

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Diseño de la Reubicación de una Estación de Bombeo para garantizar la Continuidad de Suministro de Agua Fresca durante la Ampliación de Tajo de una Mina de Cobre

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico.

Elaborado por

Johar Guber Condor Arenas

 [0009-0001-8584-5998](https://orcid.org/0009-0001-8584-5998)

Asesor

MSc. Fausto Israel Godofredo Valdivia

 [0000-0003-1494-9690](https://orcid.org/0000-0003-1494-9690)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	(Condor, 2025)
Referencia/Reference	Condor, J. (2025). <i>Diseño de la Reubicación de una Estación de Bombeo para garantizar la Continuidad de Suministro de Agua Fresca durante la Ampliación de Tajo de una Mina de Cobre</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Resumen

La unidad minera en estudio proyecta ampliación de su tajo, lo cual presenta interferencias con la ubicación actual de la estación de bombeo N°2 y sus líneas de tuberías. Como consecuencia, estas infraestructuras serán inhabilitadas. Se desarrolló la investigación con el objetivo de reubicar la estación de bombeo para garantizar la continuidad del suministro de agua fresca a la planta de procesamiento de minerales y campamentos mineros.

En el trabajo de investigación se determina que los nuevos parámetros de operación de las bombas repotenciadas son 720 m³/h y 322 metros de columna de agua, y se dimensionan las tuberías de acero, mediante evaluaciones hidráulicas en estado estable y transitorio, empleando los softwares AFT Fathom y Hammer Connected, con licencia de uso temporal, junto con un análisis de las curvas de operación de bombas comerciales.

Con el objetivo de optimizar costos de capital, se evalúa, desde un punto de vista técnico económico, las alternativas de emplear bombas repotenciadas en mina o en el taller del proveedor, concluyendo que repotenciar en el taller del proveedor es más económico. Asimismo, se diseña un tanque de almacenamiento de agua fresca con 15 m de altura y 18 m de diámetro, bajo el estándar API 650 y los requerimientos específicos de la unidad minera, empleando software AMETank con licencia de uso temporal.

El trabajo de investigación es de tipo aplicado y se basa en un enfoque cuantitativo, debido a que aborda y soluciona el problema delimitado mediante el empleo de conocimientos científicos y teóricos a través de procedimientos estructurados. Los resultados obtenidos contribuirán a la propuesta de nuevas técnicas de estudio de las variables involucradas con la reubicación de una estación de bombeo, garantizando así la continuidad en el suministro de agua fresca durante la ampliación del tajo de una mina. Estas propuestas no solo benefician a las áreas de operaciones, sino que también tienen un impacto positivo en la comunidad minera al garantizar un recurso vital para todos los involucrados.

Palabras claves: Tanque, Bombas, Tuberías, Agua fresca, Estándar API 650, Minería.

Abstract

The mining unit under study plans to expand its pit, which will interfere with the current location of pumping station No. 2 and its pipelines. As a result, these infrastructures will be disabled. The research was carried out with the objective of relocating the pumping station to guarantee the continuity of the fresh water supply to the mineral processing plant and mining camps.

In the research work, the new operating parameters of the repowered pumps are determined to be 720 m³/h and 322 meters of water column, and the steel pipes are sized, through steady state and transient hydraulic evaluations, using the AFT Fathom and Hammer Connected softwares, licensed for temporary use, along with an analysis of the operating curves of commercial pumps.

With the objective of optimizing capital costs, the alternatives of using repowered pumps at the mine or at the supplier's workshop are evaluated from a technical-economic point of view, concluding that repowering at the supplier's workshop is more economical. Likewise, a 15 m high and 18 m diameter fresh water storage tank is designed under API 650 standard and the specific requirements of the mining unit, using AMETank software licensed for temporary use.

The research work is of an applied type and is based on a quantitative approach, because it addresses and solves the problem delimited by using scientific and theoretical knowledge through structured procedures. The results obtained will contribute to the proposal of new techniques for the study of the variables involved in the relocation of a pumping station, thus guaranteeing the continuity in the supply of fresh water during the expansion of a mine pit. These proposals not only benefit the operations areas but also have a positive impact on the mining community by guaranteeing a vital resource for all involved.

Keywords: Tank, Pumps, Piping, Fresh water, API 650 standard, Mining.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Prólogo	xii
Introducción	xiv
Capítulo I. Generalidades.....	1
1.1 Antecedentes de la Investigación	1
1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio	5
1.3 Formulación del Problema	9
1.3.1 Problema general	9
1.3.2 Problemas específicos	9
1.4 Justificación e Importancia de la Investigación.....	9
1.5 Objetivos	10
1.5.1 Objetivo general	10
1.5.2 Objetivos específicos	10
1.6 Hipótesis	11
1.6.1 Hipótesis general.....	11
1.6.2 Hipótesis específicas.....	11
1.7 Variables y Operacionalización de variables	12
1.7.1 Operacionalización de variables	12
1.8 Metodología de la Investigación.....	12
1.8.1 Unidad de análisis	12
1.8.2 Tipo, Enfoque, Nivel de Investigación.....	12
1.8.3 Diseño de Investigación	13
1.9 Fuentes de Información e Instrumentos utilizados	13
Capítulo II. Marco teórico y conceptual.....	14
2.1 Marco teórico	14

2.1.1	Suministro de agua fresca	14
2.1.2	Planificación minera	14
2.1.3	Estación de bombeo.....	15
2.1.4	Ecuaciones de Bernoulli.....	15
2.1.5	Ecuación general de la energía	16
2.1.6	Número de Reynolds, Flujo Laminar y Flujo Turbulento	17
2.1.7	Ecuación de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.....	18
2.1.8	Perdidas menores o secundarias en sistemas de tuberías.	18
2.1.9	Selección y aplicación de bombas.....	19
2.1.10	Golpe de ariete	19
2.1.11	Norma API 650	20
2.1.12	Diseño de fondo del tanque	20
2.1.13	Diseño de casco del tanque.....	21
2.1.14	Diseño de techo del tanque	22
2.2	Marco conceptual	22
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de Investigación		23
3.1	Recolección de datos	23
3.1.1	Diagramas de flujo de proceso del suministro de agua fresca	24
3.1.2	Condiciones de sitio	27
3.1.3	Características del fluido	27
3.1.4	Sistema de bombeo existente.....	28
3.1.5	Nueva ubicación de la estación de bombeo	28
3.1.6	Requerimientos de operación	29
3.1.7	Superficie topográfica del nuevo pipeline	30
3.2	Diseño hidráulico del sistema de bombeo	32
3.2.1	Perfil topográfico.....	32
3.2.2	Consideraciones para el análisis en estado estable	32
3.2.3	Selección del modelo de bomba y dimensión del impulsor.....	33

3.2.4	Diseño hidráulico en estado estable	40
3.2.5	Consideraciones para el análisis transitorio	44
3.2.6	Análisis de transitorios hidráulicos	44
3.2.7	Cálculo hidráulico complementario del sistema	51
3.2.8	Cálculo de potencia de los motores	52
3.3	Evaluación técnico-económica de bombas repotenciadas	53
3.3.1	Presentación de propuestas	54
3.4	Diseño estructural del tanque de almacenamiento	56
3.4.1	Requerimientos o exigencias de diseño	56
3.4.2	Selección de Material	57
3.4.3	Cálculo de espesores y dimensiones del casco, techo y fondo	58
3.4.4	Comprobación de estabilidad al volcamiento por carga del viento	62
3.4.5	Cálculo de estabilidad por cargas sísmicas	64
3.4.6	Comprobación de estabilidad por compresión del tanque	67
3.4.7	Diseño del tanque mediante el software AMETank	68
Capítulo IV. Resultados y Contrastación de Hipótesis		73
4.1	Análisis de resultados	73
4.1.1	Determinación de parámetros de operación de las bombas	73
4.1.2	Evaluación técnico-económico de las alternativas para implementar las bombas	74
4.1.3	Diseño de tanque de almacenamiento	74
4.2	Contrastación de hipótesis	75
Conclusiones		76
Recomendaciones		77
Referencias bibliográficas		78
Anexos		80

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1 <i>Esquema del flujo de procesos del sistema suministro de agua fresca de la mina</i>	6
Figura 2 <i>Vista del tajo de la mina en estudio y ubicación de la estación de bombeo existente.....</i>	8
Figura 3 <i>Carga de presión, carga de elevación, carga de velocidad y carga total que es la constante Bernoulli</i>	16
Figura 4 <i>Sistema de transporte de fluidos que refleja la ecuación fundamental de energía.....</i>	17
Figura 5 <i>Diagrama de flujo de proceso general del suministro de agua fresca</i>	25
Figura 6 <i>Diagrama de flujo de proceso de la estación de bombeo</i>	26
Figura 7 <i>Alternativas consideradas para la nueva ubicación de la estación de bombeo</i>	28
Figura 8 <i>Perfil topográfico en base a los datos de la superficie</i>	32
Figura 9 <i>Diagrama P&ID simplificado</i>	35
Figura 10 <i>Esquema de ubicación de las bombas en la estación de bombeo N°2</i>	36
Figura 11 <i>Curva de la bomba marca Goulds Pumps, modelo 3610 tamaño 8x14-31AX</i>	39
Figura 12 <i>Gráfico de la presión de estancamiento (en psig) obtenido con el software AFT Fathom.....</i>	40
Figura 13 <i>Modificación del tramo 30"-2132-WR-00450-C3T2B</i>	41

Figura 14 <i>Modelado de la estación de bombeo N°2 y línea de impulsión hasta la estación N°3</i>	42
Figura 15 <i>Datos de entrada de la bomba, curva de operación</i>	43
Figura 16 <i>Resultado resumen de las bombas 2132-PPC-0113/0114/0115/0116 en operación</i>	43
Figura 17 <i>Modelado para el análisis de transitorios hidráulicos.....</i>	47
Figura 18 <i>Gradiente hidráulico – Escenario 1.....</i>	49
Figura 19 <i>Envolverte de presiones – Escenario 1</i>	49
Figura 20 <i>Gradiente hidráulico – Escenario 2.....</i>	51
Figura 21 <i>Envolverte de presiones – Escenario 2</i>	51
Figura 22 <i>Ventana de parámetros de diseño del tanque</i>	69
Figura 23 <i>Pestañas de diseño del techo, fondo y casco del AMETank</i>	70
Figura 24 <i>Pestañas de diseño del sistema de anclaje mecánico del AMETank...</i>	71
Figura 25 <i>Vista 3D del tanque generado por el software AMETank</i>	72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Variables e indicadores de la investigación</i>	12
Tabla 2 <i>Espesores mínimos de plancha del casco</i>	21
Tabla 3 <i>Condiciones de sitio</i>	27
Tabla 4 <i>Propiedades características del fluido</i>	27
Tabla 5 <i>Requerimiento de operación de las bombas</i>	29
Tabla 6 <i>Requerimiento de operación del tanque</i>	29
Tabla 7 <i>Condiciones de instalación – Elevación</i>	30
Tabla 8 <i>Datos de la plataforma proyectada</i>	31
Tabla 9 <i>Validación de los diámetros de tuberías de la estación de bombeo y línea de impulsión</i>	34
Tabla 10 <i>Cálculo de las pérdidas primarias para la bomba 2132-PPC-0116</i>	37
Tabla 11 <i>Cálculo de las pérdidas secundarias en la línea de la bomba 2132-PPC-0116</i>	38
Tabla 12 <i>Resumen del cálculo de TDH requerido</i>	38
Tabla 13 <i>Características de las tuberías</i>	45
Tabla 14 <i>Datos de entrada para los cálculos en el software Hammer Connected</i>	46
Tabla 15 <i>Resultados – Parada intempestiva sin atenuación de fenómenos transitorios</i>	48

Tabla 16 <i>Resultados – Parada intempestiva con atenuación de fenómenos transitorios</i>	50
Tabla 17 <i>Parámetros de operación de bombas</i>	52
Tabla 18 <i>Potencia eléctrica de motores requeridos para cada bomba en las distintas configuraciones de operación</i>	53
Tabla 19 <i>Alternativa 01 – Repotenciación de bomba en mina</i>	54
Tabla 20 <i>Alternativa 02 – Repotenciación de bomba en el taller del proveedor ...</i>	55
Tabla 21 <i>Resumen de costos</i>	56
Tabla 22 <i>Datos para el diseño del tanque.....</i>	57
Tabla 23 <i>Propiedades del material ASTM A36</i>	58
Tabla 24 <i>Resultado de los cálculos según API 650 – Método de 1-pie</i>	59
Tabla 25 <i>Resultado de los cálculos de espaciamiento de las vigas principales ...</i>	61
Tabla 26 <i>Pesos de los elementos estructurales del techo.....</i>	62
Tabla 27 <i>Cálculo para verificar la estabilidad por carga del viento</i>	63
Tabla 28 <i>Parámetros sísmicos de entrada para los cálculos de estabilidad</i>	65
Tabla 29 <i>Cálculo para verificar la estabilidad por carga sísmica.....</i>	66

Prólogo

El trabajo de investigación se estructura en seis capítulos, los cuales se describen a continuación:

El capítulo I expone los antecedentes investigativos relacionados con el diseño de estaciones de bombeo, incluido diseño de tanque de almacenamiento, que sirven como base para la formulación y desarrollo de esta investigación. Además, se describe la problemática de garantizar efectivamente la continuidad del suministro de agua fresca durante la ampliación de tajo en una mina de cobre. A continuación, se presentan los objetivos, hipótesis y metodología de la investigación.

El capítulo II presenta el marco teórico, que enfatiza la relevancia del suministro de agua fresca dentro de los procesos mineros y se presentan las teorías que fundamentarán el análisis del comportamiento del fluido en estado estable y transitorio. Además, se expone el marco teórico para el diseño del tanque de almacenamiento de acero. Finalmente, se establece un marco conceptual que define la interpretación de términos en el contexto de la investigación con el objetivo de evitar ambigüedades y garantizar una interpretación clara y consistente.

El capítulo III presenta el desarrollo de la investigación, iniciando con la recolección de datos de las condiciones de sitio y requerimientos de operación, que incluyen la nueva ubicación de la estación de bombeo N°2, definida previamente por la unidad minera en estudios anteriores. Posteriormente, se llevan a cabo los cálculos hidráulicos del sistema de impulsión de agua fresca de la estación de bombeo y se realiza una evaluación técnico-económica de las alternativas para repotenciar las bombas existentes. Finalmente, se presenta el diseño del tanque de almacenamiento de agua fresca correspondiente a la nueva estación de bombeo N°2.

El capítulo IV analiza los resultados presentados en el capítulo IV. En esta sección se interpretan los resultados obtenidos del análisis hidráulico en estado estable y transitorio del sistema de tuberías, con un enfoque en los parámetros de operación de las bombas,

así como en las presiones y materiales de las tuberías. Además, se analiza los costos asociados a cada alternativa para la implementación de las bombas, y revisar los resultados obtenidos en el software AMETank, que incluyen espesores, estabilidad y características de las estructuras de soporte de techo.

Finalmente, se presentan las conclusiones de la investigación y se contrasta la validez de las hipótesis formuladas. Asimismo, se proponen recomendaciones para fomentar la generación de nuevo conocimiento mediante futuras investigaciones, con el objetivo de garantizar de manera efectiva la continuidad del suministro de agua fresca después de la ampliación del tajo de la mina, que presenta interferencia con la estación de bombeo existente en operación.

Se incluye todas las referencias bibliográficas citadas y se anexa los documentos referenciados en el desarrollo de la investigación.

Introducción

La ampliación del tajo de una mina es una decisión estratégica que permite prolongar el tiempo de operación, pero también implica la necesidad de replantear la disposición de las infraestructuras en las áreas adyacentes. En el estudio realizado, una unidad minera ubicada en la región de Apurímac tiene planificado ampliar el área del tajo en 65 hectáreas. La ampliación afectará a diversas infraestructuras existentes, especialmente a la estación de bombeo N°2, vías de transporte, grifo y estaciones de trabajo. Como consecuencia, será necesario demoler y plantear la reubicación de las infraestructuras mencionadas. La investigación se centra exclusivamente en el diseño de la estación de bombeo N°2 reubicada.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon diversas técnicas y herramientas que permitieron obtener información precisa y detallada. En primer lugar, se realizaron solicitudes de información mediante correos electrónicos directamente a la unidad minera, lo que permitió acceder a los datos técnicos y operativos de la actual estación de bombeo, las condiciones de la mina, los requerimientos de caudal de agua y el plan de ampliación del tajo. Además, se llevaron a cabo análisis de los documentos técnicos proporcionados, como planos y estudios previos.

Los resultados reflejan que, al repotenciar las bombas existentes en el taller del proveedor, se logra una optimización de los costos de capital. Además, se ha determinado que la línea de impulsión de tubería va a requerir de un sistema de amortiguamiento de ondas para mitigar las sobrepresiones generadas por un posible corte imprevisto de energía eléctrica que alimentan a los motores de las bombas.

En resumen, el estudio realizado resalta por su impacto práctico en la operación minera. La optimización de los costos de capital, mediante la repotenciación de las bombas existentes y la implementación de un sistema de amortiguamiento de ondas en la línea de impulsión de la tubería, ofrece una solución técnica eficiente frente a retos operativos generados por la reubicación de la estación de bombeo. Desde un enfoque técnico, la

investigación aborda de manera integral los problemas derivados de la expansión minera, garantizando la continuidad en el suministro de agua fresca. En términos de contribución científica, el trabajo presenta un modelo que puede ser aplicado en otras unidades mineras con situaciones similares, ampliando el conocimiento sobre la gestión de infraestructuras hidráulicas en contextos de expansión minera. Este estudio no solo optimiza el uso de recursos, sino que también establece un marco para futuras investigaciones y para la mejora de la planificación y el diseño de infraestructuras en el sector minera.

Capítulo I. Generalidades

1.1 Antecedentes de la Investigación

Vallejos, J. (2020). “Comparación técnica y económica de dos diseños de impulsión de larga distancia para agua desalinizada en la gran minería.”

El autor realizó el estudio con el objetivo de comparar técnica y económicamente entre el diseño de un sistema de impulsión abierto y un sistema de impulsión cerrado para el transporte de agua desalinizada, en ambos casos se consideraron el mismo trazado y requerimientos técnicos. El estudio respalda la importancia de optimizar tanto el diseño como los costos operativos en proyectos relacionados con el suministro de agua en sectores industriales, como la minería. De manera similar al caso de la reubicación de la estación de bombeo en el actual estudio, la correcta selección de bombas, el diseño de las tuberías, y la evaluación de los costos de inversión y operación son elementos clave para reducir los gastos de capital y garantizar la eficiencia operativa.

La investigación utiliza un enfoque cuantitativo y el nivel de investigación aplicada, debido a que el objetivo se alcanza empleando conocimientos teóricos y científicos a través de una serie de procedimientos: En primer lugar, se determina el tamaño óptimo de la tubería para minimizar los costos de inversión y operación mediante el desarrollo de un sistema preliminar que consiste en una ingeniería conceptual, no precisa los equipos ni los componentes mecánicos específicos a utilizar; sin embargo, permite determinar la cantidad de estaciones, las cargas dinámicas y las toneladas de acero a utilizar, lo que posibilita cuantificar los costos referenciales de inversión y operación. El segundo procedimiento implica el desarrollo de la ingeniería básica. Se definen los diseños de cada estación de bombeo, desde los equipos de bombeo hasta los estanques de almacenamiento que se utilizan en el sistema de impulsión abierto, considerando 40 pulgadas como el diámetro económico de las tuberías para ambos sistemas de impulsión. Por último, se realiza una evaluación económica a través de un estudio comercial para determinar los costos de

inversión y operación para los diseños previamente establecidos, donde los precios se obtienen mediante cotizaciones formales.

Como resultado de la investigación, se obtuvo que el diámetro de 40 pulgadas minimiza el costo total para ambos sistemas. Además, se determinó que el sistema abierto requiere de tres estaciones de bombeo y dos estanques de almacenamiento de 18 m de diámetro y 17.03 m de altitud. Las bombas seleccionadas son de la marca Gould Pumps, modelo BB3 12x14-19AD, con una configuración de cinco bombas en operación y una bomba en stand-by por cada estación. Los parámetros de operación son 1 080 m³/h (caudal) y 801 metros de columna de agua (altura dinámica total). Por otro lado, para el sistema cerrado se determinó que se requiere el mismo número de estaciones, pero no requieren estanques. Las bombas seleccionadas presentan las mismas configuraciones de operación del sistema abierto, con variación en los parámetros de operación que corresponde a 1 080 m³/h y 796 mca. Como ultimo resultado, se obtiene que los costos de inversión y operación son un total de 522,486.111 dólares americanos para el sistema abierto y 517,877.707 dólares americanos para el sistema cerrado.

Se concluye que, dada la mínima diferencia porcentual del 0.64% en los costos totales entre ambos sistemas, no es posible determinar una preferencia por uno de los dos sistemas. Sin embargo, basándose en la ingeniería desarrollada, se establece una preferencia hacia el sistema de impulsión abierta debido a la holgura operacional que proporciona el uso de estanque de almacenamiento en un posible fallo en alguna estación de bombeo.

Agboola et al (2020). "Decision on the selection of the best height-diameter ratio for the optimal design of 13,000 m3. Cogent Engineering."

El autor realizó el estudio con el objetivo de seleccionar la mejor relación altura-diámetro para el diseño óptimo de tanques de almacenamiento de petróleo, de 13 000 m³ de capacidad. El estudio respalda la importancia de la evaluación de múltiples criterios, como el área ocupada, el peso vacío del tanque, y los factores de carga estructural, entre otros, para determinar la opción más eficiente en términos de diseño o costos.

Para la investigación se utilizó el Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) con el método Importancia de Criterios a través de la Correlación entre Inter Criterios” (CRITIC, por sus siglas en inglés) para determinar el factor de ponderación objetivo de los criterios. Los criterios considerados son: área ocupada por el tanque, peso vacío del tanque, momento del viento, momento sísmico del anillo de cimentación, carga en la base y costo estimado, y los factores ponderados son 0.2356, 0.2607, 0.1238, 0.1249, 0.1196 y 0.1354, respectivamente. Posteriormente, se utilizó la Técnica de Orden de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal (TOPIS, por sus siglas en inglés) para clasificar cada una de las alternativas en función a su factor de ponderación objetivo obtenido mediante CRITIC. Los resultados se cotejaron con el método Optimización de Criterios y Resolución de Compromisos (VIKOR, por sus siglas en esloveno) para su confirmación.

Los resultados obtenidos indican que las alternativas A4 y A5, con relaciones de altura-diámetro 0.8 y 0.9 respectivamente, son las mejores opciones para alcanzar un diseño óptimo del tanque de 13 000 m³. Además, se calculó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman para TOPSIS y VIKOR, mostrando una correlación alta de 0.8727 entre ellos. El análisis de sensibilidad revela que tanto TOPSIS como VIKOR son sensibles a cambios en el factor de ponderación de los criterios al clasificar las alternativas.

Se concluye que los métodos CRITIC y TOPSIS como herramientas para el análisis de decisiones multicriterio han sido adoptados con éxito para la selección de la relación Altura-Diámetro para el diseño óptimo de un tanque de almacenamiento de petróleo de 13 000 m³ de capacidad.

Chuchin, M. (2022). “Diseño estructural de tanque agitador para almacenar 1900 m³ de Milk of Lime en la empresa Minera Chinalco Perú.”

El autor realizó el estudio con el objetivo de diseñar la estructura del tanque agitador, de acero soldado, para el almacenamiento de 1 900 m³ de lechada de cal en la empresa Minera Chinalco Perú. El estudio respalda la relevancia de cumplir con las normas internacionales, como el API 650 para el diseño de tanques de almacenamiento y AISC

360 para estructuras de acero, lo cual garantiza que el diseño estructural sea seguro, eficiente y conforme a los estándares exigidos.

El estudio empleó un enfoque cuantitativo de nivel aplicativo, centrado en la resolución del problema mediante la aplicación de conocimiento teórico y científico. La investigación se enfocó en atender las necesidades específicas de una empresa minera en cuanto al almacenamiento de lechada de cal a través del diseño del tanque agitador. El diseño se dividió en tres etapas: La primera etapa se enfocó en desarrollar el diseño del tanque de almacenamiento conforme a la normativa del American Petroleum Institute - API 650, la cual establece los requisitos mínimos necesarios para el diseño de recipientes de almacenamiento verticales de acero soldado apoyados sobre el suelo y sujetos a presión atmosférica. La segunda etapa se dedicó al diseño del puente estructural conforme a la norma del Instituto de la Construcción en Acero - AISC 360 y el método LRFD (diseño por factores de carga y resistencia). Finalmente, el conjunto estructural Tanque-Puente fue sometido a simulación mediante el análisis por elementos finitos empleando el software SolidWorks Simulation 2020, con el propósito de validar y optimizar el diseño estructural.

Los resultados obtenidos se reflejaron en el diseño de un tanque agitador con dimensiones que corresponden a 13.85 metros de diámetro y altura. Asimismo, se determinó que el tanque empleará seis virolas, 3 de 6 mm, 2 de 8 mm y 1 de 9 mm, y el material seleccionado para el caso y el fondo es acero estructural ASTM A36; además, se presenta los resúmenes de juntas de soldaduras a emplearse en la construcción, por último, correspondiente al tanque se determinó el diseño de las silletas de anclaje y perno de anclaje, según lo desarrollado se requiere 16 pernos de anclaje M56 (2 1/4" – 8N) de material A-307 (tuerca A194 2H). Como resultado del diseño del puente soporte del agitador se determinó las dimensiones que corresponden a 3 388 mm x 13 940 mm; y se definió los perfiles a emplearse que son: vigas longitudinales principales tipo W36x194, vigas transversales tipo W16x50 y arriostres diagonales tipo W8x21. Por último, mediante el análisis de elementos finitos en el software SolidWorks se obtuvo que el máximo

esfuerzo es de 143 MPa, y la deflexión máxima en la estructura tanque-agitador es de 5.2 mm.

La conclusión extraída de la investigación es que, al adherirse rigurosamente a las normativas API y AISC, y al validar el diseño mediante el método de elementos finitos, empleando el software SolidWorks Simulation, se puede alcanzar un diseño óptimo y seguro para un tanque agitador. Esto se debe a que el esfuerzo máximo de la estructura es menor al esfuerzo de diseño máximo permisible por API 650 (160 MPa), y la deflexión de la estructura se encuentra por debajo del límite máximo recomendado de 6.3 mm (D.S Dickey y J.B Fasano). Por lo tanto, el diseño se considera satisfactorio.

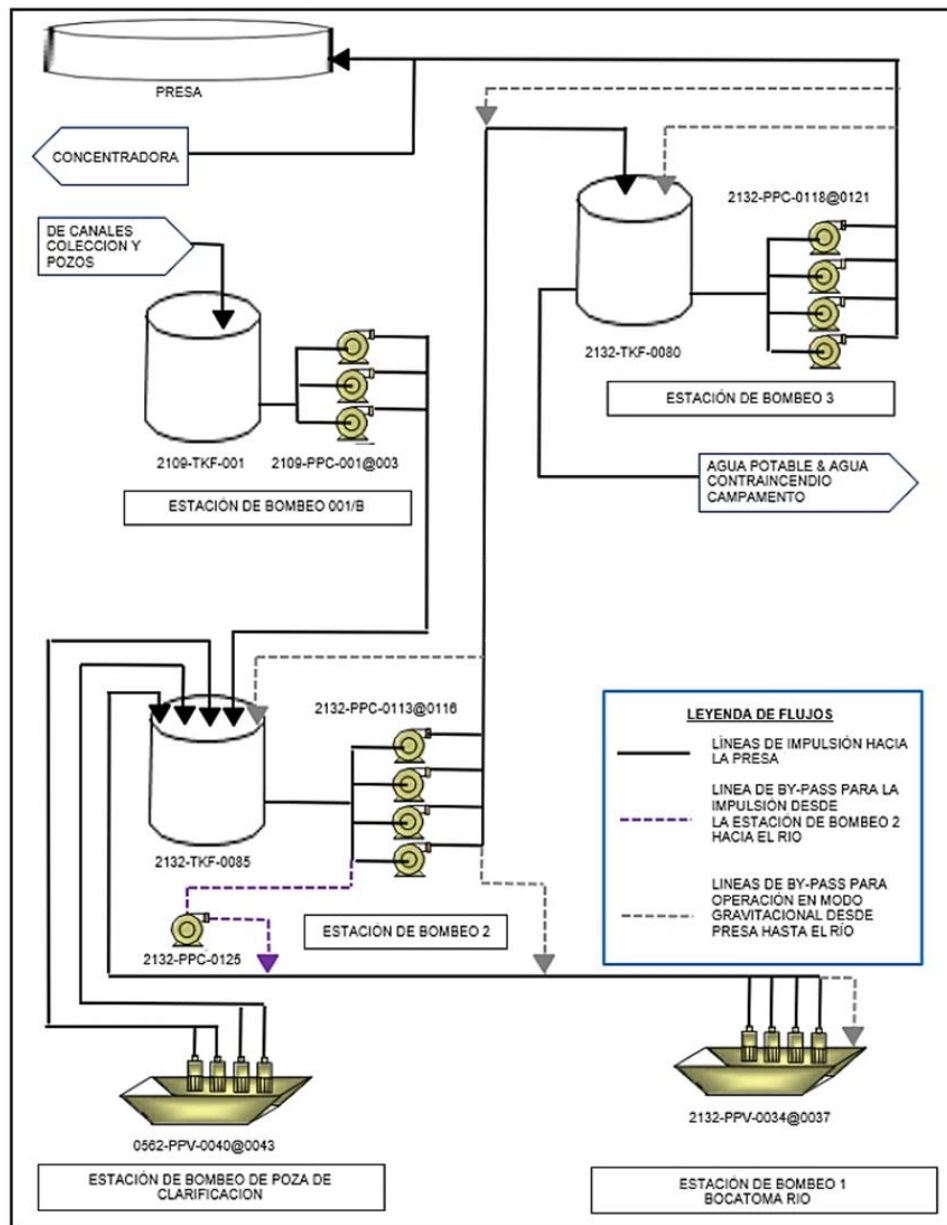
1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio

El agua desempeña un papel crucial en las actividades mineras, no solo es esencial para el procesamiento de minerales, sino también para los asentamientos mineros. Según la Autoridad Nacional de Agua (ANA), el sector minero emplea aproximadamente el 2% de agua fresca disponible en el Perú. Dado que gran parte de esta agua se extrae de lagos y ríos cercanos, las unidades mineras han tenido que estudiar alternativas que permitan desarrollar proyectos factibles y económicamente rentables para su transporte hasta las inmediaciones de la mina.

En la unidad minera en estudio, para cumplir con el procesamiento diario de 145 ktpd (kilo toneladas por día), se emplea agua recuperada del proceso y agua fresca de reposición proveniente de una presa. El sistema de transporte de agua fresca existente consta de tres estaciones de bombeo identificadas como N°1, N°2 y N°3; cada una equipada con bombas y tanques de almacenamiento, en la figura 1 se presenta el diagrama de bloques del sistema. Estas estaciones tienen la función de transportar agua fresca desde un río cercano, a través de una bocatoma, hasta la presa de almacenamiento de agua fresca. Este sistema es fundamental para garantizar el suministro constante y eficiente de agua para las actividades mineras.

Figura 1

Esquema del flujo de procesos del sistema suministro de agua fresca de la mina



Nota: El esquema muestra las tres estaciones de bombeo de agua fresca existente en la unidad minera de cobre

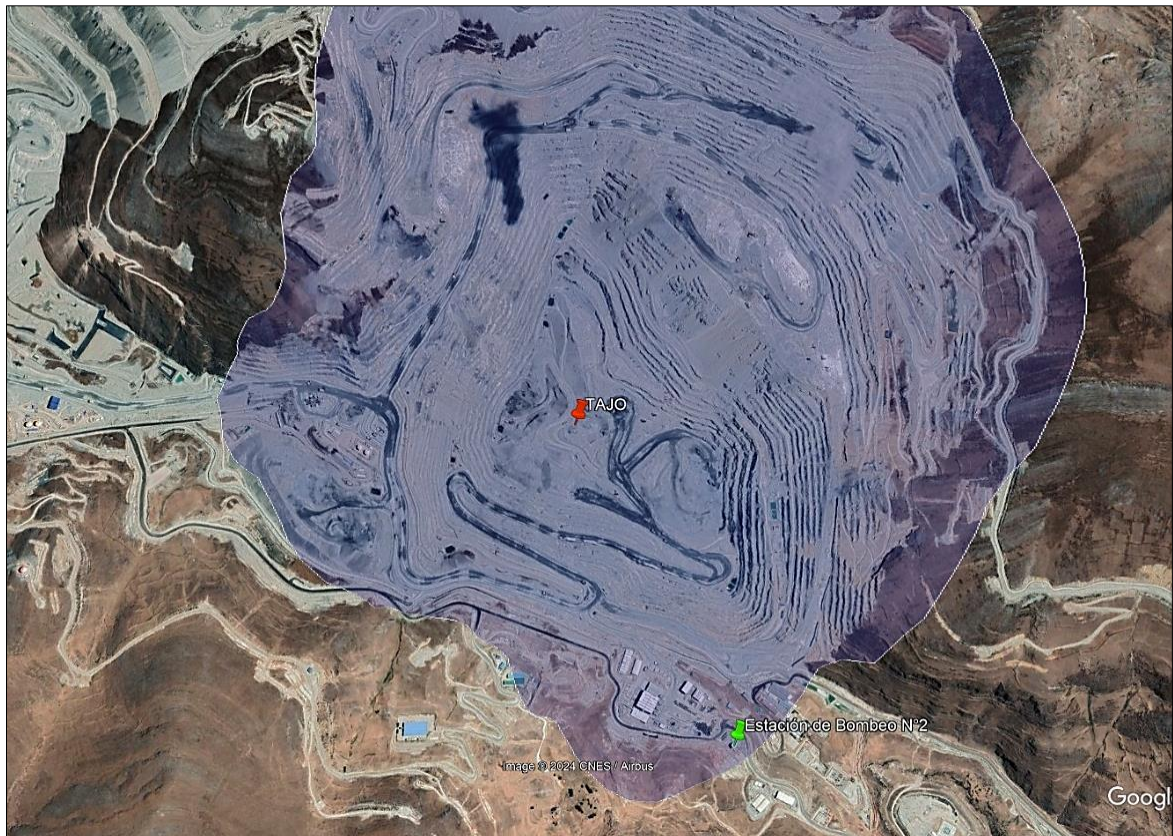
En el año 2022, la mina en estudio recibió permiso para ampliar su tajo en 65 hectáreas. De estas, 16 hectáreas permanecerán sin intervención, 23 hectáreas serán áreas intervenidas por el movimiento de tierra relacionado a la construcción del tajo y 26 hectáreas estarán intervenidas por componentes e infraestructuras aprobados en el contorno del tajo (SENACE, 2020). La ampliación del tajo se desarrollará en dos etapas denominados fase 6 y fase 8 respectivamente. La proyección de los límites del tajo desde

la fase 6 presenta una interferencia con infraestructuras existentes, entre las cuales se encuentra la Estación de Bombeo N°2 y sus líneas de tuberías. Como resultado, estas infraestructuras quedarían inhabilitadas y sería interrumpido el transporte de agua fresca entre la Estación de bombeo N° 2 y N°3, surge entonces la problemática central de la investigación, ¿Cómo garantizar la continuidad de suministro de agua fresca a las operaciones de la mina?, Las consecuencias que generan la paralización de la operación de la Estación de Bombeo N°2 es provocar un desabastecimiento de agua fresca en los diferentes puntos de la mina, lo cual implicaría detener o reducir la capacidad de procesamiento de mineral. Además, algunos equipos en operación podrían experimentar fallas debido a la falta de suministro adecuado de agua. En última instancia, esta situación podría llevar a una paralización completa de las operaciones en un determinado tiempo, especialmente después de agotarse el agua de reserva almacenada de la presa.

Además, se presentan problemas específicos relacionados con los equipos existentes de la estación de bombeo. Las bombas en funcionamiento podrían tener una vida útil que cumpla con lo requerido a una bomba nueva, considerando reemplazos de sus componentes menores, previa evaluación. Surge entonces los problemas específicos ¿Se puede emplear las bombas existentes en otra estación de bombeo?, ¿Cómo se determinan los parámetros de operación de las bombas en una nueva ubicación? Y por último ¿Cómo se garantiza un diseño seguro de un tanque de almacenamiento de agua para abastecer a las bombas?

Figura 2

Vista del tajo de la mina en estudio y ubicación de la estación de bombeo existente



Nota. La sección resaltada es la proyección estimada de los límites de la ampliación del tajo. Tomado de Google Earth. (2024).

Ante la problemática relacionada con el suministro de agua fresca a los diferentes sectores de la mina, este estudio adquiere una importancia crucial para asegurar la continuidad del abastecimiento de agua fresca durante la ampliación del tajo, evitando así interrupciones en las actividades de extracción y procesamiento del mineral.

Para abordar el problema, se aplicará un enfoque cuantitativo, que implica delimitar el problema planteado y seguir un proceso estructurado. Posteriormente, mediante la aplicación de conocimiento científico y tecnológico, se buscarán posibles soluciones.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema general

¿De qué manera se garantiza efectivamente la continuidad del suministro de agua fresca durante la ampliación de tajo en una mina de cobre?

1.3.2 Problemas específicos

- a) ¿De qué manera se determinan los parámetros de operaciones de las bombas, que garantice el requerimiento de suministro de agua fresca a las operaciones de la mina desde una estación de bombeo?
- b) ¿De qué manera se define el lugar para realizar la repotenciación de las bombas existentes, que minimice el costo de capital de las bombas a ser instaladas en una estación de bombeo de agua fresca reubicada?
- c) ¿De qué manera se garantiza un almacenamiento seguro de agua fresca en un tanque de acero de una estación de bombeo?

1.4 Justificación e Importancia de la Investigación

El estudio en curso se justifica debido a su relevancia para el ámbito académico y principalmente para la industria minera. Por lo tanto, se fundamenta en tres perspectivas: teóricas, metodológicas y prácticas, y considerando el aporte al campo técnico.

Desde la perspectiva teórica, la investigación se justifica debido a que los resultados contribuirán a ampliar el conocimiento sobre las variables. Asimismo, estos resultados proporcionarán nuevos conocimientos sobre cómo abordar de manera específica el desafío de garantizar el suministro de agua fresca durante la ampliación de un tajo en una mina de cobre. Por lo cual, este tema resulta relevante tanto en la ingeniería como en la gestión de infraestructuras hídricas en contexto de expansión de un tajo minero.

En el contexto metodológico, los resultados de esta investigación contribuirán a proponer nuevas técnicas de estudio de las variables involucradas. La elección de los métodos y enfoques se fundamenta en la necesidad de garantizar la continuidad de suministro de agua fresca durante la ampliación del tajo. Para lograr este objetivo, se seleccionarán métodos de modelado hidráulico y análisis geoespacial. Estos métodos

permitirán el uso de técnicas de simulación para prever posibles escenarios y evaluar la eficacia de las soluciones propuestas. La justificación metodológica radica en la necesidad de obtener resultados confiables y aplicables que respalden la toma de decisiones en el diseño de la reubicación de la estación de bombeo.

Desde una perspectiva práctica, al lograr una reubicación efectiva de la estación de bombeo, se garantizará la continuidad del suministro de agua fresca durante la ampliación del tajo en la mina de cobre. Esto no solo beneficiará a las áreas de operaciones, sino también a la comunidad minera, asegurando un recurso vital para todos los involucrados.

Además, como aporte al campo técnico, la integración de soluciones tecnológicas como la simulación hidráulica permitió identificar los puntos óptimos de funcionamiento de las bombas y adaptar la infraestructura a las nuevas necesidades derivadas de la ampliación del tajo. La herramienta de simulación facilitó la planificación de intervenciones específicas, como la instalación de sistemas de amortiguamiento de ondas, para mitigar las sobrepresiones y garantizar la estabilidad operativa de las tuberías. Asimismo, la evaluación técnico-económica de la repotenciación de las bombas existentes en la mina o en el taller del proveedor, proporcionó una solución eficiente y económica, optimizando los costos de capital sin comprometer la continuidad en el suministro de agua fresca. Este enfoque integrado, que combina la simulación hidráulica y la evaluación de costos, mejora no solo la eficiencia operativa y energética, sino que también contribuye a la sostenibilidad de las operaciones mineras al permitir una expansión efectiva.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo general*

Diseñar la reubicación de una estación de bombeo de agua fresca para garantizar la continuidad del suministro de agua fresca durante ampliación del tajo en una mina de cobre.

1.5.2 *Objetivos específicos*

- a) Determinar los parámetros de operación de las bombas realizando evaluaciones hidráulicas en estado estable y transitorio mediante el software

AFT Fathom y Hammer Connected, respectivamente, para garantizar el suministro de agua fresca a las operaciones de una mina desde una estación de bombeo.

- b) Evaluar, desde el punto de vista técnico-económico, las alternativas de repotenciar las bombas existentes en mina o en el taller del proveedor, para optimizar el costo de capital de las bombas a ser instaladas en una estación de bombeo de agua fresca reubicada.
- c) Diseñar un tanque de almacenamiento bajo la norma API 650 y estándares de la unidad minera, y mediante el software AMETank para garantizar un almacenamiento seguro.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

El diseño de una estación de bombeo de agua fresca reubicado garantizará la continuidad del suministro de agua fresca durante la ampliación del tajo en una mina.

1.6.2 Hipótesis específicas

- a) La determinación de los parámetros de operación de las bombas, mediante el software AFT Fathom y Hammer Connected, garantizará el suministro de agua fresca de manera eficiente a las operaciones de la mina desde una estación de bombeo.
- b) La evaluación técnico-económica de las alternativas evidenciará que la alternativa de repotenciar las bombas en el taller del proveedor optimiza el costo de capital de las bombas a ser instaladas en la nueva estación de bombeo reubicada.
- c) El diseño de un tanque de almacenamiento de agua fresca seguro se alcanzará al cumplir con los requerimientos establecidos por la norma API 650 y estándares específicos de la unidad minera.

1.7 Variables y Operacionalización de variables

1.7.1 Operacionalización de variables

Tabla 1

Variables e indicadores de la investigación

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES			
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADOR
VARIABLE INDEPENDIENTE VI: Diseño de la reubicación de una estación de bombeo de agua fresca.	Es el proceso de planificación y definición de un nuevo diseño para trasladar una estación de bombeo existente a una ubicación diferente. Esta actividad implica considerar diversos factores, como la eficiencia hidráulica, la accesibilidad, la seguridad y la continuidad operativa.	Ubicación	Latitud y Longitud
		Capacidad de bombeo	m ³ /h Altura dinámica total (metros de columna de agua)
		Capacidad de almacenamiento del tanque	m ³
VARIABLE DEPENDIENTE VD: Continuidad de suministro de agua fresca.	Se enfoca en garantizar que haya suficiente agua fresca y disponible para mantener las operaciones mineras, de manera eficiente y segura.	Ampliación de tajo	km ²
		Planificación minera	Eficiencia
		Capacidad de producción	Tonelada de mineral procesada (MTPD)
		Agua fresca	Propiedades caracterización y
		Caudal requerido de agua fresca	m ³ /h

1.8 Metodología de la Investigación

1.8.1 Unidad de análisis

La unidad de análisis del estudio es la estación de bombeo N°2 que es responsable de almacenar y distribuir agua fresca hacia la estación de bombeo N°3 en una mina de cobre, ubicada a 4 100 m s.n.m. en la región de Apurímac.

1.8.2 Tipo, Enfoque, Nivel de Investigación

La presente investigación según su propósito es de tipo aplicada, debido a que se enfoca en aplicar el diseño de reubicación de una estación de bombeo con el objetivo de garantizar la continuidad de suministro de agua fresca durante la ampliación del tajo en una mina de cobre. Para esto se aplica el conocimiento de sistemas de bombeo

con fines de determinar los parámetros de diseño, calcular y validar el dimensionamiento, así como seleccionar los equipos de bombeo y almacenamiento de agua adecuados para el sistema.

El enfoque de investigación es cuantitativo, porque tiene el problema de estudio delimitado y concreto, y se busca probar hipótesis. Asimismo, debido a que se analiza datos e informaciones objetivas como capacidades, dimensiones y cantidades; utilizando procedimientos estandarizados.

El nivel de investigación que utilizaremos es descriptivo y correlacional, debido a que se busca recopilar datos actualizados sobre el objeto de estudio, y evaluar las alternativas para seleccionar la alternativa más favorable técnica y económicamente para el diseño óptimo de la reubicación de una estación de bombeo.

1.8.3 *Diseño de Investigación*

La investigación es de diseño no experimental porque solo se recolecta la información actual de la estación de bombeo en operación para desarrollar el diseño de la reubicación de una estación de bombeo de agua fresca, con el propósito de presentar a la unidad minera la propuesta optimizando los costos de implementación.

1.9 Fuentes de Información e Instrumentos utilizados

Son fuentes primarias todas las informaciones provenientes en forma directa de la unidad minera, mediante solicitudes de correo electrónico directamente a la unidad minera, solo con fines académico para el desarrollo del presente estudio, sin divulgar el nombre de la mina, por lo cual no se menciona la mina en específico en el trabajo. La información permitió acceder a los datos técnicos y operativos sobre la actual estación de bombeo, las condiciones de la mina, los requerimientos de caudal de agua y el plan de ampliación del tajo. Además, se llevaron a cabo análisis de los documentos técnicos proporcionados, como planos y estudios previos de la unidad minera.

Son fuentes secundarias las investigaciones realizadas relacionadas con la unidad minera de cobre en estudio.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Suministro de agua fresca*

El suministro de agua fresca en la industria minería es esencial para garantizar la continuidad de las operaciones mineras de manera segura y sostenible. Este suministro puede abarcar la captación de agua de fuentes naturales proveniente de agua superficiales y subterráneas como ríos, lagos, acuíferos y pozos (Comisión Chilena de Cobre, 2015), así como el tratamiento de agua residual o la desalinización del agua de mar, dependiendo de la disponibilidad y calidad del agua en la ubicación de la mina.

El agua fresca se emplea en actividades que requieran un nivel de calidad relativamente elevado, es decir, con bajo contenido de sólidos en suspensión y disueltos, así como niveles bajos de agentes químicos y/o reactivos químicos residuales. Estas actividades incluyen la preparación de reactivos empleados en los procesos, el suministro de agua de enfriamiento para variadores de velocidad, el agua de sello para las bombas de pulpa, la limpieza del circuito de flotación y el abastecimiento de una planta de tratamiento de agua potable.

2.1.2 *Planificación minera*

La planificación minera es una actividad que determina el proceso mediante el cual se convierte el recurso mineral en un negocio productivo óptimo para los accionistas (Alexandra et al., 2010).

La planificación minera tiene como objetivo armonizar y aprovechar las diversas fuentes de ingresos disponibles en la industria minera. Esto incluye considerar aspectos como el tamaño del yacimiento, ley (concentración) del mineral, ubicación geográfica, características geológicas generales, condiciones operativas y de gestión, y el poder de mercado, todo esto se hace respetando las restricciones impuestas por el mercado y el entorno, con el fin de definir una promesa de producción a largo plazo que maximice la rentabilidad económica del activo. (Luque, 2016).

2.1.3 Estación de bombeo

Las estaciones de bombeo desempeñan un papel crucial en el manejo eficiente del agua en la minería, ya sea para evacuar aguas subterráneas, abastecer agua para procesos o recircular dentro de la mina. El diseño y operación de estas estaciones influyen de manera significativa en la eficiencia y productividad de las actividades mineras. Asimismo, las estaciones de bombeo son estructuras diseñadas para elevar un fluido desde un nivel de energía inferior a uno superior. Cuando la gravedad ya no es suficiente para mantener el flujo, se utilizan estas estaciones para transportar aguas residuales a través de un sistema de tuberías o canales. (Jimenez & Pin, 2017).

2.1.4 Ecuaciones de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli explica las variaciones en la energía potencial, la energía cinética y la energía de presión en un sistema de flujo de fluidos entre dos puntos específicos. Se asume que no existen pérdidas ni incrementos de energía en el trayecto entre estos puntos, lo que implica que la energía total se mantiene constante a lo largo del flujo. (Mott & Untener, 2015)

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.1)$$

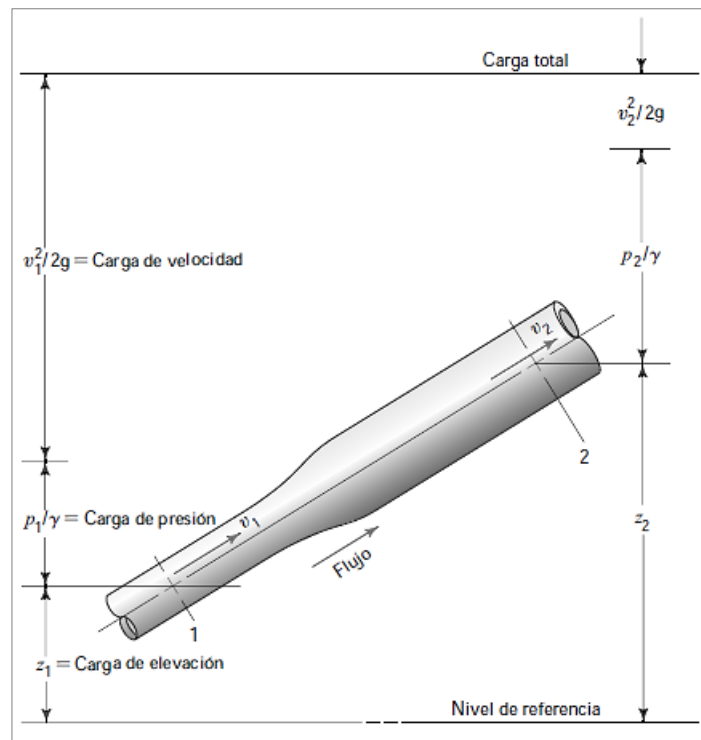
Donde v representa la velocidad de la partícula, p es la presión, z es la altura relativa, γ es el peso específico y g es la aceleración de la gravedad. La ecuación se expresa en unidades de metros de columna de agua (m.c.a.).

La ecuación de Bernoulli presenta restricciones que son las siguientes:

- Se aplica solo a fluidos incompresible.
- No se permite la presencia de dispositivos y/o elementos mecánicos entre las dos secciones consideradas que añadan o extraigan energía del sistema.
- Se excluye la posibilidad de transferencia de energía.
- Se excluye la pérdida de energía debido a la fricción.

Figura 3

Carga de presión, carga de elevación, carga de velocidad y carga total que es la constante Bernoulli



Nota. Explica las variaciones en la energía potencial, la energía cinética y la energía de presión en un sistema de flujo de fluidos. Tomado de Mecánica de fluidos 7ma edición, por Mott, R. & Untener, J. (2015).

2.1.5 Ecuación general de la energía

La ecuación general de energía es una ampliación de la ecuación de Bernoulli, que incorpora tanto pérdidas y ganancias de energía. La ecuación describe el balance energético de un flujo de fluido entre dos puntos de una tubería. (Mott & Untener, 2015)

Ecuación general de la energía:

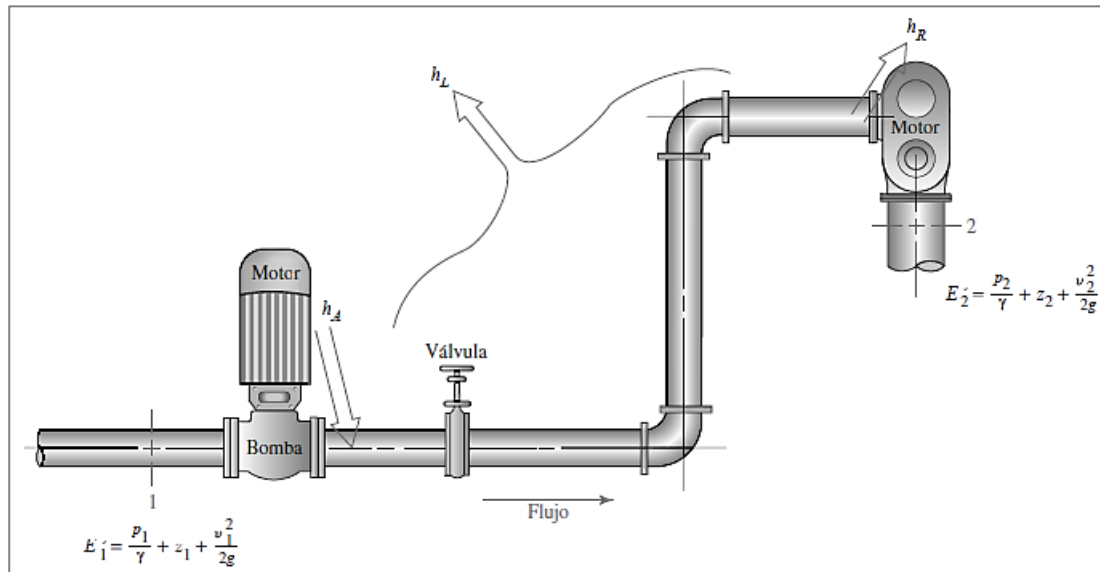
$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.2)$$

En donde, h_A representa la energía agregada al sistema a través de un dispositivo mecánico, como una bomba. Por otro lado, h_R se refiere a la energía extraída del sistema por un dispositivo mecánico, como una turbina. Por último, h_L corresponde a las pérdidas

de energía del sistema, causadas por la fricción en las tuberías o por pérdidas menores debido a válvulas y accesorios.

Figura 4

Sistema de transporte de fluidos que refleja la ecuación fundamental de energía



Nota. Representa la interpretación lógica de la ecuación de energía en un sistema. Tomado de Mecánica de fluidos 7ma edición, por Mott, R. & Untener, J. (2015).

2.1.6 Número de Reynolds, Flujo Laminar y Flujo Turbulento

El número de Reynolds es un valor adimensional que permite predecir la naturaleza del flujo, determinando si será laminar o turbulento. Esta clasificación depende de la densidad y viscosidad del fluido, así como del diámetro de la tubería y la velocidad media del flujo. Se considera flujo laminar cuando el número de Reynolds es menor a 2 000, y turbulento cuando supera los 4 000. En el intervalo entre 2 000 y 4 000, denominado región crítica, el tipo de flujo puede variar según las condiciones específicas del sistema, por lo cual es recomendable no trabajar dentro de este rango. (Mott & Untener, 2015)

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (2.3)$$

En donde $V \left(\frac{m}{s}\right)$ es la velocidad del flujo, $D \text{ (m)}$ diámetro de la tubería y $\nu \left(\frac{m^2}{s}\right)$ viscosidad cinemática del fluido.

2.1.7 Ecuación de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.

En la ecuación general de la energía se considera la pérdida de energía en el sistema causada por la fricción en la tubería, designada como h_L . Para el caso de flujo en tuberías redondas de secciones rectas y largas, ya sea flujo laminar o turbulento, según Darcy (1857) y Weisbach (1845), la pérdida de energía por fricción puede expresarse matemáticamente como proporcional a la energía cinética y a la relación entre la longitud y el diámetro de la tubería, mediante la siguiente expresión. (Mott & Untener, 2015).

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

En donde f es el coeficiente de fricción de Darcy (Adimensional). Para el flujo laminar ($Re < 2,000$), se expresa de la siguiente manera:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.5)$$

Para el flujo turbulento, se aplica la ecuación de Colebrook-White para calcular directamente el valor del factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.6)$$

En donde ε denota el coeficiente de rugosidad del material de la tubería.

En 1944, Lewis Moody desarrolló una herramienta gráfica para simplificar el cálculo del factor de fricción en flujos turbulentos y laminares en tuberías, la gráfica es conocida como diagrama de Moody. (Farfan, 2022)

2.1.8 Pérdidas menores o secundarias en sistemas de tuberías.

Son pérdidas de energía que se originan a causa de válvulas, accesorios, entradas y salida de las tuberías. Estas pérdidas surgen debido al cambio de dirección del flujo, expansiones o contracciones repentinas en la sección transversal de las tuberías. Se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.7)$$

En donde K representa el coeficiente de resistencia, cuyo valor se obtiene a partir de estudios experimentales presentadas en gráficos para diversos componentes del sistema de tuberías, entre los cuales se incluye principales válvulas, codos, reductores, y perdidas en salidas y entradas de tuberías. (Mott & Untener, 2015)

2.1.9 Selección y aplicación de bombas

La función de una bomba es transferir energía al líquido, lo que permite su transporte dentro de una instalación. Este proceso implica aumentar la presión de salida de la bomba, que está relacionada con el caudal que se transporta en forma de curva característica. La curvatura característica de cada bomba depende de su diseño, tamaño, velocidad y, en gran medida, también de la viscosidad del fluido. (De las Heras, 2011).

Para seleccionar una bomba, necesitamos conocer dos datos fundamentales: el caudal y la presión o altura de elevación. El caudal (Q) que representa la cantidad de líquido (agua) que circula por una tubería en un periodo específico. La presión se cuantifica en metros de columna de agua (m.c.a.) y se compone de la altura geométrica, las pérdidas de carga y la presión residual. (Mott & Untener, 2015)

2.1.10 Golpe de ariete

El golpe de agua o choque hidráulico se refiere al repentino aumento de presión en las tuberías que ocurre cuando el flujo de líquido se detiene de manera abrupta. Este fenómeno puede ocurrir, por ejemplo, cuando se cierran rápidamente válvulas o grifos, o cuando las bombas que impulsan el líquido se detienen inesperadamente.

El golpe de agua es especialmente peligroso en tuberías largas que transportan grandes cantidades de líquido a altas velocidades, ya que puede causar daños significativos en las uniones, la propia tubería o los equipos involucrados. (Deng et al, 2022).

2.1.11 Norma API 650

Estándar desarrollado por el Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en ingles). Esta norma establece los requisitos para el diseño, construcción, inspección y pruebas de tanques de almacenamiento soldados utilizados para almacenar productos como petróleo crudo, productos derivados y otros líquidos.

Los tanques diseñados bajo la norma API 650 son cilíndricos, con eje vertical y base plana apoyada en el suelo. Están diseñados para operar a una presión de trabajo igual a la atmósfera o menor a 18 kPa (generalmente) y a temperaturas por debajo de 93°C. (API, 2020)

2.1.12 Diseño de fondo del tanque

Según API 650, el diseño del fondo (Bottom) debe cumplir los siguientes requerimientos generales:

- Todas las planchas del fondo deben tener un espesor mínimo de 6 mm, excluyendo toda tolerancia por corrosión especificado por el comprador.
- Las planchas del fondo deben ser proyectadas por lo menos 50 mm fuera del borde exterior del casco.
- Si se requiere plancha anular, debe tener un ancho radial mínimo de 600 mm y una proyección mínima de 50 mm desde el borde exterior del casco.

Consideraciones adicionales según empresas especialistas en construcción de tanques en unidades mineras del Perú son las siguientes:

- El fondo debe ser diseñado con una pendiente mínima de 1% desde el centro a la periferia del tanque.
- Se recomienda el uso de plancha anular debido a los efectos resultantes de los asentamientos diferenciales que ocurre debajo del perímetro de apoyo de la pared del tanque. Estos efectos pueden provocar pandeos de la pared y concentración de esfuerzos en las juntas entre la pared, el techo y el fondo del tanque.

2.1.13 Diseño de casco del tanque

Según API 650, el diseño del casco (Shell) debe cumplir los siguientes requerimientos generales:

- El espesor requerido del casco debe ser mayor que los espesores del casco de diseño, incluyendo tolerancia por corrosión, o el espesor de prueba hidrostática del casco. Sin embargo, el espesor del caso no debe ser menor que lo indica en la tabla 2.
- Las planchas deben tener un ancho nominal mínimo de 1 800 mm (72 pulg.), a menos que el comprador apruebe el uso de planchas con dimensiones menores.
- Es necesario comprobar la estabilidad del casco del tanque frente a cargas de viento. Si se determina que se requiere, se emplearán anillos rigidizadores intermedios o aumentará el espesor de la plancha del casco o una combinación de ambos, para garantizar la estabilidad frente a las cargas de viento.

Tabla 2

Espesores mínimos de plancha del casco

Diámetro nominal del tanque		Espesor nominal de la plancha	
m	pulg.	mm	Pulg.
< 15	< 50	5	3/16
15 a < 36	50 a < 120	6	1/4
36 a 60	120 a 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Nota. Salvo indicación contraria especificada por el Comprador, el diámetro nominal del depósito será el diámetro de la línea central de las placas del fondo del casco. Tomado de API Standard 650 13th edition (2020).

2.1.14 Diseño de techo del tanque

El espesor del techo será calculado de acuerdo con lo indicado en API standard 650. El espesor mínimo de las planchas del techo debe ser de 5 mm, descontada toda tolerancia por corrosión.

2.2 Marco conceptual

Reubicación: Proceso de mover una estación de bombeo de agua fresca desde su ubicación original a un nuevo lugar.

Tanque: Recipiente que por lo general es de forma cilíndrica y se emplean en el almacenamiento y conservación de productos líquidos o sólidos.

Bomba: Equipo hidráulico que como objetivo convertir energía mecánica en energía hidráulica para poder mover la mayor cantidad de líquido posible a una determinada presión.

Pérdidas: Reducción de energía que experimenta un fluido mientras es transportado a través de un sistema de tuberías.

Perfil: Representación gráfica o descripción de la elevación a lo largo del recorrido de una tubería.

Estado: Condiciones particulares de un fluido en un instante específico, caracterizadas por propiedades físicas y termodinámicas.

Ley: Porcentaje o concentrado de un mineral valioso presente en una muestra de roca o material extraído de una mina.

TDH: Total Dynamic Head, magnitud que representa la energía total que necesita una bomba para transportar un fluido a través de un sistema de tuberías.

Inercia: Energía que se requiere para acelerar o desacelerar el conjunto de la bomba y el motor.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de Investigación

El capítulo III está estructurado en cuatro secciones. En la primera sección, se detallan los datos recopilados sobre las condiciones de sitio, requerimiento operacional y criterios de diseño. La segunda sección aborda el procesamiento de datos, que conlleva al diseño de la estación de bombeo, incluido la línea de impulsión. En la tercera sección, se presenta la evaluación técnico-económica de las alternativas de repotenciar las bombas existentes. Finalmente, la cuarta sección se enfoca en el diseño del tanque de almacenamiento de agua fresca de la estación de bombeo.

El procesamiento de datos se realizó para el sistema de impulsión de agua fresca de la estación de bombeo N°2, con el objetivo de determinar los parámetros operativos necesarios para seleccionar el modelo de la bomba y dimensionar el impulsor. Además, para definir las dimensiones y el material de las tuberías de la estación de bombeo como para la línea de impulsión.

El sistema de impulsión de agua fresca de la estación de bombeo N° 2 está compuesto por cuatro bombas en paralelo. Y posterior a la descarga de las bombas, las tuberías en paralelo se conectan a una línea de impulsión de 7.6 km de longitud, donde el fluido transportado se descargará en la estación de bombeo N°3 a presión atmosférica.

3.1 Recolección de datos

Durante la primera etapa de la investigación, se recolectó la información de estudios previos para definir la nueva ubicación de la estación de bombeo N°2 y establecer recorridos tentativos para la instalación de las líneas de tuberías. También se recolectó planos y documentos asociados, así como especificaciones de condiciones de sitio, requerimiento de procesos, información topográfica del terreno y características del fluido a transportar entre las estaciones de bombeo.

Además, se obtuvo información técnica de los equipos de bombeo y tanque de almacenamiento existentes, y se solicitó a proveedores homologados curvas características de bombas de marca Goulds Pumps.

3.1.1 Diagramas de flujo de proceso del suministro de agua fresca

El sistema que provee de agua fresca a las instalaciones principales de la unidad minera se compone de un sistema de impulsión compuesto por tres estaciones de bombeo. La primera, la estación de bombeo N°1, emplea bombas de tipo vertical y está ubicada cerca del río. Las otras dos estaciones, N°2 y N°3, están equipadas con bombas de tipo horizontal, siendo la estación N°2 la única que será reubicada. Cada estación dispone de cuatro bombas capaces de impulsar un flujo máximo de 800 l/s (2 880 m³/h). El número de bombas operando y el flujo a impulsar es variable en el tiempo y dependiente de la época del año; el sistema considera que las cuatro bombas estén en operación para alcanzar los 800 l/s.

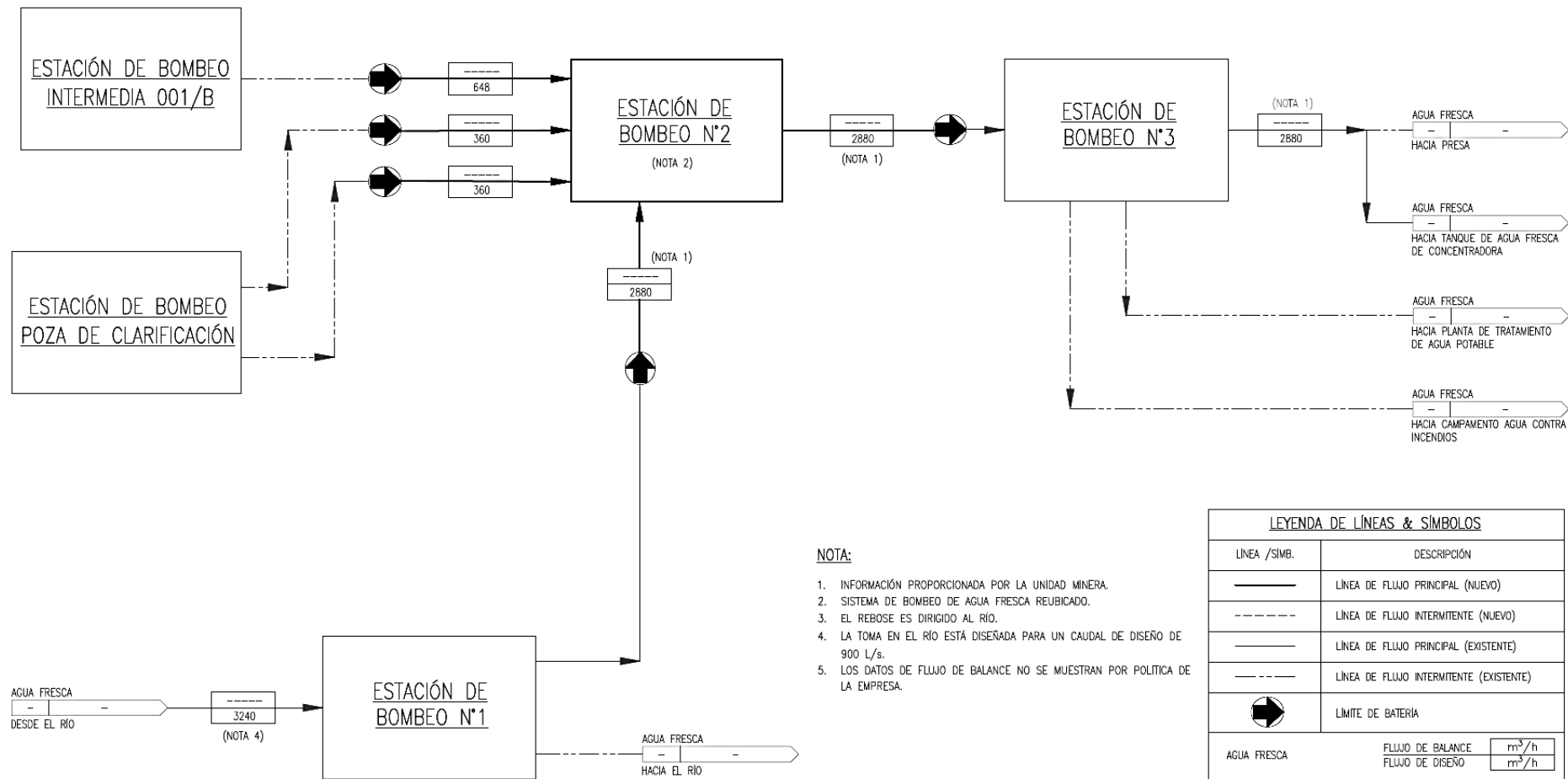
El proyecto abarca la reubicación de la estación de bombeo N°2, que forma parte del sistema de manejo de agua fresca. Esta estación también es alimentada de agua fresca proveniente de la estación de bombeo intermedia 001/B y la estación de bombeo de la poza de clarificación.

La nueva estación de bombeo N°2 estará conformada por un nuevo tanque de almacenamiento de agua con una capacidad útil de 3 000 m³ y cuatro bombas centrífugas diseñadas para cubrir los requerimientos del proyecto. Cada bomba tendrá un caudal de diseño de 720 m³/h, lo que permitirá a la estación de bombeo alcanzar una capacidad total de 2 880 m³/h.

En la Figura 5 se presenta el diagrama general del suministro de agua fresca, y en la Figura 6 el diagrama de la estación de bombeo N°2.

Figura 5

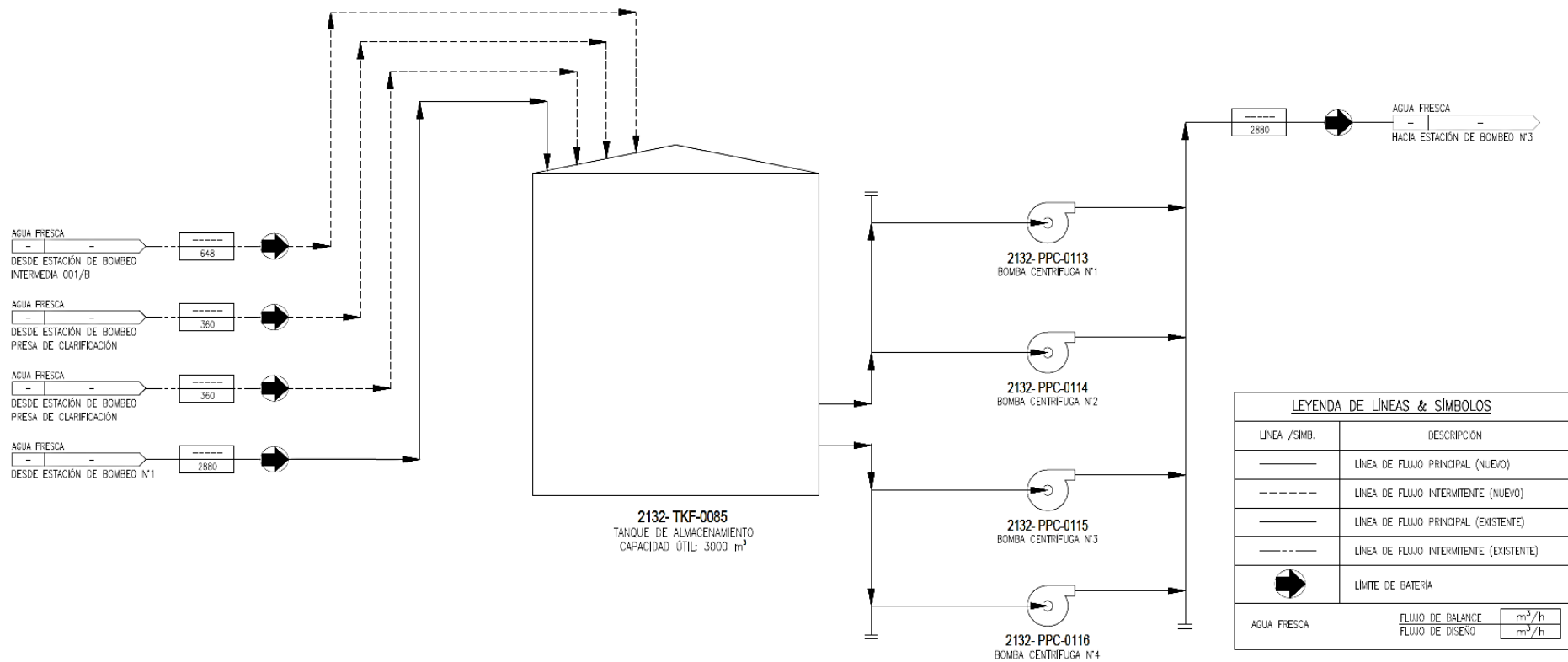
Diagrama de flujo de proceso general del suministro de agua fresca



Nota: El caudal de diseño para la alimentación de agua fresca a la estación de bombeo N°2 se determina únicamente por el suministro de la estación de bombeo N°1. Durante las temporadas secas, las estaciones de bombeo intermedia 001/B y de la poza de clarificación entrarán en operación para cubrir la demanda de agua.

Figura 6

Diagrama de flujo de proceso de la estación de bombeo



Nota: La estación de bombeo N°2 dispondrá de cuatro bombas centrífugas en paralelos y un tanque de almacenamiento con una capacidad útil (neta) de 3000 m³.

3.1.2 Condiciones de sitio

Las especificaciones de las condiciones generales del sitio de la unidad minera se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Condiciones de sitio

Condiciones de sitio	
Altitud	: 3 684 – 4 629 m.s.n.m.
Temperatura (máxima / mínima)	: 22 °C / -9 °C
Temperatura promedio	: 11.9 ° (invierno) / 16.1 °C (verano)
Presión atmosférica	: 60.1 kPa
Humedad relativa del aire	: 51 / 83 % durante el año (mín./máx.)

3.1.3 Características del fluido

Las características del fluido objeto de estudio se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Propiedades características del fluido

Características del fluido	
Fluido	: Agua fresca
Temperatura	: 10 °C - 20 °C
Temperatura de diseño	: 15 °C
Gravedad específica	: 1.0
Viscosidad dinámica	: 1.1 cP
Presión de vapor	: 1.7 kPa
Contenido de sólidos	: menor a 1 000 ppm

3.1.4 Sistema de bombeo existente

El sistema de bombeo existente N°2 está integrado por cuatro bombas de la marca Goulds Pumps, modelo 3610. Cada bomba tiene un tamaño de impulsor de 685 mm de diámetro y una potencia nominal del motor eléctrico de 752.4 kW.

El tanque de almacenamiento existente tiene la capacidad de 3 600 m³, con 18 m de diámetro y 18 m de altura. Debido a ser considerado un equipo crítico y presentar evidencias significativas de corrosión, el cliente no permite la reutilización del tanque por razones de seguridad operacional.

3.1.5 Nueva ubicación de la estación de bombeo

Mediante estudios previos, la unidad minera determinó la nueva ubicación de la estación de bombeo. En la Figura 7 se muestra las alternativas evaluadas para la nueva ubicación.

Figura 7

Alternativas consideradas para la nueva ubicación de la estación de bombeo



Según el estudio, la unidad minera seleccionó la opción 2A como la nueva ubicación de la estación de bombeo N°2.

3.1.6 Requerimientos de operación

La estación de bombeo N°2, reubicada, deberá impulsar un flujo de diseño de 2 880 m³/h y estará conformada por cuatro bombas centrífugas cuyo flujo de operación por bomba según se indica en la Tabla 5.

Tabla 5

Requerimiento de operación de las bombas

Ítem	Equipo	Caudal (m ³ /h)
1	Bomba 2132-PPC-0113 (operación)	720.0
2	Bomba 2132-PPC-0114 (operación)	720.0
3	Bomba 2132-PPC-0115 (operación)	720.0
4	Bomba 2132-PPC-0116 (operación)	720.0

Como se mencionó anteriormente, la estación contará con un tanque de almacenamiento nuevo para almacenar agua fresca y abastecer las bombas. Los datos del tanque se indica en la Tabla 6.

Tabla 6

Requerimiento de operación del tanque

Información del tanque					
TAG	Tipo	Fluido	Densidad del fluido almacenado (kg/m ³)	Volumen útil requerido (m ³)	Dimensiones (m)
2132-TKF-0085	Vertical - Techo cónico soportado	Agua Fresca	1,0	3 000	Φ 18 x 15 h

Las consideraciones de instalación de los equipos en las estaciones de bombeo N°2 y N°3 se presenta en la siguiente tabla 7.

Tabla 7

Condiciones de instalación – Elevación

Descripción	Valor
Elevación de la estación de bombeo N° 2	: 3 804.4 m.s.n.m.
Elevación mínima de nivel de agua en el tanque 2132-TKF-0085	: 3 806.5 m.s.n.m.
Elevación de bombas 2132-PPC-0113/0114/0115/0116	: 3 805.5 m.s.n.m.
Elevación de la tubería de descarga en el tanque 2132-TKF-0080 (Estación N°3)	: 4 079.0 m.s.n.m.
Elevación de la estación de bombeo 3	: 4 058.4 m.s.n.m.

3.1.7 Superficie topográfica del nuevo pipeline

En la Tabla 8 se presentan los datos de la progresiva y elevación de la superficie topográfica a lo largo del recorrido de la línea impulsión de la estación de bombeo N°2. Esta línea de impulsión se conectará a la línea de tubería existente en un punto cercano a la estación de bombeo N°3. La línea de tubería existente pertenece a la línea de impulsión de la estación de bombeo N°2 existente en operación.

Tabla 8*Datos de la plataforma proyectada*

N°	Progresiva (Km: 0+000)	Altitud (m.s.n.m)	N°	Progresiva (Km: 0+000)	Altitud (m.s.n.m)	N°	Progresiva (Km: 0+000)	Altitud (m.s.n.m)
1	0 + .00	3 802.58	37	2 + 695.79	3 938.76	73	4 + 480.00	3 998.72
2	0 + 49.50	3 803.08	38	2 + 728.43	3 937.36	74	4 + 520.00	3 999.25
3	0 + 53.45	3 807.03	39	2 + 752.93	3 937.04	75	4 + 600.00	4 000.28
4	0 + 100.00	3 809.23	40	2 + 799.19	3 938.17	76	4 + 652.82	4 000.98
5	0 + 246.29	3 817.31	41	2 + 822.29	3 939.57	77	4 + 750.00	3 999.43
6	0 + 280.00	3 820.13	42	2 + 840.00	3 941.00	78	4 + 777.73	3 998.53
7	0 + 500.00	3 840.35	43	2 + 847.74	3 941.64	79	4 + 779.98	4 000.63
8	0 + 575.66	3 847.94	44	3 + 447.48	3 982.82	80	4 + 841.06	3 998.71
9	0 + 840.00	3 873.88	45	3 + 549.67	3 989.08	81	4 + 967.61	3 995.72
10	0 + 910.68	3 877.66	46	3 + 617.94	3 990.40	82	5 + 020.00	3 992.25
11	0 + 943.56	3 880.08	47	3 + 640.00	3 990.71	83	5 + 072.99	3 986.80
12	0 + 990.00	3 884.40	48	3 + 650.33	3 991.00	84	5 + 088.74	3 985.34
13	1 + 291.43	3 913.61	49	3 + 676.82	3 992.16	85	5 + 105.72	3 984.12
14	1 + 308.09	3 915.27	50	3 + 769.02	3 999.78	86	5 + 135.16	3 982.86
15	1 + 337.31	3 916.26	51	3 + 782.32	4 000.85	87	5 + 147.05	3 982.66
16	1 + 359.25	3 916.23	52	3 + 820.53	4 004.42	88	5 + 181.17	3 982.75
17	1 + 475.89	3 910.43	53	3 + 830.00	4 005.17	89	5 + 210.00	3 982.56
18	1 + 491.75	3 910.41	54	3 + 855.00	4 005.95	90	5 + 315.87	3 981.66
19	1 + 561.73	3 913.66	55	3 + 867.57	4 003.33	91	5 + 332.34	3 981.85
20	1 + 600.00	3 916.92	56	3 + 870.00	4 005.63	92	5 + 350.00	3 982.02
21	1 + 683.55	3 924.34	57	3 + 885.88	4 004.76	93	5 + 412.95	3 981.93
22	1 + 725.95	3 927.69	58	3 + 900.00	4 003.45	94	5 + 503.41	3 977.89
23	1 + 931.24	3 937.31	59	4 + 012.54	3 992.75	95	5 + 521.22	3 977.63
24	1 + 963.55	3 937.21	60	4 + 023.33	3 992.09	96	5 + 547.91	3 977.77
25	1 + 986.24	3 936.19	61	4 + 035.33	3 991.54	97	5 + 566.66	3 978.13
26	2 + 010.00	3 934.31	62	4 + 049.74	3 991.13	98	5 + 671.38	3 985.78
27	2 + 088.13	3 928.68	63	4 + 094.19	3 991.61	99	5 + 720.60	3 987.99
28	2 + 127.74	3 928.00	64	4 + 109.79	3 992.41	100	5 + 794.01	3 992.02
29	2 + 149.06	3 928.28	65	4 + 120.00	3 993.05	101	5 + 820.00	3 992.21
30	2 + 165.82	3 928.83	66	4 + 168.40	3 996.11	102	5 + 832.05	3 992.12
31	2 + 181.82	3 929.62	67	4 + 230.00	3 998.28	103	5 + 896.14	3 990.67
32	2 + 328.14	3 943.40	68	4 + 250.00	3 998.27	104	5 + 945.36	3 988.24
33	2 + 358.28	3 945.72	69	4 + 281.66	3 998.23	105	5 + 971.61	3 986.32
34	2 + 373.38	3 946.39	70	4 + 314.01	3 998.51	106	6 + 100.00	3 975.28
35	2 + 400.00	3 946.82	71	4 + 384.29	3 999.80	107	6 + 120.00	3 974.21
36	2 + 608.47	3 944.00	72	4 + 396.80	3 999.76	108	6 + 183.94	3 973.79

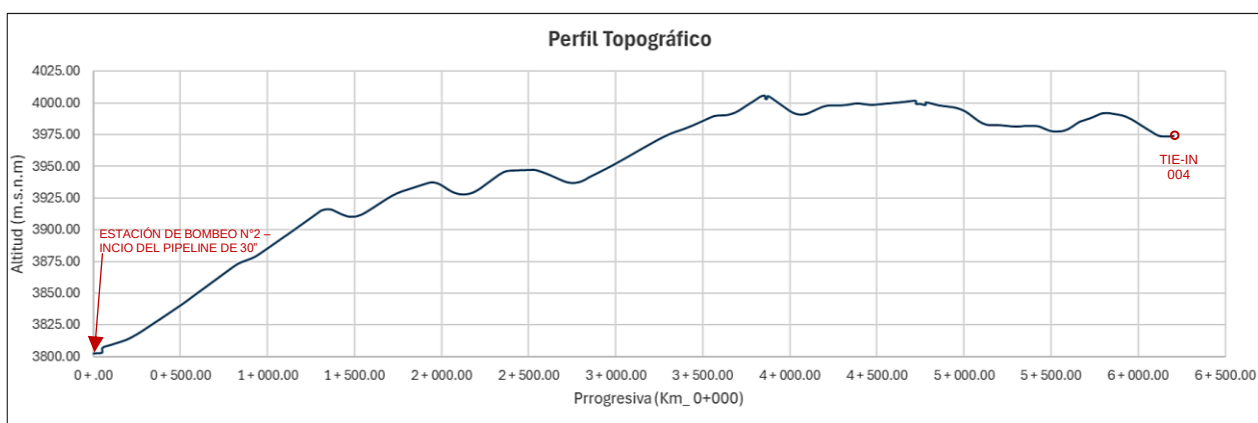
3.2 Diseño hidráulico del sistema de bombeo

3.2.1 Perfil topográfico

Los datos obtenidos de la superficie topográfica se han procesado en Excel para graficar el perfil del recorrido de la línea de impulsión entre la estación de bombeo N°2 y N°3.

Figura 8

Perfil topográfico en base a los datos de la superficie



3.2.2 Consideraciones para el análisis en estado estable

Las siguientes consideraciones se obtiene de los criterios de diseño de la unidad minera y de buenas prácticas de anteriores proyectos ejecutados.

- Para la estimación de la potencia consumida del motor eléctrico, se considerará una eficiencia del motor del 95%.
- La selección de los diámetros de las tuberías se realizará considerando velocidad preferible de operación de 1.5 a 3.0 m/s.
- Los materiales y dimensiones de las tuberías (diámetro y espesor) están basados en el documento "Appendix D – Class Material Sheets (PipeWorks)" de la empresa Bechtel.

- Los valores de rugosidad absoluta de las tuberías que se usarán en el análisis son los siguientes:
 - Tubería de acero al carbono nueva : 0.05 mm
 - Tubería de acero al carbono reutilizada : 0.15 mm
- Se considerará un factor de 1.2 para las pérdidas friccionales primarias en acero, en la línea de impulsión nueva.
- Las pérdidas friccionales serán calculadas empleando la ecuación de *Darcy-Weisbach* y el factor de fricción con la ecuación de *Colebrook-White*.

3.2.3 Selección del modelo de bomba y dimensión del impulsor

Los cálculos se desarrollarán de acuerdo con el requerimiento de operación, considerando una configuración de diseño con cuatro bombas paralelos en funcionamiento.

3.2.3.1 Selección de diámetro de tuberías. Los diámetros de las tuberías se determinan en base a la información de la actual estación de bombeo N°2 y la línea de impulsión hasta la estación N°3. Estas dimensiones se validarán en base a la velocidad de flujo recomendado.

En Tabla 9 se muestra la validación de los diámetros, asimismo en la Figura 9 se presenta el PI&D general de la estación de bombeo N°2 reubicada y la línea de impulsión hacia la estación de bombeo N°3.

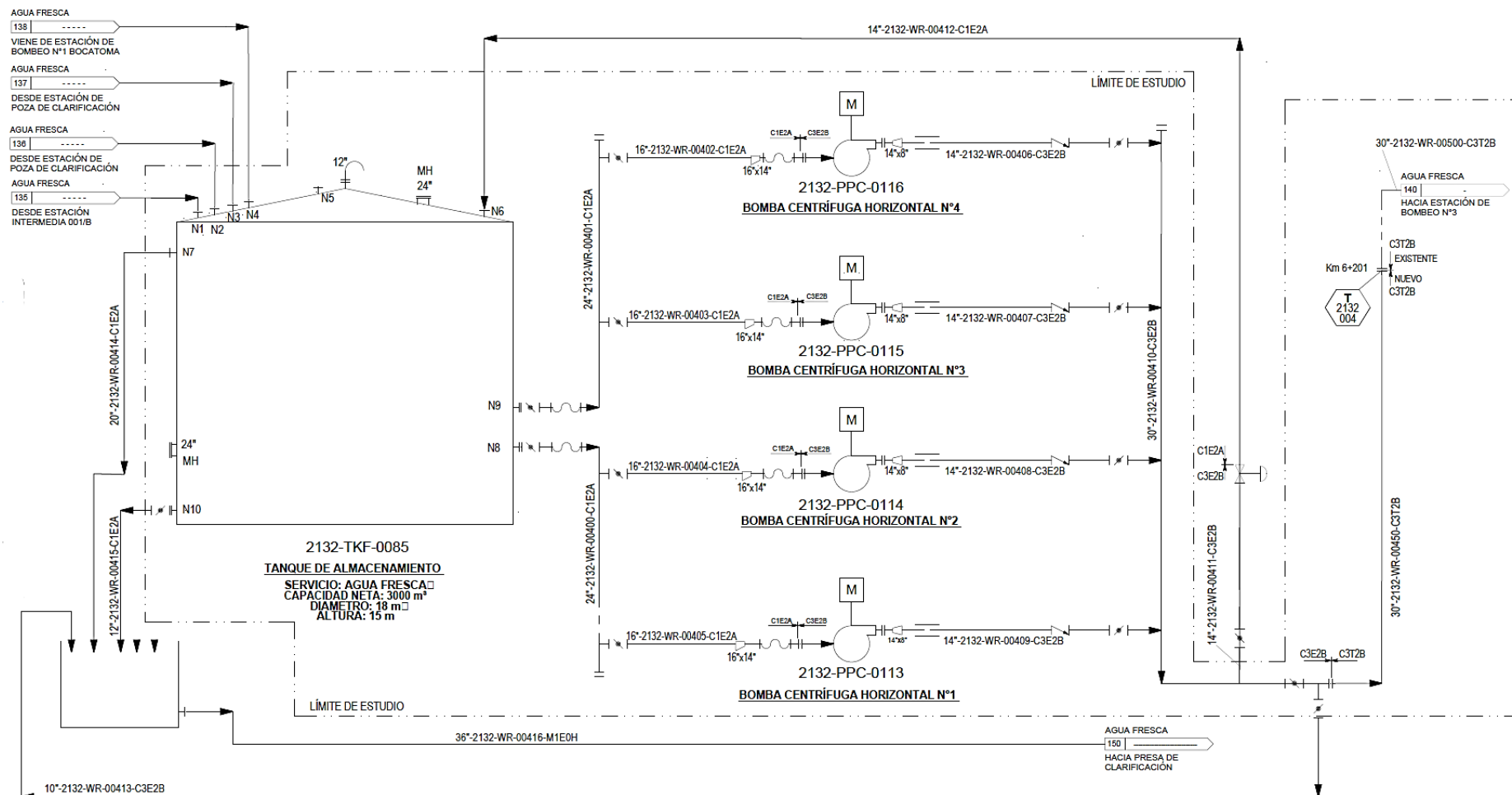
Tabla 9*Validación de los diámetros de tuberías de la estación de bombeo y línea de impulsión*

N°	Tubería/ Pipeline	Caudal (m³/h)	Diámetro (pulg)	Espesor (pulg)	Velocidad ($V=Q/A$) (m/s)	Observación al Diámetro
1	00400	1400	24	0.375	1.46	Correcto, cercano a 1.5 m/s
2	00401	1400	24	0.375	1.46	Correcto, cercano a 1.5 m/s
3	00402	720	16	0.375	1.69	Correcto
4	00403	720	16	0.375	1.69	Correcto
5	00404	720	16	0.375	1.69	Correcto
6	00405	720	16	0.375	1.69	Correcto
7	00406	720	14	0.5	2.34	Correcto
8	00407	720	14	0.5	2.34	Correcto
9	00408	720	14	0.5	2.34	Correcto
10	00409	720	14	0.5	2.34	Correcto
11	00410	720-2 880	30	0.5	0.47 – 1.89	Por ser tramo corto se permite la velocidad inferior a 1.5m/s
12	00450	2 880	30	0.25 – 0.312	1.82	Correcto
13	00500	2 880	30	0.312 – 0.375	1.83 – 1.85	Correcto

Nota: De los resultados obtenidos se observa que los tramos de tuberías presentan velocidades conforme a lo recomendado, a excepción un tramo corto.

Figura 9

Diagrama P&ID simplificado

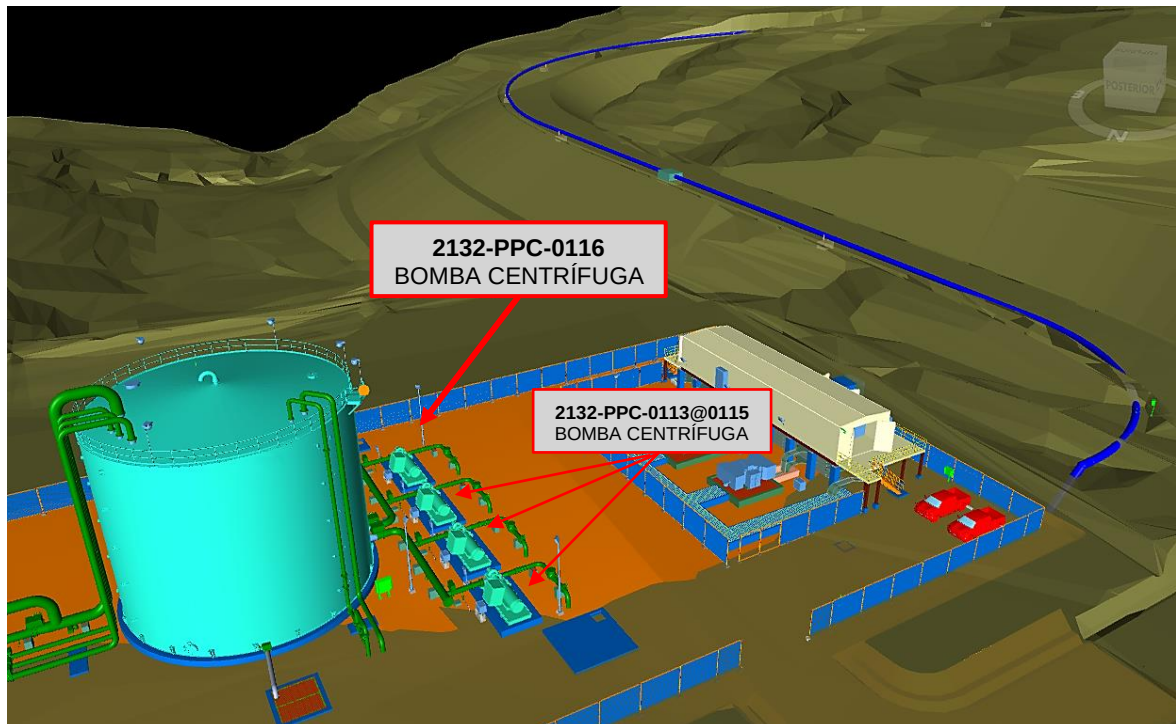


Nota: El presente diagrama P&ID se elaboró en base a la configuración de la estación de bombeo N°2 existente. La sección de instrumentación no se incluye, debido a no ser necesario para los cálculos hidráulicos planteado como objetivo, y no forma parte del alcance del estudio.

3.2.3.1 Cálculo del TDH preliminar para la selección de bomba. El cálculo de TDH preliminar se llevó a cabo empleando Microsoft Excel. Para realizar los cálculos se seleccionó la línea de impulsión de la bomba centrífuga 2132-PPC-0116. En la Figura 10 se visualiza un esquema de la estación de bombeo N°2.

Figura 10

Esquema de ubicación de las bombas en la estación de bombeo N°2



En la tabla 10 se presenta el cálculo de perdidas primarias, en la Tabla 11 se detalla el cálculo de perdidas secundarias, y finalmente, en la Tabla 12 se muestra el cálculo de pérdidas totales para determinar el TDH requerido, que se empleará para seleccionar las nuevas bombas de la estación de bombeo N°2.

Tabla 10

Cálculo de las pérdidas primarias para la bomba 2132-PPC-0116

N°	Tubería/ Pipeline	Diámetro (pulg)	Espesor (pulg)	Caudal (m³/h)	Velocidad (m/s)	Rugosidad (mm)	Longitud (m)	Número de Reynolds	Factor de fricción	Pérdidas primarias (m.c.a)
1	400	24	0.375	1440	1.46	0.05	4.485	7.564E+05	0.01364	0.01126
2	400	24	0.375	720	0.73	0.05	6.8	3.782E+05	0.01480	0.00463
3	402	16	0.375	720	1.70	0.05	1.71	5.766E+05	0.01458	0.00945
4	Conexión a bombas	14	0.375	720	2.25	0.05	1.88	6.636E+05	0.01462	0.02104
5	Conexión a bombas	8	0.02	720	6.23	0.05	0.25	1.104E+06	0.01519	0.03710
6	406	14	0.5	720	2.34	0.05	10.35	6.764E+05	0.01463	0.12746
7	410	30	0.5	720	0.47	0.05	6.8	3.032E+05	0.01510	0.00156
8	410	30	0.5	1 440	0.94	0.05	6.8	6.064E+05	0.01374	0.00569
9	410	30	0.5	2 160	1.41	0.05	6.8	9.096E+05	0.01313	0.01224
10	410	30	0.5	2 880	1.88	0.05	8.5	1.213E+06	0.01277	0.02646
11	450	30	0.25	2 880	1.81	0.05	6 201.552	1.192E+06	0.01532	21.26770
12	500	30	0.312	2 880	1.83	0.15	615.751	1.197E+06	0.01757	2.47368
13	500	30	0.375	2 880	1.85	0.15	664.44	1.202E+06	0.01758	2.72851
14	600	30	0.375	2 880	1.85	0.15	50	1.202E+06	0.01465	0.17110
15	600	20	0.375	2 880	4.26	0.15	4.8	1.827E+06	0.01549	0.14073
Pérdidas primarias Total (m):										27.04 (mcf)

Nota: El cuadro presenta como resultado final las pérdidas de energía en las tuberías, expresadas en metros de columna de fluido.

Tabla 11

Cálculo de las pérdidas secundarias en la línea de la bomba 2132-PPC-0116

Accesorios	Factor de pérdida (K)	Q (m³/h)	V m/s	Pérdidas secundarias (m.c.a)
Codo	0.1680	1440	1.46	0.0183
Tee	0.2200	1440	1.70	0.0323
Valvula	0.3250	720	1.70	0.0477
Reductor	0.0390	720	1.70	0.0057
Reductor	0.1143	720	2.25	0.0294
Codo	0.1820	720	2.34	0.0506
Válvula Check	12.9726	720	2.34	3.6066
Válvula	0.4550	720	2.34	0.1265
Bend	0.1820	720	2.34	0.0506
Tee	0.2200	1 440	2.34	0.0612
Tee	0.6600	1 440	2.34	0.1835
Tee	0.2200	1 440	2.34	0.0612
Tee	0.2200	1 440	2.34	0.0612
Reductor	0.1680	2 880	1.81	0.0282
Reductor	0.2730	2 880	1.81	0.0458
Válvula de control	0.7210	2 880	4.26	0.6671
Reductor	0.0940	2 880	1.81	0.0158
Codo	0.1680	2 880	1.81	0.0282
Codo	0.1680	2 880	1.81	0.0282
Codo	0.1680	2 880	1.81	0.0282
Pérdidas secundarias Total (m):				5.18

Nota: El cuadro presenta como resultado final, pérdidas secundarias expresadas en metros de columna de fluido.

Tabla 12

Resumen del cálculo de TDH requerido

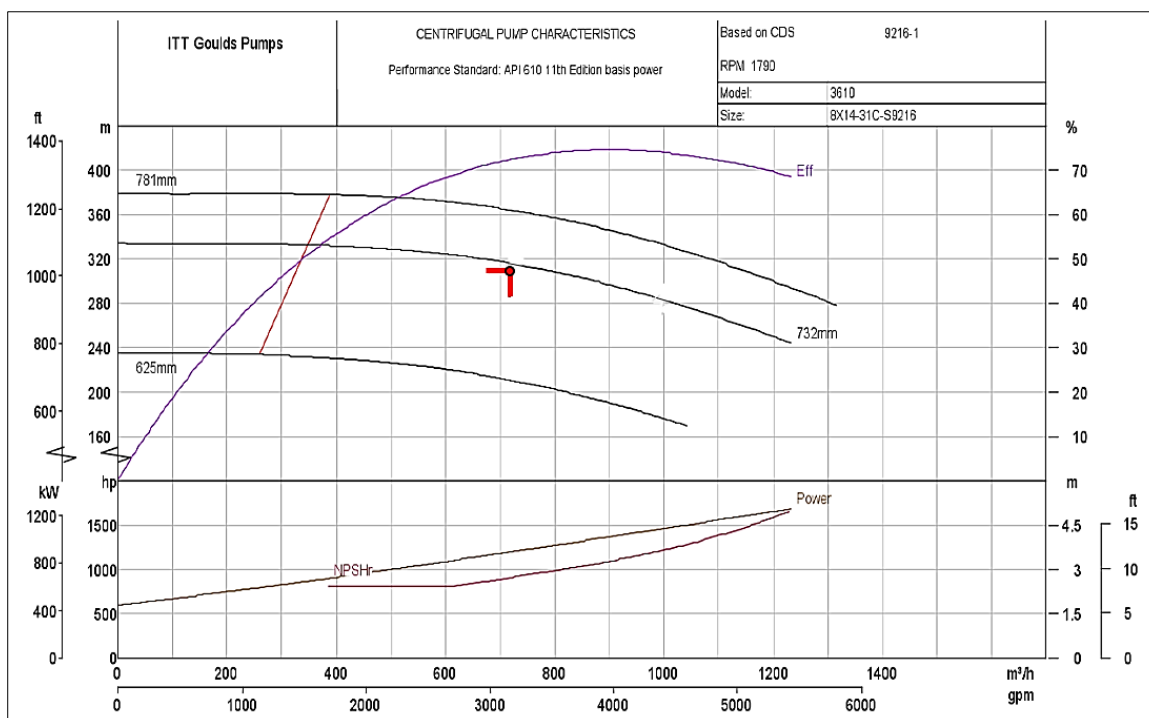
Bomba	Pérdida Primaria (m)	Pérdida Secundarias (m)	Diferencia de altitud Tanques (m)	TDH requerido (m)
2132-PPC-0116	27.04	5.18	272.468	304.7

El requerimiento del sistema para cada bomba es 720 m³/h de caudal y un TDH de 304.7 m.c.a. Para la selección del modelo de bomba y dimensión del impulsor, se utilizarán los modelos de la marca Goulds Pumps. Dado que el caudal requerido es similar a los

caudales reportados por las bombas en operación de la estación de bombeo N°2 existente, se optará por el mismo modelo, correspondiente a 3610. En la Figura 11 se presenta la curva del modelo para los diferentes tamaños de impulsores.

Figura 11

Curva de la bomba marca Goulds Pumps, modelo 3610 tamaño 8x14-31AX



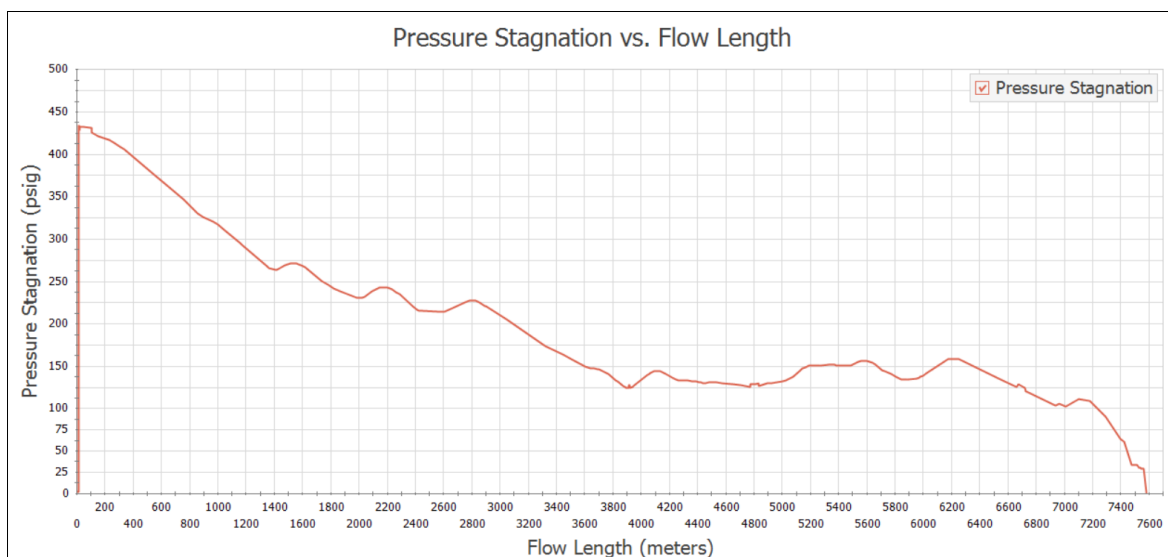
Nota: Se muestra dentro del grafico el punto de operación requerido por el sistema.

De acuerdo con la curva de la bomba presentado, el tamaño del impulsor adecuado para el requerimiento operacional es de 732 mm, correspondiente a la bomba modelo 3610 tamaño 8x14-31AX de la marca Goulds Pumps.

En la figura 12 y se muestra el gráfico de la presión de estancamiento del sistema de impulsión. Esta información se empleará para seleccionar el tipo y material de tubería de la línea de impulsión de 30" adecuado para cada tramo, con la finalidad de optimizar costos.

Figura 12

Gráfico de la presión de estancamiento (en psig) obtenido con el software AFT Fathom



Nota: Se visualiza que la presión máxima del sistema es aproximadamente 432 psig, lo cual ejerce sobre las tuberías inmediatamente posterior a la brida de descarga de las bombas.

3.2.4 Diseño hidráulico en estado estable

Para determinar el comportamiento del sistema en estado estable, considerando el modelo de bomba y dimensión del impulsor seleccionados, se realizarán los cálculos y simulaciones de la estación de bombeo N°2 y la línea de impulsión empleando el software AFT Fathom.

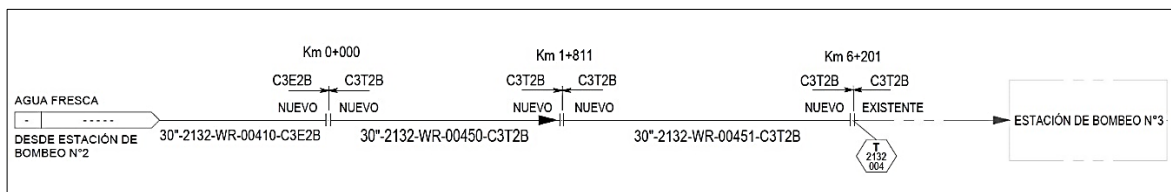
Se emplea el software AFT Fathom debido a su facilidad de uso y su interfaz intuitiva, lo que permite realizar simulaciones hidráulicas de manera eficiente sin necesidad de una capacitación avanzada. Además, es uno de los programas más empleados en nuestra región, lo que respalda su confiabilidad y compatibilidad con las prácticas y estándares locales, facilitando su incorporación y soporte dentro de la industria. La licencia empleada es de alquiler a una consultora de ingeniería, la cual se reserva su nombre debido a la política interna de la empresa.

Con el objetivo de optimizar los costos de adquisición del tramo 30"-2132-WR-00450-C3T2B, que inicialmente fue seleccionado con material API5L-X65 con un espesor

de 0.25" para los cálculos de selección de diámetro de impulsor, donde se obtiene una presión máxima de trabajo 561.6 psig. A partir de estos cálculos, se propone seccionar en dos tramos, basándose en las presiones de estancamiento mostradas en la Figura 12. El segundo tramo iniciará en la progresiva 1+811 km y se extenderá hasta el Tie-in 004. Para este tramo, se optará por material API 5L-B con un espesor de 0.375", lo que proporciona una presión máxima de trabajo de 512.7 psig y reduce el costo de adquisición.

Figura 13

Modificación del tramo 30"-2132-WR-00450-C3T2B

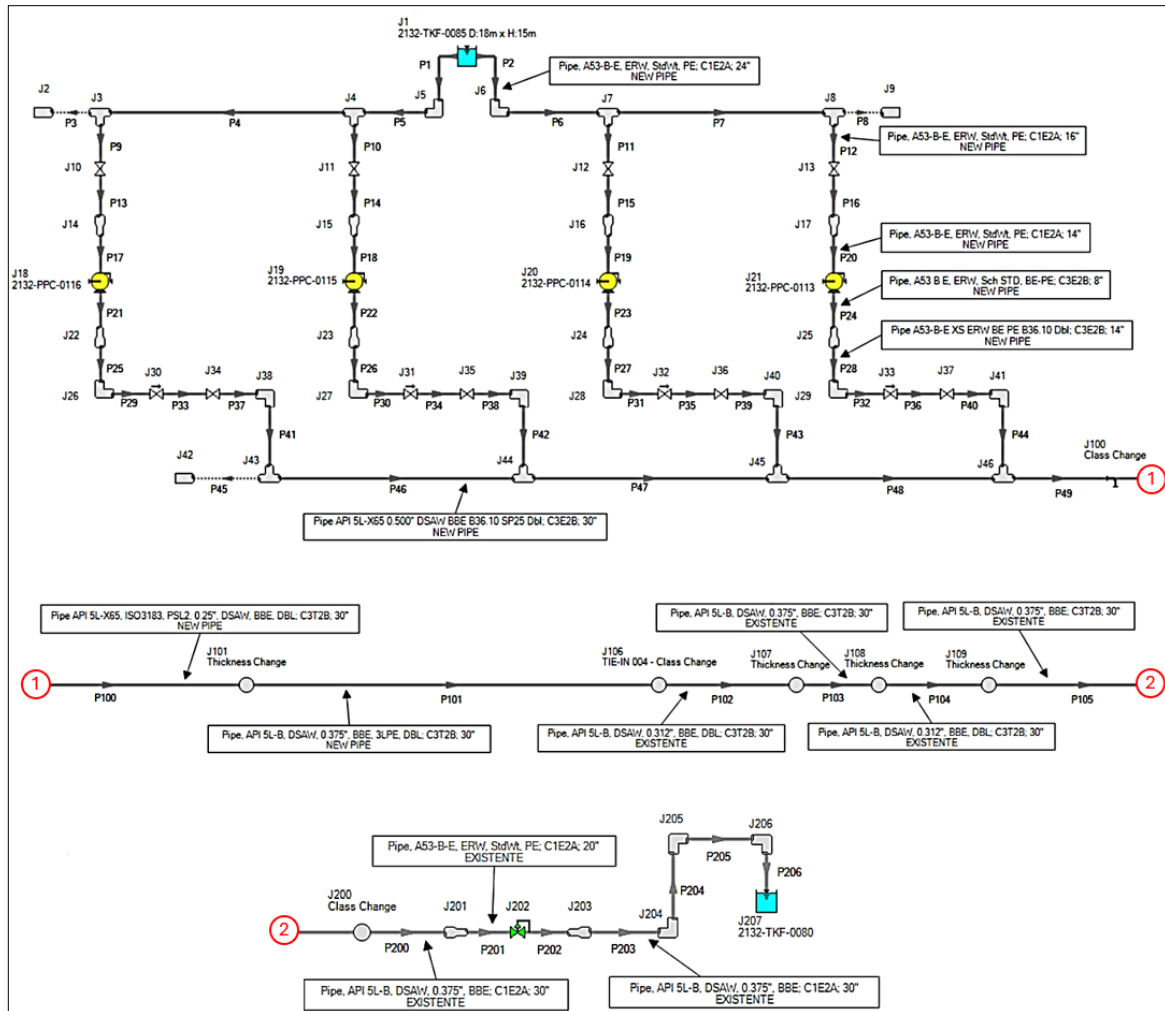


Nota: La selección del materia y espesor del segundo trabajo se realizó en base a las presiones de trabajo máximo indicados en el documento "Appendix D – Class Material Sheets (PipeWorks)" de la empresa Bechtel.

Con la implementación del cambio, procedemos a realizar el modelado del sistema en base al P&ID se muestra en la Figura 14 el modelado en AFT Fathom.

Figura 14

Modelado de la estación de bombeo N°2 y línea de impulsión hasta la estación N°3



Se presenta uno de los datos de entrada cargados al software, con respecto a las curvas características del modelo de bomba seleccionado.

Figura 15

Datos de entrada de la bomba, curva de operación

Pump Properties

Number: 21 Upstream Pipe: 20
Name: 2132-PPC-0113 Downstream Pipe: 24

Pump Configuration

Configuration Method
☒ Simple ☐ Multiple

Pump Model: Centrifugal (Rotodynamic)

Analysis Type
☒ Pump Curve
☐ Trimmed Impeller
☐ Ratio as Percent
☐ Actual Impeller
☐ Submerged Pump
☐ Check Valve at Discharge
☐ Interstage Bleed

Raw Data:

Parameter	Flow Q Units	Head/Pressure dH meters	NPSHR meters	Efficiency/Power Percent
1	0	340,2879		0
2	100	341,3604		19,96055
3	200	341,8022		35,20215
4	300	341,0358		47,95047
5	400	338,9629	2,41402	57,9687
6	500	334,5047	2,419508	64,74394
7	600	330,5575	2,419755	70,18134
8	700	324,1297	2,699018	73,40493
9	800	316,1502	2,973287	75,31751
10	900	305,5932	3,255227	75,95493
11	1000	294,6743	3,702446	75,50483
12	1100	281,3092	4,15647	74,19203
13	1200	264,9651	4,78134	71,2538
14	1300	247,3164	5,496494	67,91758

Curve Fitting
Curve Fit Type:
☒ Polynomial
☐ Interpolated X-Y Data

☒ Head Rise
☒ NPSHR
☒ Efficiency

All None Invert

Curve Fit Order
2

Generate Curve Fit Now

PUMP CURVE

a	338,7625
b	0,03414782
c	-7,945919E-05
NPSHR	
a	3,241888
b	-0,003783727
c	4,231101E-06
EFFICIENCY	
a	4,28793
b	0,1630579
c	-8,965877E-05

ΔH = a + bQ + cQ² + dQ³ + eQ⁴

Reference Density
☒ No Correction ☐ Water @STP
☐ User Specified kg/m³

Nota: Se muestra la ventana de Pump Properties donde se ingresaron los valores para graficar las curvas de Caudal-TDH, NPSHR y curva de eficiencia.

El software AFT Fathom nos proporciona los resultados que se muestran en la Figura 16, los cuales reflejan los parámetros de operación del sistema de impulsión de la estación de bombeo N°2.

Figura 16

Resultado resumen de las bombas 2132-PPC-0113/0114/0115/0116 en operación

Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (m3/hr)	Mass Flow (kg/sec)	dP (bar)	dH (meters)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (kW)	BEP (m3/hr)	% of BEP (Percent)	NPSHA (meters)	NPSHR (meters)
18	Show	2132-PPC-0116	720,1	200,0	31,59	322,1	75,21	100,0	839,5	909,3	79,19	7,425	2,711
19	Show	2132-PPC-0115	720,2	200,0	31,59	322,1	75,22	100,0	839,5	909,3	79,20	7,429	2,711
20	Show	2132-PPC-0114	720,3	200,0	31,59	322,1	75,22	100,0	839,6	909,3	79,21	7,429	2,712
21	Show	2132-PPC-0113	720,3	200,1	31,59	322,1	75,22	100,0	839,6	909,3	79,22	7,425	2,712

3.2.5 Consideraciones para el análisis transitorio

Las siguientes consideraciones se obtiene de los criterios de diseño de la unidad minera y buenas prácticas de anteriores proyectos similares ejecutados.

- Se considera en el análisis los eventos de transitorios hidráulicos debido a la parada intempestiva de las bombas por corte de suministro eléctrico. Los escenarios analizados son los siguiente:
 - Escenario N° 1: Parada intempestiva de bomba – Sin atenuación de fenómenos transitorios.
 - Escenario N° 2: Parada intempestiva de bomba – Con atenuación de fenómenos transitorio (válvula anticipadora de onda).
- Se empleará como elemento principal de mitigación de sobretensiones, presiones superiores a la presión admisible de las tuberías, una válvula anticipadora de onda tipo globo ubicada en la estación de bombeo 2.

3.2.6 Análisis de transitorios hidráulicos

El análisis se realizará con el objetivo de verificar los materiales y espesores de las tuberías seleccionadas para el sistema de bombeo N°2, incluyendo la línea de impulsión. Esto se realizará ante un eventual transitorio de golpe de ariete causado por una parada inesperada de las bombas debido a un corte en el suministro eléctrico.

La sobrepresión admisible durante eventos de cargas ocasionales, como son los transitorios hidráulicos en las tuberías de acero, se determina de acuerdo con las directrices de las normas ASME B31.3 y ASME B31.4. Para las tuberías de la estación de bombeo, la sobrepresión admisible se incrementa en 33% de la presión de operación admisible según ASME B31.3; mientras que para la línea de impulsión (pipeline) se incrementa en 10% de la presión de operación admisible según ASME B31.4. La presión de vacío admisible se ha calculado de acuerdo con la norma ASME.

Tabla 13*Características de las tuberías*

Tramo	Ubicación o progresiva	Diámetro Nominal (pulg)	Material	Espesor	Clase	Presión de operación admisible (psig)	Sobretensión admisible (psig)	Presión de vacío admisible (psig)
Tubería de descarga (NUEVO)	EB2	14"	A53-B-E	0.500"	C3E2B	740.0	984.2	(-) 448.8
Tubería de descarga (NUEVO)	EB2	30"	API 5L-X65	0.500"	C3E2B	600.0	798.0	(-) 73.2
Pipeline de descarga (NUEVO)	0+000 a 1+811	30"	API 5L-X65	0.250"	C3T2B	561.6	617.8	(-) 19.3
Pipeline de descarga (NUEVO)	1+811 a 6+201	30"	API 5L-B	0.312"	C3T2B	406.3	446.9	(-) 25.7
Pipeline de descarga (Existente)	6+201 a 6+608 / 6+676 a 6+885	30"	API 5L-B	0.312"	C3T2B	406.3	446.9	(-) 25.7
Pipeline de descarga (Existente)	6+608 a 6+676 / 6+885 a 7+482	30"	API 5L-B	0.375"	C3T2B	512.7	564.0	(-) 32.2

Según con lo indicado en el punto 3.2.6, se contempla el uso de una nueva válvula anticipadora de onda instalada en la tubería de descarga de las bombas como elemento mitigador de sobretensiones. A continuación, se indican sus características:

- Tipo : Globo
- CV al 100%-10" : 2 300 gpm/psi^{0.5}
- Tiempo de apertura : 1 segundo
- Tiempo de cierre : durante el periodo transitorio

Los cálculos se desarrollarán empleando el software Hammer Connected de la firma Bentley, en la Tabla 14 se presenta los datos de entrada al software y en la Figura 17 se muestra el modelado parcial del sistema.

Se emplea el software Hammer Connected debido a que está desarrollado principalmente para trabajar simulaciones de sistemas hidráulicos con agua como fluido de análisis, lo que lo convierte en una herramienta ideal para aplicaciones en la industria del agua. Un factor clave que lo distingue es su costo significativamente más bajo en comparación con otros programas similares en el mercado local, lo que lo hace una opción accesible y rentable para las empresas y proyectos que buscan optimizar sus sistemas hidráulicos sin comprometer la calidad de los resultados. La licencia utilizada es de alquiler a una consultora de ingeniería, la cual se reserva su nombre debido a la política interna de la empresa.

Los reportes generados por el software para el análisis transitorio se presentan en los anexos 3, y 4.

Tabla 14

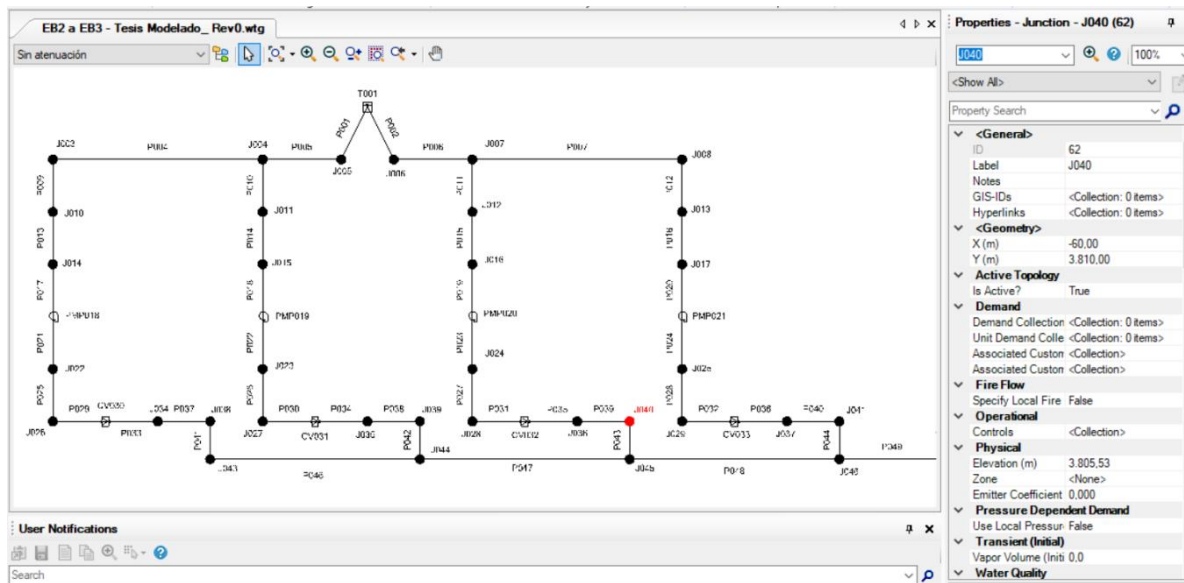
Datos de entrada para los cálculos en el software Hammer Connected

Parámetros	Datos
Tiempo de simulación	120 s
Tiempo de inicio de parada de bombas	1 s
Tipo de válvula anticipadora de onda	Globo de 14"
Inercia bomba – motor	50 kg.m ²

Nota: Adicional a los valores que se muestra en la tabla, se ingresan todos los valores de altitud de los equipos y nodos. Así como longitudes, espesores y material de las tuberías. El valor de Inercia bomba-motor se obtiene de información del proveedor.

Figura 17

Modelado para el análisis de transitorios hidráulicos



Nota: Se muestra el modelado parcial del sistema de bombeo, específicamente las tuberías de la estación de bombeo N°2.

3.2.6.1 Escenario N°1: Parada intempestiva de la bomba sin atenuación de fenómenos transitorios. En la Tabla 15 se presenta la verificación de los materiales y espesores de las tuberías, junto con los principales resultados obtenidos del análisis transitorio del sistema, considerando las sobrepresiones admisibles indicadas en la Tabla 13. Además, en las Figura 18 y 19 se muestra la gradiente hidráulica y envolvente de presiones, respectivamente, a lo largo de las tuberías.

Tabla 15*Resultados – Parada intempestiva sin atenuación de fenómenos transitorios*

Tramo	Ubicación o progresiva	Diámetro Material Espesor Clase	Máx. Sobrepresión obtenida (psig)	Sobretensión admisible (psig)	Mín. Presión obtenida (psig)	Presión de vacío admisible (psig)	Obs.
Tubería de descarga (NUEVO)	EB2	14" A53-B-E 0.500" C3E2B	851.0	984.2	(-) 14,2	(-) 448.8	No falla
Tubería de descarga (NUEVO)	EB2	30" API 5L-X65 0.500" C3E2B	728,15	798.0	131,0	(-) 73.2	No falla
Pipeline de descarga (NUEVO)	0+000 a 1+811	30" API 5L-X65 0.250" C3T2B	703,5	617.8	4,59	(-) 19.3	Falla
Pipeline de descarga (NUEVO)	1+811 a 6+201	30" API 5L-B 0.375" C3T2B	486,0	564,0	(-) 14,2	(-) 25.7	No falla
Pipeline de descarga (Existente)	6+201 a 6+608 / 6+676 a 6+885	30" API 5L-B 0.312" C3T2B	293,1	446.9	(-) 5,5	(-) 25.7	No falla
Pipeline de descarga (Existente)	6+608 a 6+676 / 6+885 a 7+482	30" API 5L-B 0.375" C3T2B	268.9	564.0	(-) 14,2	(-) 32.2	No falla

Figura 18

Gradiente hidráulico – Escenario 1

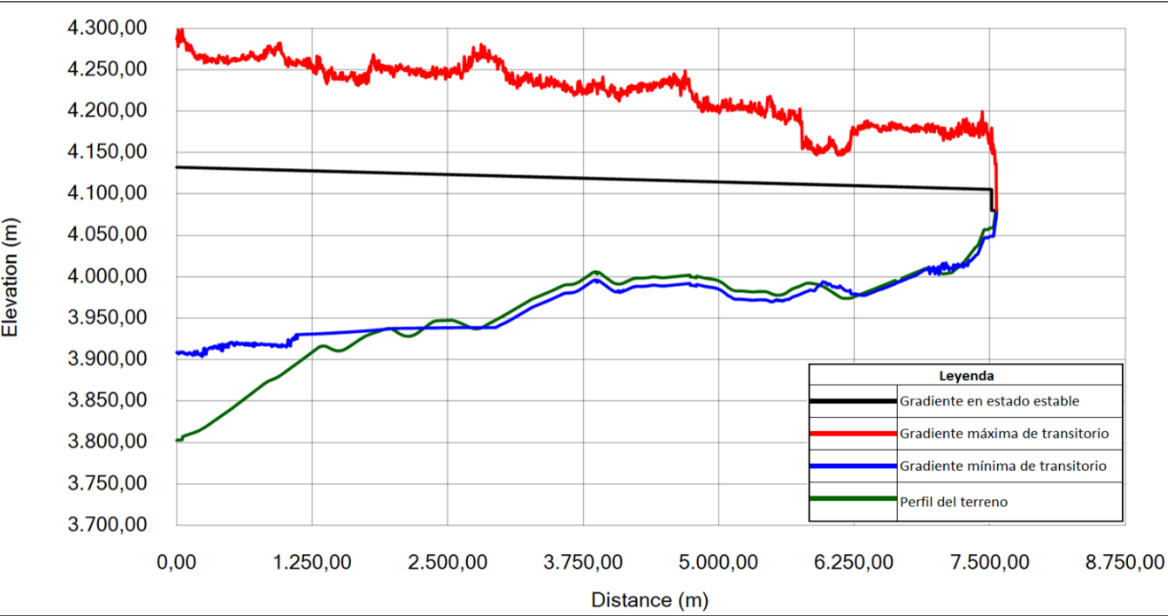
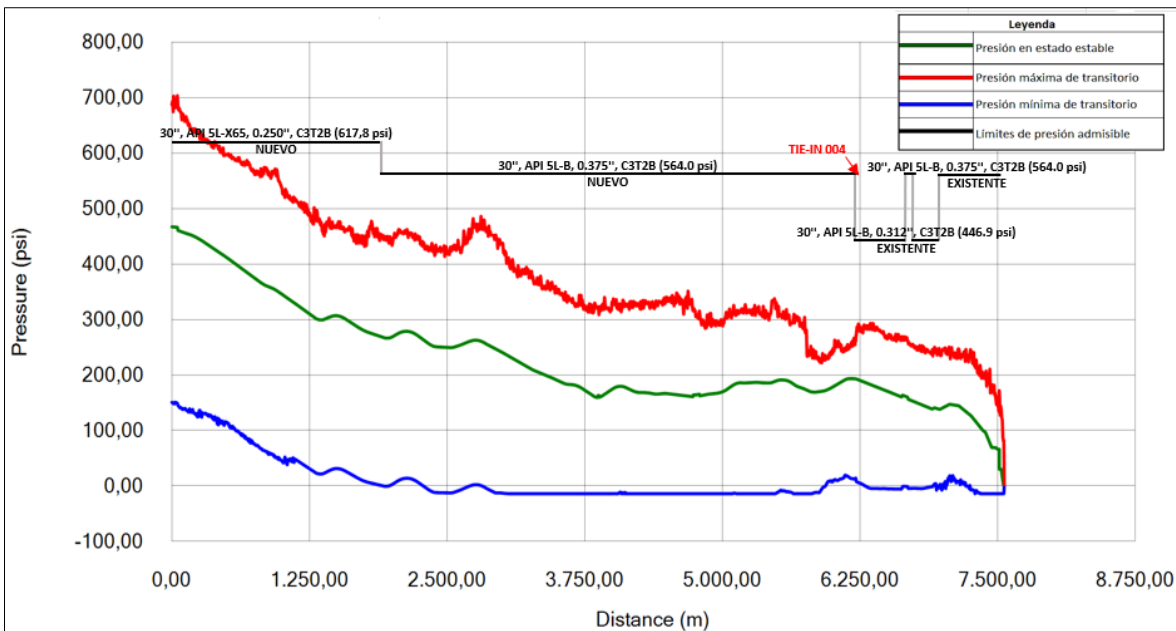


Figura 19

Envolvente de presiones – Escenario 1



3.2.6.2 Escenario N°2: Parada intempestiva de la bomba con atenuación de fenómenos transitorios. En la Tabla 16 se presenta la verificación de los materiales y espesores de las tuberías, junto con los principales resultados obtenidos del análisis transitorio del sistema, considerando las sobrepresiones admisibles indicadas en la Tabla 13. Además, en las Figura 20 y 21 se muestra la gradiente hidráulica y envolvente de presiones, respectivamente, a lo largo de la tubería.

Tabla 16

Resultados – Parada intempestiva con atenuación de fenómenos transitorios

Tramo	Ubicación o progresiva	Diámetro Material Espesor Clase	Máx. Sobrepresión obtenida (psig)	Sobretensión admisible (psig)	Mín. Presión obtenida (psig)	Presión de vacío admisible (psig)	Obs.
Tubería de descarga (NUEVO)	EB2	14" A53-B-E 0.500" C3E2B	467,8	984.2	(-) 14,20	(-) 448.8	No falla
Tubería de descarga (NUEVO)	EB2	30" API 5L-X65 0.500" C3E2B	467,8	798.0	12.24	(-) 73.2	No falla
Pipeline de descarga (NUEVO)	0+000 a 1+811	30" API 5L-X65 0.250" C3T2B	467,8	617.8	(-) 14,2	(-) 19.3	No falla
Pipeline de descarga (NUEVO)	1+811 a 6+201	30" API 5L-B 0.375" C3T2B	278,3	564,0	(-) 14,2	(-) 25.7	No falla
Pipeline de descarga (Existente)	6+201 a 6+608 / 6+676 a 6+885	30" API 5L-B 0.312" C3T2B	197,1	446.9	(-) 14,2	(-) 25.7	No falla
Pipeline de descarga (Existente)	6+608 a 6+676 / 6+885 a 7+482	30" API 5L-B 0.375" C3T2B	164,0	564.0	(-) 14,2	(-) 32.2	No falla

Figura 20

Gradiente hidráulico – Escenario 2

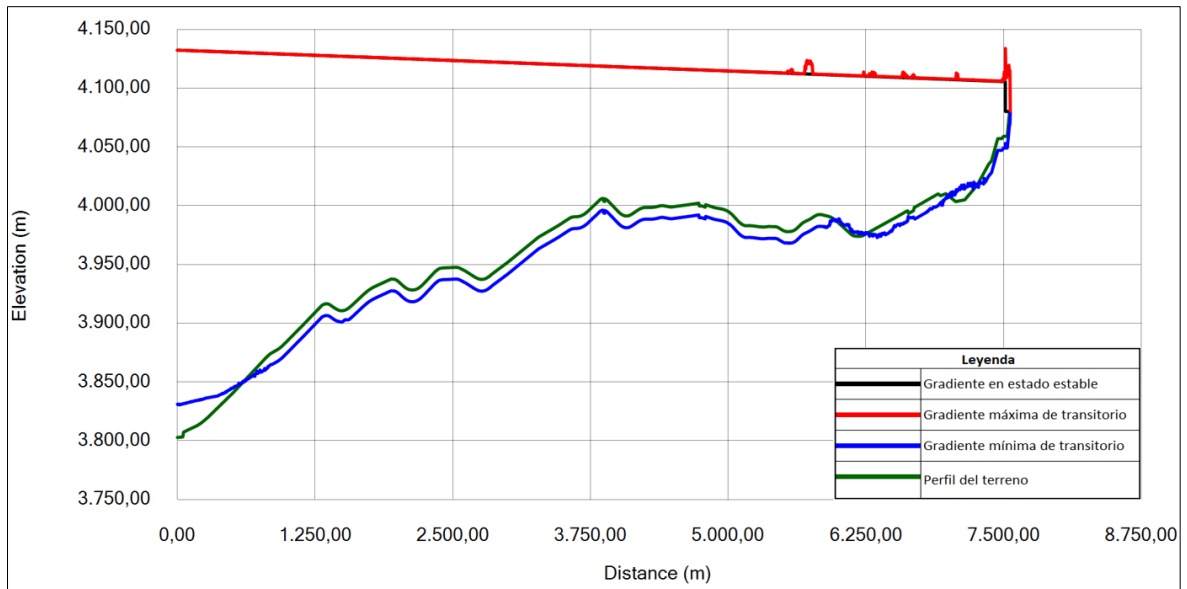
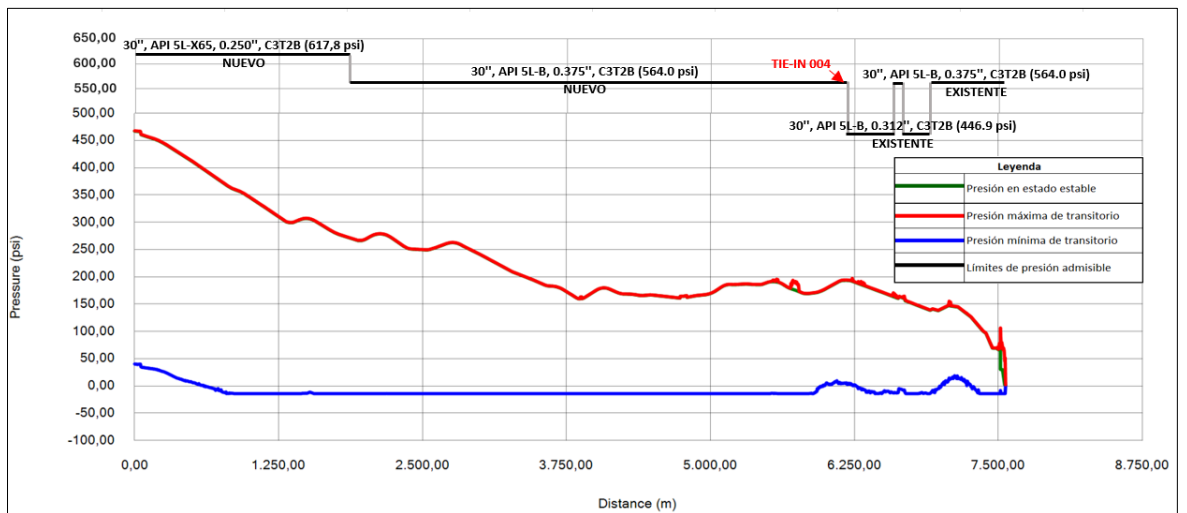


Figura 21

Envoltura de presiones – Escenario 2



3.2.7 Cálculo hidráulico complementario del sistema

Los cálculos hidráulicos presentados se realizaron para la configuración de cuatro bombas paralelos en funcionamiento. Una vez validada la selección de la bomba y las dimensiones de las tuberías para la configuración de diseño, se complementan los cálculos para las configuraciones de una, dos y tres bombas en operación.

En la Tabla 17 se presenta el resumen de los resultados para las cuatro configuraciones de funcionamiento de las bombas.

Tabla 17

Parámetros de operación de bombas

Bombas	Resultados por bomba					
	Caudal (m ³ /h)	ADT (m)	NPSHa (m)	NPSHr (m)	Eficiencia (%)	Potencia en el eje (kW)
Cuatro (4) bombas en operación	720.0	322.1	7.4	2.7	75.2	839.5
Tres (3) bombas en operación	908.3	304.2	7.4	3.3	78.4	959.3
Dos (2) bombas en operación	993.1	294.3	7.3	3.6	77.8	1 023.0
Una (1) bomba en operación	1 058.0	285.9	7.3	3.9	76.4	1 077.0

Nota: El requerimiento de caudales para el funcionamiento de una, dos o tres bombas en paralelo se obtiene de los reportes de caudal de operación de la estación de bombeo N°2 existente.

3.2.8 Cálculo de potencia de los motores

Los cálculos se desarrollarán con el objetivo de definir se requiere adquirir nuevos motores o se pueden reutilizar los existentes, los cuales tienen una potencia de placa de 752.4 kW cada uno. Para ello, es esencial conocer la potencia en el eje requerida en las configuraciones de operación (una, dos, tres o cuatro bombas en funcionamiento).

A continuación, se determina la potencia eléctrica requerida por cada bomba en las distintas configuraciones de operación de las bombas.

$$Potencia_{eléctrica} = \frac{Potencia_{en\ el\ eje}}{n_t * n_M} \quad (3.1)$$

Donde:

n_t : Eficiencia de la transmisión

n_M : Eficiencia del motor

Tabla 18

Potencia eléctrica de motores requeridos para cada bomba en las distintas configuraciones de operación

Bombas	Resultados por bomba				
	Potencia en el eje (kW)	n_t (%)	n_M (%)	Potencia eléctrica (kW)	Potencia eléctrica (hp)
Cuatro (4) bombas en operación	839.5	0.96	0.95	920.5	1 235
Tres (3) bombas en operación	959.3	0.96	0.95	1 051.9	1 411
Dos (2) bombas en operación	1 023.0	0.96	0.95	1 121.7	1 505
Una (1) bomba en operación	1 077.0	0.96	0.95	1 180.9	1 584

De acuerdo con los cálculos realizados se concluye que se requiere motores nuevos debido a que la capacidad de los motores existentes es menor a lo requerido en todas las configuraciones de funcionamiento. Para la aplicación se va a seleccionar cuatro motores nuevos con una potencia de placa de 1 267.7 kW (1 700 hp).

3.3 Evaluación técnico-económica de bombas repotenciadas

Ahora que se tiene definido el modelo de las bombas, incluido la dimensión del impulsor, y capacidad requerida de los motores procederemos a evaluar las alternativas de repotenciar las bombas existentes. La evaluación se desarrollará desde el punto de vista técnico-económico.

Todas las alternativas deberán incluir la repotenciación de cuatro bombas nuevas con capacidad de 1 700 hp.

3.3.1 Presentación de propuestas

Las propuestas presentadas a continuación fueron obtenidas formalmente, mediante cotización presupuestaria. La propuesta técnica-económica por bomba para cada alternativa se muestra en las tablas 19 y 20.

Tabla 19

Alternativa 01 – Repotenciación de bomba en mina

Item	Descripción	Consideraciones	Sub-total
01	Desmontaje de bomba	– Desmontaje de bomba, bases y motores	\$ 14,000.00
02	Transporte interno	– Traslado de bomba, del sitio a almacén de la obra – Traslado de almacén de la obra al sitio	\$ 2,420.80
03	Transporte externo	– Transporte de componentes, del centro de servicios del proveedor al almacén de la obra	\$ 1,541.05
04	Repotenciamiento de bomba	– Impeller – Motor de 1700 HP – Base y acople – Wear rings – Asistencia en campo – Repotenciación en taller – Instalación de bomba repotenciada – Asistencia Vendor – Camioneta, chofer, combustible, hospedaje y alimentación para personal de ITT – Otros (Gaskets, casings, locknuts, keys, bearing, rings, etc.)	\$ 339,348.05
05	Otros trabajos (recomendado por el proveedor ITT)	– Inspección completa de los componentes de bomba – Cajas de rodamiento / Asiento de caja de rodamiento – Paralelismo de ejes – Control dimensional y desgaste de carcasa – Flete al sitio de los componentes recomendados por el proveedor (5%)	\$ 37,790.00
Costo Directo Total – Valor unitario			\$ 395,099.90

Tabla 20*Alternativa 02 – Repotenciación de bomba en el taller del proveedor*

Item	Descripción	Consideraciones	Sub-total
01	Desmontaje de bomba	- Desmontaje de bomba, bases y motores	\$ 14,000.00
02	Transporte interno	- Traslado de Bomba, del sitio a taller del proveedor - Traslado de taller del proveedor al sitio	\$ 2,420.80
03	Transporte externo	- Traslado de bomba, del almacén de la obra a centro de servicios del proveedor - Transporte de bomba, de centro de servicios del proveedor a almacén de la obra	\$ 5,136.82
04	Repotenciamiento de bomba	- Impeller - Motor de 1700 HP - Base y acople - Wear rings - Instalación de bomba repotenciada - Asistencia Vendor - Camioneta, chofer, combustible, hospedaje y alimentación para personal del proveedor - Otros (Gaskets, casings, locknuts, keys, bearing, rings, etc.)	\$ 330,408.05
05	Otros trabajos (recomendado por el proveedor ITT)	- Inspección completa de los componentes de bomba - Cajas de rodamiento / Asiento de caja de rodamiento - Paralelismo de ejes - Control dimensional y desgaste de carcasa	\$ 36,200.00
Costo Directo Total – Valor unitario			\$ 388,165.67

Obtenido los valores unitarios de cada alternativa, En la tabla 22 se muestra el resumen del valor total para implementar cada alternativa.

Tabla 21

Resumen de costos

Item	Alternativa	Valor unitario (US\$)	Valor total (US\$)
01	Bombas repotenciadas en la mina	395,099.90	1,580,399.58
02	Bombas repotenciadas en el taller del proveedor	388,165.67	1,552,662.67

3.4 Diseño estructural del tanque de almacenamiento

Según lo presentado en el diagrama de flujo, la nueva estación de bombeo N°2 estará conformada por un nuevo tanque de almacenamiento de agua fresca (2132-TKF-0085) con capacidad útil de 3 000 m³. Por lo cual, se procederá a desarrollar el diseño conforme al estándar API 650.

El primer procedimiento en el diseño será determinar los espesores de las planchas requeridos para la construcción del fondo, el casco y el techo del tanque de almacenamiento. Además, se llevarán a cabo cálculos preliminares para validar la estabilidad frente a cargas de viento y sísmicas.

Finalmente, se completará el diseño de los anillos de refuerzo, boquillas y sistema de anclaje del tanque, así como la validación de los cálculos iniciales mediante el software AMETank 15.6.12 de la firma TechnoSoft. Se emplea el software AMETank debido a su interfaz gráfica intuitiva, que optimiza el proceso de modelado en comparación con otros programas similares. La licencia utilizada es de alquiler a una consultora de ingeniería, cuyo nombre se omite por políticas internas de la empresa.

3.4.1 Requerimientos o exigencias de diseño

Los requerimientos y especificaciones para el diseño del tanque de almacenamiento se detallan en la Tabla 22. La información se obtuvo directamente a partir

de los criterios de diseño, las condiciones del sitio y entre otros documentos de la unidad minera.

Tabla 22

Datos para el diseño del tanque

Características	Datos	Características	Datos
Diámetro	18 m	Material	ASTM A36
Altura	15 m	Zona sísmica	Zona 2 E.030
Nivel de diseño	14.85 m	Parámetros sísmicos	Clase de sitio B, $S_s=1.16$, $S_1= 0.37$
Nivel de operación	13.68 m	Carga viva en el techo	100 kg/m ²
Nivel mínimo	1.89 m	Carga muerta (accesorios)	30 kg/m ²
Temperatura de diseño	15 °C	Carga de nieve	40 kg/m ²
Gravedad específica	1.0	Velocidad del viento	97 km/h
Tolerancia de corrosión (Casco)	1.6 mm	Eficiencia de junta soldada	0.85
Tolerancia de corrosión (Fondo)	1.6 mm	Número de boquillas	04-Alimentación 02-Descarga 01-Instrumentación
Tolerancia de corrosión (Techo)	0.8 mm		01-Venteo 02-Manhole 01-Rebose 01-Drenaje

Nota: Las dimensiones del diámetro y altura se definió en base al volumen neto (útil) requerido y la disponibilidad del sitio de la instalación, con dichos valores la relación ($H/D=0.83$) es menor a 1 lo cual está de acuerdo con la recomendación de Agboola et al (2020).

3.4.2 Selección de Material

Dado la aplicación para almacenar agua fresca y en base a la información del tanque existente se seleccionó ASTM A36 como material para el diseño del tanque. En la tabla 23 se muestra las propiedades del material obtenido del estándar API 650 (Tabla 5.2a - Permissible Plate Materials and Allowable Stresses (SI)).

Tabla 23

Propiedades del material ASTM A36

Acero ASTM A36	
Esfuerzo a la rotura (σ_t)	400 MPa
Esfuerzo de fluencia (F_y)	250 MPa
Esfuerzo admisible bajo condiciones de diseño (S_d)	160 MPa
Esfuerzo admisible por prueba hidrostática (S_t)	171 MPa
Módulo de elasticidad del material	200 GPa

3.4.3 Cálculo de espesores y dimensiones del casco, techo y fondo

3.4.3.1 Diseño de casco (Shell). De acuerdo con lo establecido en el marco teórico los cálculos de espesores del casco se desarrollarán mediante el método de un pie indicado en la norma API (sección 5.6.3). Para calcular los números de anillos se debe considerar que el ancho mínimo de cada anillo debe ser 1 800 mm.

El espesor mínimo requerido de las planchas del caso por anillo será el mayor de los valores calculados mediante las siguientes formulas:

$$t_d = \frac{4,9 * D * (H - 0,3) * G}{S_d} + CA \quad (3.2)$$

$$t_t = \frac{4,9 * D * (H - 0,3)}{S_t} \quad (3.3)$$

H: Altura de diseño del liquido

G: Gravedad especifica de diseño del liquido

CA: Tolerancia de corrosión

S_d : Esfuerzo admisible bajo condiciones de diseño

S_t : Esfuerzo admisible por prueba hidrostática

En la tabla 24 se muestran los resultados de los cálculos realizados con el método de un pie.

Tabla 24

Resultado de los cálculos según API 650 – Método de 1-pie

Anillo N°	Ancho Calculado	Ancho Definido	Altura de líquido	Espesor de operación (t_d)	Espesor de prueba (t_r)	Espesor seleccionado
	mm	mm	m	mm	mm	mm
1	2 400	2 400	14.85	9.621	7.505	12.0
2	2 400	2 400	12.45	8.298	6.267	9.0
3	2 400	2 400	10.05	6.975	5.029	8.0
4	2 400	2 400	7.65	5.652	3.791	6.0
5	2 400	1 800	5.25	4.329	2.553	6.0
6	2 400	1 800	3.45	3.336	1.625	6.0
7	600	1 800	1.65	2.344	0.696	6.0

Nota: Las dimensiones de las planchas de acero comercial a utilizar son 2.4 m x 6.0 m. Por lo tanto, se busca maximizar el número de anillos con un ancho de 2.4 m para reducir así los trabajos adicionales en corte.

El casco del tanque estará conformado por 07 anillos. Los cuatro primeros están conformados por planchas de 2.4 m x 6 m y los otros tres por planchas de 1.8 m x 6 m de altura en concordancia con el punto 5.6.1.2 del standard API 650. En el cálculo presentado el anillo con el menor espesor de plancha es 6 mm, que incluye una tolerancia por corrosión de 1.6 mm por corrosión. El espesor mínimo de 6 mm es según lo indicado en el punto 5.6.1.1 API 650.

3.4.3.2 Diseño de fondo (bottom). El fondo será desarrollado con una pendiente de 1% desde el centro a la periferia del tanque. Según el estándar API 650, el espesor mínimo de las planchas del fondo será de 6 mm sin incluir tolerancia por corrosión. Para las planchas del fondo del tanque la tolerancia por corrosión a considerar será de 1.6 mm.

$$t_{\min_fondo} = 6.0 + CA \quad (3.4)$$

$$t_{\min_fondo} = 6.0 + 1.6 = 7.6 \text{ mm}$$

Por consiguiente, el espesor comercial elegido es:

$$t_{\text{seleccionado}} = 8 \text{ mm}$$

El diámetro del fondo debe garantizar que un ancho de 50 mm como mínimo sobresalga por fuera de la superficie exterior del primer anillo del casco, en cumplimiento con lo establecido en el punto 5.4.2 del estándar API 650.

$$Diámetro_{fondo_mínimo} = Diámetro_{interior} + 2(t_{anillo\#1}) + 2(Ancho_{mín_API650}) \quad (3.5)$$

$$Diámetro_{fondo_mínimo} = 18 + 2(0.012) + 2(0.050) = 18.124 \text{ m}$$

3.4.3.3 Diseño del techo. Dado que se almacenará agua fresca y por requerimientos de la unidad minera, el tanque deberá contar con un techo. El tipo de techo seleccionado será cónico, soportado por vigas y columna. El espesor mínimo de las planchas del techo será de 5 mm, descontada la tolerancia por corrosión. El techo tendrá una inclinación de 9.5°.

$$t_{\min_techo} = 5.0 + CA \quad (3.6)$$

$$t_{\min_techo} = 5.0 + 0.8 = 5.8 \text{ mm}$$

Por consiguiente, el espesor comercial elegido es:

$$t_{\text{seleccionado}} = 6 \text{ mm}$$

La cantidad de vigas principales de la estructura del techo se calculará de acuerdo con lo establecido en el punto 5.10.4.4 del estándar API 650. Este apartado indica que el espaciamiento máximo entre vigas no debe superar los 2 100 mm.

$$b = t \left(\frac{1.5F_y}{p} \right)^{0.5} \quad (3.7)$$

b: El máximo espaciamiento permitido de las vigas

F_y: Esfuerzo de fluencia de la plancha

t: Espesor de la plancha del techo

p: Presión uniforme sobre el techo

Tabla 25

Resultado de los cálculos de espaciamiento de las vigas principales

Cálculo de espaciamiento de las vigas	
DATOS DE ENTRADA:	
Radio del techo	r: 9.00 m
Longitud inclinada del techo	s: 9.12 m
Área del techo	Ar: 258 m ²
Peso del techo	Wr: 12 150.8 kg
Carga muerta por unidad de área	Wa: 47.1 kg/m ²
Considerando 15 % por accesorios en el techo	Wa: 54.2 kg/m ²
Cargas vivas consideradas en el diseño	Wv: 115.8 kg/m ²
Carga total por unidad de área	Wt: 170.0 kg/m ²
CÁLCULO SEGÚN API 650:	
Espaciamiento máximo de las vigas (<2100mm)	b: 2 845.2 mm
Número de vigas cálculo	# vigas: 20
Observación: No cumple, se debe aumentar la cantidad de vigas	
Selección de cantidad de vigas para cumplir con el requerimiento	
Número de vigas determinado	# vigas: 27
Espaciamiento entre vigas establecido	b: 2 094 mm

La selección preliminar de los tipos y dimensiones de las estructuras de soporte del techo se determina mediante el software AMETank, considerando un diseño parcial. En la Tabla 26 se presenta los resultados y pesos de dichas estructuras.

Tabla 26*Pesos de los elementos estructurales del techo*

Elementos	Característica	Peso unitario
Viga principal	C 9x15x9000	203.6 kg
Viga secundaria	C 4x5.4x940	8.80 kg
Columna	Tubo 10" SCH 80	1 581.0 kg
Peso total		7 315.8 kg

3.4.4 Comprobación de estabilidad al volcamiento por carga del viento

Para determinar si el diseño del tanque requiere ser anclado para garantizar la estabilidad al volcamiento por carga del viento, se desarrollará los cálculos según el punto 5.11.2.2 del estándar API650, donde establece que los tanques para ser auto-ancrados con techos cónicos soportados deberán satisfacer el siguiente criterio:

$$M_{ws} + F_p(M_{pi}) < M_{DL}/1.5 + M_{DLR} \quad (3.8)$$

F_p : Factor de combinación de presiones

M_{ws} : Momento debido a la presión del viento horizontal y vertical del viento

M_{pi} : Momento debido a la presión interna

M_{DL} : Momento debido al peso del manto y estructura del techo

M_{DLR} : Momento debido al peso del techo

Según API 650, sección 5.2.1k, la presión del viento sobre el manto (P_w) y la presión del viento sobre el techo (P_{wr}) se calculan según las siguientes expresiones:

$$P_w = 0.89 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (3.9)$$

$$P_{wr} = 1.48 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (3.10)$$

v : Velocidad del viento para diseño.

De las ecuaciones de obtiene los siguientes resultados:

Presión del viento sobre el casco:

$$P_w = 0.89 * \left(\frac{97}{190}\right)^2 = 0.23 \text{ kPa}$$

$$P_{wr} = 1.48 * \left(\frac{97}{190}\right)^2 = 0.39 \text{ kPa}$$

Se presenta los cálculos resumidos de las variables para la comprobación de estabilidad ante la carga del viento en la Tabla 27.

Tabla 27

Cálculo para verificar la estabilidad por carga del viento

Parámetros	Ecuación	Valor / Resultado
Datos de entrada:		
Factor de combinación de presiones (F_p)	-	0.4
Momento debido a la presión del viento horizontal y vertical del viento (M_{ws})	$M_{ws} = P_w * D * \frac{H^3}{8}$	3 523.0 kN.m
Momento debido a la presión interna (M_{pi})	$M_{pi} = P_i * \pi * \frac{D^3}{8}$	0 kN.m
Momento debido al peso del manto y estructura del techo (M_{DL})	$M_{DL} = (W_{casco} + W_{techo}) * \frac{D^2}{2}$	123 428.2 Kn.m
Momento debido al peso del techo (M_{DLR})	$M_{DLR} = (W_{techo}) * \frac{D^2}{2}$	33 100.3 kN.m

Se realiza el cálculo según la ecuación del punto 5.11.2.2, si se cumple dicha ecuación el tanque no requiere anclaje mecánico para cumplir con la estabilidad por carga del viento.

Ecuación del criterio de evaluación:

$$M_{ws} + F_p(M_{pi}) < M_{DL}/1.5 + M_{DLR} \quad (3.11)$$

De los valores obtenidos en la Tabla 25, reemplazados en la ecuación y se obtiene el siguiente resultado:

$$3\,523.0 < 115\,385.7$$

Se observa que cumple dicho criterio, por lo cual se demuestra que el tanque es estable ante carga del viento, y se concluye que no necesita anclaje para garantizar la estabilidad al volcamiento por carga del viento.

3.4.5 Cálculo de estabilidad por cargas sísmicas

Los cálculos de estabilidad sísmica se desarrollan de acuerdo con el Anexo E del estándar API 650, cuyo objetivo principal es garantizar la protección de la vida y prevenir el colapso catastrófico del tanque. Es importante señalar que la aplicación del estándar no garantiza la ausencia de daños al tanque y a los componentes relacionado durante un evento sísmico.

Según el apartado E.3 "Performance Basis" del estándar API 650, el tanque se clasifica como SUG II, debido a que almacena agua de proceso esencial para la operación de toda la planta y campamentos, pero la recuperación inmediata de la estructura tras un evento sísmico no es considerada crítica.

Tabla 28*Parámetros sísmicos de entrada para los cálculos de estabilidad*

Parámetros	Valor	Fuente de información
Factor de importancia	I: 1.25 (Zona sísmica 2)	Condiciones del sitio – Unidad minera / Tabla E.5 – API 650
Aceleración máxima del suelo	S_p : 0.48	Condiciones del sitio – Unidad minera
Periodo corto Aceleración Espectral	S_s : 1.16	Condiciones del sitio – Unidad minera
Periodo largo Aceleración Espectral	S_1 : 0.37	Condiciones del sitio – Unidad minera
Factor K (5% Amortiguamiento)	1.5	Condiciones del sitio – Unidad minera / API 650
Periodo de transición de periodo largo	T_L : 16	Condiciones del sitio – Unidad minera
Clase de sitio	B	Condiciones del sitio – Unidad minera
Factor F_a	F_a : 1.00	Tabla E.1 – API 650
Factor F_v	F_v : 1.00	Tabla E.2 – API 650
Coeficiente C_i	C_i : 6.05	Figura E.1 – API 650
Factor Q	Q : 0.67	E.4.6.1 – API 650
Factor S_{DS}	S_{DS} : 0.80	E.4.6.1 – API 650
Factor S_{D1}	S_{D1} : 0.80	E.4.6.1 – API 650
Factor de modificación de respuesta impulsiva	R_{wi} : 4.00	Tabla E.4 – API 650
Factor de modificación de respuesta convectiva	R_{wc} : 2.00	Tabla E.4 – API 650

En la Tabla 29 se presenta los cálculos resumidos de las variables para realizar el cálculo del momento de volteo.

Tabla 29

Cálculo para verificar la estabilidad por carga sísmica

Parámetros	Ecuación	Valor / Resultado
Datos de entrada:		
Coeficiente de desbordamiento (Ecuación E.4.5.2-c)	$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H}{D}\right)}}$	0.58
Periodo convectivo (Ecuación E.4.5.2-a)	$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt[2]{D}$	4.42 s
Periodo natural impulsivo (Ecuación E.4.5.1-1a)	$T_i = \left(\frac{1}{\sqrt{2000}}\right)\left(\frac{C_i H}{\sqrt{\frac{t_u}{D}}}\right)\left(\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}}\right)$	0.246 s
Parámetro de aceleración espectral impulsiva (Ecuación E.4.6.1-1)	$A_i = S_{DS}\left(\frac{I}{R_{wi}}\right)$	0.25 s
Parámetro de aceleración espectral convectiva (Ecuación E.4.6.1-5)	$A_c = K S_{D1}\left(\frac{T_L}{T_c^2}\right)\left(\frac{I}{R_{wc}}\right)$	0.17 s
Peso del contenido	$W_p = \frac{1}{4} D^2 H_d G g$	37 071 kN
Peso efectivo del contenido impulsivo (Ecuación E.6.1.1-2)	$W_i = \left(1 - 0.218 \frac{D}{H}\right) W_p$	27 275 kN
Peso efectivo del contenido convectivo (Ecuación E.6.1.1-2)	$W_c = 0.23 \frac{D}{H} \tanh\left(\frac{3.67H}{D}\right) W_p$	10 286 kN
Peso del casco	W_s	558 kN
Peso del techo	W_r	204 kN
Distancia al centro de gravedad inductivo (Ecuación E.6.1.2.1-2)	$X_i = \left(0.5 - 0.0094 \frac{D}{H}\right) H$	5.73 m
Distancia al centro de gravedad convectivo (Ecuación E.6.1.2.1-3)	$X_c = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1}{\frac{3.67H}{D} \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)}\right) H$	10.40 m
Distancia al centro de gravedad del casco	X_s	6.50 m
Distancia al centro de gravedad del techo	X_r	15.13 m

Con los parámetros obtenidos realizamos el siguiente cálculo del momento de volteo del tanque:

$$M_{rw} = \sqrt{\left(A_i * (W_i * X_i + W_s * X_s + W_r * X_r)\right)^2 + (A_c * W_c * X_c)^2} \quad (3.12)$$

$$M_{rw} = 44\,643.62 \text{ kN.m}$$

Con el resultado obtenido realizamos el cálculo según la ecuación E.6.2.1.1.1-1 API 650, que corresponde al criterio de ratio de anclaje.

$$\text{Factor de Anclaje: } J = \left(\frac{M_{rw}}{D^2 * (w_t(1 - 0.4A_v) + w_a - F_p w_{int})} \right) \quad (3.13)$$

$$J = 2.43$$

Según la tabla E.6 – Anchorage Ratio Criteria, debido a que el factor de anclaje es mayor a 1.54 el tanque presenta inestabilidad y no puede estar auto-anclado para resistir la carga de diseño. Por lo expuesto se concluye que el tanque si necesita anclajes.

3.4.6 Comprobación de estabilidad por compresión del tanque

Como ultima comprobación de estabilidad del tanque realizaremos el cálculo de compresión del casco.

Compresión en el casco en tanques anclados mecánicamente según ecuación E.6.2.2.2-1A:

$$\sigma_c = \left(w_t * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * M_{rw}}{D^2} \right) * \frac{1}{1\,000 * t_s} \quad (3.14)$$

σ_c : Esfuerzo de compresión en tanques con carga en techo

A_v : Parámetro de aceleración de sismo vertical, $A_v = 0.47 S_{DS} = 0.47 * 0.80 = 0.38$

t_s : Espesor del primer anillo, menos el espesor por corrosión, $t_s = 10.4 \text{ mm}$

w_t : Peso lineal del casco y techo alrededor del fondo, $w_t = 3.5 \text{ kN/m}$

Reemplazando los valores obtenemos:

$$\sigma_c = 17.3 \text{ Mpa}$$

Esfuerzo de compresión longitudinal permisible de la membrana del casco según ecuación E.6.2.3.2-2A:

$$\text{Para: } \frac{GH_t D^2}{t_s^2} \geq 44$$

$$F_c = 83 * \frac{t_s}{D} \quad (3.15)$$

F_c : Esfuerzo de compresión admisible en tanques con cargas en el techo

t_s : Espesor del primer anillo, menos el espesor por corrosión, $t_s = 10.4 \text{ mm}$

D : Diámetro del tanque

Reemplazando los valores obtenemos:

$$F_c = 48.0 \text{ Mpa}$$

Dado que el esfuerzo de compresión es menor que el esfuerzo admisible ($\sigma_c < F_c$) se concluye que el tanque es estructuralmente estable.

3.4.7 Diseño del tanque mediante el software AMETank

El propósito de emplear el software AMETank es validar, precisar, y complementar los cálculos y resultados obtenidos. Se complementará el diseño del sistema de anclaje mecánico, anillos de refuerzo, boquillas y accesorios, como escaleras y barandas.

Los valores de entrada para realizar el diseño y modelado del tanque en el software AMETank se obtiene de la Tabla 22, y los parámetros sísmicos de la tabla 27. En la Figura 22 se muestra los parámetros de diseño ingresados al software.

Figura 22

Ventana de parámetros de diseño del tanque

Dimensions		Design Standard	
Tank Diameter Based On	Inner Diameter	Governing Standard Edition	13TH EDITION
Tank Diameter (Inside)	18 m	Addendum	None
Tank Height	15 m	Tank Fabrication Type	Field Erected
Design Liquid Level	14.85 m	Per API-650 Appendix	NONE
Maximum Liquid Level	14.15 m	Allow Nozzles External Loads?	
High High Liquid Level	0 m	Appendix (Applied E)	E
High Liquid Level	0 m	Capacities and Weights	
Normal Working Level	13.68 m	Capacity Unit	M^3
Low Liquid Level	0 m	Capacity Reduction Diameter	0
Low Low Liquid Level	0 m	Capacity Reduction Height	0
Minimum Liquid Level	1.89 m	Capacity to Top of Shell	3810.0
Operating Conditions		Capacity to Design Liquid Level	3772.0
Lowest One-Day Mean Temperatures		Capacity to Maximum Liquid Level	3594.0
Minimum Design Metal Temperature	0 °C	Working Capacity	3474.0
Design Temperature	15 °C	Net Working Capacity	3000
Maximum Operating Temperature	15 °C	Minimum Operating Capacity	474
Ambient Temperature	20 °C	Tank Product Design Weight (Kgs)	<Unbound>
Internal Gauge Pressure (Design)	0 kpa	Tank Total Weight (Kgs)	94676
External Gauge Pressure (Vacuum)	0 kpa	Date In Service	YYYY 2024 MM 10 DD 15
Internal Pressure Combination Factor	0.4	Tank Bottom Elevation	0
External Pressure Combination Factor	0.4	North Angle Position (from X)	0
Roof Live Load	1 kpa		
Ground Snow Load	0.4 kpa		
Additional Roof Dead Load	0.29 kpa		
Product Stored	Agua fresca		
Product Design Specific Gravity	1		
Hydrotest Liquid Specific Gravity	1		
Hydrotest Liquid Level	14.85 m		
Joint Efficiency (1 = 100%)	1		
Corrosion Allowance	1.6		
Tank Material	A36		
Soil Bearing Capacity (kPa)	145		

Nota: Se muestra la pestaña Design Parameters. Así mismo, se ingresa los parámetros sísmico y viento en la pestaña Seismic/Wind Factors.

Posterior a establecer los parámetros en la pestaña de Project (del software AMETank), se procede a la pestaña de Design donde se ingresa y/o modifica los valores de acuerdo con los requerimientos de la aplicación y estándar API 650.

En la Figura 23 muestra pestañas parciales del diseño del techo, fondo y casco, respectivamente.

Figura 23

Pestañas de diseño del techo, fondo y casco del AMETank

Roof

Shell

Bottom

Structure

Access

Fixed Roof

Floating Roof

Design

Framing

Rows

Knuckle

Top Me

Cone

Support Type

Inside Structure with Columns

Plates Design Calculations

Material

A36

Corrosion Allowance

0.8

Joint Efficiency (1 = 100%)

1

Yield Strength (MPa)

250.0

Tensile Strength (MPa)

400.0

Allowable Design Stress (MPa)

160.0

Roof Rise Per 12 (Recommended 0.75)

1.92

Slope Angle

9.090276920822

Roof Horizontal Radius

9020.0

Roof Insulation Type

Roof Insulation Thickness (mm)

0

Roof Insulation Density

130

kg/m³

Frangible Roof per API-650 5.10.2.6

No

Add CA to Minimum Erection Thickness?

Yes

Req'd Thickness Based on Erection

5.8

Req'd Thickness Based on Gravity Loads

NA

Req'd Thickness Based on Internal Pressure

NA

Req'd Thickness Based on External Pressure

NA

Plate Thickness (Min. Req'd. 5.8)

6

Annular Compression Ring

No

Roof

Shell

Bottom

Structure

Access

Design

Rows

Foundation

Annular Ring

B

Plates Design Calculations

Slope Bottom (Cone Up-Down)

Material

A36

JE Detail

Joint Efficiency (1 = 100%)

1

Corrosion Allowance

1.6

Bottom Insulation Type

Bottom Insulation Thickness (mm)

0

Bottom Insulation Density

130

kg/m³

Plate Thickness (t-Req'd 7.6)

8

Sketch Plate Thickness

8

Outside Projection (Chime Distance)

50

Min Chime Distance For Drawings

50

Annular Ring Required

No

Annular Ring

Yes

Bottom Apex

Bottom Rise Per 12

0.12

Highest or Lowest Distance (mm)

82.770024998125

Slope Angle

0.572938697683

Highest Point Radial Distance

0

Highest Point Orientation Angle

0

Apex Diameter

130

Bottom to Shell Attachment Type

External

Course (1 Bottom) (7 Top)	Width (mm)	Material	CA	JE	Min Yield Strength (mpa)	Tensile Strength (mpa)	Sd (mpa)	St (mpa)	t-min Erection (mm)	t-Design t-T (mm)	t-Test (Tt) (mm)	t-min Seismic (mm)	t-min External Pressure (mm)	t-min (mm)	t-Actual (T-use) (mm)	Max LL @ Pi (m)	Max Pi @ LL (kPa)
7	1800	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6	2.3442	0.6963	2.5474	NA	6	6	21.4819	64.9922
6	1800	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6	3.3364	1.6247	3.5109	NA	6	6	19.6819	47.3522
5	1800	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6	4.3287	2.5532	4.4568	NA	6	6	17.8819	29.7122
4	2400	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6	5.6517	3.7911	5.6758	NA	6	6	15.4819	6.1922
3	2400	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6	6.9747	5.0289	6.8462	NA	6.9747	8	16.71	18.2278
2	2400	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6	8.2977	6.2668	7.9712	NA	8.2977	9	16.124	12.4856
1	2400	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6	9.6207	7.5047	9.0608	NA	9.6207	12	19.1662	42.2989

Notes:

1.- CA = Corrosion Allowance per API-650 5.3.2.

2.- JE = Joint Efficiency per API-650.

3.- Sd = Maximum allowable product design stress per API-650 5.6.2.1.

4.- St = Maximum allowable hydrostatic test stress.

5.- t-min erection = Based on erection requirements per API-650 5.6.1.1.

6.- t-Design (Td) = Design shell thickness per API-650 5.7.4.1 and 5.7.4.2.

7.- t-Test (Tt) = Hydrostatic test shell thickness.

8.- t-min Seismic = Based on seismic requirements per API-650 Appendix E.

9.- t-min External Pressure = Based on external pressure requirements per API-650 Appendix V.8.1.3.

Initialize

Initialize Without External Pressure

Reset

Display Courses

JE Table 4.2

Apply

Initialize Fractional Precision

1

Reverse?

Check Courses Vertical Axial Load

1

2

3

4

5

6

7

En la Figura 24 se muestra la pestaña donde se desarrolla el diseño del sistema de anclaje mecánico del tanque.

Figura 24

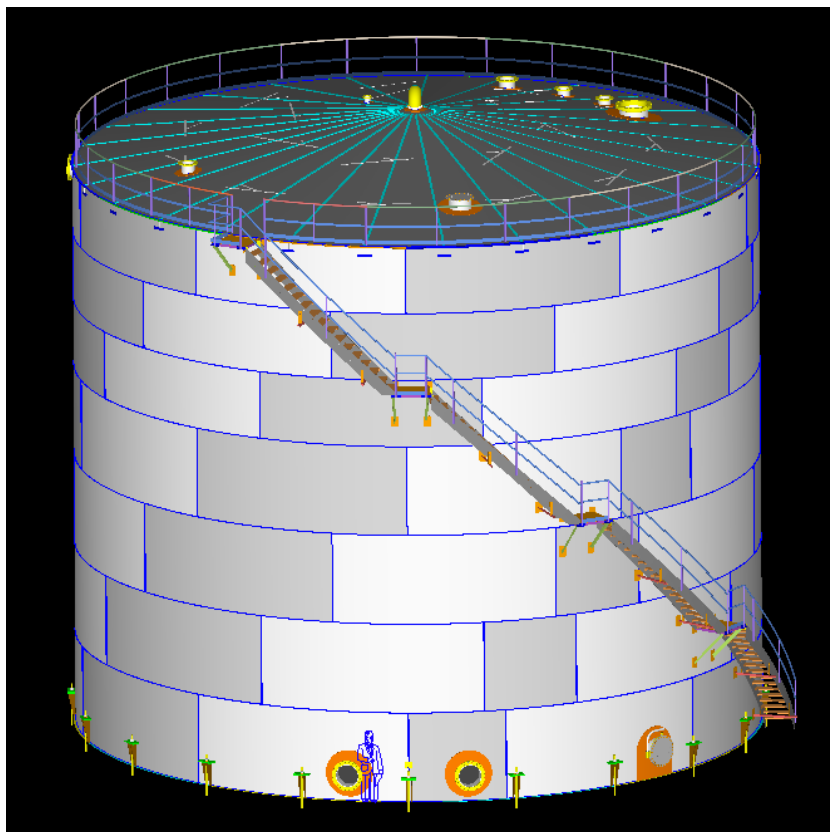
Pestañas de diseño del sistema de anclaje mecánico del AMETank

Lugs		Anchors		Cable Trays		Davits		Shell Insulation Support		Shell Foam Chamber Shield	
Layout Configuration Drawing											
Anchor Quantity		20		Bolt Top Edge To Top Plate Distance		180.009799999999					
Anchor Type		Anchor Chair		Bolt Eccentricity Temperature Method		Expansion On					
Anchor Chair Detail											
Label		Anchor-Chair-Bolt		Bolt Dist. From Outer Shell (e) (Min. 82mm)		95					
Custom Mark				Bolt Distance Below Tank Bottom		250					
Standard Mark		<Unbound> !		n Threads Per Unit Length		4.5					
Start Angle		0		Bolt Thread Length		180.009799999999					
Max Arc Spacing Between Anchor Chairs				Thread Pitch		0.22					
				Anchor Bolt Material		A307					
Anchor Chair Position Angle List											
Anchor Chair Height (h) (Min. 305mm)		675		Upper Nut2		☐					
Anchor Chair Material		A36		Underground Options		☐					
Anchor Chair Corrosion Allowance		0		Plate		☐					
Coupling Nut Length		153		Washer		☐					
Top Plate				Washer Diameter		114.3					
☐ Edge Straight?				Washer Thickness		6.35					
Top Plate Width (a)		400		RePad		☐					
Top Plate Center Length (b) (Min. 130mm)		200		Repad Type		None					
Top Plate Outer Edge Length		202.21953652587		Stress		☐					
Top Plate Thickness (c) (Min. 38mm)		40		Top plate Allowable stress (MPa)		212.8					
Plate Root Opening (s)		7		Top Plate Actual Stress (MPa)		183.2765					
Top Plate Chamfer Width		0		Shell Allowable stress (MPa)		208.3333					
Top Plate Chamfer Length		0		Shell Actual Stress (MPa)		202.0274					
☒ Top Plate Slotted Hole?				Anchor Chair Total Weight (Kgs)		1212 !					
Top Plate Slotted Hole Length		102		Anchor Chair Table							
Side Plates											
Plates Spacing (g) (Min. 84mm)		100									
Lower Width		50									
Chamfer Length		10									
Thickness (j) (Min. 30mm)		30									
Anchor Bolt											
Anchor Bolt Design Based On		Design Temp									
Anchor Bolt Type		Bolt									
Anchor Bolt BOM Description		BOLT									
☒ Bolts By Others?											
Anchor Bolt Corrosion Allowance		1.6									
Anchor Bolt Required Diameter (mm)		55.4									
Bolt Nominal Size (d) (Min. m56)		2 1/4									

Se presenta resultados resumidos del diseño en AMETank, para mayor detalle se adjunta el reporte del diseño. Finalmente, en la Figura 25 se muestra el 3D generado por el software.

Figura 25

Vista 3D del tanque generado por el software AMETank



Nota: Empleando el software también se desarrolla el diseño de las escaleras y barandas de seguridad según el estándar API 650.

Capítulo IV. Resultados y Contrastación de Hipótesis

4.1 Análisis de resultados

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos en el Capítulo III, así como su significación y relación con los objetivos de la investigación. Los puntos clave para la interpretación incluyen los parámetros hidráulicos de la bomba, las características de las tuberías, los costos de implementación de la bomba y las características del tanque de almacenamiento.

4.1.1 *Determinación de parámetros de operación de las bombas*

Los parámetros fueron obtenidos considerando el funcionamiento simultáneo de las cuatro bombas en paralelos, resultando el parámetro de operación 720 m³/h con una altura dinámica total (TDH) de 322 m.c.a y una eficiencia del 79 % por bomba. A partir de estos datos, se determina los parámetros para la configuración de una, dos y tres bombas funcionamiento simultáneamente. La finalidad de obtener los puntos de operación en las distintas configuraciones es garantizar el caudal requerido hacía la estación de bombeo N°3 durante todo el año y en diferentes condiciones.

En la evaluación hidráulico en estado transitorio, se identificó que el primer tramo de la línea de impulsión presentaría fallas. Inicialmente, tras el análisis en estado estable, se decidió dividir en dos tramos, siendo el segundo de un material con menor presión de trabajo. Los resultados del análisis en estado transitorio validan esta decisión, debido a que las sobrepresiones en el segundo tramo presentan una reducción significativa, resultandos inferiores a la sobrepresión admisible del material.

Posteriormente, se implementó un sistema de protección contra sobrepresiones mediante válvulas anticipadoras de ondas. Esta medida permite reducir los valores de sobrepresiones a niveles inferiores a las limites admisibles de sobrepresiones de cada

material, garantizando así la integridad estructural ante posibles sobrepresiones generados por corte de energía eléctrica.

4.1.2 Evaluación técnico-económico de las alternativas para implementar las bombas

De la evaluación económica se identificó que las bombas repotenciadas en el taller del proveedor (Alternativa 02) generan costos más bajos en comparación a la otra alternativa. Se observó una diferencia de 27,736.91 USD respecto a la Alternativa 01, que considera la repotenciación en mina. Así mismo, la alternativa de repotenciar en mina conlleva riesgo de depender de la disponibilidad de otras áreas o de otras contratistas para realizar la repotenciación.

4.1.3 Diseño de tanque de almacenamiento

A partir de los cálculos iniciales para determinar los espesores de las planchas a emplear en el fondo, el casco y el techo de tanque, se establecieron los siguientes espesores: 8 mm para el fondo, 6mm para el techo, y el casco consistirá en 4 anillos de 6 mm, así como un anillo de 8 mm, uno de 9 mm y otro de 12 mm. En estos anillos se emplea un ancho mínimo de las planchas de 1 800 mm según lo indicado en el estándar API 650.

Posteriormente, se determinó que el tanque debe ser anclado mecánicamente para garantizar su estabilidad frente a cargas de viento y sísmicos. Este requerimiento fue validado mediante el software de diseño AMETank, que indica la necesidad de emplear 20 pernos de 2 ¼ pulgadas para el anclaje del tanque.

Así mismo, el software nos define las dimensiones del anillo superior de refuerzo que corresponde a un perfil 2x2x1/4 pulgadas, así como el diseño de barandas y una escalera en espiral. Además, se obtuvieron las estructuras de soporte de techo, que incluye una tubería de 10 pulgada de cedula 80, 27 canales C9x15 para la viga principal y C4x5.4 para viga secundaria.

Finalmente, tras ingresar los parámetros de diseño y mantener una interacción continua con el software, se realizó la verificación del diseño del tanque, lo que valida los cálculos iniciales.

4.2 Contrastación de hipótesis

Los parámetros de las bombas obtenidos para el diseño de la estación de bombeo N°2, junto con la línea de impulsión, confirman que se garantiza el suministro de agua fresca durante todo el año en diferentes condiciones climáticas. Asimismo, se asegura que las tuberías y equipos funcionen de manera segura y eficiente a lo largo de su vida útil.

Por los resultados de la evaluación técnico-económica se corrobora que la repotenciación de las bombas en el taller del proveedor optimiza el costo de capital. El servicio en específico de realizar la repotenciación presenta una diferencia de 26,820.00 USD, siendo una cifra significativa en comparación con las variaciones de costos en otras actividades.

Del resultado obtenido en el reporte del diseño empelando el software AMETank se valida aspectos como la estabilidad y la integridad estructural, confirmando que el tanque está diseñado para operar de manera segura en el entorno minero.

Finalmente, válidas las hipótesis específicas del estudio se demuestra que el diseño de una estación de bombeo de agua fresca reubicado garantizará la continuidad del suministro de agua fresca durante la ampliación del tajo en una mina.

Conclusiones

- Para los parámetros de operación requerido considerando bombas de la misma marca y modelo que el existente, se requiere que el diámetro del impulsor sea 732 mm y un motor nuevo por bomba con una potencia de placa de 1 700 hp.
- La implementación de válvula anticipadora de onda alivia las sobretensiones generadas por cortes intempestivos de energía eléctrica, reduciendo el valor máximo de 851.0 psig a 467.9 psig.
- La alternativa seleccionada corresponde a la repotenciación en el taller del proveedor, cuyo costo de capital es menor en 27,736.91 USD en comparación a la alternativa de repotenciación en mina.
- El tanque presenta relación (altura/ diámetro) de 0.83, con un peso total del tanque es de 94.2 toneladas donde aproximadamente el 55 % corresponde al peso de las planchas del casco.
- El tanque contará con 20 silletas de anclaje, con pernos de 2 ¼ pulgadas, para garantizar la estabilidad del tanque antes cargas sísmicas.

Recomendaciones

- Ejecutar un análisis de elementos finitos en la estructura del tanque bajo diversas condiciones de carga, para identificar los esfuerzos máximos generados por la implementación de las boquillas con la finalidad realizar algún acondicionamiento de refuerzo.
- Realizar una evaluación técnico-económica que incluya obras civiles, eléctricos y otros trabajos requeridos para la instalación y construcción de la estación de bombeo.
- Desarrollar evaluaciones hidráulicas de las estaciones de bombeo 001/B y clarificación con el objetivo de validar una correcta operación, considerando la nueva ubicación de la estación de bombeo N°2.

Referencias bibliográficas

- Agboola, O., Akinnuli, B., Kareem, B., & Akintunde, M. (2020). Decision on the selection of the best height-diameter ratio for the optimal design of 13,000 m³. *Cogent Engineering.*, 7(1), 1770913. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1770913>.
- Alexandra, N., Rubio, E., Andrés, R., & Eureka, K. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, 40(3), 222-245. <https://doi.org/10.1287/inte.1090.0492>
- API. (2020). Welded Steel Tanks for Oil Storage: API Standard 650. New York: American Petroleum Institute.
- Chuquin, M. (2022). *Diseño estructural de tanque agitador para almacenar 1900 m³ de Milk of Lime en la empresa Minera Chinalco Perú*. [Tesis de pregrado. Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8703>.
- De las Heras, S. (2011). Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas. Iniciativa Digital Politécnica.
- Deng, T., Gong, J., Wu, H., Zhang, Y., Zhang, S., Lin, Q., & Liu, H. (2013). Hydraulic Transients Induced by Pigging Operation. *Hindawi Publishing Corporation*, 2013, 231260. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2013/231260>.
- Farfan, A. (2022). *Cálculo hidráulico del sistema de bombeo de agua fresca para la planta minera Las Bambas Cuzco*. [Informe profesional de pregrado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/18368>.

- Jimenez, W., & Pin, J. (2017). *Análisis y diseño de una estación de bombeo para aguas servidas en el sector cristo del consuelo cooperativas Las Ranas*. [Trabajo de titulación, Universidad de Guayaquil], Repositorio institucional. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/32640>.
- Luque, E. (2016). *Modelo de estimación y comparación de velocidades reale vs simuladas de los camiones Komatsu 930E en minera Los Pelambres - Antofagasta Minerals Chile*. [Tesis de grado, Universidad Nacional del Antiplano]. Repositorio institucional Vicerrectorado de Investigación. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/3317>.
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). *Mecánica de fluidos*. Pearson educación.
- Muñoz, V. (2021). *Diseño, cálculo y optimización de un depósito estándar de productos derivados del petróleo según el código API 650*. [Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio Digital. <http://hdl.handle.net/10317/9920>.
- Vallejos, J. (2020). *Comparación técnica y económica de dos diseños de impulsión de larga distancia para agua desalinizada en la gran minería*. [Tesis de pregrado. Universidad de Chile]. Repositorio académico. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174439>.

Anexos

Anexo 1. Reporte de resultados en AFT Fathom 13.0	1
Anexo 2. Reporte de resultados en Hammer Connected – Escenario 1: Parada intempestiva sin atenuación de fenómenos transitorios	10
Anexo 3. Reporte de resultados en Hammer Connected – Escenario 2: Parada intempestiva con atenuación de fenómenos transitorios.....	33
Anexo 4. Reporte de resultados AMETank	56

Anexo 1. Reporte de resultados en AFT Fathom 13.0

AFT Fathom 13 (Output) 30/10/2024 Page 1	AFT Fathom Model Diseño de la Reubicación de una Estación de Bombeo de Agua Fresca Anexo 1 - Output de cálculo Cuatro (4) bomba operando	
<u>Model Reference Information</u> <u>General</u> Title: AFT Fathom Model Analysis run on: 30/10/2024 2:09:10 Application version: AFT Fathom Version 13 (2024.07.23) Input File: C:\Users\Johar\Documents\Tesis Documentos\MCC Sistema de bombeo\Modelados AFT Fathom\Cálculos finales tesis - pipeline en dos tramos.fth Scenario: Base Scenario/Cuatro (4) bombas en operación Output File: C:\Users\Johar\Documents\Tesis Documentos\MCC Sistema de bombeo\Modelados AFT Fathom\Cálculos finales tesis - pipeline en dos tramos_F2.out Execution Time= 0,54 seconds Total Number Of Head/Pressure Iterations= 414 Total Number Of Flow Iterations= 33 Total Number Of Temperature Iterations= 0 Number Of Pipes= 62 Number Of Junctions= 60 Matrix Method= Gaussian Elimination Pressure/Head Tolerance= 0,0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0,0001 relative change Temperature Tolerance= 0,0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Pressure Relaxation= (Automatic) Constant Fluid Property Model Fluid Library: AFT Standard Fluid: Water (liquid) Max Fluid Temperature Data= 485 deg. K Min Fluid Temperature Data= 273,15 deg. K Temperature= 15 deg. C Density= 999,86 kg/m3 Viscosity= 0,00114 kg/sec-m Vapor Pressure= 0,01706 bar Viscosity Model= Newtonian Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Spray Discharge, Relief Valve Ambient Pressure (constant)= 0,65 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300 Total Inflow= 2.881 m3/hr Total Outflow= 2.881 m3/hr Maximum Static Pressure is 32,28 bar at Pipe 25 Inlet Minimum Static Pressure is 0,6416 bar at Pipe 206 Outlet <u>Warnings</u> No Warnings <u>Design Alerts</u> No Design Alerts Defined		

AFT Fathom 13 (Output) 30/10/2024 Page 2	AFT Fathom Model Diseño de la Reubicación de una Estación de Bombeo de Agua Fresca Anexo 1 - Output de cálculo Cuatro (4) bomba operando	
--	--	---

Pump Summary

Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (m3/hr)	Mass Flow (kg/sec)	dP (bar)	dH (meters)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (kW)	BEP (m3/hr)
18	Show	2132-PPC-0116	720,1	200,0	31,59	322,1	75,21	100,0	839,5	909,3
19	Show	2132-PPC-0115	720,2	200,0	31,59	322,1	75,22	100,0	839,5	909,3
20	Show	2132-PPC-0114	720,3	200,0	31,59	322,1	75,22	100,0	839,6	909,3
21	Show	2132-PPC-0113	720,3	200,1	31,59	322,1	75,22	100,0	839,6	909,3

Jct	% of BEP (Percent)	NPSHA (meters)	NPSHR (meters)
18	79,19	7,425	2,711
19	79,20	7,429	2,711
20	79,21	7,429	2,712
21	79,22	7,425	2,712

Valve Summary

Jct	Name	Valve Type	Vol. Flow (m3/hr)	Mass Flow (kg/sec)	dP Stag. (bar)	dH (meters)	P Static In (bar)	Cv	K	Valve State
10	Valve	REGULAR	720,1	200,0	0,004682	0,04775	0,7385	12.172	0,3250	Open
11	Valve	REGULAR	720,2	200,0	0,004683	0,04776	0,7390	12.172	0,3250	Open
12	Valve	REGULAR	720,3	200,0	0,004683	0,04776	0,7390	12.172	0,3250	Open
13	Valve	REGULAR	720,3	200,1	0,004685	0,04778	0,7385	12.172	0,3250	Open
34	Valve	REGULAR	720,1	200,0	0,012412	0,12659	31,9130	7.475	0,4550	Open
35	Valve	REGULAR	720,2	200,0	0,012414	0,12661	31,9128	7.475	0,4550	Open
36	Valve	REGULAR	720,3	200,0	0,012417	0,12663	31,9122	7.475	0,4550	Open
37	Valve	REGULAR	720,3	200,1	0,012419	0,12666	31,9111	7.475	0,4550	Open
202	Control Valve	FCV	2.880,0	799,9	1,599974	16,31748	4,1670	2.633	17,6304	Open
30	Check Valve	CHECK	720,1	200,0	0,353881	3,60909	32,2686	1.400	12,9726	Open
31	Check Valve	CHECK	720,2	200,0	0,353947	3,60976	32,2685	1.400	12,9726	Open
32	Check Valve	CHECK	720,3	200,0	0,354008	3,61038	32,2680	1.400	12,9726	Open
33	Check Valve	CHECK	720,3	200,1	0,354089	3,61120	32,2669	1.400	12,9726	Open

Reservoir Summary

Jct	Name	Type	Liq. Height (meters)	Liq. Elevation (meters)	Surface Pressure (bar)	Liquid Volume (meters3)	Liquid Mass (kg)	Net Vol. Flow (m3/hr)	Net Mass Flow (kg/sec)
1	2132-TKF-0085 D:18m x H:15m	Infinite	N/A	3.807	0,6586	N/A	N/A	-2.880	-799,9
207	2132-TKF-0080	Infinite	N/A	4.079	0,6586	N/A	N/A	2.880	799,9

Pipe Output Table



Pipe	Name	Vol. Flow Rate (m3/hr)	Velocity (meters/sec)	P Static Max (bar)	P Static Min (bar)	Elevation Inlet (meters)	Elevation Outlet (meters)	dP Stag. Total (bar)	dP Static Total (bar)
1	Pipe	1.439,9	1,4603	0,7460	0,7456	3.806	3.806	0,0004961	0,0004961
2	Pipe	1.440,2	1,4605	0,7460	0,7456	3.806	3.806	0,0004963	0,0004963
3	Pipe	0,0	0,0000	0,7533	0,7533	3.806	3.806	0,0000000	0,0000000
4	Pipe	720,1	0,7303	0,7511	0,7506	3.806	3.806	0,0004542	0,0004542
5	Pipe	1.439,9	1,4603	0,7438	0,7431	3.806	3.806	0,0006706	0,0006706
6	Pipe	1.440,2	1,4605	0,7438	0,7431	3.806	3.806	0,0006709	0,0006709
7	Pipe	720,3	0,7305	0,7511	0,7506	3.806	3.806	0,0004545	0,0004545
8	Pipe	0,0	0,0000	0,7533	0,7533	3.806	3.806	0,0000000	0,0000000
9	Pipe	720,1	1,6975	0,7389	0,7385	3.806	3.806	0,0003673	0,0003673
10	Pipe	720,2	1,6977	0,7394	0,7390	3.806	3.806	0,0003673	0,0003673
11	Pipe	720,3	1,6978	0,7393	0,7390	3.806	3.806	0,0003674	0,0003674
12	Pipe	720,3	1,6980	0,7389	0,7385	3.806	3.806	0,0003675	0,0003675
13	Pipe	720,1	1,6975	0,7339	0,7333	3.806	3.806	0,0005563	0,0005563
14	Pipe	720,2	1,6977	0,7343	0,7337	3.806	3.806	0,0005564	0,0005564
15	Pipe	720,3	1,6978	0,7343	0,7337	3.806	3.806	0,0005565	0,0005565
16	Pipe	720,3	1,6980	0,7338	0,7333	3.806	3.806	0,0005566	0,0005566
17	Pipe	720,1	2,2486	0,7219	0,7198	3.806	3.806	0,0020535	0,0020535
18	Pipe	720,2	2,2488	0,7223	0,7203	3.806	3.806	0,0020539	0,0020539
19	Pipe	720,3	2,2490	0,7223	0,7202	3.806	3.806	0,0020542	0,0020542
20	Pipe	720,3	2,2493	0,7218	0,7198	3.806	3.806	0,0020547	0,0020547
21	Pipe	720,1	6,1977	32,1405	32,1369	3.806	3.806	0,0035730	0,0035730
22	Pipe	720,2	6,1983	32,1404	32,1368	3.806	3.806	0,0035736	0,0035736
23	Pipe	720,3	6,1989	32,1399	32,1363	3.806	3.806	0,0035742	0,0035742
24	Pipe	720,3	6,1996	32,1387	32,1351	3.806	3.806	0,0035750	0,0035750
25	Pipe	720,1	2,3359	32,2797	32,2760	3.806	3.806	0,0037504	0,0037504
26	Pipe	720,2	2,3362	32,2796	32,2759	3.806	3.806	0,0037511	0,0037511
27	Pipe	720,3	2,3364	32,2791	32,2754	3.806	3.806	0,0037517	0,0037517
28	Pipe	720,3	2,3366	32,2780	32,2743	3.806	3.806	0,0037525	0,0037525
29	Pipe	720,1	2,3359	32,2710	32,2686	3.806	3.806	0,0024041	0,0024041
30	Pipe	720,2	2,3362	32,2709	32,2685	3.806	3.806	0,0024045	0,0024045
31	Pipe	720,3	2,3364	32,2704	32,2680	3.806	3.806	0,0024049	0,0024049
32	Pipe	720,3	2,3366	32,2693	32,2669	3.806	3.806	0,0024054	0,0024054
33	Pipe	720,1	2,3359	31,9147	31,9130	3.806	3.806	0,0017670	0,0017670
34	Pipe	720,2	2,3362	31,9146	31,9128	3.806	3.806	0,0017673	0,0017673
35	Pipe	720,3	2,3364	31,9140	31,9122	3.806	3.806	0,0017676	0,0017676
36	Pipe	720,3	2,3366	31,9128	31,9111	3.806	3.806	0,0017680	0,0017680
37	Pipe	720,1	2,3359	31,9005	31,8993	3.806	3.806	0,0012020	0,0012020
38	Pipe	720,2	2,3362	31,9004	31,8992	3.806	3.806	0,0012023	0,0012023
39	Pipe	720,3	2,3364	31,8998	31,8986	3.806	3.806	0,0012025	0,0012025
40	Pipe	720,3	2,3366	31,8986	31,8974	3.806	3.806	0,0012027	0,0012027
41	Pipe	720,1	2,3359	32,1617	31,8944	3.806	3.803	-0,2673536	-0,2673536
42	Pipe	720,2	2,3362	32,1614	31,8942	3.806	3.803	-0,2671690	-0,2671690
43	Pipe	720,3	2,3364	32,1608	31,8937	3.806	3.803	-0,2671751	-0,2671751
44	Pipe	720,3	2,3366	32,1596	31,8925	3.806	3.803	-0,2671718	-0,2671718
45	Pipe	0,0	0,0000	32,1890	32,1890	3.803	3.803	0,0000000	0,0000000



Pipe	dP Gravity (bar)	dH (meters)	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)
1	0,00005837	0,004465	0,7460	0,7456	0,7567	0,7562
2	0,00005837	0,004466	0,7460	0,7456	0,7567	0,7562
3	0,00000000	0,000000	0,7533	0,7533	0,7533	0,7533
4	0,00000000	0,004632	0,7511	0,7506	0,7538	0,7533
5	0,00000000	0,006840	0,7438	0,7431	0,7544	0,7538
6	0,00000000	0,006842	0,7438	0,7431	0,7544	0,7538
7	0,00000000	0,004635	0,7511	0,7506	0,7538	0,7533
8	0,00000000	0,000000	0,7533	0,7533	0,7533	0,7533
9	0,00000000	0,003746	0,7389	0,7385	0,7533	0,7529
10	0,00000000	0,003746	0,7394	0,7390	0,7538	0,7534
11	0,00000000	0,003747	0,7393	0,7390	0,7538	0,7534
12	0,00000000	0,003748	0,7389	0,7385	0,7533	0,7529
13	0,00000000	0,005673	0,7339	0,7333	0,7483	0,7477
14	0,00000000	0,005674	0,7343	0,7337	0,7487	0,7482
15	0,00000000	0,005675	0,7343	0,7337	0,7487	0,7482
16	0,00000000	0,005677	0,7338	0,7333	0,7483	0,7477
17	0,00000000	0,020943	0,7219	0,7198	0,7471	0,7451
18	0,00000000	0,020947	0,7223	0,7203	0,7476	0,7455
19	0,00000000	0,020950	0,7223	0,7202	0,7476	0,7455
20	0,00000000	0,020955	0,7218	0,7198	0,7471	0,7451
21	0,00000000	0,036439	32,1405	32,1369	32,3325	32,3289
22	0,00000000	0,036446	32,1404	32,1368	32,3325	32,3289
23	0,00000000	0,036452	32,1399	32,1363	32,3320	32,3284
24	0,00000000	0,036460	32,1387	32,1351	32,3309	32,3273
25	0,00000000	0,038249	32,2797	32,2760	32,3070	32,3033
26	0,00000000	0,038256	32,2796	32,2759	32,3069	32,3032
27	0,00000000	0,038262	32,2791	32,2754	32,3064	32,3027
28	0,00000000	0,038270	32,2780	32,2743	32,3053	32,3016
29	0,00000000	0,024518	32,2710	32,2686	32,2983	32,2959
30	0,00000000	0,024523	32,2709	32,2685	32,2982	32,2958
31	0,00000000	0,024527	32,2704	32,2680	32,2977	32,2953
32	0,00000000	0,024532	32,2693	32,2669	32,2966	32,2942
33	0,00000000	0,018021	31,9147	31,9130	31,9420	31,9402
34	0,00000000	0,018024	31,9146	31,9128	31,9419	31,9401
35	0,00000000	0,018027	31,9140	31,9122	31,9413	31,9395
36	0,00000000	0,018031	31,9128	31,9111	31,9401	31,9383
37	0,00000000	0,012259	31,9005	31,8993	31,9278	31,9266
38	0,00000000	0,012261	31,9004	31,8992	31,9277	31,9265
39	0,00000000	0,012263	31,8998	31,8986	31,9271	31,9259
40	0,00000000	0,012266	31,8986	31,8974	31,9259	31,9247
41	-0,27067122	0,033835	31,8944	32,1617	31,9217	32,1890
42	-0,27067122	0,035718	31,8942	32,1614	31,9215	32,1887
43	-0,27067122	0,035656	31,8937	32,1608	31,9209	32,1881
44	-0,27067122	0,035689	31,8925	32,1596	31,9198	32,1869
45	0,00000000	0,000000	32,1890	32,1890	32,1890	32,1890



Pipe	Name	Vol. Flow Rate (m3/hr)	Velocity (meters/sec)	P Static Max (bar)	P Static Min (bar)	Elevation Inlet (meters)	Elevation Outlet (meters)	dP Stag. Total (bar)	dP Static Total (bar)
46	Pipe	720,1	0,4694	32,1879	32,1875	3.803	3.803	0,0003321	0,0003321
47	Pipe	1.440,4	0,9389	32,1842	32,1837	3.803	3.803	0,0005574	0,0005574
48	Pipe	2.160,3	1,4082	32,1782	32,1770	3.803	3.803	0,0011965	0,0011965
49	Pipe	2.880,0	1,8773	32,1693	32,1657	3.803	3.803	0,0035758	0,0035758
100	Pipe	2.880,0	1,8142	32,1639	18,8563	3.803	3.932	13,3075794	13,3075794
101	Pipe	2.880,0	1,9101	19,1380	10,8365	3.932	3.974	5,7893536	5,7893536
102	Pipe	2.880,0	1,8296	13,0667	10,8233	3.974	3.996	2,2433485	2,2433485
103	Pipe	2.880,0	1,8454	11,0340	10,4916	3.996	3.999	0,3314920	0,3314920
104	Pipe	2.880,0	1,8296	10,4919	9,3079	3.999	4.010	1,1839663	1,1839663
105	Pipe	2.880,0	1,8454	9,8796	4,2548	4.010	4.059	5,0528013	5,0528013
200	Pipe	2.880,0	1,8454	4,2548	4,2523	4.059	4.059	0,0025680	0,0025680
201	Pipe	2.880,0	4,2606	4,1739	4,1670	4.059	4.059	0,0068623	0,0068623
202	Pipe	2.880,0	4,2606	2,5670	2,5602	4.059	4.059	0,0068623	0,0068623
203	Pipe	2.880,0	1,8454	2,6253	2,6204	4.059	4.059	0,0049358	0,0049358
204	Pipe	2.880,0	1,8454	2,6175	0,6498	4.059	4.079	1,9676794	1,9676794
205	Pipe	2.880,0	1,8454	0,6470	0,6458	4.079	4.079	0,0011673	0,0011673
206	Pipe	2.880,0	1,8454	0,6429	0,6416	4.079	4.079	0,0013218	0,0013218

Pipe	dP Gravity (bar)	dH (meters)	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)
46	0,00000000	0,003387	32,1879	32,1875	32,1890	32,1887
47	0,00000000	0,005685	32,1842	32,1837	32,1887	32,1881
48	0,00000000	0,012203	32,1782	32,1770	32,1881	32,1869
49	0,00099232	0,026348	32,1693	32,1657	32,1869	32,1833
100	12,70114654	6,184758	32,1639	18,8563	32,1804	18,8728
101	4,11715622	17,054052	18,8545	13,0652	18,8728	13,0834
102	2,08402841	1,624840	13,0667	10,8233	13,0834	10,8401
103	0,30435190	0,276791	10,8231	10,4916	10,8401	10,5086
104	1,10221039	0,833794	10,4919	9,3079	10,5086	9,3246
105	4,81403124	2,435118	9,3076	4,2548	9,3246	4,2718
200	0,00000000	0,026190	4,2548	4,2523	4,2718	4,2693
201	0,00000000	0,069985	4,1739	4,1670	4,2646	4,2578
202	0,00000000	0,069986	2,5670	2,5602	2,6578	2,6509
203	0,00000000	0,050338	2,6253	2,6204	2,6423	2,6374
204	1,96100931	0,068025	2,6175	0,6498	2,6345	0,6668
205	0,00000000	0,011904	0,6470	0,6458	0,6640	0,6628
206	0,00000000	0,013480	0,6429	0,6416	0,6599	0,6586

All Junction Table

Jct	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m3/hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)
1	2132-TKF-0085 D:18m x H:15m	0,6586	0,7567	0,6586	0,7567	N/A	N/A
2	Dead End	0,7533	0,7533	0,7533	0,7533	0,0	0,0



Jct	Loss Factor (K)
1	0,00000
2	0,00000

Jct	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m3/hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)
3	Tee or Wye	0,7500	0,7500	0,7533	0,7533	N/A	N/A
4	Tee or Wye	0,7454	0,7454	0,7538	0,7538	N/A	N/A
5	Bend	0,7456	0,7438	0,7562	0,7544	1.439,9	399,9
6	Bend	0,7456	0,7438	0,7562	0,7544	1.440,2	400,0
7	Tee or Wye	0,7454	0,7454	0,7538	0,7538	N/A	N/A
8	Tee or Wye	0,7500	0,7500	0,7533	0,7533	N/A	N/A
9	Dead End	0,7533	0,7533	0,7533	0,7533	0,0	0,0
10	Valve	0,7385	0,7339	0,7529	0,7483	720,1	200,0
11	Valve	0,7390	0,7343	0,7534	0,7487	720,2	200,0
12	Valve	0,7390	0,7343	0,7534	0,7487	720,3	200,0
13	Valve	0,7385	0,7338	0,7529	0,7483	720,3	200,1
14	Area Change	0,7333	0,7219	0,7477	0,7471	720,1	200,0
15	Area Change	0,7337	0,7223	0,7482	0,7476	720,2	200,0
16	Area Change	0,7337	0,7223	0,7482	0,7476	720,3	200,0
17	Area Change	0,7333	0,7218	0,7477	0,7471	720,3	200,1
18	2132-PPC-0116	0,7198	32,1405	0,7451	32,3325	720,1	200,0
19	2132-PPC-0115	0,7203	32,1404	0,7455	32,3325	720,2	200,0
20	2132-PPC-0114	0,7202	32,1399	0,7455	32,3320	720,3	200,0
21	2132-PPC-0113	0,7198	32,1387	0,7451	32,3309	720,3	200,1
22	Area Change	32,1369	32,2797	32,3289	32,3070	720,1	200,0
23	Area Change	32,1368	32,2796	32,3289	32,3069	720,2	200,0
24	Area Change	32,1363	32,2791	32,3284	32,3064	720,3	200,0
25	Area Change	32,1351	32,2780	32,3273	32,3053	720,3	200,1
26	Bend	32,2760	32,2710	32,3033	32,2983	720,1	200,0
27	Bend	32,2759	32,2709	32,3032	32,2982	720,2	200,0
28	Bend	32,2754	32,2704	32,3027	32,2977	720,3	200,0
29	Bend	32,2743	32,2693	32,3016	32,2966	720,3	200,1
30	Check Valve	32,2686	31,9147	32,2959	31,9420	720,1	200,0
31	Check Valve	32,2685	31,9146	32,2958	31,9419	720,2	200,0
32	Check Valve	32,2680	31,9140	32,2953	31,9413	720,3	200,0
33	Check Valve	32,2669	31,9128	32,2942	31,9401	720,3	200,1
34	Valve	31,9130	31,9005	31,9402	31,9278	720,1	200,0
35	Valve	31,9128	31,9004	31,9401	31,9277	720,2	200,0
36	Valve	31,9122	31,8998	31,9395	31,9271	720,3	200,0
37	Valve	31,9111	31,8986	31,9383	31,9259	720,3	200,1
38	Bend	31,8993	31,8944	31,9266	31,9217	720,1	200,0
39	Bend	31,8992	31,8942	31,9265	31,9215	720,2	200,0
40	Bend	31,8986	31,8937	31,9259	31,9209	720,3	200,0
41	Bend	31,8974	31,8925	31,9247	31,9198	720,3	200,1
42	Dead End	32,1890	32,1890	32,1890	32,1890	0,0	0,0



Jct	Loss Factor (K)
3	0,00000
4	0,00000
5	0,16800
6	0,16800
7	0,00000
8	0,00000
9	0,00000
10	0,32500
11	0,32500
12	0,32500
13	0,32500
14	0,03895
15	0,03895
16	0,03895
17	0,03895
18	0,00000
19	0,00000
20	0,00000
21	0,00000
22	0,11427
23	0,11427
24	0,11427
25	0,11427
26	0,18200
27	0,18200
28	0,18200
29	0,18200
30	12,97255
31	12,97255
32	12,97255
33	12,97255
34	0,45500
35	0,45500
36	0,45500
37	0,45500
38	0,18200
39	0,18200
40	0,18200
41	0,18200
42	0,00000

Jct	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m3/hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)
43	Tee or Wye	32,1846	32,1846	32,1890	32,1890	N/A	N/A
44	Tee or Wye	32,1809	32,1809	32,1887	32,1887	N/A	N/A



Jct	Loss Factor (K)
43	0,00000
44	0,00000

Jct	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m3/hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)
45	Tee or Wye	32,1759	32,1759	32,1881	32,1881	N/A	N/A
46	Tee or Wye	32,1693	32,1693	32,1869	32,1869	N/A	N/A
100	Class Change	32,1657	32,1639	32,1833	32,1804	2.880,0	799,9
101	Thickness Change	18,8563	18,8545	18,8728	18,8728	2.880,0	799,9
106	TIE-IN 004 - Class Change	13,0652	13,0667	13,0834	13,0834	2.880,0	799,9
107	Thickness Change	10,8233	10,8231	10,8401	10,8401	2.880,0	799,9
108	Thickness Change	10,4916	10,4919	10,5086	10,5086	2.880,0	799,9
109	Thickness Change	9,3079	9,3076	9,3246	9,3246	2.880,0	799,9
200	Class Change	4,2548	4,2548	4,2718	4,2718	2.880,0	799,9
201	Area Change	4,2523	4,1739	4,2693	4,2646	2.880,0	799,9
202	Control Valve	4,1670	2,5670	4,2578	2,6578	2.880,0	799,9
203	Area Change	2,5602	2,6253	2,6509	2,6423	2.880,0	799,9
204	Bend	2,6204	2,6175	2,6374	2,6345	2.880,0	799,9
205	Bend	0,6498	0,6470	0,6668	0,6640	2.880,0	799,9
206	Bend	0,6458	0,6429	0,6628	0,6599	2.880,0	799,9
207	2132-TKF-0080	0,6586	0,6586	0,6586	0,6586	2.880,0	799,9

Jct	Loss Factor (K)
45	0,00000
46	0,00000
100	0,16800
101	0,00000
106	0,00000
107	0,00000
108	0,00000
109	0,00000
200	0,00000
201	0,27366
202	17,63036
203	0,09458
204	0,16800
205	0,16800
206	0,16800
207	0,00000

**Anexo 2. Reporte de resultados en Hammer Connected –
Escenario 1: Parada intempestiva sin atenuación de fenómenos
transitorios**

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación

Transient Calculation Summary			
Time Step	0,005600 sec	Specific Gravity	0,998
Number of Time Steps	21309	Wave Speed (Global)	(N/A) m/s
Total Simulated Time	120,0 sec	Vapor Pressure	-14 psi
Number of Nodes	246	Number of Report Paths	1
Number of Pipes	248		

Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P001	T001	3.810,10	J005	3.810,10
P002	T001	3.810,10	J006	3.810,10
P004	J004	3.810,10	J003	3.810,10
P005	J005	3.810,10	J004	3.810,10
P006	J006	3.810,10	J007	3.810,10
P007	J007	3.810,10	J008	3.810,10
P009	J003	3.810,10	J010	3.810,10
P010	J004	3.810,10	J011	3.810,10
P011	J007	3.810,10	J012	3.810,10
P012	J008	3.810,10	J013	3.810,10
P013	J010	3.810,10	J014	3.810,10
P014	J011	3.810,10	J015	3.810,10
P015	J012	3.810,10	J016	3.810,10
P016	J013	3.810,10	J017	3.810,10
P017	J014	3.810,10	PMP018	3.810,00
P018	J015	3.810,10	PMP019	3.810,00
P019	J016	3.810,10	PMP020	3.810,00
P020	J017	3.810,10	PMP021	3.810,00
P021	PMP018	4.132,50	J022	4.132,50
P022	PMP019	4.132,50	J023	4.132,50
P023	PMP020	4.132,50	J024	4.132,50
P024	PMP021	4.132,50	J025	4.132,50
P025	J022	4.132,50	J026	4.132,40
P026	J023	4.132,50	J027	4.132,40
P027	J024	4.132,50	J028	4.132,40
P028	J025	4.132,50	J029	4.132,40
P029	J026	4.132,40	CV030	4.132,40
P030	J027	4.132,40	CV031	4.132,40
P031	J028	4.132,40	CV032	4.132,40
P032	J029	4.132,40	CV033	4.132,40
P033	CV030	4.132,40	J034	4.132,40
P034	CV031	4.132,40	J035	4.132,40
P035	CV032	4.132,40	J036	4.132,40
P036	CV033	4.132,40	J037	4.132,40
P037	J034	4.132,40	J038	4.132,40
P038	J035	4.132,40	J039	4.132,40
P039	J036	4.132,40	J040	4.132,40
P040	J037	4.132,40	J041	4.132,30
P041	J038	4.132,40	J043	4.132,30
P042	J039	4.132,40	J044	4.132,30
P043	J040	4.132,40	J045	4.132,30
P044	J041	4.132,30	J046	4.132,30
P046	J043	4.132,30	J044	4.132,30

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P047	J044	4.132,30	J045	4.132,30
P048	J045	4.132,30	J046	4.132,30
P049	J046	4.132,30	J100-00	4.132,30
P100-01	J100-00	4.132,30	J100-01	4.132,10
P100-02	J100-01	4.132,10	J100-02	4.132,10
P100-03	J100-02	4.132,10	J100-03	4.131,90
P100-04	J100-03	4.131,90	J100-04	4.131,70
P100-05	J100-04	4.131,70	J100-05	4.131,50
P100-06	J100-05	4.131,50	J100-06	4.131,40
P100-07	J100-06	4.131,40	J100-07	4.131,30
P100-08	J100-07	4.131,30	J100-08	4.130,50
P100-09	J100-08	4.130,50	J100-09	4.130,20
P100-10	J100-09	4.130,20	J100-10	4.129,80
P100-11	J100-10	4.129,80	J100-11	4.129,40
P100-12	J100-11	4.129,40	J100-12	4.129,30
P100-13	J100-12	4.129,30	J100-13	4.129,10
P100-14	J100-13	4.129,10	J100-14	4.129,00
P100-15	J100-14	4.129,00	J100-15	4.128,80
P100-16	J100-15	4.128,80	J100-16	4.128,40
P100-17	J100-16	4.128,40	J100-17	4.128,40
P100-18	J100-17	4.128,40	J100-18	4.127,70
P100-19	J100-18	4.127,70	J100-19	4.127,70
P100-20	J100-19	4.127,70	J100-20	4.127,60
P100-21	J100-20	4.127,60	J100-21	4.127,50
P100-22	J100-21	4.127,50	J100-22	4.127,40
P100-23	J100-22	4.127,40	J100-23	4.127,30
P100-24	J100-23	4.127,30	J100-24	4.127,20
P100-25	J100-24	4.127,20	J100-25	4.127,10
P100-26	J100-25	4.127,10	J100-26	4.127,00
P100-27	J100-26	4.127,00	J100-27	4.127,00
P100-28	J100-27	4.127,00	J100-28	4.126,90
P100-29	J100-28	4.126,90	J100-29	4.126,90
P100-30	J100-29	4.126,90	J100-30	4.126,80
P100-31	J100-30	4.126,80	J100-31	4.126,70
P100-32	J100-31	4.126,70	J100-32	4.126,40
P100-33	J100-32	4.126,40	J100-33	4.126,20
P100-34	J100-33	4.126,20	J100-34	4.126,10
P100-35	J100-34	4.126,10	J101-00	4.125,90
P101-01	J101-00	4.125,90	J101-01	4.125,50
P101-02	J101-01	4.125,50	J101-02	4.125,40
P101-03	J101-02	4.125,40	J101-03	4.125,30
P101-04	J101-03	4.125,30	J101-04	4.125,20
P101-05	J101-04	4.125,20	J101-05	4.125,10
P101-06	J101-05	4.125,10	J101-06	4.125,00
P101-07	J101-06	4.125,00	J101-07	4.124,90
P101-08	J101-07	4.124,90	J101-08	4.124,90
P101-09	J101-08	4.124,90	J101-09	4.124,80
P101-10	J101-09	4.124,80	J101-10	4.124,70
P101-11	J101-10	4.124,70	J101-11	4.124,60
P101-12	J101-11	4.124,60	J101-12	4.124,60

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P101-13	J101-12	4.124,60	J101-13	4.124,50
P101-14	J101-13	4.124,50	J101-14	4.124,40
P101-15	J101-14	4.124,40	J101-15	4.124,10
P101-16	J101-15	4.124,10	J101-16	4.124,00
P101-17	J101-16	4.124,00	J101-17	4.123,90
P101-18	J101-17	4.123,90	J101-18	4.123,80
P101-19	J101-18	4.123,80	J101-19	4.123,30
P101-20	J101-19	4.123,30	J101-20	4.123,30
P101-21	J101-20	4.123,30	J101-21	4.123,10
P101-22	J101-21	4.123,10	J101-22	4.122,70
P101-23	J101-22	4.122,70	J101-23	4.122,60
P101-24	J101-23	4.122,60	J101-24	4.122,50
P101-25	J101-24	4.122,50	J101-25	4.122,50
P101-26	J101-25	4.122,50	J101-26	4.122,40
P101-27	J101-26	4.122,40	J101-27	4.122,40
P101-28	J101-27	4.122,40	J101-28	4.122,30
P101-29	J101-28	4.122,30	J101-29	4.122,20
P101-30	J101-29	4.122,20	J101-30	4.122,20
P101-31	J101-30	4.122,20	J101-31	4.121,70
P101-32	J101-31	4.121,70	J101-32	4.120,70
P101-33	J101-32	4.120,70	J101-33	4.120,30
P101-34	J101-33	4.120,30	J101-34	4.120,10
P101-35	J101-34	4.120,10	J101-35	4.119,70
P101-36	J101-35	4.119,70	J101-36	4.119,60
P101-37	J101-36	4.119,60	J101-37	4.119,50
P101-38	J101-37	4.119,50	J101-38	4.119,50
P101-39	J101-38	4.119,50	J101-39	4.119,40
P101-40	J101-39	4.119,40	J101-40	4.119,40
P101-41	J101-40	4.119,40	J101-41	4.119,30
P101-42	J101-41	4.119,30	J101-42	4.119,20
P101-43	J101-42	4.119,20	J101-43	4.119,20
P101-44	J101-43	4.119,20	J101-44	4.119,10
P101-45	J101-44	4.119,10	J101-45	4.118,90
P101-46	J101-45	4.118,90	J101-46	4.118,90
P101-47	J101-46	4.118,90	J101-47	4.118,70
P101-48	J101-47	4.118,70	J101-48	4.118,70
P101-49	J101-48	4.118,70	J101-49	4.118,70
P101-50	J101-49	4.118,70	J101-50	4.118,60
P101-51	J101-50	4.118,60	J101-51	4.118,60
P101-52	J101-51	4.118,60	J101-52	4.118,60
P101-53	J101-52	4.118,60	J101-53	4.118,50
P101-54	J101-53	4.118,50	J101-54	4.118,50
P101-55	J101-54	4.118,50	J101-55	4.118,50
P101-56	J101-55	4.118,50	J101-56	4.118,40
P101-57	J101-56	4.118,40	J101-57	4.118,10
P101-58	J101-57	4.118,10	J101-58	4.118,10
P101-59	J101-58	4.118,10	J101-59	4.118,00
P101-60	J101-59	4.118,00	J101-60	4.118,00
P101-61	J101-60	4.118,00	J101-61	4.117,90
P101-62	J101-61	4.117,90	J101-62	4.117,90

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P101-63	J101-62	4.117,90	J101-63	4.117,80
P101-64	J101-63	4.117,80	J101-64	4.117,80
P101-65	J101-64	4.117,80	J101-65	4.117,70
P101-66	J101-65	4.117,70	J101-66	4.117,70
P101-67	J101-66	4.117,70	J101-67	4.117,60
P101-68	J101-67	4.117,60	J101-68	4.117,50
P101-69	J101-68	4.117,50	J101-69	4.117,40
P101-70	J101-69	4.117,40	J101-70	4.117,30
P101-71	J101-70	4.117,30	J101-71	4.117,20
P101-72	J101-71	4.117,20	J101-72	4.117,20
P101-73	J101-72	4.117,20	J101-73	4.117,10
P101-74	J101-73	4.117,10	J101-74	4.116,90
P101-75	J101-74	4.116,90	J101-75	4.116,90
P101-76	J101-75	4.116,90	J101-76	4.116,80
P101-77	J101-76	4.116,80	J101-77	4.116,70
P101-78	J101-77	4.116,70	J101-78	4.116,70
P101-79	J101-78	4.116,70	J101-79	4.116,60
P101-80	J101-79	4.116,60	J101-80	4.116,60
P101-81	J101-80	4.116,60	J101-82	4.116,60
P101-82	J101-82	4.116,60	J101-84	4.116,40
P101-83	J101-84	4.116,40	J101-86	4.116,40
P101-84	J101-86	4.116,40	J101-88	4.116,20
P101-85	J101-88	4.116,20	J102-04	4.115,90
P101-86	J102-04	4.115,90	J103-00	4.115,70
P101-87	J103-00	4.115,70	J103-01	4.115,50
P101-88	J103-01	4.115,50	J103-02	4.115,50
P101-89	J103-02	4.115,50	J103-03	4.115,40
P101-90	J103-03	4.115,40	J103-04	4.115,30
P101-91	J103-04	4.115,30	J103-05	4.115,30
P101-92	J103-05	4.115,30	J103-06	4.115,10
P101-93	J103-06	4.115,10	J103-07	4.115,00
P101-94	J103-07	4.115,00	J103-08	4.114,70
P101-95	J103-08	4.114,70	J103-09	4.114,60
P101-96	J103-09	4.114,60	J103-10	4.114,50
P101-97	J103-10	4.114,50	J103-11	4.114,40
P101-98	J103-11	4.114,40	J103-12	4.114,20
P101-99	J103-12	4.114,20	J103-13	4.114,20
P101-100	J103-13	4.114,20	J103-14	4.114,10
P101-101	J103-14	4.114,10	J103-15	4.114,10
P101-102	J103-15	4.114,10	J103-16	4.114,00
P101-103	J103-16	4.114,00	J104-00	4.114,00
P101-104	J104-00	4.114,00	J104-01	4.114,00
P101-105	J104-01	4.114,00	J104-02	4.113,80
P101-106	J104-02	4.113,80	J104-03	4.113,70
P101-107	J104-03	4.113,70	J104-04	4.113,50
P101-108	J104-04	4.113,50	J104-05	4.113,40
P101-109	J104-05	4.113,40	J104-06	4.113,40
P101-110	J104-06	4.113,40	J104-07	4.113,30
P101-111	J104-07	4.113,30	J104-08	4.113,20
P101-112	J104-08	4.113,20	J104-09	4.113,00

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P101-113	J104-09	4.113,00	J104-10	4.112,90
P101-114	J104-10	4.112,90	J104-11	4.112,80
P101-115	J104-11	4.112,80	J104-12	4.112,70
P101-116	J104-12	4.112,70	J104-13	4.112,60
P101-117	J104-13	4.112,60	J104-14	4.112,50
P101-118	J104-14	4.112,50	J104-15	4.112,50
P101-119	J104-15	4.112,50	J104-16	4.112,40
P101-120	J104-16	4.112,40	J104-17	4.112,30
P101-121	J104-17	4.112,30	J104-18	4.112,20
P101-122	J104-18	4.112,20	J104-19	4.112,10
P101-123	J104-19	4.112,10	J104-20	4.111,90
P101-124	J104-20	4.111,90	J105-00	4.111,80
P101-125	J105-00	4.111,80	J105-01	4.111,80
P101-126	J105-01	4.111,80	J105-02	4.111,70
P101-127	J105-02	4.111,70	J105-03	4.111,60
P101-128	J105-03	4.111,60	J105-04	4.111,60
P101-129	J105-04	4.111,60	J105-05	4.111,50
P101-130	J105-05	4.111,50	J105-06	4.111,30
P101-131	J105-06	4.111,30	J105-07	4.111,20
P101-132	J105-07	4.111,20	J105-08	4.111,20
P101-133	J105-08	4.111,20	J105-09	4.111,10
P101-134	J105-09	4.111,10	J105-10	4.111,00
P101-135	J105-10	4.111,00	J105-11	4.110,50
P101-136	J105-11	4.110,60	J105-12	4.110,50
P101-137	J105-12	4.110,50	J105-13	4.110,40
P101-138	J105-13	4.110,40	J105-14	4.110,30
P101-139	J105-14	4.110,30	J105-15	4.110,30
P101-140	J105-15	4.110,30	J106-00	4.110,20
P102-01	J106-00	4.110,20	J106-01	4.109,10
P102-02	J106-01	4.109,10	J107-00	4.108,70
P103-01	J107-00	4.108,70	J107-01	4.108,70
P103-02	J107-01	4.108,70	J107-02	4.108,70
P103-03	J107-02	4.108,70	J107-03	4.108,50
P103-04	J107-03	4.108,50	J107-04	4.108,50
P103-05	J107-04	4.108,50	J108-00	4.108,50
P104-01	J108-00	4.108,50	J109-00	4.107,70
P105-01	J109-00	4.107,70	J109-01	4.107,70
P105-02	J109-01	4.107,70	J109-02	4.107,60
P105-03	J109-02	4.107,60	J109-03	4.107,50
P105-04	J109-03	4.107,50	J109-04	4.107,10
P105-05	J109-04	4.107,10	J109-05	4.106,80
P105-06	J109-05	4.106,80	J109-06	4.106,40
P105-07	J109-06	4.106,40	J109-07	4.106,10
P105-08	J109-07	4.106,10	J109-08	4.106,00
P105-09	J109-08	4.106,00	J109-09	4.105,80
P105-10	J109-09	4.105,80	J109-10	4.105,60
P105-11	J109-10	4.105,60	J109-11	4.105,60
P105-12	J109-11	4.105,60	J200-00	4.105,50
P200	J200-00	4.105,50	J201	4.105,50
P201	J201	4.105,50	FCV202	4.105,40

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P202	FCV202	4.080,20	J203	4.080,20
P203	J203	4.080,20	J204	4.080,10
P204	J204	4.080,10	J205	4.080,00
P205	J205	4.080,00	J206	4.080,00
P206	J206	4.080,00	T207	4.080,00

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P001:T001	1,000	7	7	3.810,10	3.810,09
P001:J005	1,270	8	6	3.811,34	3.809,67
P002:T001	1,000	7	7	3.810,10	3.810,09
P002:J006	1,270	8	6	3.811,34	3.809,71
P004:J004	1,530	10	5	3.812,48	3.809,40
P004:J003	1,660	11	5	3.813,07	3.809,26
P005:J005	1,270	8	6	3.811,34	3.809,67
P005:J004	1,530	10	5	3.812,48	3.809,40
P006:J006	1,270	8	6	3.811,34	3.809,71
P006:J007	1,530	10	6	3.812,48	3.809,53
P007:J007	1,530	10	6	3.812,48	3.809,53
P007:J008	1,660	11	5	3.813,07	3.809,40
P009:J003	1,660	11	5	3.813,07	3.809,26
P009:J010	1,930	12	5	3.814,32	3.809,03
P010:J004	1,530	10	5	3.812,48	3.809,40
P010:J011	1,810	12	5	3.813,74	3.809,17
P011:J007	1,530	10	6	3.812,48	3.809,53
P011:J012	1,810	12	5	3.813,74	3.809,29
P012:J008	1,660	11	5	3.813,07	3.809,40
P012:J013	1,930	12	5	3.814,32	3.809,20
P013:J010	1,930	12	5	3.814,32	3.809,03
P013:J014	2,180	14	5	3.815,43	3.808,74
P014:J011	1,810	12	5	3.813,74	3.809,17
P014:J015	2,040	13	5	3.814,79	3.808,90
P015:J012	1,810	12	5	3.813,74	3.809,29
P015:J016	2,040	13	5	3.814,79	3.809,08
P016:J013	1,930	12	5	3.814,32	3.809,20
P016:J017	2,180	14	5	3.815,43	3.808,96
P017:J014	2,180	14	5	3.815,43	3.808,74
P017:PMP018	2,520	16	4	3.816,91	3.808,54
P018:J015	2,040	13	5	3.814,79	3.808,90
P018:PMP019	2,420	16	5	3.816,48	3.808,73
P019:J016	2,040	13	5	3.814,79	3.809,08
P019:PMP020	2,420	16	5	3.816,48	3.808,83
P020:J017	2,180	14	5	3.815,43	3.808,96
P020:PMP021	2,550	16	5	3.817,02	3.808,76
P021:PMP018	1,000	464	-10	4.132,52	3.798,64
P021:J022	1,000	464	30	4.132,48	3.826,76
P022:PMP019	1,000	464	3	4.132,52	3.807,94
P022:J023	1,000	464	53	4.132,48	3.842,57

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P023:PMP020	1,000	464	-14	4.132,51	3.795,53
P023:J024	1,000	464	55	4.132,47	3.844,63
P024:PMP021	1,000	464	-14	4.132,50	3.795,53
P024:J025	1,000	464	-14	4.132,46	3.795,53
P025:J022	1,000	464	30	4.132,48	3.826,76
P025:J026	1,000	464	42	4.132,44	3.834,86
P026:J023	1,000	464	53	4.132,48	3.842,57
P026:J027	1,000	464	61	4.132,43	3.848,39
P027:J024	1,000	464	55	4.132,47	3.844,63
P027:J028	1,000	464	60	4.132,43	3.848,14
P028:J025	1,000	464	-14	4.132,46	3.795,53
P028:J029	1,000	464	-14	4.132,41	3.795,53
P029:J026	1,000	464	42	4.132,44	3.834,86
P029:CV030	1,000	464	22	4.132,41	3.820,68
P030:J027	1,000	464	61	4.132,43	3.848,39
P030:CV031	1,000	464	46	4.132,41	3.838,22
P031:J028	1,000	464	60	4.132,43	3.848,14
P031:CV032	1,000	464	37	4.132,40	3.831,90
P032:J029	1,000	464	-14	4.132,41	3.795,53
P032:CV033	1,000	464	-14	4.132,38	3.795,53
P033:CV030	1,710	795	52	4.365,33	3.841,95
P033:J034	1,590	736	105	4.324,07	3.879,24
P034:CV031	1,790	829	77	4.389,27	3.859,75
P034:J035	1,580	733	98	4.322,22	3.874,88
P035:CV032	1,650	763	64	4.343,30	3.850,49
P035:J036	1,510	702	110	4.300,07	3.883,13
P036:CV033	1,870	866	47	4.415,58	3.838,61
P036:J037	1,610	749	57	4.333,29	3.845,54
P037:J034	1,590	736	105	4.324,07	3.879,24
P037:J038	1,700	786	96	4.359,55	3.873,27
P038:J035	1,580	733	98	4.322,22	3.874,88
P038:J039	1,660	771	108	4.349,02	3.881,43
P039:J036	1,510	702	110	4.300,07	3.883,13
P039:J040	1,640	759	109	4.340,54	3.882,47
P040:J037	1,610	749	57	4.333,29	3.845,54
P040:J041	1,830	851	78	4.405,05	3.860,28
P041:J038	1,700	786	96	4.359,55	3.873,27
P041:J043	1,560	728	132	4.315,74	3.895,50
P042:J039	1,660	771	108	4.349,02	3.881,43
P042:J044	1,480	692	143	4.290,00	3.903,26
P043:J040	1,640	759	109	4.340,54	3.882,47
P043:J045	1,500	702	146	4.297,31	3.905,32
P044:J041	1,830	851	78	4.405,05	3.860,28
P044:J046	1,490	695	149	4.292,27	3.907,63
P046:J043	1,560	728	132	4.315,74	3.895,50
P046:J044	1,480	692	143	4.290,00	3.903,26
P047:J044	1,480	692	143	4.290,00	3.903,26
P047:J045	1,500	702	146	4.297,31	3.905,32
P048:J045	1,500	702	146	4.297,31	3.905,32
P048:J046	1,490	695	149	4.292,27	3.907,63
P049:J046	1,490	695	149	4.292,27	3.907,63
P049:J100-00	1,470	687	150	4.286,81	3.908,78

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P100-01:J100-00	1,470	687	150	4.286,81	3.908,78
P100-01:J100-01	1,510	703	149	4.298,87	3.908,18
P100-02:J100-01	1,510	703	149	4.298,87	3.908,18
P100-02:J100-02	1,480	685	145	4.289,47	3.909,37
P100-03:J100-02	1,480	685	145	4.289,47	3.909,37
P100-03:J100-03	1,460	670	139	4.281,48	3.907,52
P100-04:J100-03	1,460	670	139	4.281,48	3.907,52
P100-04:J100-04	1,420	643	135	4.265,72	3.908,12
P100-05:J100-04	1,420	643	135	4.265,72	3.908,12
P100-05:J100-05	1,430	644	130	4.268,21	3.906,16
P100-06:J100-05	1,430	644	130	4.268,21	3.906,16
P100-06:J100-06	1,430	639	136	4.267,51	3.913,32
P100-07:J100-06	1,430	639	136	4.267,51	3.913,32
P100-07:J100-07	1,430	632	130	4.265,87	3.911,85
P100-08:J100-07	1,430	632	130	4.265,87	3.911,85
P100-08:J100-08	1,450	598	113	4.261,87	3.920,04
P100-09:J100-08	1,450	598	113	4.261,87	3.920,04
P100-09:J100-09	1,470	588	100	4.262,24	3.918,30
P100-10:J100-09	1,470	588	100	4.262,24	3.918,30
P100-10:J100-10	1,520	579	85	4.268,53	3.920,13
P100-11:J100-10	1,520	579	85	4.268,53	3.920,13
P100-11:J100-11	1,560	572	67	4.273,84	3.918,26
P100-12:J100-11	1,560	572	67	4.273,84	3.918,26
P100-12:J100-12	1,580	572	63	4.277,31	3.918,60
P100-13:J100-12	1,580	572	63	4.277,31	3.918,60
P100-13:J100-13	1,580	562	57	4.273,64	3.918,16
P100-14:J100-13	1,580	562	57	4.273,64	3.918,16
P100-14:J100-14	1,580	559	51	4.273,76	3.916,32

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 8 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P100-15:J100-14	1,580	559	51	4.273,76	3.916,32
P100-15:J100-15	1,550	539	46	4.264,27	3.916,94
P100-16:J100-15	1,550	539	46	4.264,27	3.916,94
P100-16:J100-16	1,570	521	44	4.262,04	3.926,13
P100-17:J100-16	1,570	521	44	4.262,04	3.926,13
P100-17:J100-17	1,570	516	47	4.260,03	3.929,64
P100-18:J100-17	1,570	516	47	4.260,03	3.929,64
P100-18:J100-18	1,570	477	25	4.249,95	3.931,19
P100-19:J100-18	1,570	477	25	4.249,95	3.931,19
P100-19:J100-19	1,650	497	22	4.265,39	3.931,28
P100-20:J100-19	1,650	497	22	4.265,39	3.931,28
P100-20:J100-20	1,600	478	21	4.253,19	3.931,47
P100-21:J100-20	1,600	478	21	4.253,19	3.931,47
P100-21:J100-21	1,530	459	22	4.239,79	3.931,59
P100-22:J100-21	1,530	459	22	4.239,79	3.931,59
P100-22:J100-22	1,540	461	22	4.240,89	3.931,69
P100-23:J100-22	1,540	461	22	4.240,89	3.931,69
P100-23:J100-23	1,590	483	27	4.252,80	3.932,02
P100-24:J100-23	1,590	483	27	4.252,80	3.932,02
P100-24:J100-24	1,520	467	30	4.240,19	3.932,32
P100-25:J100-24	1,520	467	30	4.240,19	3.932,32
P100-25:J100-25	1,520	468	31	4.240,66	3.932,49
P100-26:J100-25	1,520	468	31	4.240,66	3.932,49
P100-26:J100-26	1,530	471	31	4.242,27	3.932,60
P100-27:J100-26	1,530	471	31	4.242,27	3.932,60
P100-27:J100-27	1,520	466	31	4.239,24	3.932,67
P100-28:J100-27	1,520	466	31	4.239,24	3.932,67
P100-28:J100-28	1,520	464	31	4.238,33	3.932,78

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 9 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P100-29:J100-28	1,520	464	31	4.238,33	3.932,78
P100-29:J100-29	1,520	464	29	4.239,31	3.932,96
P100-30:J100-29	1,520	464	29	4.239,31	3.932,96
P100-30:J100-30	1,510	458	27	4.236,22	3.933,13
P100-31:J100-30	1,510	458	27	4.236,22	3.933,13
P100-31:J100-31	1,550	461	23	4.242,11	3.933,44
P100-32:J100-31	1,550	461	23	4.242,11	3.933,44
P100-32:J100-32	1,530	438	14	4.233,09	3.934,22
P100-33:J100-32	1,530	438	14	4.233,09	3.934,22
P100-33:J100-33	1,600	451	10	4.245,65	3.934,62
P100-34:J100-33	1,600	451	10	4.245,65	3.934,62
P100-34:J100-34	1,620	451	7	4.247,79	3.935,02
P100-35:J100-34	1,620	451	7	4.247,79	3.935,02
P100-35:J101-00	1,720	473	5	4.265,45	3.935,55
P101-01:J101-00	1,720	473	5	4.265,45	3.935,55
P101-01:J101-01	1,680	449	-1	4.254,00	3.936,84
P101-02:J101-01	1,680	449	-1	4.254,00	3.936,84
P101-02:J101-02	1,640	437	0	4.245,52	3.937,29
P101-03:J101-02	1,640	437	0	4.245,52	3.937,29
P101-03:J101-03	1,630	438	2	4.244,72	3.937,55
P101-04:J101-03	1,630	438	2	4.244,72	3.937,55
P101-04:J101-04	1,660	448	4	4.250,27	3.937,67
P101-05:J101-04	1,660	448	4	4.250,27	3.937,67
P101-05:J101-05	1,650	452	8	4.250,78	3.937,72
P101-06:J101-05	1,650	452	8	4.250,78	3.937,72
P101-06:J101-06	1,670	461	11	4.254,71	3.937,78
P101-07:J101-06	1,670	461	11	4.254,71	3.937,78
P101-07:J101-07	1,640	456	13	4.249,87	3.937,81

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 10 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-08:J101-07	1,640	456	13	4.249,87	3.937,81
P101-08:J101-08	1,650	460	13	4.252,37	3.937,84
P101-09:J101-08	1,650	460	13	4.252,37	3.937,84
P101-09:J101-09	1,660	462	14	4.253,88	3.937,88
P101-10:J101-09	1,660	462	14	4.253,88	3.937,88
P101-10:J101-10	1,630	454	13	4.248,47	3.937,93
P101-11:J101-10	1,630	454	13	4.248,47	3.937,93
P101-11:J101-11	1,630	453	13	4.248,11	3.937,96
P101-12:J101-11	1,630	453	13	4.248,11	3.937,96
P101-12:J101-12	1,620	448	12	4.245,35	3.937,99
P101-13:J101-12	1,620	448	12	4.245,35	3.937,99
P101-13:J101-13	1,620	444	9	4.244,19	3.938,04
P101-14:J101-13	1,620	444	9	4.244,19	3.938,04
P101-14:J101-14	1,640	444	6	4.246,64	3.938,08
P101-15:J101-14	1,640	444	6	4.246,64	3.938,08
P101-15:J101-15	1,670	428	-8	4.245,06	3.938,24
P101-16:J101-15	1,670	428	-8	4.245,06	3.938,24
P101-16:J101-16	1,710	433	-11	4.251,05	3.938,29
P101-17:J101-16	1,710	433	-11	4.251,05	3.938,29
P101-17:J101-17	1,700	427	-12	4.247,34	3.938,33
P101-18:J101-17	1,700	427	-12	4.247,34	3.938,33
P101-18:J101-18	1,690	425	-12	4.246,27	3.938,36
P101-19:J101-18	1,690	425	-12	4.246,27	3.938,36
P101-19:J101-19	1,720	429	-13	4.249,90	3.938,57
P101-20:J101-19	1,720	429	-13	4.249,90	3.938,57
P101-20:J101-20	1,720	430	-12	4.249,68	3.938,62
P101-21:J101-20	1,720	430	-12	4.249,68	3.938,62
P101-21:J101-21	1,690	429	-8	4.246,28	3.938,71

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 11 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-22:J101-21	1,690	429	-8	4.246,28	3.938,71
P101-22:J101-22	1,710	445	0	4.252,78	3.938,78
P101-23:J101-22	1,710	445	0	4.252,78	3.938,78
P101-23:J101-23	1,830	482	2	4.277,05	3.938,79
P101-24:J101-23	1,830	482	2	4.277,05	3.938,79
P101-24:J101-24	1,800	472	2	4.269,87	3.938,78
P101-25:J101-24	1,800	472	2	4.269,87	3.938,78
P101-25:J101-25	1,800	472	2	4.269,72	3.938,77
P101-26:J101-25	1,800	472	2	4.269,72	3.938,77
P101-26:J101-26	1,760	462	1	4.263,41	3.938,75
P101-27:J101-26	1,760	462	1	4.263,41	3.938,75
P101-27:J101-27	1,860	486	1	4.280,71	3.938,76
P101-28:J101-27	1,860	486	1	4.280,71	3.938,76
P101-28:J101-28	1,850	479	-1	4.277,46	3.938,73
P101-29:J101-28	1,850	479	-1	4.277,46	3.938,73
P101-29:J101-29	1,820	466	-4	4.269,81	3.938,70
P101-30:J101-29	1,820	466	-4	4.269,81	3.938,70
P101-30:J101-30	1,820	465	-4	4.269,21	3.938,68
P101-31:J101-30	1,820	465	-4	4.269,21	3.938,68
P101-31:J101-31	1,820	438	-13	4.260,12	3.942,71
P101-32:J101-31	1,820	438	-13	4.260,12	3.942,71
P101-32:J101-32	1,800	377	-14	4.239,04	3.963,27
P101-33:J101-32	1,800	377	-14	4.239,04	3.963,27
P101-33:J101-33	1,790	356	-14	4.230,60	3.969,91
P101-34:J101-33	1,790	356	-14	4.230,60	3.969,91
P101-34:J101-34	1,850	360	-14	4.236,62	3.973,01
P101-35:J101-34	1,850	360	-14	4.236,62	3.973,01
P101-35:J101-35	1,810	335	-14	4.225,55	3.979,28

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 12 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-36:J101-35	1,810	335	-14	4.225,55	3.979,28
P101-36:J101-36	1,820	334	-14	4.225,41	3.980,16
P101-37:J101-36	1,820	334	-14	4.225,41	3.980,16
P101-37:J101-37	1,870	342	-14	4.231,67	3.980,48
P101-38:J101-37	1,870	342	-14	4.231,67	3.980,48
P101-38:J101-38	1,830	335	-14	4.226,82	3.980,52
P101-39:J101-38	1,830	335	-14	4.226,82	3.980,52
P101-39:J101-39	1,840	336	-14	4.227,35	3.980,60
P101-40:J101-39	1,840	336	-14	4.227,35	3.980,60
P101-40:J101-40	1,820	331	-14	4.224,28	3.980,91
P101-41:J101-40	1,820	331	-14	4.224,28	3.980,91
P101-41:J101-41	1,780	325	-14	4.219,87	3.981,19
P101-42:J101-41	1,780	325	-14	4.219,87	3.981,19
P101-42:J101-42	1,800	324	-14	4.220,44	3.982,36
P101-43:J101-42	1,800	324	-14	4.220,44	3.982,36
P101-43:J101-43	1,920	344	-14	4.235,39	3.983,17
P101-44:J101-43	1,920	344	-14	4.235,39	3.983,17
P101-44:J101-44	1,840	325	-14	4.224,03	3.984,85
P101-45:J101-44	1,840	325	-14	4.224,03	3.984,85
P101-45:J101-45	1,860	313	-14	4.220,61	3.989,98
P101-46:J101-45	1,860	313	-14	4.220,61	3.989,98
P101-46:J101-46	1,960	328	-14	4.232,30	3.991,04
P101-47:J101-46	1,960	328	-14	4.232,30	3.991,04
P101-47:J101-47	1,930	313	-14	4.225,32	3.994,61
P101-48:J101-47	1,930	313	-14	4.225,32	3.994,61
P101-48:J101-48	2,050	330	-14	4.237,56	3.995,37
P101-49:J101-48	2,050	330	-14	4.237,56	3.995,37
P101-49:J101-49	2,030	324	-14	4.234,36	3.995,81

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

HAMMER
[24.00.00.26]

30/10/2024

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

Page 13 of 22

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-50:J101-49	2,030	324	-14	4.234,36	3.995,81
P101-50:J101-50	2,020	322	-14	4.233,04	3.996,04
P101-51:J101-50	2,020	322	-14	4.233,04	3.996,04
P101-51:J101-51	2,000	320	-14	4.231,24	3.996,15
P101-52:J101-51	2,000	320	-14	4.231,24	3.996,15
P101-52:J101-52	1,960	320	-14	4.229,04	3.993,81
P101-53:J101-52	1,960	320	-14	4.229,04	3.993,81
P101-53:J101-53	1,890	308	-14	4.220,77	3.993,52
P101-54:J101-53	1,890	308	-14	4.220,77	3.993,52
P101-54:J101-54	2,020	323	-14	4.233,54	3.995,82
P101-55:J101-54	2,020	323	-14	4.233,54	3.995,82
P101-55:J101-55	1,980	319	-14	4.229,54	3.994,96
P101-56:J101-55	1,980	319	-14	4.229,54	3.994,96
P101-56:J101-56	1,960	320	-14	4.228,97	3.993,65
P101-57:J101-56	1,960	320	-14	4.228,97	3.993,65
P101-57:J101-57	1,870	327	-14	4.224,91	3.984,74
P101-58:J101-57	1,870	327	-14	4.224,91	3.984,74
P101-58:J101-58	1,900	335	-14	4.229,41	3.983,93
P101-59:J101-58	1,900	335	-14	4.229,41	3.983,93
P101-59:J101-59	1,840	326	-14	4.222,58	3.983,02
P101-60:J101-59	1,840	326	-14	4.222,58	3.983,02
P101-60:J101-60	1,880	336	-14	4.228,92	3.982,34
P101-61:J101-60	1,880	336	-14	4.228,92	3.982,34
P101-61:J101-61	1,810	325	-14	4.220,78	3.981,84
P101-62:J101-61	1,810	325	-14	4.220,78	3.981,84
P101-62:J101-62	1,790	322	-13	4.217,82	3.982,38
P101-63:J101-62	1,790	322	-13	4.217,82	3.982,38
P101-63:J101-63	1,770	319	-13	4.215,99	3.982,27

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 14 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-64:J101-63	1,770	319	-13	4.215,99	3.982,27
P101-64:J101-64	1,790	321	-12	4.217,13	3.982,79
P101-65:J101-64	1,790	321	-12	4.217,13	3.982,79
P101-65:J101-65	1,850	330	-14	4.224,23	3.981,80
P101-66:J101-65	1,850	330	-14	4.224,23	3.981,80
P101-66:J101-66	1,830	324	-12	4.221,05	3.983,84
P101-67:J101-66	1,830	324	-12	4.221,05	3.983,84
P101-67:J101-67	1,830	324	-14	4.221,33	3.983,25
P101-68:J101-67	1,830	324	-14	4.221,33	3.983,25
P101-68:J101-68	1,900	326	-14	4.226,00	3.986,31
P101-69:J101-68	1,900	326	-14	4.226,00	3.986,31
P101-69:J101-69	1,930	328	-14	4.228,93	3.987,52
P101-70:J101-69	1,930	328	-14	4.228,93	3.987,52
P101-70:J101-70	1,920	324	-14	4.226,76	3.988,22
P101-71:J101-70	1,920	324	-14	4.226,76	3.988,22
P101-71:J101-71	1,930	325	-14	4.227,17	3.988,48
P101-72:J101-71	1,930	325	-14	4.227,17	3.988,48
P101-72:J101-72	1,890	319	-14	4.222,85	3.988,46
P101-73:J101-72	1,890	319	-14	4.222,85	3.988,46
P101-73:J101-73	1,960	330	-14	4.231,02	3.988,42
P101-74:J101-73	1,960	330	-14	4.231,02	3.988,42
P101-74:J101-74	1,960	330	-14	4.230,91	3.988,70
P101-75:J101-74	1,960	330	-14	4.230,91	3.988,70
P101-75:J101-75	1,940	324	-14	4.227,33	3.989,06
P101-76:J101-75	1,940	324	-14	4.227,33	3.989,06
P101-76:J101-76	1,970	327	-14	4.230,06	3.989,53
P101-77:J101-76	1,970	327	-14	4.230,06	3.989,53
P101-77:J101-77	1,930	320	-14	4.225,08	3.989,85

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 15 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-78:J101-77	1,930	320	-14	4.225,08	3.989,85
P101-78:J101-78	2,010	333	-14	4.234,91	3.990,00
P101-79:J101-78	2,010	333	-14	4.234,91	3.990,00
P101-79:J101-79	1,990	329	-14	4.231,70	3.989,96
P101-80:J101-79	1,990	329	-14	4.231,70	3.989,96
P101-80:J101-80	1,960	325	-14	4.228,58	3.989,91
P101-81:J101-80	1,960	325	-14	4.228,58	3.989,91
P101-81:J101-82	1,990	331	-14	4.232,42	3.989,51
P101-82:J101-82	1,990	331	-14	4.232,42	3.989,51
P101-82:J101-84	2,030	339	-14	4.237,76	3.988,91
P101-83:J101-84	2,030	339	-14	4.237,76	3.988,91
P101-83:J101-86	2,040	340	-14	4.238,77	3.988,91
P101-84:J101-86	2,040	340	-14	4.238,77	3.988,91
P101-84:J101-88	2,030	336	-14	4.236,29	3.989,45
P101-85:J101-88	2,030	336	-14	4.236,29	3.989,45
P101-85:J102-04	2,000	328	-14	4.231,29	3.990,48
P101-86:J102-04	2,000	328	-14	4.231,29	3.990,48
P101-86:J103-00	2,080	339	-14	4.239,70	3.991,18
P101-87:J103-00	2,080	339	-14	4.239,70	3.991,18
P101-87:J103-01	1,960	316	-14	4.224,36	3.992,06
P101-88:J103-01	1,960	316	-14	4.224,36	3.992,06
P101-88:J103-02	1,940	319	-14	4.224,43	3.989,79
P101-89:J103-02	1,940	319	-14	4.224,43	3.989,79
P101-89:J103-03	1,870	307	-14	4.216,07	3.989,62
P101-90:J103-03	1,870	307	-14	4.216,07	3.989,62
P101-90:J103-04	1,910	315	-14	4.220,79	3.988,72
P101-91:J103-04	1,910	315	-14	4.220,79	3.988,72
P101-91:J103-05	1,900	309	-14	4.218,71	3.990,83

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center
76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 16 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-92:J103-05	1,900	309	-14	4.218,71	3.990,83
P101-92:J103-06	1,730	285	-14	4.199,88	3.988,91
P101-93:J103-06	1,730	285	-14	4.199,88	3.988,91
P101-93:J103-07	1,790	297	-14	4.207,41	3.988,29
P101-94:J103-07	1,790	297	-14	4.207,41	3.988,29
P101-94:J103-08	1,740	292	-14	4.202,29	3.986,87
P101-95:J103-08	1,740	292	-14	4.202,29	3.986,87
P101-95:J103-09	1,730	292	-14	4.201,36	3.985,92
P101-96:J103-09	1,730	292	-14	4.201,36	3.985,92
P101-96:J103-10	1,730	294	-14	4.201,92	3.984,54
P101-97:J103-10	1,730	294	-14	4.201,92	3.984,54
P101-97:J103-11	1,810	313	-14	4.213,00	3.982,45
P101-98:J103-11	1,810	313	-14	4.213,00	3.982,45
P101-98:J103-12	1,710	309	-14	4.204,84	3.977,00
P101-99:J103-12	1,710	309	-14	4.204,84	3.977,00
P101-99:J103-13	1,780	326	-13	4.214,85	3.976,29
P101-100:J103-13	1,780	326	-13	4.214,85	3.976,29
P101-100:J103-14	1,670	307	-14	4.200,64	3.974,75
P101-101:J103-14	1,670	307	-14	4.200,64	3.974,75
P101-101:J103-15	1,710	317	-14	4.206,66	3.973,55
P101-102:J103-15	1,710	317	-14	4.206,66	3.973,55
P101-102:J103-16	1,670	310	-14	4.201,75	3.973,13
P101-103:J103-16	1,670	310	-14	4.201,75	3.973,13
P101-103:J104-00	1,680	311	-14	4.202,45	3.973,06
P101-104:J104-00	1,680	311	-14	4.202,45	3.973,06
P101-104:J104-01	1,700	316	-14	4.205,55	3.972,86
P101-105:J104-01	1,700	316	-14	4.205,55	3.972,86
P101-105:J104-02	1,710	317	-14	4.206,45	3.972,95

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

HAMMER
[24.00.00.26]

30/10/2024

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

Page 17 of 22

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-106:J104-02	1,710	317	-14	4.206,45	3.972,95
P101-106:J104-03	1,680	312	-14	4.202,42	3.972,76
P101-107:J104-03	1,680	312	-14	4.202,42	3.972,76
P101-107:J104-04	1,670	312	-14	4.201,47	3.971,95
P101-108:J104-04	1,670	312	-14	4.201,47	3.971,95
P101-108:J104-05	1,680	314	-14	4.203,06	3.971,78
P101-109:J104-05	1,680	314	-14	4.203,06	3.971,78
P101-109:J104-06	1,730	323	-14	4.209,72	3.971,85
P101-110:J104-06	1,730	323	-14	4.209,72	3.971,85
P101-110:J104-07	1,660	309	-14	4.199,50	3.972,04
P101-111:J104-07	1,660	309	-14	4.199,50	3.972,04
P101-111:J104-08	1,640	305	-14	4.196,88	3.972,21
P101-112:J104-08	1,640	305	-14	4.196,88	3.972,21
P101-112:J104-09	1,650	307	-14	4.198,21	3.972,13
P101-113:J104-09	1,650	307	-14	4.198,21	3.972,13
P101-113:J104-10	1,710	319	-14	4.206,70	3.971,80
P101-114:J104-10	1,710	319	-14	4.206,70	3.971,80
P101-114:J104-11	1,670	318	-12	4.202,80	3.970,44
P101-115:J104-11	1,670	318	-12	4.202,80	3.970,44
P101-115:J104-12	1,620	310	-10	4.196,40	3.971,27
P101-116:J104-12	1,620	310	-10	4.196,40	3.971,27
P101-116:J104-13	1,610	308	-8	4.195,11	3.972,19
P101-117:J104-13	1,610	308	-8	4.195,11	3.972,19
P101-117:J104-14	1,630	312	-9	4.197,86	3.971,28
P101-118:J104-14	1,630	312	-9	4.197,86	3.971,28
P101-118:J104-15	1,670	318	-11	4.202,32	3.970,73
P101-119:J104-15	1,670	318	-11	4.202,32	3.970,73
P101-119:J104-16	1,610	305	-11	4.193,68	3.971,18

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

HAMMER
[24.00.00.26]

30/10/2024

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

Page 18 of 22

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-120:J104-16	1,610	305	-11	4.193,68	3.971,18
P101-120:J104-17	1,570	293	-11	4.186,96	3.972,40
P101-121:J104-17	1,570	293	-11	4.186,96	3.972,40
P101-121:J104-18	1,690	305	-14	4.199,49	3.974,75
P101-122:J104-18	1,690	305	-14	4.199,49	3.974,75
P101-122:J104-19	1,660	298	-14	4.195,67	3.975,98
P101-123:J104-19	1,660	298	-14	4.195,67	3.975,98
P101-123:J104-20	1,610	283	-14	4.187,43	3.978,19
P101-124:J104-20	1,610	283	-14	4.187,43	3.978,19
P101-124:J105-00	1,400	241	-14	4.159,91	3.980,04
P101-125:J105-00	1,400	241	-14	4.159,91	3.980,04
P101-125:J105-01	1,370	237	-14	4.156,92	3.980,05
P101-126:J105-01	1,370	237	-14	4.156,92	3.980,05
P101-126:J105-02	1,380	236	-14	4.157,68	3.981,39
P101-127:J105-02	1,380	236	-14	4.157,68	3.981,39
P101-127:J105-03	1,420	240	-14	4.161,62	3.982,22
P101-128:J105-03	1,420	240	-14	4.161,62	3.982,22
P101-128:J105-04	1,440	243	-12	4.163,86	3.983,89
P101-129:J105-04	1,440	243	-12	4.163,86	3.983,89
P101-129:J105-05	1,400	237	-12	4.159,18	3.983,85
P101-130:J105-05	1,400	237	-12	4.159,18	3.983,85
P101-130:J105-06	1,350	231	-3	4.153,64	3.988,66
P101-131:J105-06	1,350	231	-3	4.153,64	3.988,66
P101-131:J105-07	1,320	226	-1	4.149,55	3.989,23
P101-132:J105-07	1,320	226	-1	4.149,55	3.989,23
P101-132:J105-08	1,330	229	0	4.151,14	3.989,95
P101-133:J105-08	1,330	229	0	4.151,14	3.989,95
P101-133:J105-09	1,340	234	8	4.153,31	3.993,96

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

HAMMER
[24.00.00.26]

30/10/2024

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

Page 19 of 22

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-134:J105-09	1,340	234	8	4.153,31	3.993,96
P101-134:J105-10	1,350	239	9	4.154,72	3.992,83
P101-135:J105-10	1,350	239	9	4.154,72	3.992,83
P101-135:J105-11	1,290	247	19	4.149,58	3.989,01
P101-136:J105-11	1,290	247	19	4.149,58	3.989,01
P101-136:J105-12	1,320	255	17	4.153,88	3.986,63
P101-137:J105-12	1,320	255	17	4.153,88	3.986,63
P101-137:J105-13	1,310	254	16	4.152,94	3.985,55
P101-138:J105-13	1,310	254	16	4.152,94	3.985,55
P101-138:J105-14	1,320	255	13	4.153,65	3.983,12
P101-139:J105-14	1,320	255	13	4.153,65	3.983,12
P101-139:J105-15	1,350	262	12	4.158,45	3.982,60
P101-140:J105-15	1,350	262	12	4.158,45	3.982,60
P101-140:J106-00	1,430	276	7	4.168,68	3.979,43
P102-01:J106-00	1,430	276	7	4.168,68	3.979,43
P102-01:J106-01	1,610	273	-5	4.182,19	3.985,75
P102-02:J106-01	1,610	273	-5	4.182,19	3.985,75
P102-02:J107-00	1,670	269	-6	4.185,00	3.991,46
P103-01:J107-00	1,670	269	-6	4.185,00	3.991,46
P103-01:J107-01	1,670	268	-5	4.184,53	3.991,80
P103-02:J107-01	1,670	268	-5	4.184,53	3.991,80
P103-02:J107-02	1,600	263	-1	4.178,34	3.992,53
P103-03:J107-02	1,600	263	-1	4.178,34	3.992,53
P103-03:J107-03	1,630	262	-1	4.180,01	3.994,69
P103-04:J107-03	1,630	262	-1	4.180,01	3.994,69
P103-04:J107-04	1,640	256	-5	4.178,82	3.995,18
P103-05:J107-04	1,640	256	-5	4.178,82	3.995,18
P103-05:J108-00	1,660	259	-5	4.180,90	3.995,49

EB2 a EB3 - Tesis Modelado_ Rev0.wtg

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

HAMMER
[24.00.00.26]

30/10/2024

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

Page 20 of 22

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P104-01:J108-00	1,660	259	-5	4.180,90	3.995,49
P104-01:J109-00	1,730	241	-2	4.179,59	4.008,66
P105-01:J109-00	1,730	241	-2	4.179,59	4.008,66
P105-01:J109-01	1,770	246	-1	4.183,09	4.009,08
P105-02:J109-01	1,770	246	-1	4.183,09	4.009,08
P105-02:J109-02	1,780	250	3	4.184,55	4.010,81
P105-03:J109-02	1,780	250	3	4.184,55	4.010,81
P105-03:J109-03	1,770	244	3	4.182,28	4.012,02
P105-04:J109-03	1,770	244	3	4.182,28	4.012,02
P105-04:J109-04	1,640	242	18	4.173,68	4.016,26
P105-05:J109-04	1,640	242	18	4.173,68	4.016,26
P105-05:J109-05	1,710	247	8	4.178,86	4.010,51
P105-06:J109-05	1,710	247	8	4.178,86	4.010,51
P105-06:J109-06	1,920	243	-8	4.188,58	4.012,09
P105-07:J109-06	1,920	243	-8	4.188,58	4.012,09
P105-07:J109-07	2,010	202	-14	4.177,37	4.025,34
P105-08:J109-07	2,010	202	-14	4.177,37	4.025,34
P105-08:J109-08	2,110	203	-14	4.181,30	4.027,99
P105-09:J109-08	2,110	203	-14	4.181,30	4.027,99
P105-09:J109-09	2,640	183	-14	4.185,74	4.047,00
P105-10:J109-09	2,640	183	-14	4.185,74	4.047,00
P105-10:J109-10	2,270	156	-14	4.167,15	4.047,08
P105-11:J109-10	2,270	156	-14	4.167,15	4.047,08
P105-11:J109-11	2,420	160	-14	4.171,74	4.048,80
P105-12:J109-11	2,420	160	-14	4.171,74	4.048,80
P105-12:J200-00	2,170	143	-14	4.159,96	4.049,00
P200:J200-00	2,170	143	-14	4.159,96	4.049,00
P200:J201	2,390	158	-14	4.170,34	4.049,00
P201:J201	2,390	158	-14	4.170,34	4.049,00

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°1: Parada de bomba sin atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Sin atenuación
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P201:FCV202	2,600	171	-14	4.179,54	4.049,00
P202:FCV202	5,700	172	-14	4.179,86	4.049,00
P202:J203	5,310	159	-14	4.171,34	4.049,00
P203:J203	5,310	159	-14	4.171,34	4.049,00
P203:J204	4,580	137	-14	4.155,60	4.049,00
P204:J204	4,580	137	-14	4.155,60	4.049,00
P204:J205	54,870	80	-14	4.135,40	4.069,00
P205:J205	54,880	80	-14	4.135,40	4.069,00
P205:J206	56,840	82	-14	4.136,67	4.069,00
P206:J206	56,840	82	-14	4.136,67	4.069,00
P206:T207	1,500	2	1	4.080,50	4.079,38
P-1:J100-00	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)
P-1:SV100	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)	(N/A)

**Anexo 3. Reporte de resultados en Hammer Connected –
Escenario 2: Parada intempestiva con atenuación de fenómenos
transitorios**

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Transient Calculation Summary			
Time Step	0,005600 sec	Specific Gravity	0,998
Number of Time Steps	21372	Wave Speed (Global)	(N/A) m/s
Total Simulated Time	120,0 sec	Vapor Pressure	-14 psi
Number of Nodes	247	Number of Report Paths	1
Number of Pipes	249		

Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P001	T001	3.810,10	J005	3.810,10
P002	T001	3.810,10	J006	3.810,10
P004	J004	3.810,10	J003	3.810,10
P005	J005	3.810,10	J004	3.810,10
P006	J006	3.810,10	J007	3.810,10
P007	J007	3.810,10	J008	3.810,10
P009	J003	3.810,10	J010	3.810,10
P010	J004	3.810,10	J011	3.810,10
P011	J007	3.810,10	J012	3.810,10
P012	J008	3.810,10	J013	3.810,10
P013	J010	3.810,10	J014	3.810,10
P014	J011	3.810,10	J015	3.810,10
P015	J012	3.810,10	J016	3.810,10
P016	J013	3.810,10	J017	3.810,10
P017	J014	3.810,10	PMP018	3.810,00
P018	J015	3.810,10	PMP019	3.810,00
P019	J016	3.810,10	PMP020	3.810,00
P020	J017	3.810,10	PMP021	3.810,00
P021	PMP018	4.132,50	J022	4.132,50
P022	PMP019	4.132,50	J023	4.132,50
P023	PMP020	4.132,50	J024	4.132,50
P024	PMP021	4.132,50	J025	4.132,50
P025	J022	4.132,50	J026	4.132,40
P026	J023	4.132,50	J027	4.132,40
P027	J024	4.132,50	J028	4.132,40
P028	J025	4.132,50	J029	4.132,40
P029	J026	4.132,40	CV030	4.132,40
P030	J027	4.132,40	CV031	4.132,40
P031	J028	4.132,40	CV032	4.132,40
P032	J029	4.132,40	CV033	4.132,40
P033	CV030	4.132,40	J034	4.132,40
P034	CV031	4.132,40	J035	4.132,40
P035	CV032	4.132,40	J036	4.132,40
P036	CV033	4.132,40	J037	4.132,40
P037	J034	4.132,40	J038	4.132,40
P038	J035	4.132,40	J039	4.132,40
P039	J036	4.132,40	J040	4.132,40
P040	J037	4.132,40	J041	4.132,30
P041	J038	4.132,40	J043	4.132,30
P042	J039	4.132,40	J044	4.132,30
P043	J040	4.132,40	J045	4.132,30

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P044	J041	4.132,30	J046	4.132,30
P046	J043	4.132,30	J044	4.132,30
P047	J044	4.132,30	J045	4.132,30
P048	J045	4.132,30	J046	4.132,30
P049	J046	4.132,30	J100-00	4.132,30
P100-01	J100-00	4.132,30	J100-01	4.132,10
P100-02	J100-01	4.132,10	J100-02	4.132,10
P100-03	J100-02	4.132,10	J100-03	4.131,90
P100-04	J100-03	4.131,90	J100-04	4.131,70
P100-05	J100-04	4.131,70	J100-05	4.131,50
P100-06	J100-05	4.131,50	J100-06	4.131,40
P100-07	J100-06	4.131,40	J100-07	4.131,30
P100-08	J100-07	4.131,30	J100-08	4.130,50
P100-09	J100-08	4.130,50	J100-09	4.130,20
P100-10	J100-09	4.130,20	J100-10	4.129,80
P100-11	J100-10	4.129,80	J100-11	4.129,40
P100-12	J100-11	4.129,40	J100-12	4.129,30
P100-13	J100-12	4.129,30	J100-13	4.129,10
P100-14	J100-13	4.129,10	J100-14	4.129,00
P100-15	J100-14	4.129,00	J100-15	4.128,80
P100-16	J100-15	4.128,80	J100-16	4.128,40
P100-17	J100-16	4.128,40	J100-17	4.128,40
P100-18	J100-17	4.128,40	J100-18	4.127,70
P100-19	J100-18	4.127,70	J100-19	4.127,70
P100-20	J100-19	4.127,70	J100-20	4.127,60
P100-21	J100-20	4.127,60	J100-21	4.127,50
P100-22	J100-21	4.127,50	J100-22	4.127,40
P100-23	J100-22	4.127,40	J100-23	4.127,30
P100-24	J100-23	4.127,30	J100-24	4.127,20
P100-25	J100-24	4.127,20	J100-25	4.127,10
P100-26	J100-25	4.127,10	J100-26	4.127,00
P100-27	J100-26	4.127,00	J100-27	4.127,00
P100-28	J100-27	4.127,00	J100-28	4.126,90
P100-29	J100-28	4.126,90	J100-29	4.126,90
P100-30	J100-29	4.126,90	J100-30	4.126,80
P100-31	J100-30	4.126,80	J100-31	4.126,70
P100-32	J100-31	4.126,70	J100-32	4.126,40
P100-33	J100-32	4.126,40	J100-33	4.126,20
P100-34	J100-33	4.126,20	J100-34	4.126,10
P100-35	J100-34	4.126,10	J101-00	4.125,90
P101-01	J101-00	4.125,90	J101-01	4.125,50
P101-02	J101-01	4.125,50	J101-02	4.125,40
P101-03	J101-02	4.125,40	J101-03	4.125,30
P101-04	J101-03	4.125,30	J101-04	4.125,20
P101-05	J101-04	4.125,20	J101-05	4.125,10
P101-06	J101-05	4.125,10	J101-06	4.125,00
P101-07	J101-06	4.125,00	J101-07	4.124,90
P101-08	J101-07	4.124,90	J101-08	4.124,90
P101-09	J101-08	4.124,90	J101-09	4.124,80

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 2 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P101-10	J101-09	4.124,80	J101-10	4.124,70
P101-11	J101-10	4.124,70	J101-11	4.124,60
P101-12	J101-11	4.124,60	J101-12	4.124,60
P101-13	J101-12	4.124,60	J101-13	4.124,50
P101-14	J101-13	4.124,50	J101-14	4.124,40
P101-15	J101-14	4.124,40	J101-15	4.124,10
P101-16	J101-15	4.124,10	J101-16	4.124,00
P101-17	J101-16	4.124,00	J101-17	4.123,90
P101-18	J101-17	4.123,90	J101-18	4.123,80
P101-19	J101-18	4.123,80	J101-19	4.123,30
P101-20	J101-19	4.123,30	J101-20	4.123,30
P101-21	J101-20	4.123,30	J101-21	4.123,10
P101-22	J101-21	4.123,10	J101-22	4.122,70
P101-23	J101-22	4.122,70	J101-23	4.122,60
P101-24	J101-23	4.122,60	J101-24	4.122,50
P101-25	J101-24	4.122,50	J101-25	4.122,50
P101-26	J101-25	4.122,50	J101-26	4.122,40
P101-27	J101-26	4.122,40	J101-27	4.122,40
P101-28	J101-27	4.122,40	J101-28	4.122,30
P101-29	J101-28	4.122,30	J101-29	4.122,20
P101-30	J101-29	4.122,20	J101-30	4.122,20
P101-31	J101-30	4.122,20	J101-31	4.121,70
P101-32	J101-31	4.121,70	J101-32	4.120,70
P101-33	J101-32	4.120,70	J101-33	4.120,30
P101-34	J101-33	4.120,30	J101-34	4.120,10
P101-35	J101-34	4.120,10	J101-35	4.119,70
P101-36	J101-35	4.119,70	J101-36	4.119,60
P101-37	J101-36	4.119,60	J101-37	4.119,50
P101-38	J101-37	4.119,50	J101-38	4.119,50
P101-39	J101-38	4.119,50	J101-39	4.119,40
P101-40	J101-39	4.119,40	J101-40	4.119,40
P101-41	J101-40	4.119,40	J101-41	4.119,30
P101-42	J101-41	4.119,30	J101-42	4.119,20
P101-43	J101-42	4.119,20	J101-43	4.119,20
P101-44	J101-43	4.119,20	J101-44	4.119,10
P101-45	J101-44	4.119,10	J101-45	4.118,90
P101-46	J101-45	4.118,90	J101-46	4.118,90
P101-47	J101-46	4.118,90	J101-47	4.118,70
P101-48	J101-47	4.118,70	J101-48	4.118,70
P101-49	J101-48	4.118,70	J101-49	4.118,70
P101-50	J101-49	4.118,70	J101-50	4.118,60
P101-51	J101-50	4.118,60	J101-51	4.118,60
P101-52	J101-51	4.118,60	J101-52	4.118,60
P101-53	J101-52	4.118,60	J101-53	4.118,50
P101-54	J101-53	4.118,50	J101-54	4.118,50
P101-55	J101-54	4.118,50	J101-55	4.118,50
P101-56	J101-55	4.118,50	J101-56	4.118,40
P101-57	J101-56	4.118,40	J101-57	4.118,10
P101-58	J101-57	4.118,10	J101-58	4.118,10

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 3 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P101-59	J101-58	4.118,10	J101-59	4.118,00
P101-60	J101-59	4.118,00	J101-60	4.118,00
P101-61	J101-60	4.118,00	J101-61	4.117,90
P101-62	J101-61	4.117,90	J101-62	4.117,90
P101-63	J101-62	4.117,90	J101-63	4.117,80
P101-64	J101-63	4.117,80	J101-64	4.117,80
P101-65	J101-64	4.117,80	J101-65	4.117,70
P101-66	J101-65	4.117,70	J101-66	4.117,70
P101-67	J101-66	4.117,70	J101-67	4.117,60
P101-68	J101-67	4.117,60	J101-68	4.117,50
P101-69	J101-68	4.117,50	J101-69	4.117,40
P101-70	J101-69	4.117,40	J101-70	4.117,30
P101-71	J101-70	4.117,30	J101-71	4.117,20
P101-72	J101-71	4.117,20	J101-72	4.117,20
P101-73	J101-72	4.117,20	J101-73	4.117,10
P101-74	J101-73	4.117,10	J101-74	4.116,90
P101-75	J101-74	4.116,90	J101-75	4.116,90
P101-76	J101-75	4.116,90	J101-76	4.116,80
P101-77	J101-76	4.116,80	J101-77	4.116,70
P101-78	J101-77	4.116,70	J101-78	4.116,70
P101-79	J101-78	4.116,70	J101-79	4.116,60
P101-80	J101-79	4.116,60	J101-80	4.116,60
P101-81	J101-80	4.116,60	J101-82	4.116,60
P101-82	J101-82	4.116,60	J101-84	4.116,40
P101-83	J101-84	4.116,40	J101-86	4.116,40
P101-84	J101-86	4.116,40	J101-88	4.116,20
P101-85	J101-88	4.116,20	J102-04	4.115,90
P101-86	J102-04	4.115,90	J103-00	4.115,70
P101-87	J103-00	4.115,70	J103-01	4.115,50
P101-88	J103-01	4.115,50	J103-02	4.115,50
P101-89	J103-02	4.115,50	J103-03	4.115,40
P101-90	J103-03	4.115,40	J103-04	4.115,30
P101-91	J103-04	4.115,30	J103-05	4.115,30
P101-92	J103-05	4.115,30	J103-06	4.115,10
P101-93	J103-06	4.115,10	J103-07	4.115,00
P101-94	J103-07	4.115,00	J103-08	4.114,70
P101-95	J103-08	4.114,70	J103-09	4.114,60
P101-96	J103-09	4.114,60	J103-10	4.114,50
P101-97	J103-10	4.114,50	J103-11	4.114,40
P101-98	J103-11	4.114,40	J103-12	4.114,20
P101-99	J103-12	4.114,20	J103-13	4.114,20
P101-100	J103-13	4.114,20	J103-14	4.114,10
P101-101	J103-14	4.114,10	J103-15	4.114,10
P101-102	J103-15	4.114,10	J103-16	4.114,00
P101-103	J103-16	4.114,00	J104-00	4.114,00
P101-104	J104-00	4.114,00	J104-01	4.114,00
P101-105	J104-01	4.114,00	J104-02	4.113,80
P101-106	J104-02	4.113,80	J104-03	4.113,70
P101-107	J104-03	4.113,70	J104-04	4.113,50

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 4 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P101-108	J104-04	4.113,50	J104-05	4.113,40
P101-109	J104-05	4.113,40	J104-06	4.113,40
P101-110	J104-06	4.113,40	J104-07	4.113,30
P101-111	J104-07	4.113,30	J104-08	4.113,20
P101-112	J104-08	4.113,20	J104-09	4.113,00
P101-113	J104-09	4.113,00	J104-10	4.112,90
P101-114	J104-10	4.112,90	J104-11	4.112,80
P101-115	J104-11	4.112,80	J104-12	4.112,70
P101-116	J104-12	4.112,70	J104-13	4.112,60
P101-117	J104-13	4.112,60	J104-14	4.112,50
P101-118	J104-14	4.112,50	J104-15	4.112,50
P101-119	J104-15	4.112,50	J104-16	4.112,40
P101-120	J104-16	4.112,40	J104-17	4.112,30
P101-121	J104-17	4.112,30	J104-18	4.112,20
P101-122	J104-18	4.112,20	J104-19	4.112,10
P101-123	J104-19	4.112,10	J104-20	4.111,90
P101-124	J104-20	4.111,90	J105-00	4.111,80
P101-125	J105-00	4.111,80	J105-01	4.111,80
P101-126	J105-01	4.111,80	J105-02	4.111,70
P101-127	J105-02	4.111,70	J105-03	4.111,60
P101-128	J105-03	4.111,60	J105-04	4.111,60
P101-129	J105-04	4.111,60	J105-05	4.111,50
P101-130	J105-05	4.111,50	J105-06	4.111,30
P101-131	J105-06	4.111,30	J105-07	4.111,20
P101-132	J105-07	4.111,20	J105-08	4.111,20
P101-133	J105-08	4.111,20	J105-09	4.111,10
P101-134	J105-09	4.111,10	J105-10	4.111,00
P101-135	J105-10	4.111,00	J105-11	4.110,50
P101-136	J105-11	4.110,60	J105-12	4.110,50
P101-137	J105-12	4.110,50	J105-13	4.110,40
P101-138	J105-13	4.110,40	J105-14	4.110,30
P101-139	J105-14	4.110,30	J105-15	4.110,30
P101-140	J105-15	4.110,30	J106-00	4.110,20
P102-01	J106-00	4.110,20	J106-01	4.109,10
P102-02	J106-01	4.109,10	J107-00	4.108,70
P103-01	J107-00	4.108,70	J107-01	4.108,70
P103-02	J107-01	4.108,70	J107-02	4.108,70
P103-03	J107-02	4.108,70	J107-03	4.108,50
P103-04	J107-03	4.108,50	J107-04	4.108,50
P103-05	J107-04	4.108,50	J108-00	4.108,50
P104-01	J108-00	4.108,50	J109-00	4.107,70
P105-01	J109-00	4.107,70	J109-01	4.107,70
P105-02	J109-01	4.107,70	J109-02	4.107,60
P105-03	J109-02	4.107,60	J109-03	4.107,50
P105-04	J109-03	4.107,50	J109-04	4.107,10
P105-05	J109-04	4.107,10	J109-05	4.106,80
P105-06	J109-05	4.106,80	J109-06	4.106,40
P105-07	J109-06	4.106,40	J109-07	4.106,00
P105-08	J109-07	4.106,00	J109-08	4.106,00

Bentley Systems, Inc. Haestad Methods
Solution Center

76 Watertown Road, Suite 2D Thomaston, CT
06787 USA +1-203-755-1666

HAMMER
[24.00.00.26]
Page 5 of 22

30/10/2024

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Transient Initial Conditions Summary

Label	Start Node	Head (Initial at Start Node, Transient) (m)	Stop Node	Head (Initial at Stop Node, Transient) (m)
P105-09	J109-08	4.106,00	J109-09	4.105,80
P105-10	J109-09	4.105,80	J109-10	4.105,60
P105-11	J109-10	4.105,60	J109-11	4.105,60
P105-12	J109-11	4.105,60	J200-00	4.105,50
P200	J200-00	4.105,50	J201	4.105,50
P201	J201	4.105,50	FCV202	4.105,40
P202	FCV202	4.080,20	J203	4.080,20
P203	J203	4.080,20	J204	4.080,10
P204	J204	4.080,10	J205	4.080,00
P205	J205	4.080,00	J206	4.080,00
P206	J206	4.080,00	T207	4.080,00
P-1	J100-00	4.132,30	SV100	4.132,30

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P001:T001	1,000	7	7	3.810,10	3.810,08
P001:J005	5,070	33	-14	3.828,68	3.795,53
P002:T001	1,000	7	7	3.810,10	3.810,08
P002:J006	4,960	32	-14	3.828,16	3.795,53
P004:J004	5,310	34	-14	3.829,69	3.795,53
P004:J003	6,100	39	-14	3.833,27	3.795,53
P005:J005	5,070	33	-14	3.828,68	3.795,53
P005:J004	5,310	34	-14	3.829,69	3.795,53
P006:J006	4,960	32	-14	3.828,16	3.795,53
P006:J007	4,770	31	-14	3.827,25	3.795,53
P007:J007	4,770	31	-14	3.827,25	3.795,53
P007:J008	5,350	35	-14	3.829,87	3.795,53
P009:J003	6,100	39	-14	3.833,27	3.795,53
P009:J010	7,660	49	-14	3.840,34	3.795,53
P010:J004	5,310	34	-14	3.829,69	3.795,53
P010:J011	7,620	49	-14	3.840,19	3.795,53
P011:J007	4,770	31	-14	3.827,25	3.795,53
P011:J012	7,170	46	-14	3.838,12	3.795,53
P012:J008	5,350	35	-14	3.829,87	3.795,53
P012:J013	7,590	49	-14	3.839,99	3.795,53
P013:J010	7,660	49	-14	3.840,34	3.795,53
P013:J014	10,740	69	-14	3.854,26	3.795,53
P014:J011	7,620	49	-14	3.840,19	3.795,53
P014:J015	9,020	58	-14	3.846,50	3.795,53
P015:J012	7,170	46	-14	3.838,12	3.795,53
P015:J016	7,160	46	-14	3.838,07	3.795,53
P016:J013	7,590	49	-14	3.839,99	3.795,53
P016:J017	8,580	55	-14	3.844,45	3.795,53
P017:J014	10,740	69	-14	3.854,26	3.795,53
P017:PMP018	12,780	82	-14	3.863,17	3.795,53
P018:J015	9,020	58	-14	3.846,50	3.795,53
P018:PMP019	9,990	64	-14	3.850,67	3.795,53

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P019:J016	7,160	46	-14	3.838,07	3.795,53
P019:PMP020	8,910	57	-14	3.845,76	3.795,53
P020:J017	8,580	55	-14	3.844,45	3.795,53
P020:PMP021	8,860	57	-14	3.845,50	3.795,53
P021:PMP018	1,000	464	-14	4.132,52	3.795,53
P021:J022	1,000	464	-14	4.132,48	3.795,53
P022:PMP019	1,000	464	-14	4.132,52	3.795,53
P022:J023	1,000	464	-14	4.132,48	3.795,53
P023:PMP020	1,000	464	-14	4.132,51	3.795,53
P023:J024	1,000	464	-14	4.132,47	3.795,53
P024:PMP021	1,000	464	-14	4.132,50	3.795,53
P024:J025	1,000	464	-14	4.132,46	3.795,53
P025:J022	1,000	464	-14	4.132,48	3.795,53
P025:J026	1,000	464	-14	4.132,44	3.795,53
P026:J023	1,000	464	-14	4.132,48	3.795,53
P026:J027	1,000	464	-12	4.132,43	3.796,95
P027:J024	1,000	464	-14	4.132,47	3.795,53
P027:J028	1,000	464	-14	4.132,43	3.795,53
P028:J025	1,000	464	-14	4.132,46	3.795,53
P028:J029	1,000	464	-14	4.132,41	3.795,53
P029:J026	1,000	464	-14	4.132,44	3.795,53
P029:CV030	1,000	464	-14	4.132,41	3.795,53
P030:J027	1,000	464	-12	4.132,43	3.796,95
P030:CV031	1,000	464	-14	4.132,41	3.795,53
P031:J028	1,000	464	-14	4.132,43	3.795,53
P031:CV032	1,000	464	-14	4.132,40	3.795,53
P032:J029	1,000	464	-14	4.132,41	3.795,53
P032:CV033	1,000	464	-14	4.132,38	3.795,53
P033:CV030	1,000	464	-14	4.132,41	3.795,53
P033:J034	1,000	464	-14	4.132,39	3.795,53
P034:CV031	1,000	464	-8	4.132,41	3.799,64
P034:J035	1,000	464	-1	4.132,38	3.804,62
P035:CV032	1,000	464	-14	4.132,40	3.795,53
P035:J036	1,000	464	11	4.132,38	3.813,38
P036:CV033	1,000	464	-14	4.132,38	3.795,53
P036:J037	1,000	464	-14	4.132,36	3.795,53
P037:J034	1,000	464	-14	4.132,39	3.795,53
P037:J038	1,000	464	-14	4.132,37	3.795,53
P038:J035	1,000	464	-1	4.132,38	3.804,62
P038:J039	1,000	464	3	4.132,37	3.807,82
P039:J036	1,000	464	11	4.132,38	3.813,38
P039:J040	1,000	464	-14	4.132,36	3.795,53
P040:J037	1,000	464	-14	4.132,36	3.795,53
P040:J041	1,000	464	-14	4.132,35	3.795,53
P041:J038	1,000	464	-14	4.132,37	3.795,53
P041:J043	1,000	468	12	4.132,33	3.811,39
P042:J039	1,000	464	3	4.132,37	3.807,82
P042:J044	1,000	468	36	4.132,33	3.828,03
P043:J040	1,000	464	-14	4.132,36	3.795,53
P043:J045	1,000	468	31	4.132,32	3.824,70

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P044:J041	1,000	464	-14	4.132,35	3.795,53
P044:J046	1,000	468	39	4.132,31	3.830,01
P046:J043	1,000	468	12	4.132,33	3.811,39
P046:J044	1,000	468	36	4.132,33	3.828,03
P047:J044	1,000	468	36	4.132,33	3.828,03
P047:J045	1,000	468	31	4.132,32	3.824,70
P048:J045	1,000	468	31	4.132,32	3.824,70
P048:J046	1,000	468	39	4.132,31	3.830,01
P049:J046	1,000	468	39	4.132,31	3.830,01
P049:J100-00	1,000	468	40	4.132,27	3.831,03
P100-01:J100-00	1,000	468	40	4.132,27	3.831,03
P100-01:J100-01	1,000	467	40	4.132,10	3.831,36
P100-02:J100-01	1,000	467	40	4.132,10	3.831,36
P100-02:J100-02	1,000	461	35	4.132,08	3.831,65
P100-03:J100-02	1,000	461	35	4.132,08	3.831,65
P100-03:J100-03	1,000	458	33	4.131,92	3.832,55
P100-04:J100-03	1,000	458	33	4.131,92	3.832,55
P100-04:J100-04	1,000	453	30	4.131,65	3.834,16
P100-05:J100-04	1,000	453	30	4.131,65	3.834,16
P100-05:J100-05	1,000	450	29	4.131,54	3.835,17
P100-06:J100-05	1,000	450	29	4.131,54	3.835,17
P100-06:J100-06	1,000	446	26	4.131,41	3.836,03
P100-07:J100-06	1,000	446	26	4.131,41	3.836,03
P100-07:J100-07	1,000	441	23	4.131,29	3.836,68
P100-08:J100-07	1,000	441	23	4.131,29	3.836,68
P100-08:J100-08	1,000	412	6	4.130,51	3.844,87
P100-09:J100-08	1,000	412	6	4.130,51	3.844,87
P100-09:J100-09	1,000	400	1	4.130,25	3.848,97
P100-10:J100-09	1,000	400	1	4.130,25	3.848,97
P100-10:J100-10	1,000	382	-8	4.129,82	3.854,71
P100-11:J100-10	1,000	382	-8	4.129,82	3.854,71

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P100-11:J100-11	1,000	367	-14	4.129,45	3.861,03
P100-12:J100-11	1,000	367	-14	4.129,45	3.861,03
P100-12:J100-12	1,000	362	-14	4.129,32	3.864,51
P100-13:J100-12	1,000	362	-14	4.129,32	3.864,51
P100-13:J100-13	1,000	357	-14	4.129,07	3.867,86
P100-14:J100-13	1,000	357	-14	4.129,07	3.867,86
P100-14:J100-14	1,000	353	-14	4.128,96	3.870,28
P100-15:J100-14	1,000	353	-14	4.128,96	3.870,28
P100-15:J100-15	1,000	347	-14	4.128,79	3.874,60
P100-16:J100-15	1,000	347	-14	4.128,79	3.874,60
P100-16:J100-16	1,000	331	-14	4.128,41	3.885,17
P100-17:J100-16	1,000	331	-14	4.128,41	3.885,17
P100-17:J100-17	1,000	329	-14	4.128,36	3.886,33
P100-18:J100-17	1,000	329	-14	4.128,36	3.886,33
P100-18:J100-18	1,000	304	-14	4.127,73	3.903,80
P100-19:J100-18	1,000	304	-14	4.127,73	3.903,80
P100-19:J100-19	1,000	301	-14	4.127,67	3.905,46
P100-20:J100-19	1,000	301	-14	4.127,67	3.905,46
P100-20:J100-20	1,000	300	-14	4.127,57	3.906,45
P100-21:J100-20	1,000	300	-14	4.127,57	3.906,45
P100-21:J100-21	1,000	300	-14	4.127,49	3.906,42
P100-22:J100-21	1,000	300	-14	4.127,49	3.906,42
P100-22:J100-22	1,000	300	-14	4.127,45	3.905,99
P100-23:J100-22	1,000	300	-14	4.127,45	3.905,99
P100-23:J100-23	1,000	304	-14	4.127,28	3.902,77
P100-24:J100-23	1,000	304	-14	4.127,28	3.902,77
P100-24:J100-24	1,000	307	-14	4.127,16	3.901,47

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P100-25:J100-24	1,000	307	-14	4.127,16	3.901,47
P100-25:J100-25	1,000	307	-13	4.127,09	3.901,15
P100-26:J100-25	1,000	307	-13	4.127,09	3.901,15
P100-26:J100-26	1,000	307	-14	4.127,03	3.901,00
P100-27:J100-26	1,000	307	-14	4.127,03	3.901,00
P100-27:J100-27	1,000	307	-13	4.127,00	3.901,85
P100-28:J100-27	1,000	307	-13	4.127,00	3.901,85
P100-28:J100-28	1,000	306	-12	4.126,95	3.902,90
P100-29:J100-28	1,000	306	-12	4.126,95	3.902,90
P100-29:J100-29	1,000	305	-13	4.126,86	3.902,86
P100-30:J100-29	1,000	305	-13	4.126,86	3.902,86
P100-30:J100-30	1,000	302	-14	4.126,79	3.903,85
P100-31:J100-30	1,000	302	-14	4.126,79	3.903,85
P100-31:J100-31	1,000	297	-14	4.126,65	3.907,11
P100-32:J100-31	1,000	297	-14	4.126,65	3.907,11
P100-32:J100-32	1,000	286	-14	4.126,36	3.914,53
P100-33:J100-32	1,000	286	-14	4.126,36	3.914,53
P100-33:J100-33	1,000	282	-14	4.126,21	3.917,88
P100-34:J100-33	1,000	282	-14	4.126,21	3.917,88
P100-34:J100-34	1,000	278	-14	4.126,07	3.920,21
P100-35:J100-34	1,000	278	-14	4.126,07	3.920,21
P100-35:J101-00	1,000	275	-14	4.125,91	3.922,31
P101-01:J101-00	1,000	275	-14	4.125,91	3.922,31
P101-01:J101-01	1,000	267	-14	4.125,48	3.927,51
P101-02:J101-01	1,000	267	-14	4.125,48	3.927,51
P101-02:J101-02	1,000	267	-14	4.125,36	3.927,40
P101-03:J101-02	1,000	267	-14	4.125,36	3.927,40

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-03:J101-03	1,000	268	-14	4.125,28	3.926,39
P101-04:J101-03	1,000	268	-14	4.125,28	3.926,39
P101-04:J101-04	1,000	271	-14	4.125,20	3.924,50
P101-05:J101-04	1,000	271	-14	4.125,20	3.924,50
P101-05:J101-05	1,000	274	-14	4.125,10	3.922,15
P101-06:J101-05	1,000	274	-14	4.125,10	3.922,15
P101-06:J101-06	1,000	277	-14	4.125,00	3.919,99
P101-07:J101-06	1,000	277	-14	4.125,00	3.919,99
P101-07:J101-07	1,000	278	-14	4.124,92	3.918,87
P101-08:J101-07	1,000	278	-14	4.124,92	3.918,87
P101-08:J101-08	1,000	279	-14	4.124,85	3.918,36
P101-09:J101-08	1,000	279	-14	4.124,85	3.918,36
P101-09:J101-09	1,000	279	-14	4.124,78	3.918,19
P101-10:J101-09	1,000	279	-14	4.124,78	3.918,19
P101-10:J101-10	1,000	279	-14	4.124,70	3.918,48
P101-11:J101-10	1,000	279	-14	4.124,70	3.918,48
P101-11:J101-11	1,000	278	-14	4.124,64	3.919,03
P101-12:J101-11	1,000	278	-14	4.124,64	3.919,03
P101-12:J101-12	1,000	276	-14	4.124,58	3.919,91
P101-13:J101-12	1,000	276	-14	4.124,58	3.919,91
P101-13:J101-13	1,000	274	-14	4.124,49	3.921,70
P101-14:J101-13	1,000	274	-14	4.124,49	3.921,70
P101-14:J101-14	1,000	270	-14	4.124,41	3.923,89
P101-15:J101-14	1,000	270	-14	4.124,41	3.923,89
P101-15:J101-15	1,000	256	-14	4.124,06	3.933,60
P101-16:J101-15	1,000	256	-14	4.124,06	3.933,60
P101-16:J101-16	1,000	253	-14	4.123,95	3.935,92

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-17:J101-16	1,000	253	-14	4.123,95	3.935,92
P101-17:J101-17	1,000	252	-14	4.123,90	3.936,59
P101-18:J101-17	1,000	252	-14	4.123,90	3.936,59
P101-18:J101-18	1,000	251	-14	4.123,80	3.937,01
P101-19:J101-18	1,000	251	-14	4.123,80	3.937,01
P101-19:J101-19	1,000	250	-14	4.123,34	3.937,56
P101-20:J101-19	1,000	250	-14	4.123,34	3.937,56
P101-20:J101-20	1,000	250	-14	4.123,26	3.937,03
P101-21:J101-20	1,000	250	-14	4.123,26	3.937,03
P101-21:J101-21	1,000	254	-14	4.123,06	3.934,20
P101-22:J101-21	1,000	254	-14	4.123,06	3.934,20
P101-22:J101-22	1,000	261	-14	4.122,74	3.928,95
P101-23:J101-22	1,000	261	-14	4.122,74	3.928,95
P101-23:J101-23	1,000	263	-14	4.122,63	3.927,55
P101-24:J101-23	1,000	263	-14	4.122,63	3.927,55
P101-24:J101-24	1,000	263	-14	4.122,54	3.927,24
P101-25:J101-24	1,000	263	-14	4.122,54	3.927,24
P101-25:J101-25	1,000	263	-14	4.122,48	3.927,41
P101-26:J101-25	1,000	263	-14	4.122,48	3.927,41
P101-26:J101-26	1,000	262	-14	4.122,42	3.927,85
P101-27:J101-26	1,000	262	-14	4.122,42	3.927,85
P101-27:J101-27	1,000	261	-14	4.122,37	3.928,36
P101-28:J101-27	1,000	261	-14	4.122,37	3.928,36
P101-28:J101-28	1,000	259	-14	4.122,29	3.929,77
P101-29:J101-28	1,000	259	-14	4.122,29	3.929,77
P101-29:J101-29	1,000	257	-14	4.122,23	3.931,19
P101-30:J101-29	1,000	257	-14	4.122,23	3.931,19

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-30:J101-30	1,000	256	-14	4.122,20	3.931,83
P101-31:J101-30	1,000	256	-14	4.122,20	3.931,83
P101-31:J101-31	1,000	241	-14	4.121,69	3.941,89
P101-32:J101-31	1,000	241	-14	4.121,69	3.941,89
P101-32:J101-32	1,000	209	-14	4.120,69	3.963,27
P101-33:J101-32	1,000	209	-14	4.120,69	3.963,27
P101-33:J101-33	1,000	199	-14	4.120,25	3.969,91
P101-34:J101-33	1,000	199	-14	4.120,25	3.969,91
P101-34:J101-34	1,000	195	-14	4.120,05	3.973,01
P101-35:J101-34	1,000	195	-14	4.120,05	3.973,01
P101-35:J101-35	1,000	185	-14	4.119,69	3.979,28
P101-36:J101-35	1,000	185	-14	4.119,69	3.979,28
P101-36:J101-36	1,000	184	-14	4.119,62	3.980,16
P101-37:J101-36	1,000	184	-14	4.119,62	3.980,16
P101-37:J101-37	1,000	183	-14	4.119,54	3.980,48
P101-38:J101-37	1,000	183	-14	4.119,54	3.980,48
P101-38:J101-38	1,000	183	-14	4.119,51	3.980,52
P101-39:J101-38	1,000	183	-14	4.119,51	3.980,52
P101-39:J101-39	1,000	183	-14	4.119,44	3.980,60
P101-40:J101-39	1,000	183	-14	4.119,44	3.980,60
P101-40:J101-40	1,000	182	-14	4.119,36	3.980,91
P101-41:J101-40	1,000	182	-14	4.119,36	3.980,91
P101-41:J101-41	1,000	182	-14	4.119,33	3.981,19
P101-42:J101-41	1,000	182	-14	4.119,33	3.981,19
P101-42:J101-42	1,000	180	-14	4.119,23	3.982,36
P101-43:J101-42	1,000	180	-14	4.119,23	3.982,36
P101-43:J101-43	1,000	179	-14	4.119,19	3.983,17

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-44:J101-43	1,000	179	-14	4.119,19	3.983,17
P101-44:J101-44	1,000	176	-14	4.119,11	3.984,85
P101-45:J101-44	1,000	176	-14	4.119,11	3.984,85
P101-45:J101-45	1,000	169	-14	4.118,90	3.989,98
P101-46:J101-45	1,000	169	-14	4.118,90	3.989,98
P101-46:J101-46	1,000	167	-14	4.118,85	3.991,04
P101-47:J101-46	1,000	167	-14	4.118,85	3.991,04
P101-47:J101-47	1,000	162	-14	4.118,72	3.994,61
P101-48:J101-47	1,000	162	-14	4.118,72	3.994,61
P101-48:J101-48	1,000	161	-14	4.118,68	3.995,37
P101-49:J101-48	1,000	161	-14	4.118,68	3.995,37
P101-49:J101-49	1,000	160	-14	4.118,65	3.995,81
P101-50:J101-49	1,000	160	-14	4.118,65	3.995,81
P101-50:J101-50	1,000	160	-14	4.118,63	3.996,04
P101-51:J101-50	1,000	160	-14	4.118,63	3.996,04
P101-51:J101-51	1,000	160	-14	4.118,59	3.996,15
P101-52:J101-51	1,000	160	-14	4.118,59	3.996,15
P101-52:J101-52	1,000	163	-14	4.118,58	3.993,81
P101-53:J101-52	1,000	163	-14	4.118,58	3.993,81
P101-53:J101-53	1,000	163	-14	4.118,55	3.993,52
P101-54:J101-53	1,000	163	-14	4.118,55	3.993,52
P101-54:J101-54	1,000	160	-14	4.118,53	3.995,82
P101-55:J101-54	1,000	160	-14	4.118,53	3.995,82
P101-55:J101-55	1,000	161	-14	4.118,48	3.994,96
P101-56:J101-55	1,000	161	-14	4.118,48	3.994,96
P101-56:J101-56	1,000	163	-14	4.118,43	3.993,65
P101-57:J101-56	1,000	163	-14	4.118,43	3.993,65

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-57:J101-57	1,000	175	-14	4.118,10	3.984,74
P101-58:J101-57	1,000	175	-14	4.118,10	3.984,74
P101-58:J101-58	1,000	177	-14	4.118,06	3.983,67
P101-59:J101-58	1,000	177	-14	4.118,06	3.983,67
P101-59:J101-59	1,000	178	-14	4.118,02	3.982,95
P101-60:J101-59	1,000	178	-14	4.118,02	3.982,95
P101-60:J101-60	1,000	178	-14	4.117,98	3.982,28
P101-61:J101-60	1,000	178	-14	4.117,98	3.982,28
P101-61:J101-61	1,000	179	-14	4.117,94	3.981,73
P101-62:J101-61	1,000	179	-14	4.117,94	3.981,73
P101-62:J101-62	1,000	180	-14	4.117,89	3.981,32
P101-63:J101-62	1,000	180	-14	4.117,89	3.981,32
P101-63:J101-63	1,000	180	-14	4.117,84	3.981,19
P101-64:J101-63	1,000	180	-14	4.117,84	3.981,19
P101-64:J101-64	1,000	179	-14	4.117,79	3.981,33
P101-65:J101-64	1,000	179	-14	4.117,79	3.981,33
P101-65:J101-65	1,000	179	-14	4.117,73	3.981,80
P101-66:J101-65	1,000	179	-14	4.117,73	3.981,80
P101-66:J101-66	1,000	178	-14	4.117,67	3.982,60
P101-67:J101-66	1,000	178	-14	4.117,67	3.982,60
P101-67:J101-67	1,000	177	-14	4.117,64	3.983,25
P101-68:J101-67	1,000	177	-14	4.117,64	3.983,25
P101-68:J101-68	1,000	172	-14	4.117,46	3.986,31
P101-69:J101-68	1,000	172	-14	4.117,46	3.986,31
P101-69:J101-69	1,000	170	-14	4.117,38	3.987,52
P101-70:J101-69	1,000	170	-14	4.117,38	3.987,52
P101-70:J101-70	1,000	169	-14	4.117,30	3.988,22

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)
Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-71:J101-70	1,000	169	-14	4.117,30	3.988,22
P101-71:J101-71	1,000	169	-14	4.117,24	3.988,48
P101-72:J101-71	1,000	169	-14	4.117,24	3.988,48
P101-72:J101-72	1,000	169	-14	4.117,17	3.988,46
P101-73:J101-72	1,000	169	-14	4.117,17	3.988,46
P101-73:J101-73	1,000	168	-14	4.117,06	3.988,42
P101-74:J101-73	1,000	168	-14	4.117,06	3.988,42
P101-74:J101-74	1,000	168	-14	4.116,94	3.988,70
P101-75:J101-74	1,000	168	-14	4.116,94	3.988,70
P101-75:J101-75	1,000	167	-14	4.116,87	3.989,06
P101-76:J101-75	1,000	167	-14	4.116,87	3.989,06
P101-76:J101-76	1,000	166	-14	4.116,79	3.989,53
P101-77:J101-76	1,000	166	-14	4.116,79	3.989,53
P101-77:J101-77	1,000	166	-14	4.116,74	3.989,85
P101-78:J101-77	1,000	166	-14	4.116,74	3.989,85
P101-78:J101-78	1,000	166	-14	4.116,69	3.990,00
P101-79:J101-78	1,000	166	-14	4.116,69	3.990,00
P101-79:J101-79	1,000	166	-14	4.116,65	3.989,96
P101-80:J101-79	1,000	166	-14	4.116,65	3.989,96
P101-80:J101-80	1,000	166	-14	4.116,65	3.989,91
P101-81:J101-80	1,000	166	-14	4.116,65	3.989,91
P101-81:J101-82	1,000	166	-14	4.116,57	3.989,51
P101-82:J101-82	1,000	166	-14	4.116,57	3.989,51
P101-82:J101-84	1,000	167	-14	4.116,43	3.988,91
P101-83:J101-84	1,000	167	-14	4.116,43	3.988,91
P101-83:J101-86	1,000	167	-14	4.116,36	3.988,91
P101-84:J101-86	1,000	167	-14	4.116,36	3.988,91

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-84:J101-88	1,000	166	-14	4.116,22	3.989,45
P101-85:J101-88	1,000	166	-14	4.116,22	3.989,45
P101-85:J102-04	1,000	164	-14	4.115,95	3.990,48
P101-86:J102-04	1,000	164	-14	4.115,95	3.990,48
P101-86:J103-00	1,000	163	-14	4.115,76	3.991,18
P101-87:J103-00	1,000	163	-14	4.115,76	3.991,18
P101-87:J103-01	1,000	161	-14	4.115,53	3.992,06
P101-88:J103-01	1,000	161	-14	4.115,53	3.992,06
P101-88:J103-02	1,000	164	-14	4.115,52	3.989,79
P101-89:J103-02	1,000	164	-14	4.115,52	3.989,79
P101-89:J103-03	1,000	164	-14	4.115,43	3.989,62
P101-90:J103-03	1,000	164	-14	4.115,43	3.989,62
P101-90:J103-04	1,000	166	-14	4.115,33	3.988,72
P101-91:J103-04	1,000	166	-14	4.115,33	3.988,72
P101-91:J103-05	1,000	163	-14	4.115,32	3.990,83
P101-92:J103-05	1,000	163	-14	4.115,32	3.990,83
P101-92:J103-06	1,000	165	-14	4.115,11	3.988,91
P101-93:J103-06	1,000	165	-14	4.115,11	3.988,91
P101-93:J103-07	1,000	166	-14	4.115,04	3.988,29
P101-94:J103-07	1,000	166	-14	4.115,04	3.988,29
P101-94:J103-08	1,000	167	-14	4.114,77	3.986,87
P101-95:J103-08	1,000	167	-14	4.114,77	3.986,87
P101-95:J103-09	1,000	169	-14	4.114,67	3.985,92
P101-96:J103-09	1,000	169	-14	4.114,67	3.985,92
P101-96:J103-10	1,000	170	-14	4.114,58	3.984,54
P101-97:J103-10	1,000	170	-14	4.114,58	3.984,54
P101-97:J103-11	1,000	173	-14	4.114,48	3.982,45

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-98:J103-11	1,000	173	-14	4.114,48	3.982,45
P101-98:J103-12	1,000	181	-14	4.114,31	3.977,00
P101-99:J103-12	1,000	181	-14	4.114,31	3.977,00
P101-99:J103-13	1,000	183	-14	4.114,25	3.975,54
P101-100:J103-13	1,000	183	-14	4.114,25	3.975,54
P101-100:J103-14	1,000	184	-14	4.114,20	3.974,31
P101-101:J103-14	1,000	184	-14	4.114,20	3.974,31
P101-101:J103-15	1,000	185	-14	4.114,14	3.973,55
P101-102:J103-15	1,000	185	-14	4.114,14	3.973,55
P101-102:J103-16	1,000	186	-14	4.114,10	3.973,13
P101-103:J103-16	1,000	186	-14	4.114,10	3.973,13
P101-103:J104-00	1,000	186	-14	4.114,09	3.973,06
P101-104:J104-00	1,000	186	-14	4.114,09	3.973,06
P101-104:J104-01	1,000	186	-14	4.114,05	3.972,86
P101-105:J104-01	1,000	186	-14	4.114,05	3.972,86
P101-105:J104-02	1,000	186	-14	4.113,93	3.972,95
P101-106:J104-02	1,000	186	-14	4.113,93	3.972,95
P101-106:J104-03	1,000	186	-14	4.113,83	3.972,76
P101-107:J104-03	1,000	186	-14	4.113,83	3.972,76
P101-107:J104-04	1,000	187	-14	4.113,61	3.971,95
P101-108:J104-04	1,000	187	-14	4.113,61	3.971,95
P101-108:J104-05	1,000	187	-14	4.113,51	3.971,78
P101-109:J104-05	1,000	187	-14	4.113,51	3.971,78
P101-109:J104-06	1,000	187	-14	4.113,46	3.971,85
P101-110:J104-06	1,000	187	-14	4.113,46	3.971,85
P101-110:J104-07	1,000	186	-14	4.113,41	3.972,04
P101-111:J104-07	1,000	186	-14	4.113,41	3.972,04

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-111:J104-08	1,000	186	-14	4.113,35	3.972,21
P101-112:J104-08	1,000	186	-14	4.113,35	3.972,21
P101-112:J104-09	1,000	186	-14	4.113,13	3.972,13
P101-113:J104-09	1,000	186	-14	4.113,13	3.972,13
P101-113:J104-10	1,000	186	-14	4.113,07	3.971,80
P101-114:J104-10	1,000	186	-14	4.113,07	3.971,80
P101-114:J104-11	1,000	190	-14	4.112,88	3.968,73
P101-115:J104-11	1,000	190	-14	4.112,88	3.968,73
P101-115:J104-12	1,000	191	-14	4.112,82	3.968,17
P101-116:J104-12	1,000	191	-14	4.112,82	3.968,17
P101-116:J104-13	1,010	193	-14	4.113,73	3.968,29
P101-117:J104-13	1,010	193	-14	4.113,73	3.968,29
P101-117:J104-14	1,000	192	-14	4.113,14	3.968,04
P101-118:J104-14	1,000	192	-14	4.113,14	3.968,04
P101-118:J104-15	1,020	195	-14	4.115,75	3.968,33
P101-119:J104-15	1,020	195	-14	4.115,75	3.968,33
P101-119:J104-16	1,000	189	-14	4.112,54	3.969,06
P101-120:J104-16	1,000	189	-14	4.112,54	3.969,06
P101-120:J104-17	1,000	187	-14	4.112,46	3.970,45
P101-121:J104-17	1,000	187	-14	4.112,46	3.970,45
P101-121:J104-18	1,000	181	-14	4.112,30	3.974,75
P101-122:J104-18	1,000	181	-14	4.112,30	3.974,75
P101-122:J104-19	1,000	179	-14	4.112,24	3.975,98
P101-123:J104-19	1,000	179	-14	4.112,24	3.975,98
P101-123:J104-20	1,090	192	-14	4.123,18	3.978,19
P101-124:J104-20	1,090	192	-14	4.123,18	3.978,19
P101-124:J105-00	1,000	173	-14	4.111,95	3.980,04

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-125:J105-00	1,000	173	-14	4.111,95	3.980,04
P101-125:J105-01	1,000	173	-14	4.111,96	3.980,05
P101-126:J105-01	1,000	173	-14	4.111,96	3.980,05
P101-126:J105-02	1,000	171	-14	4.111,88	3.981,39
P101-127:J105-02	1,000	171	-14	4.111,88	3.981,39
P101-127:J105-03	1,000	170	-14	4.111,83	3.982,22
P101-128:J105-03	1,000	170	-14	4.111,83	3.982,22
P101-128:J105-04	1,000	169	-14	4.111,74	3.982,40
P101-129:J105-04	1,000	169	-14	4.111,74	3.982,40
P101-129:J105-05	1,000	169	-14	4.111,70	3.982,31
P101-130:J105-05	1,000	169	-14	4.111,70	3.982,31
P101-130:J105-06	1,000	171	-12	4.111,50	3.982,72
P101-131:J105-06	1,000	171	-12	4.111,50	3.982,72
P101-131:J105-07	1,000	172	-5	4.111,45	3.987,08
P101-132:J105-07	1,000	172	-5	4.111,45	3.987,08
P101-132:J105-08	1,000	173	-4	4.111,42	3.986,78
P101-133:J105-08	1,000	173	-4	4.111,42	3.986,78
P101-133:J105-09	1,000	174	-1	4.111,34	3.987,71
P101-134:J105-09	1,000	174	-1	4.111,34	3.987,71
P101-134:J105-10	1,000	177	1	4.111,27	3.986,99
P101-135:J105-10	1,000	177	1	4.111,27	3.986,99
P101-135:J105-11	1,000	192	4	4.110,82	3.978,50
P101-136:J105-11	1,000	192	4	4.110,82	3.978,50
P101-136:J105-12	1,000	194	5	4.110,75	3.977,59
P101-137:J105-12	1,000	194	5	4.110,75	3.977,59
P101-137:J105-13	1,000	194	4	4.110,71	3.977,28
P101-138:J105-13	1,000	194	4	4.110,71	3.977,28

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P101-138:J105-14	1,000	194	5	4.110,63	3.977,44
P101-139:J105-14	1,000	194	5	4.110,63	3.977,44
P101-139:J105-15	1,000	194	5	4.110,54	3.977,25
P101-140:J105-15	1,000	194	5	4.110,54	3.977,25
P101-140:J106-00	1,000	193	3	4.110,48	3.976,64
P102-01:J106-00	1,000	193	3	4.110,48	3.976,64
P102-01:J106-01	1,000	170	-10	4.109,44	3.982,91
P102-02:J106-01	1,000	170	-10	4.109,44	3.982,91
P102-02:J107-00	1,020	163	-13	4.110,45	3.986,54
P103-01:J107-00	1,020	163	-13	4.110,45	3.986,54
P103-01:J107-01	1,000	161	-12	4.109,03	3.986,99
P103-02:J107-01	1,000	161	-12	4.109,03	3.986,99
P103-02:J107-02	1,000	164	-5	4.109,02	3.989,80
P103-03:J107-02	1,000	164	-5	4.109,02	3.989,80
P103-03:J107-03	1,030	165	-8	4.111,54	3.990,29
P103-04:J107-03	1,030	165	-8	4.111,54	3.990,29
P103-04:J107-04	1,020	159	-13	4.110,54	3.989,39
P103-05:J107-04	1,020	159	-13	4.110,54	3.989,39
P103-05:J108-00	1,000	156	-14	4.108,81	3.988,66
P104-01:J108-00	1,000	156	-14	4.108,81	3.988,66
P104-01:J109-00	1,000	139	-14	4.108,06	3.999,90
P105-01:J109-00	1,000	139	-14	4.108,06	3.999,90
P105-01:J109-01	1,000	139	-14	4.108,05	4.000,30
P105-02:J109-01	1,000	139	-14	4.108,05	4.000,30
P105-02:J109-02	1,000	141	-8	4.107,98	4.002,61
P105-03:J109-02	1,000	141	-8	4.107,98	4.002,61
P105-03:J109-03	1,000	139	-5	4.107,80	4.006,67

Reporte de resultados – Análisis de transitorios hidráulicos
Escenario N°2: Parada de bomba con atenuación de fenómenos transitorios

Transient Calculation Summary: Con atenuación (Vál. anticipadora de onda)

Extreme Pressures and Heads

End Point	Upsurge Ratio	Max. Pressure (psi)	Min. Pressure (psi)	Max. Head (m)	Min. Head (m)
P105-04:J109-03	1,000	139	-5	4.107,80	4.006,67
P105-04:J109-04	1,000	148	11	4.107,47	4.010,96
P105-05:J109-04	1,000	148	11	4.107,47	4.010,96
P105-05:J109-05	1,000	145	13	4.107,18	4.014,19
P105-06:J109-05	1,000	145	13	4.107,18	4.014,19
P105-06:J109-06	1,000	127	-1	4.106,77	4.016,45
P105-07:J109-06	1,000	127	-1	4.106,77	4.016,45
P105-07:J109-07	1,000	101	-14	4.106,39	4.025,34
P105-08:J109-07	1,000	101	-14	4.106,39	4.025,34
P105-08:J109-08	1,000	97	-14	4.106,30	4.027,99
P105-09:J109-08	1,000	97	-14	4.106,30	4.027,99
P105-09:J109-09	1,010	70	-14	4.106,10	4.047,00
P105-10:J109-09	1,010	70	-14	4.106,10	4.047,00
P105-10:J109-10	1,010	69	-14	4.105,97	4.047,08
P105-11:J109-10	1,010	69	-14	4.105,97	4.047,08
P105-11:J109-11	1,010	67	-14	4.105,92	4.048,80
P105-12:J109-11	1,010	67	-14	4.105,92	4.048,80
P105-12:J200-00	1,180	78	-14	4.113,85	4.049,00
P200:J200-00	1,180	78	-14	4.113,85	4.049,00
P200:J201	1,190	78	-14	4.114,19	4.049,00
P201:J201	1,190	78	-14	4.114,19	4.049,00
P201:FCV202	1,190	79	-14	4.114,48	4.049,00
P202:FCV202	3,520	106	-9	4.133,71	4.052,93
P202:J203	3,010	90	-14	4.122,72	4.049,00
P203:J203	3,010	90	-14	4.122,72	4.049,00
P203:J204	2,430	73	-14	4.110,21	4.049,13
P204:J204	2,430	73	-14	4.110,21	4.049,13
P204:J205	30,880	45	-14	4.110,73	4.069,00
P205:J205	30,880	45	-14	4.110,73	4.069,00
P205:J206	35,520	51	-14	4.115,04	4.069,00
P206:J206	35,520	51	-14	4.115,04	4.069,00
P206:T207	1,500	2	0	4.080,50	4.079,00
P-1:J100-00	1,000	468	40	4.132,27	3.831,03
P-1:SV100	1,000	467	53	4.132,27	3.840,55

Anexo 4. Reporte de resultados AMETank

TANK CALCULATIONS

Table of Contents

[Project Design Data and Summary](#)

[Roof and Structure Design Details](#)

[Top Member Design](#)

[Shell Design](#)

[Bottom Design](#)

[Wind Moment](#)

[Seismic Design](#)

[Anchor Bolt Design](#)

[Anchor Chair Design](#)

[Appurtenances Design](#)

[Normal and Emergency Venting](#)

[Capacities and Weights](#)

[Reactions on Foundation](#)

[Disclaimer and Special Notes](#)

No Warnings!!

Project Design Data and Summary

[Back](#)

Project Data

Job : 2024-06-17
Date of Calcs. : 30-Oct-2024
Mfg. or Insp. Date :
Designer : Johar.Condor
Project :
Tag ID : 2132-TKF-0085
Plant :
Plant Location :
Site :
Design Basis : API-650 13th Edition Errata 1, 2021
Annexes Used : E

Design Parameters and Operating Conditions

Design Parameters

Design Internal Pressure = 0 KPa or 0 mmh₂o
Design External Pressure = -0 KPa or -0 mmh₂o

D of Tank = 18 m
OD of Tank = 18.02 m
ID of Tank = 18 m
CL of Tank = 18.01 m
Shell Height = 15 m
S.G of Contents = 1
S.G of Hydrotest = 1
Hydrotest Liquid Level = 14.85 m
Max Design Liq. Level = 14.85 m
Max Operating Liq. Level = 14.15 m
Min Liq. Level = 1.89 m
Design Temperature = 15 °C
MDMT (Minimum Design Metal Temperature) = 0 °C
Tank Joint Efficiency = 1
Ground Snow Load = 0.4 kPa
Roof Live Load = 1 kPa
Additional Roof Dead Load = 0.29 kPa

Wind Load Basis: ASCE 7-05
3 Second Gust Wind Speed (entered), V_g = 97 kph
Wind Importance Factor, I_w = 1
Design Wind Speed, V = V_g * SQRT(I_w) = 97 kph

Seismic Method: API-650 - ASCE7 Mapped(Ss & S1)
Seismic Use Group = II
Site Class = B
T_L (sec) = 16
S_s (g) = 1.16
S₁ (g) = 0.37

Av (g) = 0.36
Q = 0.67
Importance Factor = 1.25

Design Remarks

Summary Results

Shell

Shell #	Width (mm)	Material	CA (mm)	JE	Min Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Sd (MPa)	St (MPa)	Weight (kg)
1	2400	A36	1.6	1	250	400	160	171	12,759
2	2400	A36	1.6	1	250	400	160	171	9,571
3	2400	A36	1.6	1	250	400	160	171	8,508
4	2400	A36	1.6	1	250	400	160	171	6,381
5	1800	A36	1.6	1	250	400	160	171	4,786
6	1800	A36	1.6	1	250	400	160	171	4,786
7	1800	A36	1.6	1	250	400	160	171	4,786

(continued)

Shell #	Weight CA (kg)	t-min Erection (mm)	t-Des (mm)	t-Test (mm)	t-min Seismic (mm)	t-min Ext-Pe (mm)	t-min (mm)	t-Actual (mm)	Status
1	11,059	6	9.62	7.5	9.06	NA	9.62	12	OK
2	7,870	6	8.3	6.27	7.97	NA	8.3	9	OK
3	6,807	6	6.97	5.03	6.85	NA	6.97	8	OK
4	4,680	6	5.65	3.79	5.68	NA	6	6	OK
5	3,510	6	4.33	2.55	4.46	NA	6	6	OK
6	3,510	6	3.34	1.62	3.51	NA	6	6	OK
7	3,510	6	2.34	0.7	2.55	NA	6	6	OK

Total Weight of Shell = 51,628.95 kg

Roof

Type = Structurally Supported Conical Roof
Plates Material = A36
Structural Material = A36
t.required = 5.8 mm
t.actual = 6 mm
Roof corrosion allowance = 0.8 mm
Roof Joint Efficiency = 1
Plates Overlap Weight = 549 kg
Plates Weight = 12,176.41 kg

Structure

Rafters

Qty	At Radius (m)	Size	Length (m)	W (N/m)	Ind. Weight (kg)	Total Weight (kg)
27	9	C9X15	8.66	218.9	193.37	5,221.2

Rafters Total Weight = 5,221.2 kg

Columns

Qty	At Radius (m)	Size	Length (m)	W (N/m)	Ind. Weight (kg)	Total Weight (kg)
1	0	10" SCH 80	16.05	939.65	1,538.05	1,538.05

Columns Total Weight = 1,538.05 kg

Bottom

Type : Cone-Up Bottom Floor

Bottom Material = A36

t.required = 7.6 mm

t.actual = 8 mm

Bottom corrosion allowance = 1.6 mm

Bottom Joint Efficiency = 1

Total Weight of Bottom = 16,312.92 kg

Annular Ring

Material = A36

t.actual = 8 mm

Weight = 2,449.86 kg

Top Member

Type = Detail B

Size = L2x2x1/4

Material = A36

Weight = 268.29 kg

Anchors

Quantity = 20

Size = 57.15 mm

Material = A307

Bolt Hole Circle Radius = 9.1 m

Nameplate Information

Pressure Combination Factor	0.4
Design Standard	API-650 13th Edition Errata 1, 2021
Appendices Used	E
Roof	A36 : 6 mm
Shell (1)	A36 : 12 mm
Shell (2)	A36 : 9 mm
Shell (3)	A36 : 8 mm
Shell (4)	A36 : 6 mm
Shell (5)	A36 : 6 mm
Shell (6)	A36 : 6 mm
Shell (7)	A36 : 6 mm
Bottom	A36 : 8 mm
Annular Ring	A36 : 8 mm

Roof and Structure Design Details [Back](#)

Roof Type = Cone

Structure Support Type = Inside Structure With Columns

Material Properties

Material = A36

Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa

Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd) = 160.0 MPa

Density (d) = 7,840 kg/m³

Geometry

Rh = Horizontal Radius (m)

slope = Slope (Rise / Run)

Rh = 9.02 m

slope = 0.16

Description	Variable	Equation	Value	Unit
Slope Angle	Theta	ARCTAN(slope)	9.09	deg
Angle With Vertical Line	Alpha	90 - Theta	80.91	deg
Height	h	Rh * TAN(Theta)	1.44	m
Surface Area	A	(pi * (Rh ²)) / COS(Theta)	258.85	m ²
Center of Gravity from Base	CG	h / 3	0.48	m
Vertical Projected Area	Av	Rh * h	13.02	m ²
Horizontal Projected Area	Ah	pi * (Rh ²)	255.6	m ²
Volume	V	(pi * (Rh ²) * h) / 3	122.96	m ³

Weights

d-ins = Insulation Density (kg/m³)

DL-add = Added dead load (kPa)

t = Plates Thickness (mm)

t-ins = Insulation Thickness (mm)

Wr-pl-add = Additional Weight (kg)

d-ins = 130 kg/m³

DL-add = 0.29 kPa

t = 6 mm

t-ins = 0 mm

Wr-pl-add = 0 kg

Description	Variable	Equation	Value	Unit
Plates Nominal Weight	Wr-pl	(A * d * t) + Wr-pl-add	12,176.41	kg
Plates Corroded Weight	Wr-pl-corr	(A * d * (t - CA)) + Wr-pl-add	10,552.89	kg
New Plates Dead Load Pressure	DL-pl	((9.80665 * Wr-pl) / Ah) * (1 / 1000)	0.47	kPa
Corroded Plates Dead Load Pressure	DL-pl-corr	((9.80665 * Wr-pl-corr) / Ah) * (1 / 1000)	0.4	kPa

Insulation Weight	Wr-ins	t-ins * d-ins * A	0.0	kg
Insulation Dead Load Pressure	DL-ins	$((9.80665 * Wr-ins) / Ah) * (1 / 1000)$	0.0	kPa
Dead Load	DL	DL-pl + DL-ins + DL-add	0.76	kPa
Total Nominal Dead Weight	Wr-DL	$(DL * Ah) / 9.80665$	19,734.99	kg
Additional Dead Weight	Wr-DL-add	$(DL-add * Ah) / 9.80665$	7,558.58	kg

Loads

B = Maximum Gravity Load Combination Based on Balanced Snow Load (kPa)

e.1b = Gravity Loads Combination 1 Based on Balanced Snow Load per *API 650 Section 5.2.2* (kPa)

e.1u = Gravity Loads Combination 1 Based on Unbalanced Snow Load per *API 650 Section 5.2.2* (kPa)

e.2b = Gravity Loads Combination 2 Based on Balanced Snow Load per *API 650 Section 5.2.2* (kPa)

e.2u = Gravity Loads Combination 2 Based on Unbalanced Snow Load per *API 650 Section 5.2.2* (kPa)

Fpe = External Pressure Combination Factor

Lr = Minimum Roof Live Load (kPa)

max-gravity-load = Maximum Gravity Load (kPa)

Pe = Design External Pressure (kPa)

S = Ground Snow Load (kPa)

Sb = Balanced Snow load per *API 650 Section 5.2.1 (h)* (kPa)

Su = Unbalanced Snow load per *API 650 Section 5.2.1 (h)* (kPa)

U = Maximum Gravity Load Combination Based on Unbalanced Snow Load (kPa)

W-max-gravity-load = Maximum Gravity Load Weight (kg)

Fpe = 0.4

Lr = 1.0 kPa

Pe = 0.0 kPa

S = 0.4 kPa

Sb = 0.84 * S

Sb = 0.84 * 0.4

Sb = 0.34 kPa

Su = Sb

Su = 0.336

Su = 0.34 kPa

e.1b = DL + MAX(Lr , Sb) + (Fpe * Pe)

e.1b = 0.7572 + MAX(1.0 , 0.336) + (0.4 * 0.0)

e.1b = 1.76 kPa

e.2b = DL + Pe + (0.4 * MAX(Lr , Sb))

e.2b = 0.7572 + 0.0 + (0.4 * MAX(1.0 , 0.336))

e.2b = 1.16 kPa

B = MAX(e.1b , e.2b)

B = MAX(1.7572 , 1.1572)

B = 1.76 kPa

e.1u = DL + MAX(Lr , Su) + (Fpe * Pe)

e.1u = 0.7572 + MAX(1.0 , 0.336) + (0.4 * 0.0)

e.1u = 1.76 kPa

$$e.2u = DL + Pe + (0.4 * \text{MAX}(Lr, Su))$$

$$e.2u = 0.7572 + 0.0 + (0.4 * \text{MAX}(1.0, 0.336))$$

$$e.2u = 1.16 \text{ kPa}$$

$$U = \text{MAX}(e.1u, e.2u)$$

$$U = \text{MAX}(1.7572, 1.1572)$$

$$U = 1.76 \text{ kPa}$$

$$\text{max-gravity-load} = \text{MAX}(B, U)$$

$$\text{max-gravity-load} = \text{MAX}(1.7572, 1.7572)$$

$$\text{max-gravity-load} = 1.76 \text{ kPa}$$

$$W\text{-max-gravity-load} = (\text{max-gravity-load} * Ah * 1000) / 9.80665$$

$$W\text{-max-gravity-load} = (1.7572 * 255.6012 * 1000) / 9.80665$$

$$W\text{-max-gravity-load} = 45,799.06 \text{ kg}$$

Erection Requirements

t-erec-req = Minimum Erection Thickness Including Corrosion Allowance (mm)

As per API-650 5.10.2.2, Minimum Erection Thickness (t-erec) = 5 mm

$$t\text{-erec-req} = t\text{-erec} + CA$$

$$t\text{-erec-req} = 5 + 0.8$$

$$t\text{-erec-req} = 5.8 \text{ mm}$$

Required Thickness

t-req = Required Thickness (mm)

$$t\text{-req} = t\text{-erec-req}$$

$$t\text{-req} = 5.8$$

$$t\text{-req} = 5.8 \text{ mm}$$

t >= t-req ==> PASS

Structure Design Calculations

Radial Bay 0 (Center Bay)

Center Bay Rafters Spacing and Quantity

b = Maximum Rafter Spacing (mm)
b_calc = Calculated Maximum Rafter Spacing per API-650 5.10.4.4 (mm)
CA = Roof Corrosion Allowance (mm)
DL = Dead load (kPa)
Fp = Pressure Combination Factor
Fy = Roof Yield Strength (MPa)
l_actual_0 = Rafters Actual Spacing (mm)
Lr = Roof Live Load (kPa)
N_actual_0 = Actual Number of Rafters
N_min_0 = Rafters Quantity Required
P_ext_1_0 = Maximum External Pressure (kPa)
P_max_0 = Maximum Roof Load Based on Rafters Actual Spacing (MPa)
R_0 = Rafters Outer Radius (mm)
S = Ground Snow Load (kPa)
Sb = Balanced Snow Load (kPa)
t-actual = Roof Actual Thickness (mm)
t_calc_0 = Roof Required Thickness Based on Rafters Actual Spacing (mm)
TL = Roof Total Load (Dead + Live) (MPa)

CA = 0.8 mm
DL = 0.76 kPa

$F_p = 0.4$
 $F_y = 250.0 \text{ MPa}$
 $L_r = 1.0 \text{ kPa}$
 $N_{\text{actual}_0} = 27$
 $R_0 = 9,000 \text{ mm}$
 $S = 0.4 \text{ kPa}$
 $S_b = 0.34 \text{ kPa}$
 $t_{\text{actual}} = 6 \text{ mm}$
 $TL = 0.0017571722036641012 \text{ MPa}$

$b_{\text{calc}} = (t_{\text{actual}} - CA) * \text{SQRT}(((1.5 * F_y) / TL))$
 $b_{\text{calc}} = (6 - 0.8) * \text{SQRT}(((1.5 * 250.0) / 0.0018))$
 $b_{\text{calc}} = 2,402.21 \text{ mm}$

$b = \text{MIN}(b_{\text{calc}}, l_{\text{max-by-user}})$
 $b = \text{MIN}(2,402.2147, 2,100)$
 $b = 2,100 \text{ mm}$

$N_{\text{min}_0} = \text{CEILING}(((2 * \pi * R_0) / b))$
 $N_{\text{min}_0} = \text{CEILING}(((2 * \pi * 9,000) / 2,100))$
 $N_{\text{min}_0} = 27$

$N_{\text{recommended}_0}$ must be a multiple of 1, therefore $N_{\text{recommended}_0} = 27$.

$N_{\text{rft}_0} \geq N_{\text{min}_0} \Rightarrow \text{PASS}$

$l_{\text{actual}_0} = (2 * \pi * R_0) / N_{\text{actual}_0}$
 $l_{\text{actual}_0} = (2 * \pi * 9,000) / 27$
 $l_{\text{actual}_0} = 2,094.4 \text{ mm}$

$t_{\text{calc}_0} = (l_{\text{actual}_0} / \text{SQRT}(((1.5 * F_y) / TL))) + CA$
 $t_{\text{calc}_0} = (2,094.3951 / \text{SQRT}(((1.5 * 250.0) / 0.0018))) + 0.8$
 $t_{\text{calc}_0} = 5.33 \text{ mm}$

Center Bay Maximum Allowable External Pressure Based on Rafters Actual Spacing

$P_{\text{max}_0} = (1.5 * F_y) / ((l_{\text{actual}_0} / (t_{\text{actual}} - CA))^2)$
 $P_{\text{max}_0} = (1.5 * 250.0) / ((2,094.3951 / (6 - 0.8))^2)$
 $P_{\text{max}_0} = 0.002311642804799937 \text{ MPa}$

$P_{\text{ext}_1_0} = (P_{\text{max}_0} - DL - (F_p * \text{MAX}(S, L_r))) * -1$
 $P_{\text{ext}_1_0} = (2.3116 - 0.7572 - (0.4 * \text{MAX}(0.4, 1.0))) * -1$
 $P_{\text{ext}_1_0} = -1.15 \text{ kPa}$

Center Bay Rafter Design

$\text{Average-p-width}_0 = \text{Average Plate Width (mm)}$
 $\text{Average-r-s}_{\text{inner}_0} = \text{Average Rafter Spacing on Inner Side (mm)}$
 $\text{Average-r-s}_{\text{shell}_0} = \text{Average Rafter Spacing on Outer Side (mm)}$
 $b = \text{Braces Positions (mm)}$
 $CA_{\text{rft}} = \text{Rafter Corrosion Allowance (mm)}$
 $\text{div} = \text{Deflection Limit Divisor (mm)}$
 $Ma_{\text{rft}} = \text{Rafter Material}$
 $\text{Max}_P_0 = \text{Max Load Allowed per Rafter (MPa)}$
 $\text{Max-r-span}_0 = \text{Rafter Design Length (mm)}$
 $M_{\text{max}_\text{rft}_0} = \text{Maximum Bending Moment for the Dead Load Only (N.mm)}$
 $M_{\text{max}_\text{rft}_a} = \text{Maximum Bending Moment (N.mm)}$
 $N_{\text{actual}_0} = \text{Actual Number of Rafters}$
 $N_{\text{braces}} = \text{Recommended Number of Braces}$
 $P_{\text{ext}_2_0} = \text{Vacuum Limited by Rafter Type (kPa)}$
 $Ri_0 = \text{Inner Radius (mm)}$
 $Ro_0 = \text{Outer Radius (mm)}$

$Sd_DL_rft_0$ = Rafter Allowable Stress for Dead Load Only Case (MPa)
 Sd_rft_0 = Rafter Allowable Stress (MPa)
 $Sx_rft_Req_0$ = Minimum Required Elastic Section Modulus (cm³)
 $Sx_rft_Req_0-1$ = Required Elastic Section Modulus for the Dead Load and Live Load Case (cm³)
 $Sx_rft_Req_0_2$ = Required Elastic Section Modulus for Dead Load Only Case (cm³)
 θ = Slope Angle (deg)
 TL = Total Top Load (Dead + Live) (MPa)
 $W_DL_rft_0$ = Rafter Design Dead (rafter weight + top dead load) (N/mm)
 $W_Max_rft_0$ = Maximum stress allowed for each rafter in ring (N/mm)
 W_rft_0 = Rafter Design Load (rafter weight + top load) (N/mm)

$b = [3,005.39 \ 5,929.76] \text{ mm}$
 $CA_rft = 0.8 \text{ mm}$
 $div = 180 \text{ mm}$
 $Ma_rft = A36$
 $N_actual_0 = 27$
 $Ri_0 = 439.76 \text{ mm}$
 $Ro_0 = 9,000 \text{ mm}$
 $\theta = 9.09 \text{ deg}$
 $TL = 0.0017571722036641012 \text{ MPa}$

Section Modulus About X Axis (Sx_corr) = 152,640.07 mm³

$Max_r_span_0 = (Ro_0 - Ri_0) / \cos(\theta)$
 $Max_r_span_0 = (9,000 - 439.7589) / \cos(9.0903)$
 $Max_r_span_0 = 8,669.12 \text{ mm}$

$Average_r_s_inner_0 = (2 * \pi * Ri_0) / N_actual_0$
 $Average_r_s_inner_0 = (2 * \pi * 439.7589) / 27$
 $Average_r_s_inner_0 = 102.34 \text{ mm}$

$Average_r_s_shell_0 = (2 * \pi * Ro_0) / N_actual_0$
 $Average_r_s_shell_0 = (2 * \pi * 9,000) / 27$
 $Average_r_s_shell_0 = 2,094.4 \text{ mm}$

$Average_p_width_0 = (Average_r_s_inner_0 + Average_r_s_shell_0) / 2$
 $Average_p_width_0 = (102.3365 + 2,094.3951) / 2$
 $Average_p_width_0 = 1,098.37 \text{ mm}$

Center Bay Rafter Material Properties

Material = A36
 Minimum Tensile Strength (S_u) = 400.0 MPa
 Minimum Yield Strength (S_y) = 250.0 MPa
 Modulus of Elasticity at Design Temperature (E) = 199,000 MPa

Center Bay Rafter C-Channel Size C9X15 Section Properties

Description	Variable	New	Corroded	Unit
Weight	W	22.32	17.95	kg/m
Cross Sectional Area	A	2,838.7	2,282.97	mm ²
Radius of Gyration About X Axis	r_x	86.36	86.36	mm
Radius of Gyration About Y Axis	r_y	16.74	16.64	mm
Moment Of Inertia About X Axis	I_x	21,227,802.71	17,375,753.12	mm ⁴
Moment Of Inertia About Y Axis	I_y	795,002.02	631,715.89	mm ⁴
Section Modulus About X Axis	S_x	185,173.82	152,640.07	mm ³
Section Modulus About Y Axis	S_y	16,550.93	13,486.85	mm ³

Plastic Section Modulus About X Axis	Zx	222,864.07	181,361.09	mm ³
Plastic Section Modulus About Y Axis	Zy	33,429.61	27,169.34	mm ³
Warping Constant	cw	8,324,611,862.74	6,618,289,277.19	mm ⁶
Torsional Constant	j	86,576.14	47,835.16	mm ⁴
Centroid X Coords	cx	14.88	14.88	mm
Centroid to Edge Max x Distance	ex	48.36	46.76	mm
Centroid to Edge Max y Distance	ey	114.3	113.5	mm
C-Channel Flange Width	wf	63.25	61.65	mm
C-Channel Flange Thickness	tf	10.49	8.89	mm
C-Channel Depth	d	228.6	227.0	mm
C-Channel Web Thickness	tw	7.24	5.64	mm
Corrosion allowance, 0.8 mm, is applied to all sides of the structural member.				

Center Bay Rafter Allowable Flexural Strength per AISC-360

b = Flange Outstand Length per AISC-360 table B4.1b (mm)

c = Coefficient per AISC-360 Section F2, Eq F2-8b

F_{cr} = Critical stress per AISC-360 F2-4 (MPa)

h_o = Distance between the flange centroids (mm)

h_w = Web height (mm)

lambda = Slenderness parameter

lambda_{pf} = Limiting slenderness parameter for compact flange

lambda_{pw} = Limiting slenderness parameter for compact web

lambda_{rf} = Limiting slenderness parameter for noncompact flange

lambda_{rw} = Limiting slenderness parameter for noncompact web

L_p = Limiting laterally unbraced length for the limit state of yielding per AISC-360 Section F2, Eq F2-5 (mm)

L_r = Limiting laterally unbraced length for the limit state of inelastic lateral-torsional buckling per AISC-360 Section F2, Eq F2-6 (mm)

M_{allow} = Allowable Flexural Strength (N.mm)

M_n = Nominal flexural strength per AISC-360 Section F2 (N.mm)

M_{n_LTB} = Nominal Flexural Strength due to Lateral Torsional Buckling per AISC-360 Section F2, Eq F2-3 (N.mm)

M_{n_Y} = Nominal Flexural Strength due to Yielding per AISC-360 Section F2, Eq F2-1 (N.mm)

M_{n_Y_allow} = Allowable Flexural Strength Assuming the Member is Braced (Yield Only) (N.mm)

r_{ts} = Effective Radius of Gyration per AISC-360 Section F2, Eq F2-7 (mm)

w_f = Flange Total width (mm)

$$w_f = wf = 61.65 \text{ mm}$$

$$b = w_f = 61.65 \text{ mm}$$

$$h_w = d - (2 * tf) = 209.22 \text{ mm}$$

$$\lambda = b / tf$$

$$\lambda = 61.646 / 8.8902$$

$$\lambda = 6.93$$

$$\lambda_{pf} = 0.38 * \text{SQRT}((E / F_y))$$

$$\lambda_{pf} = 0.38 * \text{SQRT}((199,000 / 250.0))$$

$$\lambda_{pf} = 10.72$$

$$\lambda_{rf} = 1 * \text{SQRT}((E / F_y))$$

$$\lambda_{rf} = 1 * \sqrt{(199,000 / 250.0)}$$

$$\lambda_{rf} = 28.21$$

$$\lambda_{pw} = 3.76 * \sqrt{(E / F_y)}$$

$$\lambda_{pw} = 3.76 * \sqrt{(199,000 / 250.0)}$$

$$\lambda_{pw} = 106.08$$

$$\lambda_{rw} = 5.7 * \sqrt{(E / F_y)}$$

$$\lambda_{rw} = 5.7 * \sqrt{(199,000 / 250.0)}$$

$$\lambda_{rw} = 160.82$$

As per AISC-360 table B4.1b Flange width to thickness ratio check :
 $\lambda \leq \lambda_{pf}$

==> Flange is compact

As per AISC-360 table B4.1b Web height to thickness ratio check :
 $(h_w / t_w) \leq \lambda_{pw}$

==> Web is compact

$$M_{n_Y} = F_y * Z_x$$

$$M_{n_Y} = 250.0 * 181,361.0867$$

$$M_{n_Y} = 45,340,271.68 \text{ N.mm}$$

$$\text{Unbraced length (Lb)} = 3,005.39 \text{ mm}$$

$$L_p = 1.76 * r_y * \sqrt{(E / F_y)}$$

$$L_p = 1.76 * 16.6382 * \sqrt{(199,000 / 250.0)}$$

$$L_p = 826.18 \text{ mm}$$

$$h_o = d - t_f$$

$$h_o = 227.0 - 8.8902$$

$$h_o = 218.11 \text{ mm}$$

$$c = (h_o / 2) * \sqrt{(I_y / C_w)}$$

$$c = (218.1098 / 2) * \sqrt{(631,715.8904 / 6,618,289,277.1856)}$$

$$c = 1.07$$

$$r_{ts} = \sqrt{(\sqrt{(I_y * C_w)} / S_x)}$$

$$r_{ts} = \sqrt{(\sqrt{(631,715.8904 * 6,618,289,277.1856)} / 152,640.0702)}$$

$$r_{ts} = 20.58 \text{ mm}$$

$$L_r = 1.95 * r_{ts} * (E / (0.7 * F_y)) * \sqrt{((J * c) / (S_x * h_o)) + \sqrt{((J * c) / (S_x * h_o))^2 + (6.76 * (((0.7 * F_y) / E)^2))}}$$

$$L_r = 1.95 * 20.5818 * (199,000 / (0.7 * 250.0)) * \sqrt{((47,835.1593 * 1.0655) / (152,640.0702 * 218.1098)) + \sqrt{((47,835.1593 * 1.0655) / (152,640.0702 * 218.1098))^2 + (6.76 * (((0.7 * 250.0) / 199,000)^2))}}$$

$$L_r = 2,986.62 \text{ mm}$$

$$L_r \leq L_b$$

$$F_{cr} = ((C_b * (\pi^2) * E) / ((L_b / r_{ts})^2)) * \sqrt{(1 + (0.078 * ((J * c) / (S_x * h_o))) * ((L_b / r_{ts})^2))}$$

$$F_{cr} = ((1 * (\pi^2) * 199,000) / ((3,005.3875 / 20.5818)^2)) * \sqrt{(1 + (0.078 * ((47,835.1593 * 1.0655) / (152,640.0702 * 218.1098))) * ((3,005.3875 / 20.5818)^2))}$$

$$F_{cr} = 173.46 \text{ MPa}$$

$$M_{n_LTB} = F_{cr} * S_x$$

$$M_{n_LTB} = 173.4561 * 152,640.0702$$

$$M_{n_LTB} = 26,476,349.3 \text{ N.mm}$$

$$M_n = \min(M_{n_Y}, M_{n_LTB}) = 26,476,349.3 \text{ N.mm}$$

$$M_{allow} = M_n / 1.67$$

$$M_{allow} = 26,476,349.299 / 1.67$$

$$M_{allow} = 15,854,101.38 \text{ N.mm}$$

$$M_{n_Y_allow} = M_{n_Y} / 1.67$$

$$M_{n_Y_allow} = 45,340,271.6809 / 1.67$$

$$M_{n_Y_allow} = 27,149,863.28 \text{ N.mm}$$

Center Bay Rafter Required Section Modulus for Dead Load and Live Load Design Case

$$W_{rft_0} = (TL * \text{Average-p-width}_0) + W$$

$$W_{rft_0} = (0.0018 * 1,098.3658) + 0.2189$$

$$W_{rft_0} = 2.15 \text{ N/mm}$$

$$M_{max_rft_a} = (W_{rft_0} * (\text{Max-r-span}_0^2)) / 8$$

$$M_{max_rft_a} = (2.1489 * (8,669.1198^2)) / 8$$

$$M_{max_rft_a} = 20,187,454.79 \text{ N.mm}$$

$$Sd_{rft_0} = M_{n_Y_allow} / Sx_corr$$

$$Sd_{rft_0} = 27,149,863.282 / 152,640.0702$$

$$Sd_{rft_0} = 177.87 \text{ MPa}$$

$$Sx_{rft_Req_0-1} = (M_{max_rft_a} / Sd_{rft_0}) / 1000$$

$$Sx_{rft_Req_0-1} = (20,187,454.791 / 177.8685) / 1000$$

$$Sx_{rft_Req_0-1} = 113.5 \text{ cm}^3$$

Center Bay Rafter Required Section Modulus for Dead Load Only Design Case

$$W_{DL_rft_0} = (DL * \text{Average-p-width}_0) + W$$

$$W_{DL_rft_0} = (0.0008 * 1,098.3658) + 0.2189$$

$$W_{DL_rft_0} = 1.05 \text{ N/mm}$$

$$N_{braces} = \text{CEILING}((\text{Max-r-span}_0 / L_r)) - 1$$

$$N_{braces} = \text{CEILING}((8,669.1198 / 2,986.6151)) - 1$$

$$N_{braces} = 2$$

$$M_{max_rft_0} = (W_{DL_rft_0} * (\text{Max-r-span}_0^2)) / 8$$

$$M_{max_rft_0} = (1.0506 * (8,669.1198^2)) / 8$$

$$M_{max_rft_0} = 9,869,181.44 \text{ N.mm}$$

$$Sd_{DL_rft_0} = M_{allow} / Sx_corr$$

$$Sd_{DL_rft_0} = 15,854,101.3766 / 152,640.0702$$

$$Sd_{DL_rft_0} = 103.87 \text{ MPa}$$

$$Sx_{rft_Req_0_2} = (M_{max_rft_0} / Sd_{DL_rft_0}) / 1000$$

$$Sx_{rft_Req_0_2} = (9,869,181.4392 / 103.8659) / 1000$$

$$Sx_{rft_Req_0_2} = 95.02 \text{ cm}^3$$

Center Bay Rafter Minimum Required Section Modulus

$$Sx_{rft_Req_0} = \max(Sx_{rft_Req_0-1}, Sx_{rft_Req_0_2})$$

$$Sx_{rft_Req_0} = \max(113.4965, 95.0185)$$

$$Sx_{rft_Req_0} = 113.5 \text{ cm}^3$$

$$Sx_corr \geq Sx_{rft_Req_0} \Rightarrow \text{PASS}$$

Center Bay Rafter Required Radius of Gyration (Slenderness Check)

$$L = \text{Member Unbraced Length (mm)}$$

$$L/r = \text{Slenderness Ratio}$$

r = Governing Radius of Gyration (mm)
r-req = Required Radius of Gyration (mm)

L = 8,669.12 mm
r = 86.36 mm

As per API-650 5.10.3.2, Max Slenderness Ratio (max-ratio) = 300

$L/r = L / r$
 $L/r = 8,669.1198 / 86.36$
 $L/r = 100.38$

r-req = L / max-ratio
r-req = 8,669.1198 / 300
r-req = 28.9 mm

$L/r \leq 300 \implies$ PASS

Center Bay Rafter Minimum Required Thickness

As per API-650 5.10.2.4, Minimum Nominal Thickness (t-min) = 4.3 mm
As per API-650 5.10.2.4, Minimum Corroded Thickness (t-min-corr) = 2.4 mm

tf $\geq$ t-min $\implies$ PASS

tf-corr $\geq$ t-min-corr $\implies$ PASS

tw $\geq$ t-min $\implies$ PASS

tw-corr $\geq$ t-min-corr $\implies$ PASS

Center Bay Rafter Deflection

delta = Beam Uniform Load Deflection (mm)
delta_max = Maximum Allowable Deflection (mm)
div = Deflection limit divisor (mm)

div = 180 mm

$\text{delta_max} = L / \text{div}$
 $\text{delta_max} = 8,669.1198 / 180$
 $\text{delta_max} = 48.16 \text{ mm}$

$\text{delta} = (5 * W * (L^4)) / (384 * E * I_x)$
 $\text{delta} = (5 * 2.1489 * (8,669.1198^4)) / (384 * 199,000 * 17,375,753.1227)$
 $\text{delta} = 45.7 \text{ mm}$

$\text{delta} \leq \text{delta_max} \implies$ PASS

Center Bay Rafter Maximum Allowable External Pressure

$W_Max_rft_0 = (Sx_corr * Sd_rft_0 * 8) / (Max_r_span_0^2)$
 $W_Max_rft_0 = (152,640.0702 * 177.8685 * 8) / (8,669.1198^2)$
 $W_Max_rft_0 = 2.89 \text{ N/mm}$

$Max_P_0 = (W_Max_rft_0 - W) / \text{Average-p-width_0}$
 $Max_P_0 = (2.8901 - 0.2189) / 1,098.3658$
 $Max_P_0 = 0.0024319370847260746 \text{ MPa}$

$P_ext_2_0 = (Max_P_0 - DL - (Fp * MAX(S, Lr))) * -1$
 $P_ext_2_0 = (2.4319 - 0.7572 - (0.4 * MAX(0.4, 1.0))) * -1$
 $P_ext_2_0 = -1.27 \text{ kPa}$

Rafter to Shell Clip - Bolts Design

Bolts-Qty = Bolts Total Quantity
Bolts-Qty-Req = Bolts Required Quantity
clearance = Bolt Clearance (mm)
Clip-Load = Rafter Load on Clip (N)
d = Bolt Diameter (mm)
hole-type = Bolt Hole Type
qty-horz = Horizontal Holes Quantity
qty-vert = Vertical Holes Quantity

clearance = 1.5 mm
Clip-Load = 9,314.65 N
d = 20.84 mm
hole-type = slot
qty-horz = 2
qty-vert = 1

Bolts-Qty = qty-horz * qty-vert
Bolts-Qty = 2 * 1
Bolts-Qty = 2

As per AISC Steel Construction Manual 13th Edition Table 7-4, Bolt Available Shear Strength
(Y-bolt) = 27,445.53 N

Bolts-Qty-Req = CEILING((Clip-Load / Y-bolt))
Bolts-Qty-Req = CEILING((9,314.6503 / 27,445.5274))
Bolts-Qty-Req = 1 (Set to 2 since it cannot be less than 2)

Bolts-Qty >= Bolts-Qty-Req ==> PASS

Center Bay Girder Design

Not required for center column

Center Bay Column Design

A_req_0 = Required Cross Sectional Area Of Column (mm²)
Average-p-width_0 = Average plate width (mm)
Average-r-s_inner_0 = Average rafter spacing on inner girder (mm)
Average-r-s_shell_0 = Average rafter spacing on shell (mm)
C1_0 = Total Inner Rafters Length Supported by Girder (mm)
C2_0 = Total Outer Rafters Length Supported by Girder (mm)
CA-col = Column Corrosion Allowance (mm)
Girder-Length_0 = Girder Length (mm)
Girder-Weight_0 = Girder Weight (kg/mm)
Gusset-Type = Base Plate Gusset Type
H_gusset = Base Plate Gusset Height
L-col = Column design length (m)
L_gusset = Base Plate Gusset Length (mm)
Ma-col = Column Material
Max-P_column_0 = Maximum Load allowed per Column (MPa)
N_actual_0 = Actual number of rafters
N_gusset = Base Plate Gusset Quantity
P_c_0 = Column Total Load (N)
P_col_base-bottom_0 = Load on Bottom of Column Base Structure (N)
P_col_base-top_0 = Load on Top of Column Base Structure (N)
P_col_beam-top_0 = Load on Top of Column Beam (N)
P_col_top_0 = Load on Top of Column Top Structure (N)
P_ext_4_0 = Vacuum Limited by Column Type (kPa)
radial-distance_0 = Radial Distance (mm)
Rafter-L_0 = Rafter Length (mm)

Rafter-Weight_0 = Rafter Weight per Linear Length (kg/mm)
 Rafter-Weight_prev_0 = Rafter Weight per Linear Length previous (kg/mm)
 r_fillet = Base Plate Fillet Radius (mm)
 R_inner_0 = Inner radius (mm)
 R_outer_0 = Outer radius (mm)
 Sca = Allowable Compressive Stress (MPa)
 t_gusset = Base Plate Gusset Thickness (mm)
 TL = Roof Total Load (Dead + Live) (kPa)
 W_col = Column Weight (N)
 W_column_0 = Column Total Weight (N)
 W_column_beam = Column Beam Weight (kg)
 W_column_bottom-structure = Column Bottom Structure Weight (kg)
 W_column_top-structure = Column Top Structure Weight (kg)
 W_DL_girder_0 = Girder Dead Load Weight Including Rafters and Roof Dead Loads (N/mm)
 W_DL_rafter_0 = Rafter Dead Load Weight Including Roof Dead Load (N/mm)
 W_girder_0 = Girder Total Weight Including Rafters and Roof Loads (N/mm)
 W_Max_column_0 = Maximum weight allowed for each column in ring (N)
 W_rafter_0 = Rafter Design Load (rafter weight + top load) (N/mm)

Average-p-width_0 = 1,098.37 mm
 Average-r-s_inner_0 = 102.34 mm
 Average-r-s_shell_0 = 2,094.4 mm
 C1_0 = 0 mm
 C2_0 = 0 mm
 CA-col = 0.8 mm
 Girder-Length_0 = 0 mm
 Girder-Weight_0 = nil
 Gusset-Type = square
 H_gusset = 127
 L-col = 16.05 m
 L_gusset = 127 mm
 Ma-col = A106-B
 N_actual_0 = 27
 N_gusset = 4
 radial-distance_0 = 0.0 mm
 Rafter-Weight_0 = 0.02 kg/mm
 Rafter-Weight_prev_0 = nil
 r_fillet = 25 mm
 R_inner_0 = 439.76 mm
 R_outer_0 = 9,000 mm
 t_gusset = 12 mm
 TL = 1.76 kPa
 W_column_beam = 1,501.83 kg
 W_column_bottom-structure = 54.37 kg
 W_column_top-structure = 110.21 kg
 W_DL_girder_0 = 0 N/mm
 W_DL_rafter_0 = 1.05 N/mm
 W_girder_0 = 0 N/mm
 W_rafter_0 = 2.15 N/mm

Center Bay Column Material Properties

Material = A106-B
 Minimum Tensile Strength (Sut) = 415 MPa
 Minimum Yield Strength (Sy) = 240 MPa
 Modulus of Elasticity at Design Temperature (E) = 201,000 MPa

Center Bay Column Pipe Size 10 SCH 80 Section Properties

Description	Variable	New	Corroded	Unit
Weight	W	95.82	85.64	kg/m

Cross Sectional Area	A	12,207.8	10,911.01	mm ²
Radius of Gyration About X Axis	rx	91.37	91.34	mm
Radius of Gyration About Y Axis	ry	91.37	91.34	mm
Pipe Thickness	t-pipe	15.06	13.46	mm
Pipe Inner Diameter	ID-pipe	242.93	242.93	mm
Pipe Outer Diameter	OD-pipe	273.05	271.45	mm
Corrosion allowance, 0.8 mm, is applied to all sides of the structural member.				

Center Bay Column Allowable Compressive Strength per AISC-360

Fe = Elastic Buckling Stress per AISC-360 E3-4 (MPa)

Pa = Allowable Compressive Strength (N)

P_n = Nominal compressive strength per AISC-360 E3-1 (N)

Radius of gyration :

(rx = ry) AND (L_y = L_x)

$Fe = ((\pi^2) * E) / (((K * L_y) / ry)^2)$

$Fe = ((\pi^2) * 201,000) / (((1 * 16,051.761) / 91.3366)^2)$

Fe = 64.23 MPa

As per AISC-360 table B4.1a Pipe width to thickness ratio :

$(D / t) \leq (0.11 * (E / Fy)) \implies$ Pipe is not slender

F_{cr} = Critical stress per AISC-360 Eq. E3-3 (MPa)

$(Fy / Fe) \leq 2.25$

F_{cr} = 0.877 * Fe

F_{cr} = 0.877 * 64.2303

F_{cr} = 56.33 MPa

P_n = F_{cr} * A_g

P_n = 56.3299 * 10,911.0132

P_n = 614,616.76 N

Pa = P_n / 1.67

Pa = 614,616.7602 / 1.67

Pa = 368,033.99 N

Center Bay Column Load

Rafter-L₀ = (R_{outer_0} - R_{inner_0}) / COS(Theta)

Rafter-L₀ = (9,000 - 439.7589) / COS(9.0903)

Rafter-L₀ = 8,669.12 mm

Column Weight per Unit Length (W_{linear}) = 95.82 kg/m

W_{col} = W_{linear} * L_{col}

W_{col} = 95.8183 * 16.0518

W_{col} = 15,083.15 N

Center Bay Column Top Load Calculation - Live Load and Dead Load

L_{roof_0} = Bay Roof Length (mm)

N_{rafters_0} = Rafter Quantity

P_{rafter_0} = Rafter Load (rafter weight + top load) (N/mm)

W_{col-top_roof_0} = Roof Load on Column Top (N)

L_roof_0 = 8,669.12 mm
N_rafters_0 = 27
P_rafter_0 = 2.15 N/mm

W_col-top_roof_0 = (L_roof_0 * P_rafter_0 * N_rafters_0) / 2
W_col-top_roof_0 = (8,669.1198 * 2.1489 * 27) / 2
W_col-top_roof_0 = 251,495.56 N

Center Bay Column Top Load Calculation - Dead Load Only

L_roof_0 = Bay Roof Length (mm)
N_rafters_0 = Rafter Quantity
P_rafter_0 = Rafter Load (rafter weight + top load) (N/mm)
W_DL_col-top_roof_0 = Roof Load on Column Top (N)

L_roof_0 = 8,669.12 mm
N_rafters_0 = 27
P_rafter_0 = 1.05 N/mm

W_DL_col-top_roof_0 = (L_roof_0 * P_rafter_0 * N_rafters_0) / 2
W_DL_col-top_roof_0 = (8,669.1198 * 1.0506 * 27) / 2
W_DL_col-top_roof_0 = 122,950.38 N

Center Bay Column Load Summary

P_col_top_0 = W_col-top_roof_0
P_col_top_0 = 251,495.5588
P_col_top_0 = 251,495.56 N

P_col_beam-top_0 = P_col_top_0 + W_column_top-structure
P_col_beam-top_0 = 251,495.5588 + 1,080.742
P_col_beam-top_0 = 252,576.3 N

P_col_base-top_0 = P_col_top_0 + W_column_top-structure + W_column_beam
P_col_base-top_0 = 251,495.5588 + 1,080.742 + 14,727.9255
P_col_base-top_0 = 267,304.23 N

P_col_base-bottom_0 = P_col_top_0 + W_column_top-structure + W_column_beam +
W_column_bottom-structure
P_col_base-bottom_0 = 251,495.5588 + 1,080.742 + 14,727.9255 + 533.2236
P_col_base-bottom_0 = 267,837.45 N

W_column_0 = W_column_top-structure + W_column_beam + W_column_bottom-structure
W_column_0 = 1,080.742 + 14,727.9255 + 533.2236
W_column_0 = 16,341.89 N

P_c_0 = W_col-top_roof_0 + W_col
P_c_0 = 251,495.5588 + 15,083.1479
P_c_0 = 266,578.71 N

Center Bay Column Required Cross Sectional Area

Sca = Pa / A-corr
Sca = 368,033.9881 / 10,911.0132
Sca = 33.73 MPa

A_req_0 = P_c_0 / Sca
A_req_0 = 266,578.7066 / 33.7305
A_req_0 = 7,903.19 mm²

A-corr >= A_req_0 ==> PASS

Center Bay Column Minimum Required Thickness

As per API-650 5.10.2.4, Minimum Nominal Thickness (t-min) = 6 mm

As per API-650 5.10.2.4, Minimum Corroded Thickness (t-min-corr) = 2.4 mm

t-pipe $\geq$ t-min ==> PASS

t-pipe-corr $\geq$ t-min-corr ==> PASS

Center Bay Column Required Radius of Gyration (Slenderness Check)

L = Member Unbraced Length (mm)

L/r = Slenderness Ratio

r = Governing Radius of Gyration (mm)

r-req = Required Radius of Gyration (mm)

L = 16,051.76 mm

r = 91.34 mm

As per API-650 5.10.3.2, Max Slenderness Ratio (max-ratio) = 180

L/r = L / r

L/r = 16,051.761 / 91.3366

L/r = 175.74

r-req = L / max-ratio

r-req = 16,051.761 / 180

r-req = 89.18 mm

L/r $\leq$ 180 ==> PASS

Center Bay Column Top Plate Design

a = Top Plate Radius (mm)

CA = Top Plate Corrosion Allowance (mm)

Fa = Top Plate Allowable Stress (MPa)

Fb = Top Plate Stress per *Steel Plate Engineering Data Volume 2 Part I Table 1-1A* (MPa)

Ma = Material

P_roof-load = Roof Load on Column Top (N)

r0 = Column Radius (mm)

t = Top Plate Thickness (mm)

v = Poisson's Ratio

a = 519.76 mm

CA = 1.6 mm

Ma = A36

P_roof-load = 251,495.56 N

r0 = 136.53 mm

t = 10 mm

v = 0.3

NOTE: No credit is taken for the circular plate support.

Material = A36

Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa

Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa

Fa = 0.75 * Fy

Fa = 0.75 * 250.0

Fa = 187.5 MPa

Fb = 1.43 * (LOG((a / r0), 10) + 0.334 + (0.06 * ((r0 / a)^2))) * (P_roof-load / ((t - CA)^2))

Fb = 1.43 * (LOG((519.7589 / 136.525), 10) + 0.334 + (0.06 * ((136.525 / 519.7589)^2))) *

$$(251,495.5588 / ((10 - 1.6)^2))$$

$$F_b = 4,682.69 \text{ MPa}$$

Center Bay Column Base Plate Design

B = Base Plate Length in the X direction (mm)

b_f = Column Length in the X direction (mm)

CA = Base Plate Corrosion Allowance (mm)

d = Column Length in the Y direction (mm)

f_{cp} = Soil Bearing Capacity (kPa)

l = Critical Base Plate Cantilever Dimension per *AISC Steel Construction Manual 13th Edition Part 14, Column Base Plates for Axial Compression* (mm)

m = Cantilever Distance in the Y Direction per *AISC Steel Construction Manual 13th Edition Part 14, Column Base Plates for Axial Compression* (mm)

Ma = Material

n = Cantilever Distance in the X Direction per *AISC Steel Construction Manual 13th Edition Part 14, Column Base Plates for Axial Compression* (mm)

N = Base Plate Length in the Y direction (mm)

n-prime = Yield-Line Theory Cantilever Distance per *AISC Steel Construction Manual 13th Edition Part 14, Column Base Plates for Axial Compression* (mm)

P = Total Column Load (N)

S_y = Base Plate Yield Strength (MPa)

tp = Base Plate Thickness (mm)

tp-design = Plate Required Thickness per *AISC Steel Construction Manual 13th Edition Part 14, Column Base Plates for Axial Compression* (mm)

tp-erection = Minimum Allowable Thickness per *API-650 5.10.4.7* (mm)

tp-req = Plate Required Thickness (mm)

$$B = 401 \text{ mm}$$

$$b_f = 273.05 \text{ mm}$$

$$CA = 1.6 \text{ mm}$$

$$d = 273.05 \text{ mm}$$

$$f_{cp} = 145 \text{ kPa}$$

$$Ma = A36$$

$$N = 401 \text{ mm}$$

$$P = 266,578.71 \text{ N}$$

$$S_y = 250.0 \text{ MPa}$$

$$tp = 16 \text{ mm}$$

$$tp\text{-erection} = 12 \text{ mm}$$

Note: Base plate is designed with the assumption that it is on a slab foundation or concrete footing.

$$m = (N - (0.8 * d)) / 2$$

$$m = (401 - (0.8 * 273.05)) / 2$$

$$m = 91.28 \text{ mm}$$

$$n = (B - (0.8 * b_f)) / 2$$

$$n = (401 - (0.8 * 273.05)) / 2$$

$$n = 91.28 \text{ mm}$$

$$n\text{-prime} = \text{SQRT}((b_f * d)) / 4$$

$$n\text{-prime} = \text{SQRT}((273.05 * 273.05)) / 4$$

$$n\text{-prime} = 68.26 \text{ mm}$$

$$l = \text{MAX}(m, n, n\text{-prime})$$

$$l = \text{MAX}(91.28, 91.28, 68.2625)$$

$$l = 91.28 \text{ mm}$$

$$tp\text{-design} = (l * \text{SQRT}(((3.33 * P) / (S_y * B * N)))) + CA$$

$$tp\text{-design} = (91.28 * \text{SQRT}(((3.33 * 266,578.7066) / (250.0 * 401 * 401)))) + 1.6$$

tp-design = 15.16 mm

tp-req = MAX(tp-erection , tp-design)

tp-req = MAX(12 , 15.1643)

tp-req = 15.16 mm

tp >= tp-req ==> PASS

Center Bay Column Maximum Allowable External Pressure

W_Max_column_0 = (Sca * A-corr) - W_linear

W_Max_column_0 = (33.7305 * 10,911.0132) - 95.8183

W_Max_column_0 = 367,094.33 N

Max-P_column_0 = ((W_Max_column_0 / ((Rafter-L_0 * N_actual_0) / 2)) - Rafter-Weight_0) / Average-p-width_0

Max-P_column_0 = ((367,094.3312 / ((8,669.1198 * 27) / 2)) - 0.0223) / 1,098.3658

Max-P_column_0 = 0.002835437910627912 MPa

P_ext_4_0 = (Max-P_column_0 - DL - (Fp * MAX(S , Lr))) * -1

P_ext_4_0 = (2.8354 - 0.7572 - (0.4 * MAX(0.4 , 1.0))) * -1

P_ext_4_0 = -1.68 kPa

Top Member Detail B Design [Back](#)

DLR = Nominal Weight of Roof Plates and Attached Structural (N)

DLS = Nominal Weight of Shell Plates and Framing (N)

DLS = Ws + W_framing

DLS = 506,307.1071 + 28,247.619

DLS = 534,554.73 N

DLR = Wr + W_structural

DLR = 119,409.7922 + 16,384.5772

DLR = 135,794.37 N

Material Properties

Material = A36

Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa

Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa

Compression Ring Detail b Properties

A_detail = Detail Total Area (mm²)

A_roof = Contributing Roof Area (mm²)

A_shell = Contributing Shell Area (mm²)

I_shell = Contributing Shell Moment Of Inertia (mm⁴)

R2 = Length of Normal to Head (mm)

Wc = Maximum Width of Participating Shell per *API-650 Figure F-2* (mm)

Wh = Maximum Width of Participating Head per *API-650 Figure F-2* (mm)

$R2 = (ID / 2) / \sin(\theta)$

$R2 = (18,000 / 2) / \sin(9.0903)$

R2 = 56,965.45 mm

$Wh = 0.3 * \sqrt{(R2 * (th - CA-head))}$

$Wh = 0.3 * \sqrt{(56,965.4501 * (6 - 0.8))}$

Wh = 163.28 mm

$Wc = 0.6 * \sqrt{((ID / 2) * (tc-nominal - CA-shell))}$

$Wc = 0.6 * \sqrt{((18,000 / 2) * (6 - 1.6))}$

Wc = 119.4 mm

Angle Size L2X2X1/4 Section Properties

Description	Variable	New	Corroded	Unit
Weight	W	4.75	3.49	kg/m
Cross Sectional Area	A	609.03	447.92	mm ²
Moment Of Inertia About X Axis	Ix	144,016.07	101,861.14	mm ⁴
Moment Of Inertia About Y Axis	Iy	144,016.07	101,861.14	mm ⁴
Section Modulus About X Axis	Sx	3,998.44	2,878.17	mm ³
Section Modulus About Y Axis	Sy	3,998.44	2,878.17	mm ³
Centroid X Coords	cx	14.88	14.88	mm
Centroid Y Coords	cy	14.88	14.88	mm
Angle Long Leg Length	L1-angle	50.8	49.2	mm
Angle Short Leg Length	L2-angle	50.8	49.2	mm
Angle Thickness	t-angle	6.35	4.75	mm

- Corrosion allowance, 0.8 mm, is applied to all sides of the structural member.

$$I_{\text{shell}} = ((W_c - h) * ((tc\text{-nominal} - CA\text{-shell})^3)) / 12$$

$$I_{\text{shell}} = ((119.3985 - 6.0) * ((6 - 1.6)^3)) / 12$$

$$I_{\text{shell}} = 804.98 \text{ mm}^4$$

$$A_{\text{shell}} = (W_c - h) * (tc\text{-nominal} - CA\text{-shell})$$

$$A_{\text{shell}} = (119.3985 - 6.0) * (6 - 1.6)$$

$$A_{\text{shell}} = 498.95 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{roof}} = W_h * (th - CA\text{-head})$$

$$A_{\text{roof}} = 163.2784 * (6 - 0.8)$$

$$A_{\text{roof}} = 849.05 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{detail}} = A_{\text{shell}} + A_{\text{roof}} + A\text{-corr}$$

$$A_{\text{detail}} = 498.9534 + 849.0476 + 447.9217$$

$$A_{\text{detail}} = 1,795.92 \text{ mm}^2$$

Stiffener and Shell Combined Section Properties

Description	Variable	Equation	Value	Unit
Shell centroid	d_shell	(tc-nominal - CA-shell) / 2	2.2	mm
Stiffener centroid	d_stiff	cy + (tc-nominal - CA-shell)	19.28	mm
moment of inertia of first body	I_1	Ic + (Area * (Distance^2))	268,437.89	mm^4
moment of inertia of second body	I_2	Ic + (Area * (Distance^2))	3,219.91	mm^4
Total area	A_sum	A_1 + A_2	946.88	mm^2
Sum of moments of inertia's	I_sum	I_1 + I_2	271,657.8	mm^4
Combined centroid	c_combined	((Centroid-1 * Area-1) + (Centroid-2 * Area-2)) / (Area-1 + Area-2)	10.28	mm
Combined moment of inertia	I_combined	Ic - (Area * (Distance^2))	171,558.13	mm^4
Distance from neutral axis to edge 1 (inside)	e1	c_combined	10.28	mm
Distance from neutral axis to edge 2 (outside)	e2	((tc-nominal - CA-shell) + L1-angle) - e1	44.92	mm
Combined stiffener shell section modulus	S	I / MAX(d-1 , d-2)	3,819.35	mm^3

Erection Requirement

As per API-650 5.1.5.9, Minimum Size of Top Corner Ring (Size-min) = L50x50x6

Minimum Section Modulus per Erection Requirement (Sx-min) = 3.61 cm^3

Section Modulus (Sx) = 3.82 cm^3

Sx >= Sx-min ==> PASS

Internal Pressure - Appendix F Requirements

A_actual = Area resisting compressive force (mm^2)

D = Tank nominal diameter (m)

DLR = Nominal weight of roof plates and attached structural (N)

DLS = Nominal weight of shell plates and framing (N)
 Fp = Internal Pressure Combination Factor
 Fy = Minimum specified yield-strength of the materials in the roof-to-shell junction (MPa)
 ID = Tank inside diameter (m)
 MDL = Moment About the Shell-to-Bottom Joint from the Nominal Weight of the Shell and Roof Structural Supported by the Shell that is not Attached to the Roof Plate (N.m)
 MDLR = Moment About the Shell-to-Bottom Joint from the Nominal Weight of the Roof Plate Plus any Structural Components Attached to the Roof (N.m)
 MF = Moment About the Shell-to-Bottom Joint from Liquid Weight (N.m)
 Mw = Wind Moment From Horizontal Plus Vertical Wind Pressures (N.m)
 Mws = Wind Moment From Horizontal Wind Pressure (N.m)
 P = Design pressure (kPa)
 P_uplift = Uplift due to internal pressure per *API-650 F.1.2* (N)
 Theta angle = Angle between the roof and a horizontal plane at the roof-to-shell junction (deg)
 W_add_DL = Additional dead load weight (N)
 W_framing = Weight of framing supported by the shell and roof (N)
 Wr = Roof plates weight (N)
 Ws = Shell plates weight (N)
 W_structural = Weight of roof attached structural (N)

A_actual = 1,795.92 mm²
 D = 18.0 m
 DLR = 135,794.37 N
 DLS = 534,554.73 N
 Fp = 0.4
 Fy = 250.0 MPa
 ID = 18.0 m
 MDL = 4,810,992.54 N.m
 MDLR = 1,222,149.32 N.m
 MF = 9,577,154.75 N.m
 Mw = 470,359.56 N.m
 Mws = 470,359.56 N.m
 P = 0.0 kPa
 Theta angle = 9.09 deg
 W_add_DL = 74,124.36 N
 W_framing = 28,247.62 N
 Wr = 119,409.79 N
 Ws = 506,307.11 N
 W_structural = 16,384.58 N

$P_{uplift} = P * \pi * ((ID^2) / 4)$
 $P_{uplift} = 0.0 * \pi * ((18.0^2) / 4)$
 $P_{uplift} = 0.0 \text{ N}$

$P_{uplift} \leq W_r$, Tank design does not need to meet App. F requirements.

P_F51 = Maximum allowable internal pressure for the actual resisting area per *API 650 F.5.1* (kPa)
 P_max_internal = Maximum allowable internal pressure (kPa)

P_std = 18 kPa

$P_{F51} = ((F_y * \tan(\text{Theta angle}) * A_{actual}) / (200 * (D^2))) + ((0.00127 * DLR) / (D^2))$
 $P_{F51} = ((250.0 * \tan(9.0903) * 1,795.9227) / (200 * (18.0^2))) + ((0.00127 * 135,794.3694) / (18.0^2))$
 $P_{F51} = 1.64 \text{ kPa}$

$P_{max_internal} = \min(P_{std}, P_{F51})$
 $P_{max_internal} = \min(18, 1.6409)$
 $P_{max_internal} = 1.64 \text{ kPa}$

Shell Design [Back](#)

Ac = Convective Design Response Spectrum Acceleration Coefficient

Ai = Impulsive Design Response Spectrum Acceleration Coefficient

Av = Vertical ground acceleration coefficient description

CG-shell = Shell center of gravity (m)

D = Tank Nominal Diameter per *API-650 5.6.1.1 Note 1* (m)

d-ins = Insulation Density (kg/m^3)

G = Product Design Specific Gravity

Gt = Hydrotest Specific Gravity

H = Shell height (m)

H-Hydrotest-L = Max Hydrotest Liquid Level (m)

HL = Max Liquid Level (m)

h-min = Minimum Shell Course Height per *API-650 5.6.1.2* (mm)

Pe = Design External Pressure (kPa)

Pi = Design Internal Pressure (kPa)

Rwi = Impulsive Force Reduction Factor

t-ins = Insulation Thickness (mm)

V = Wind velocity (km/hr)

W-ins = Shell Insulation Weight (kg)

W-shell = Shell Nominal Weight (kg)

W-shell-add = Shell Additional Weight (kg)

W-shell-corr = Shell Corroded Weight (kg)

Ac = 0.0523

Ai = 0.2417

Av = 0.3609

D = 18.0 m

d-ins = 130 kg/m^3

G = 1

Gt = 1

H = 15.0 m

H-Hydrotest-L = 14.85 m

HL = 14.85 m

h-min = 1,800 mm

Pe = 0.0 kPa

Pi = 0.0 kPa

Rwi = 4

t-ins = 0 mm

V = 97.0 km/hr

W-shell-add = 0 kg

API-650 Design Method: One Foot (1ft)

Rwi = Impulsive Force Reduction Factor

Rwi = 4

Course # 1 (bottom course) Design

CA = Corrosion allowance per *API-650 5.3.2* (mm)

D1 = Shell Course Centerline Diameter (m)

H = Design Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)

H' = Effective Design Liquid Level per *API-650 Section F.2* (m)

h1 = Course Height (m)

H-Hydrotest = Hydrotest Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)

H-max = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness (m)

H-max-@-Pi = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness @ Design Internal Pressure (m)

H_t' = Effective Hydrostatic Test Liquid Level per *API-650 F.2* (m)
 JE = Joint efficiency
 loc = Course Location (m)
 Ma = Course Material
 $P_{i-max-@-H}$ = Maximum Allowable Internal Pressure for the Installed Thickness @ Design Liquid Level (kPa)
 Rwi = Impulsive Force Reduction Factor
 t = Installed Thickness (mm)
 t_d = Course Design Thickness per *API-650 Section 5.6.3.2* (mm)
 t_{min} = Minimum Required Thickness (mm)
 t_t = Course Hydrostatic Test Thickness per *API-650 5.6.3.2* (mm)
 W-1 = Shell Course Nominal Weight (kg)
 W-1-corr = Shell Course Nominal Weight (kg)

CA = 1.6 mm
 H = 14.85 m
 h1 = 2.4 m
 H-Hydrotest = 14.85 m
 JE = 1
 loc = 0 m
 Ma = A36
 Rwi = 4
 t = 12 mm

Shell Course Center of Gravity (CG-1) = 1.2 m

$D1 = ID + t$
 $D1 = 18.0 + 0.012$
 $D1 = 18.012$ m

$W-1 = \pi * D_c * t * h1 * d$
 $W-1 = \pi * 18.012 * 0.012 * 2.4 * 7,840$
 $W-1 = 12,776.7489$ kg

$W-1-corr = \pi * D_c * (t - CA) * h1 * d$
 $W-1-corr = \pi * 18.012 * (0.012 - 0.0016) * 2.4 * 7,840$
 $W-1-corr = 11,073.1824$ kg

Material Properties

Material = A36
 Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa
 Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa
 As per *API-650 Table 5-2 a*, Allowable Design Stress (Sd) = 160.0 MPa
 As per *API-650 Table 5-2 a*, Allowable Hydrostatic Test Stress (St) = 171.0 MPa
 Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible) = -7.72 °C

Thickness Required by Erection

As per *API-650 5.6.1.1*, Thickness Required by Erection (t_{erect}) = 6 mm

Thickness Required by Design

$H' = H$
 $H' = 14.85$
 $H' = 14.85$ m

$t_d = ((4.9 * D * (H' - 0.3) * SG) / S_d) + CA$
 $t_d = ((4.9 * 18.0 * (14.85 - 0.3) * 1) / 160.0) + 1.6$
 $t_d = 9.6207$ mm

Hydrostatic Test Required Thickness

$H_t' = H-Hydrotest$

$$H_t' = 14.85$$

$$H_t' = 14.85 \text{ m}$$

$$t_t = (4.9 * D * (H_t' - 0.3) * SG_t) / S_t$$

$$t_t = (4.9 * 18.0 * (14.85 - 0.3) * 1) / 171.0$$

$$t_t = 7.5047 \text{ mm}$$

Seismic Design Required Thickness

Nc = Convective Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)
 Nh = Product Hydrostatic Membrane Force per *API 650 Section E.6.1.4 and Section 5.6.3.2* (N/mm)
 Ni = Impulsive Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)
 Sd-seismic = Maximum Allowable Hoop Tension Membrane Stress per *API-650 E.6.2.4* (MPa)
 ts = Seismic Minimum Thickness per *API 650 Section E.6.2.4* (mm)

As per *API 650 Section E.6.1.4*, Shell Course Liquid Surface to Analysis Point Distance (Y) = 14.85 m

$$N_i = 2.6 * A_i * G * (D^2)$$

$$N_i = 2.6 * 0.2417 * 1 * (18.0^2)$$

$$N_i = 203.6081 \text{ N/mm}$$

$$N_c = (1.85 * A_c * G * (D^2) * \cosh(((3.68 * (H - Y)) / D))) / \cosh(((3.68 * H) / D))$$

$$N_c = (1.85 * 0.0523 * 1 * (18.0^2) * \cosh(((3.68 * (14.85 - 14.85)) / 18.0))) / \cosh(((3.68 * 14.85) / 18.0))$$

$$N_c = 3.0042 \text{ N/mm}$$

$$N_h = 4.9 * (H - H_{\text{offset}}) * D * G$$

$$N_h = 4.9 * (14.85 - 0) * 18.0 * 1$$

$$N_h = 1,309.77 \text{ N/mm}$$

sigma_T- = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)
 sigma_T+ = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

$$\sigma_{T+} = (N_h + \sqrt{((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2))}) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = (1,309.77 + \sqrt{((203.6081^2) + (3.0042^2) + (((0.3609 * 1,309.77) / 2.5)^2))}) / \text{MAX}((12 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = 152.6584 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{T-} = (N_h - \sqrt{((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2))}) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = (1,309.77 - \sqrt{((203.6081^2) + (3.0042^2) + (((0.3609 * 1,309.77) / 2.5)^2))}) / \text{MAX}((12 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = 99.2204 \text{ MPa}$$

$$S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * S_d), (0.9 * F_y * E))$$

$$S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * 160.0), (0.9 * 250.0 * 1))$$

$$S_d\text{-seismic} = 212.8 \text{ MPa}$$

$$t_s = ((\sigma_{T+} * (t_n - CA)) / S_{\text{membrane}}) + CA$$

$$t_s = ((152.6584 * (12 - 1.6)) / 212.8) + 1.6$$

$$t_s = 9.0607 \text{ mm}$$

Minimum Required Thickness

$$t_{\text{min}} = \text{MAX}(t_{\text{erec}}, t_d, t_t, t_s)$$

$$t_{\text{min}} = \text{MAX}(6, 9.6207, 7.5047, 9.0607)$$

$$t_{\text{min}} = 9.6207 \text{ mm}$$

Rating of Installed Thickness

$$H\text{-max} = (((t - CA) * Sd * JE) / (4.9 * D * SG)) + 0.3 + loc$$

$$H\text{-max} = (((12 - 1.6) * 160.0 * 1) / (4.9 * 18.0 * 1)) + 0.3 + 0$$

$$H\text{-max} = 19.1662 \text{ m}$$

$$H\text{-max-@-Pi} = \text{MAX}(H\text{-max}, 0)$$

$$H\text{-max-@-Pi} = \text{MAX}(19.1662, 0)$$

$$H\text{-max-@-Pi} = 19.1662 \text{ m}$$

$$Pi\text{-max-@-H} = \text{MAX}((((H\text{-max} - (H + loc)) * (9.8 * SG)) + P), 0)$$

$$Pi\text{-max-@-H} = \text{MAX}((((19.1662 - (14.85 + 0)) * (9.8 * 1)) + 0.0), 0)$$

$$Pi\text{-max-@-H} = 42.2989 \text{ kPa}$$

Course # 2 Design

CA = Corrosion allowance per *API-650* 5.3.2 (mm)
D2 = Shell Course Centerline Diameter (m)
H = Design Liquid Level per *API-650* 5.6.3.2 (m)
H' = Effective Design Liquid Level per *API-650* Section F.2 (m)
h2 = Course Height (m)
H-Hydrotest = Hydrotest Liquid Level per *API-650* 5.6.3.2 (m)
H-max = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness (m)
H-max-@-Pi = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness @ Design Internal Pressure (m)
Ht' = Effective Hydrostatic Test Liquid Level per *API-650* F.2 (m)
JE = Joint efficiency
loc = Course Location (m)
Ma = Course Material
Pi-max-@-H = Maximum Allowable Internal Pressure for the Installed Thickness @ Design Liquid Level (kPa)
Rwi = Impulsive Force Reduction Factor
t = Installed Thickness (mm)
t_d = Course Design Thickness per *API-650* Section 5.6.3.2 (mm)
t-min = Minimum Required Thickness (mm)
t_t = Course Hydrostatic Test Thickness per *API-650* 5.6.3.2 (mm)
W-2 = Shell Course Nominal Weight (kg)
W-2-corr = Shell Course Nominal Weight (kg)

$$CA = 1.6 \text{ mm}$$

$$H = 12.45 \text{ m}$$

$$h2 = 2.4 \text{ m}$$

$$H\text{-Hydrotest} = 12.45 \text{ m}$$

$$JE = 1$$

$$loc = 2.4 \text{ m}$$

$$Ma = A36$$

$$Rwi = 4$$

$$t = 9 \text{ mm}$$

$$\text{Shell Course Center of Gravity (CG-2)} = 3.6 \text{ m}$$

$$D2 = ID + t$$

$$D2 = 18.0 + 0.009$$

$$D2 = 18.009 \text{ m}$$

$$W\text{-2} = \pi * Dc * t * h2 * d$$

$$W\text{-2} = \pi * 18.009 * 0.009 * 2.4 * 7,840$$

$$W\text{-2} = 9,580.9657 \text{ kg}$$

$$W\text{-2-corr} = \pi * Dc * (t - CA) * h2 * d$$

$$W\text{-2-corr} = \pi * 18.009 * (0.009 - 0.0016) * 2.4 * 7,840$$

$$W\text{-2-corr} = 7,877.6829 \text{ kg}$$

Material Properties

Material = A36

Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa

Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd) = 160.0 MPa

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Hydrostatic Test Stress (St) = 171.0 MPa

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible) = -9.86 °C

Thickness Required by Erection

As per API-650 5.6.1.1, Thickness Required by Erection (t_{erect}) = 6 mm

Thickness Required by Design

$H' = H$

$H' = 12.45$

$H' = 12.45$ m

$t_d = ((4.9 * D * (H' - 0.3) * SG) / Sd) + CA$

$t_d = ((4.9 * 18.0 * (12.45 - 0.3) * 1) / 160.0) + 1.6$

$t_d = 8.2977$ mm

Hydrostatic Test Required Thickness

$H_t' = H_{Hydrotest}$

$H_t' = 12.45$

$H_t' = 12.45$ m

$t_t = (4.9 * D * (H_t' - 0.3) * SG_t) / St$

$t_t = (4.9 * 18.0 * (12.45 - 0.3) * 1) / 171.0$

$t_t = 6.2668$ mm

Seismic Design Required Thickness

N_c = Convective Hoop Membrane Unit Force per API 650 Section E.6.1.4 (N/mm)

N_h = Product Hydrostatic Membrane Force per API 650 Section E.6.1.4 and Section 5.6.3.2 (N/mm)

N_i = Impulsive Hoop Membrane Unit Force per API 650 Section E.6.1.4 (N/mm)

S_d -seismic = Maximum Allowable Hoop Tension Membrane Stress per API-650 E.6.2.4 (MPa)

t_s = Seismic Minimum Thickness per API 650 Section E.6.2.4 (mm)

As per API 650 Section E.6.1.4, Shell Course Liquid Surface to Analysis Point Distance (Y) = 12.45 m

$N_i = 5.22 * A_i * G * (D^2) * ((Y / (0.75 * D)) - (0.5 * ((Y / (0.75 * D))^2)))$

$N_i = 5.22 * 0.2417 * 1 * (18.0^2) * ((12.45 / (0.75 * 18.0)) - (0.5 * ((12.45 / (0.75 * 18.0))^2)))$

$N_i = 203.1547$ N/mm

$N_c = (1.85 * A_c * G * (D^2) * \cosh(((3.68 * (H - Y)) / D))) / \cosh(((3.68 * H) / D))$

$N_c = (1.85 * 0.0523 * 1 * (18.0^2) * \cosh(((3.68 * (14.85 - 12.45)) / 18.0))) / \cosh(((3.68 * 14.85) / 18.0))$

$N_c = 3.3732$ N/mm

$N_h = 4.9 * (H - H_{offset}) * D * G$

$N_h = 4.9 * (12.45 - 0) * 18.0 * 1$

$N_h = 1,098.09$ N/mm

σ_{T-} = Total Combined Hoop Stress per API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3 (MPa)

σ_{T+} = Total Combined Hoop Stress per API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3 (MPa)

$\sigma_{T+} = (N_h + \sqrt{((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)})) / \max((t - CA), 0.0001)$

$\sigma_{T+} = (1,098.09 + \sqrt{((203.1547^2) + (3.3732^2) + (((0.3609 * 1,098.09) / 2.5)^2)})) /$

$\text{MAX}((9 - 1.6), 0.0001)$
 $\sigma_{T+} = 183.2156 \text{ MPa}$

$\sigma_{T-} = (\text{Nh} - \text{SQRT}(((\text{Ni}^2) + (\text{Nc}^2) + ((\text{Av} * \text{Nh}) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((t - \text{CA}), 0.0001)$
 $\sigma_{T-} = (1,098.09 - \text{SQRT}(((203.1547^2) + (3.3732^2) + (((0.3609 * 1,098.09) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((9 - 1.6), 0.0001)$
 $\sigma_{T-} = 113.5655 \text{ MPa}$

$\text{Sd-seismic} = \text{MIN}((1.33 * \text{Sd}), (0.9 * \text{Fy} * \text{E}))$
 $\text{Sd-seismic} = \text{MIN}((1.33 * 160.0), (0.9 * 250.0 * 1))$
 $\text{Sd-seismic} = 212.8 \text{ MPa}$

$\text{ts} = ((\sigma_{T+} * (\text{tn} - \text{CA})) / \text{S}_{\text{membrane}}) + \text{CA}$
 $\text{ts} = ((183.2156 * (9 - 1.6)) / 212.8) + 1.6$
 $\text{ts} = 7.9712 \text{ mm}$

Minimum Required Thickness

$t_{\text{-min}} = \text{MAX}(t_{\text{errec}}, t_d, t_t, \text{ts})$
 $t_{\text{-min}} = \text{MAX}(6, 8.2977, 6.2668, 7.9712)$
 $t_{\text{-min}} = 8.2977 \text{ mm}$

Rating of Installed Thickness

$\text{H-max} = (((t - \text{CA}) * \text{Sd} * \text{JE}) / (4.9 * \text{D} * \text{SG})) + 0.3) + \text{loc}$
 $\text{H-max} = (((9 - 1.6) * 160.0 * 1) / (4.9 * 18.0 * 1)) + 0.3) + 2.4$
 $\text{H-max} = 16.124 \text{ m}$

$\text{H-max-@-Pi} = \text{MAX}(\text{H-max}, 0)$
 $\text{H-max-@-Pi} = \text{MAX}(16.124, 0)$
 $\text{H-max-@-Pi} = 16.124 \text{ m}$

$\text{Pi-max-@-H} = \text{MAX}((((\text{H-max} - (\text{H} + \text{loc})) * (9.8 * \text{SG})) + \text{P}), 0)$
 $\text{Pi-max-@-H} = \text{MAX}((((16.124 - (12.45 + 2.4)) * (9.8 * 1)) + 0.0), 0)$
 $\text{Pi-max-@-H} = 12.4856 \text{ kPa}$

Course # 3 Design

$\text{CA} = \text{Corrosion allowance per API-650 5.3.2 (mm)}$
 $\text{D3} = \text{Shell Course Centerline Diameter (m)}$
 $\text{H} = \text{Design Liquid Level per API-650 5.6.3.2 (m)}$
 $\text{H}' = \text{Effective Design Liquid Level per API-650 Section F.2 (m)}$
 $\text{h3} = \text{Course Height (m)}$
 $\text{H-Hydrotest} = \text{Hydrotest Liquid Level per API-650 5.6.3.2 (m)}$
 $\text{H-max} = \text{Maximum Liquid Level for the Installed Thickness (m)}$
 $\text{H-max-@-Pi} = \text{Maximum Liquid Level for the Installed Thickness @ Design Internal Pressure (m)}$
 $\text{Ht}' = \text{Effective Hydrostatic Test Liquid Level per API-650 F.2 (m)}$
 $\text{JE} = \text{Joint efficiency}$
 $\text{loc} = \text{Course Location (m)}$
 $\text{Ma} = \text{Course Material}$
 $\text{Pi-max-@-H} = \text{Maximum Allowable Internal Pressure for the Installed Thickness @ Design Liquid Level (kPa)}$
 $\text{Rwi} = \text{Impulsive Force Reduction Factor}$
 $t = \text{Installed Thickness (mm)}$
 $t_d = \text{Course Design Thickness per API-650 Section 5.6.3.2 (mm)}$
 $t_{\text{-min}} = \text{Minimum Required Thickness (mm)}$
 $t_t = \text{Course Hydrostatic Test Thickness per API-650 5.6.3.2 (mm)}$
 $\text{W-3} = \text{Shell Course Nominal Weight (kg)}$
 $\text{W-3-corr} = \text{Shell Course Nominal Weight (kg)}$

$\text{CA} = 1.6 \text{ mm}$
 $\text{H} = 10.05 \text{ m}$

$h_3 = 2.4 \text{ m}$
 $H\text{-Hydrotest} = 10.05 \text{ m}$
 $JE = 1$
 $loc = 4.8 \text{ m}$
 $Ma = A36$
 $Rwi = 4$
 $t = 8 \text{ mm}$

Shell Course Center of Gravity (CG-3) = 6.0 m

$D_3 = ID + t$
 $D_3 = 18.0 + 0.008$
 $D_3 = 18.008 \text{ m}$

$W\text{-3} = \pi * D_c * t * h_3 * d$
 $W\text{-3} = \pi * 18.008 * 0.008 * 2.4 * 7,840$
 $W\text{-3} = 8,515.941 \text{ kg}$

$W\text{-3-corr} = \pi * D_c * (t - CA) * h_3 * d$
 $W\text{-3-corr} = \pi * 18.008 * (0.008 - 0.0016) * 2.4 * 7,840$
 $W\text{-3-corr} = 6,812.7528 \text{ kg}$

Material Properties

Material = A36
 Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa
 Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa
 As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd) = 160.0 MPa
 As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Hydrostatic Test Stress (St) = 171.0 MPa
 Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible) = -10.57 °C

Thickness Required by Erection

As per API-650 5.6.1.1, Thickness Required by Erection (t_{errec}) = 6 mm

Thickness Required by Design

$H' = H$
 $H' = 10.05$
 $H' = 10.05 \text{ m}$

$t_d = ((4.9 * D * (H' - 0.3) * SG) / Sd) + CA$
 $t_d = ((4.9 * 18.0 * (10.05 - 0.3) * 1) / 160.0) + 1.6$
 $t_d = 6.9747 \text{ mm}$

Hydrostatic Test Required Thickness

$H_t' = H\text{-Hydrotest}$
 $H_t' = 10.05$
 $H_t' = 10.05 \text{ m}$

$t_t = (4.9 * D * (H_t' - 0.3) * SG_t) / St$
 $t_t = (4.9 * 18.0 * (10.05 - 0.3) * 1) / 171.0$
 $t_t = 5.0289 \text{ mm}$

Seismic Design Required Thickness

N_c = Convective Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)
 N_h = Product Hydrostatic Membrane Force per *API 650 Section E.6.1.4 and Section 5.6.3.2* (N/mm)
 N_i = Impulsive Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)
 $S_d\text{-seismic}$ = Maximum Allowable Hoop Tension Membrane Stress per *API-650 E.6.2.4* (MPa)
 t_s = Seismic Minimum Thickness per *API 650 Section E.6.2.4* (mm)

As per API 650 Section E.6.1.4, Shell Course Liquid Surface to Analysis Point Distance (Y) =

10.05 m

$$\begin{aligned} N_i &= 5.22 * A_i * G * (D^2) * ((Y / (0.75 * D)) - (0.5 * ((Y / (0.75 * D))^2))) \\ N_i &= 5.22 * 0.2417 * 1 * (18.0^2) * ((10.05 / (0.75 * 18.0)) - (0.5 * ((10.05 / (0.75 * 18.0))^2))) \\ N_i &= 191.0427 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_c &= (1.85 * A_c * G * (D^2) * \text{COSH}(((3.68 * (H - Y)) / D))) / \text{COSH}(((3.68 * H) / D)) \\ N_c &= (1.85 * 0.0523 * 1 * (18.0^2) * \text{COSH}(((3.68 * (14.85 - 10.05)) / 18.0))) / \text{COSH}(((3.68 * 14.85) / 18.0)) \\ N_c &= 4.5706 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_h &= 4.9 * (H - H_{\text{offset}}) * D * G \\ N_h &= 4.9 * (10.05 - 0) * 18.0 * 1 \\ N_h &= 886.41 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

sigma_T- = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

sigma_T+ = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

$$\begin{aligned} \text{sigma_T+} &= (N_h + \text{SQRT}(((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001) \\ \text{sigma_T+} &= (886.41 + \text{SQRT}(((191.0427^2) + (4.5706^2) + (((0.3609 * 886.41) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((8 - 1.6), 0.0001) \\ \text{sigma_T+} &= 174.4365 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{sigma_T-} &= (N_h - \text{SQRT}(((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001) \\ \text{sigma_T-} &= (886.41 - \text{SQRT}(((191.0427^2) + (4.5706^2) + (((0.3609 * 886.41) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((8 - 1.6), 0.0001) \\ \text{sigma_T-} &= 102.5666 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_d\text{-seismic} &= \text{MIN}((1.33 * S_d), (0.9 * F_y * E)) \\ S_d\text{-seismic} &= \text{MIN}((1.33 * 160.0), (0.9 * 250.0 * 1)) \\ S_d\text{-seismic} &= 212.8 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_s &= ((\text{sigma_T+} * (t_n - CA)) / S_{\text{membrane}}) + CA \\ t_s &= ((174.4365 * (8 - 1.6)) / 212.8) + 1.6 \\ t_s &= 6.8462 \text{ mm} \end{aligned}$$

Minimum Required Thickness

$$\begin{aligned} t_{\text{-min}} &= \text{MAX}(t_{\text{erect}}, t_d, t_t, t_s) \\ t_{\text{-min}} &= \text{MAX}(6, 6.9747, 5.0289, 6.8462) \\ t_{\text{-min}} &= 6.9747 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rating of Installed Thickness

$$\begin{aligned} H\text{-max} &= (((t - CA) * S_d * JE) / (4.9 * D * SG)) + 0.3 + loc \\ H\text{-max} &= (((8 - 1.6) * 160.0 * 1) / (4.9 * 18.0 * 1)) + 0.3 + 4.8 \\ H\text{-max} &= 16.71 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H\text{-max-@-Pi} &= \text{MAX}(H\text{-max}, 0) \\ H\text{-max-@-Pi} &= \text{MAX}(16.71, 0) \\ H\text{-max-@-Pi} &= 16.71 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pi-max-@-H} &= \text{MAX}((((H\text{-max} - (H + loc)) * (9.8 * SG)) + P), 0) \\ \text{Pi-max-@-H} &= \text{MAX}((((16.71 - (10.05 + 4.8)) * (9.8 * 1)) + 0.0), 0) \\ \text{Pi-max-@-H} &= 18.2278 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Course # 4 Design

CA = Corrosion allowance per *API-650 5.3.2* (mm)
D4 = Shell Course Centerline Diameter (m)
H = Design Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)

H' = Effective Design Liquid Level per *API-650 Section F.2* (m)
 h_4 = Course Height (m)
 $H_{\text{Hydrotest}}$ = Hydrotest Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)
 H_{max} = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness (m)
 $H_{\text{max-@-Pi}}$ = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness @ Design Internal Pressure (m)
 H_t' = Effective Hydrostatic Test Liquid Level per *API-650 F.2* (m)
 JE = Joint efficiency
 loc = Course Location (m)
 Ma = Course Material
 $Pi_{\text{max-@-H}}$ = Maximum Allowable Internal Pressure for the Installed Thickness @ Design Liquid Level (kPa)
 R_{wi} = Impulsive Force Reduction Factor
 t = Installed Thickness (mm)
 t_d = Course Design Thickness per *API-650 Section 5.6.3.2* (mm)
 t_{min} = Minimum Required Thickness (mm)
 t_t = Course Hydrostatic Test Thickness per *API-650 5.6.3.2* (mm)
 $W-4$ = Shell Course Nominal Weight (kg)
 $W-4\text{-corr}$ = Shell Course Nominal Weight (kg)

$CA = 1.6 \text{ mm}$
 $H = 7.65 \text{ m}$
 $h_4 = 2.4 \text{ m}$
 $H_{\text{Hydrotest}} = 7.65 \text{ m}$
 $JE = 1$
 $loc = 7.2 \text{ m}$
 $Ma = A36$
 $R_{wi} = 4$
 $t = 6 \text{ mm}$

Shell Course Center of Gravity (CG-4) = 8.4 m

$D_4 = ID + t$
 $D_4 = 18.0 + 0.006$
 $D_4 = 18.006 \text{ m}$

$W-4 = \pi * D_c * t * h_4 * d$
 $W-4 = \pi * 18.006 * 0.006 * 2.4 * 7,840$
 $W-4 = 6,386.2464 \text{ kg}$

$W-4\text{-corr} = \pi * D_c * (t - CA) * h_4 * d$
 $W-4\text{-corr} = \pi * 18.006 * (0.006 - 0.0016) * 2.4 * 7,840$
 $W-4\text{-corr} = 4,683.2474 \text{ kg}$

Material Properties

Material = A36
 Minimum Tensile Strength (S_u) = 400.0 MPa
 Minimum Yield Strength (S_y) = 250.0 MPa
 As per *API-650 Table 5-2 a*, Allowable Design Stress (S_d) = 160.0 MPa
 As per *API-650 Table 5-2 a*, Allowable Hydrostatic Test Stress (S_t) = 171.0 MPa
 Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible) = -12.0 °C

Thickness Required by Erection

As per *API-650 5.6.1.1*, Thickness Required by Erection (t_{erec}) = 6 mm

Thickness Required by Design

$H' = H$
 $H' = 7.65$
 $H' = 7.65 \text{ m}$

$$t_d = ((4.9 * D * (H' - 0.3) * SG) / Sd) + CA$$

$$t_d = ((4.9 * 18.0 * (7.65 - 0.3) * 1) / 160.0) + 1.6$$

$$t_d = 5.6517 \text{ mm}$$

Hydrostatic Test Required Thickness

Ht' = H-Hydrotest

Ht' = 7.65

Ht' = 7.65 m

$$t_t = (4.9 * D * (Ht' - 0.3) * SGt) / St$$

$$t_t = (4.9 * 18.0 * (7.65 - 0.3) * 1) / 171.0$$

$$t_t = 3.7911 \text{ mm}$$

Seismic Design Required Thickness

Nc = Convective Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)

Nh = Product Hydrostatic Membrane Force per *API 650 Section E.6.1.4 and Section 5.6.3.2* (N/mm)

Ni = Impulsive Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)

Sd-seismic = Maximum Allowable Hoop Tension Membrane Stress per *API-650 E.6.2.4* (MPa)

ts = Seismic Minimum Thickness per *API 650 Section E.6.2.4* (mm)

As per *API 650 Section E.6.1.4*, Shell Course Liquid Surface to Analysis Point Distance (Y) = 7.65 m

$$Ni = 5.22 * Ai * G * (D^2) * ((Y / (0.75 * D)) - (0.5 * ((Y / (0.75 * D))^2)))$$

$$Ni = 5.22 * 0.2417 * 1 * (18.0^2) * ((7.65 / (0.75 * 18.0)) - (0.5 * ((7.65 / (0.75 * 18.0))^2)))$$

$$Ni = 166.0111 \text{ N/mm}$$

$$Nc = (1.85 * Ac * G * (D^2) * \cosh(((3.68 * (H - Y)) / D))) / \cosh(((3.68 * H) / D))$$

$$Nc = (1.85 * 0.0523 * 1 * (18.0^2) * \cosh(((3.68 * (14.85 - 7.65)) / 18.0))) / \cosh(((3.68 * 14.85) / 18.0))$$

$$Nc = 6.8908 \text{ N/mm}$$

$$Nh = 4.9 * (H - H_{\text{offset}}) * D * G$$

$$Nh = 4.9 * (7.65 - 0) * 18.0 * 1$$

$$Nh = 674.73 \text{ N/mm}$$

sigma_T- = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

sigma_T+ = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

$$\sigma_{T+} = (Nh + \sqrt{((Ni^2) + (Nc^2) + (((Av * Nh) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = (674.73 + \sqrt{((166.0111^2) + (6.8908^2) + (((0.3609 * 674.73) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = 197.1204 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{T-} = (Nh - \sqrt{((Ni^2) + (Nc^2) + (((Av * Nh) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = (674.73 - \sqrt{((166.0111^2) + (6.8908^2) + (((0.3609 * 674.73) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = 109.575 \text{ MPa}$$

$$Sd\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * Sd), (0.9 * Fy * E))$$

$$Sd\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * 160.0), (0.9 * 250.0 * 1))$$

$$Sd\text{-seismic} = 212.8 \text{ MPa}$$

$$ts = ((\sigma_{T+} * (tn - CA)) / S_{\text{membrane}}) + CA$$

$$ts = ((197.1204 * (6 - 1.6)) / 212.8) + 1.6$$

$$ts = 5.6758 \text{ mm}$$

Minimum Required Thickness

$t_{\min} = \text{MAX}(t_{\text{errec}}, t_d, t_t, t_s)$
 $t_{\min} = \text{MAX}(6, 5.6517, 3.7911, 5.6758)$
 $t_{\min} = 6 \text{ mm}$

Rating of Installed Thickness

$H_{\max} = (((t - CA) * S_d * J_E) / (4.9 * D * SG)) + 0.3 + \text{loc}$
 $H_{\max} = (((6 - 1.6) * 160.0 * 1) / (4.9 * 18.0 * 1)) + 0.3 + 7.2$
 $H_{\max} = 15.4819 \text{ m}$

$H_{\max-@-Pi} = \text{MAX}(H_{\max}, 0)$
 $H_{\max-@-Pi} = \text{MAX}(15.4819, 0)$
 $H_{\max-@-Pi} = 15.4819 \text{ m}$

$Pi_{\max-@-H} = \text{MAX}((((H_{\max} - (H + \text{loc})) * (9.8 * SG)) + P), 0)$
 $Pi_{\max-@-H} = \text{MAX}((((15.4819 - (7.65 + 7.2)) * (9.8 * 1)) + 0.0), 0)$
 $Pi_{\max-@-H} = 6.1922 \text{ kPa}$

Course # 5 Design

CA = Corrosion allowance per *API-650 5.3.2* (mm)
 D5 = Shell Course Centerline Diameter (m)
 H = Design Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)
 H' = Effective Design Liquid Level per *API-650 Section F.2* (m)
 h5 = Course Height (m)
 H-Hydrotest = Hydrotest Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)
 H-max = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness (m)
 H-max-@-Pi = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness @ Design Internal Pressure (m)
 Ht' = Effective Hydrostatic Test Liquid Level per *API-650 F.2* (m)
 JE = Joint efficiency
 loc = Course Location (m)
 Ma = Course Material
 Pi-max-@-H = Maximum Allowable Internal Pressure for the Installed Thickness @ Design Liquid Level (kPa)
 Rwi = Impulsive Force Reduction Factor
 t = Installed Thickness (mm)
 t_d = Course Design Thickness per *API-650 Section 5.6.3.2* (mm)
 t-min = Minimum Required Thickness (mm)
 t_t = Course Hydrostatic Test Thickness per *API-650 5.6.3.2* (mm)
 W-5 = Shell Course Nominal Weight (kg)
 W-5-corr = Shell Course Nominal Weight (kg)

CA = 1.6 mm
 H = 5.25 m
 h5 = 1.8 m
 H-Hydrotest = 5.25 m
 JE = 1
 loc = 9.6 m
 Ma = A36
 Rwi = 4
 t = 6 mm

Shell Course Center of Gravity (CG-5) = 10.5 m

$D5 = ID + t$
 $D5 = 18.0 + 0.006$
 $D5 = 18.006 \text{ m}$

$W-5 = \pi * D_c * t * h5 * d$
 $W-5 = \pi * 18.006 * 0.006 * 1.8 * 7,840$

$$W-5 = 4,789.6848 \text{ kg}$$

$$W-5\text{-corr} = \pi * D_c * (t - CA) * h_5 * d$$

$$W-5\text{-corr} = \pi * 18.006 * (0.006 - 0.0016) * 1.8 * 7,840$$

$$W-5\text{-corr} = 3,512.4355 \text{ kg}$$

Material Properties

Material = A36
 Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa
 Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa
 As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd) = 160.0 MPa
 As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Hydrostatic Test Stress (St) = 171.0 MPa
 Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible) = -12.0 °C

Thickness Required by Erection

As per API-650 5.6.1.1, Thickness Required by Erection (t_erec) = 6 mm

Thickness Required by Design

$$H' = H$$

$$H' = 5.25$$

$$H' = 5.25 \text{ m}$$

$$t_d = ((4.9 * D * (H' - 0.3) * SG) / S_d) + CA$$

$$t_d = ((4.9 * 18.0 * (5.25 - 0.3) * 1) / 160.0) + 1.6$$

$$t_d = 4.3287 \text{ mm}$$

Hydrostatic Test Required Thickness

$$H_t' = H\text{-Hydrotest}$$

$$H_t' = 5.25$$

$$H_t' = 5.25 \text{ m}$$

$$t_t = (4.9 * D * (H_t' - 0.3) * SG_t) / S_t$$

$$t_t = (4.9 * 18.0 * (5.25 - 0.3) * 1) / 171.0$$

$$t_t = 2.5532 \text{ mm}$$

Seismic Design Required Thickness

Nc = Convective Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)
 Nh = Product Hydrostatic Membrane Force per *API 650 Section E.6.1.4 and Section 5.6.3.2* (N/mm)
 Ni = Impulsive Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)
 Sd-seismic = Maximum Allowable Hoop Tension Membrane Stress per *API-650 E.6.2.4* (MPa)
 ts = Seismic Minimum Thickness per *API 650 Section E.6.2.4* (mm)

As per API 650 Section E.6.1.4, Shell Course Liquid Surface to Analysis Point Distance (Y) = 5.25 m

$$N_i = 5.22 * A_i * G * (D^2) * ((Y / (0.75 * D)) - (0.5 * ((Y / (0.75 * D))^2)))$$

$$N_i = 5.22 * 0.2417 * 1 * (18.0^2) * ((5.25 / (0.75 * 18.0)) - (0.5 * ((5.25 / (0.75 * 18.0))^2)))$$

$$N_i = 128.0599 \text{ N/mm}$$

$$N_c = (1.85 * A_c * G * (D^2) * \cosh(((3.68 * (H - Y)) / D))) / \cosh(((3.68 * H) / D))$$

$$N_c = (1.85 * 0.0523 * 1 * (18.0^2) * \cosh(((3.68 * (14.85 - 5.25)) / 18.0))) / \cosh(((3.68 * 14.85) / 18.0))$$

$$N_c = 10.9034 \text{ N/mm}$$

$$N_h = 4.9 * (H - H_{\text{offset}}) * D * G$$

$$N_h = 4.9 * (5.25 - 0) * 18.0 * 1$$

$$N_h = 463.05 \text{ N/mm}$$

sigma_T- = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3*

(MPa)

σ_{T+} = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3*
(MPa)

$\sigma_{T+} = (N_h + \sqrt{((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$
 $\sigma_{T+} = (463.05 + \sqrt{((128.0599^2) + (10.9034^2) + (((0.3609 * 463.05) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$
 $\sigma_{T+} = 138.1631 \text{ MPa}$

$\sigma_{T-} = (N_h - \sqrt{((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$
 $\sigma_{T-} = (463.05 - \sqrt{((128.0599^2) + (10.9034^2) + (((0.3609 * 463.05) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$
 $\sigma_{T-} = 72.3142 \text{ MPa}$

$S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * S_d), (0.9 * F_y * E))$
 $S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * 160.0), (0.9 * 250.0 * 1))$
 $S_d\text{-seismic} = 212.8 \text{ MPa}$

$t_s = ((\sigma_{T+} * (t_n - CA)) / S_{\text{membrane}}) + CA$
 $t_s = ((138.1631 * (6 - 1.6)) / 212.8) + 1.6$
 $t_s = 4.4568 \text{ mm}$

Minimum Required Thickness

$t_{\text{min}} = \text{MAX}(t_{\text{erec}}, t_d, t_t, t_s)$
 $t_{\text{min}} = \text{MAX}(6, 4.3287, 2.5532, 4.4568)$
 $t_{\text{min}} = 6 \text{ mm}$

Rating of Installed Thickness

$H\text{-max} = (((t - CA) * S_d * JE) / (4.9 * D * SG)) + 0.3 + loc$
 $H\text{-max} = (((6 - 1.6) * 160.0 * 1) / (4.9 * 18.0 * 1)) + 0.3 + 9.6$
 $H\text{-max} = 17.8819 \text{ m}$

$H\text{-max-@-Pi} = \text{MAX}(H\text{-max}, 0)$
 $H\text{-max-@-Pi} = \text{MAX}(17.8819, 0)$
 $H\text{-max-@-Pi} = 17.8819 \text{ m}$

$Pi\text{-max-@-H} = \text{MAX}((((H\text{-max} - (H + loc)) * (9.8 * SG)) + P), 0)$
 $Pi\text{-max-@-H} = \text{MAX}((((17.8819 - (5.25 + 9.6)) * (9.8 * 1)) + 0.0), 0)$
 $Pi\text{-max-@-H} = 29.7122 \text{ kPa}$

Course # 6 Design

CA = Corrosion allowance per *API-650 5.3.2* (mm)
D6 = Shell Course Centerline Diameter (m)
H = Design Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)
H' = Effective Design Liquid Level per *API-650 Section F.2* (m)
h6 = Course Height (m)
H-Hydrotest = Hydrotest Liquid Level per *API-650 5.6.3.2* (m)
H-max = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness (m)
H-max-@-Pi = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness @ Design Internal Pressure (m)
Ht' = Effective Hydrostatic Test Liquid Level per *API-650 F.2* (m)
JE = Joint efficiency
loc = Course Location (m)
Ma = Course Material
Pi-max-@-H = Maximum Allowable Internal Pressure for the Installed Thickness @ Design Liquid Level (kPa)
Rwi = Impulsive Force Reduction Factor
t = Installed Thickness (mm)
t_d = Course Design Thickness per *API-650 Section 5.6.3.2* (mm)
t-min = Minimum Required Thickness (mm)

t_t = Course Hydrostatic Test Thickness per *API-650 5.6.3.2* (mm)
 W-6 = Shell Course Nominal Weight (kg)
 W-6-corr = Shell Course Nominal Weight (kg)

CA = 1.6 mm
 H = 3.45 m
 h6 = 1.8 m
 H-Hydrotest = 3.45 m
 JE = 1
 loc = 11.4 m
 Ma = A36
 Rwi = 4
 t = 6 mm

Shell Course Center of Gravity (CG-6) = 12.3 m

$D6 = ID + t$
 $D6 = 18.0 + 0.006$
 $D6 = 18.006$ m

$W-6 = \pi * Dc * t * h6 * d$
 $W-6 = \pi * 18.006 * 0.006 * 1.8 * 7,840$
 $W-6 = 4,789.6848$ kg

$W-6-corr = \pi * Dc * (t - CA) * h6 * d$
 $W-6-corr = \pi * 18.006 * (0.006 - 0.0016) * 1.8 * 7,840$
 $W-6-corr = 3,512.4355$ kg

Material Properties

Material = A36
 Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa
 Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa
 As per *API-650 Table 5-2 a*, Allowable Design Stress (Sd) = 160.0 MPa
 As per *API-650 Table 5-2 a*, Allowable Hydrostatic Test Stress (St) = 171.0 MPa
 Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible) = -12.0 °C

Thickness Required by Erection

As per *API-650 5.6.1.1*, Thickness Required by Erection (t_{erect}) = 6 mm

Thickness Required by Design

$H' = H$
 $H' = 3.45$
 $H' = 3.45$ m

$t_d = ((4.9 * D * (H' - 0.3) * SG) / Sd) + CA$
 $t_d = ((4.9 * 18.0 * (3.45 - 0.3) * 1) / 160.0) + 1.6$
 $t_d = 3.3364$ mm

Hydrostatic Test Required Thickness

$Ht' = H-Hydrotest$
 $Ht' = 3.45$
 $Ht' = 3.45$ m

$t_t = (4.9 * D * (Ht' - 0.3) * SGt) / St$
 $t_t = (4.9 * 18.0 * (3.45 - 0.3) * 1) / 171.0$
 $t_t = 1.6247$ mm

Seismic Design Required Thickness

Nc = Convective Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)
 Nh = Product Hydrostatic Membrane Force per *API 650 Section E.6.1.4 and Section 5.6.3.2*

(N/mm)

Ni = Impulsive Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)

Sd-seismic = Maximum Allowable Hoop Tension Membrane Stress per *API-650 E.6.2.4* (MPa)

ts = Seismic Minimum Thickness per *API 650 Section E.6.2.4* (mm)

As per *API 650 Section E.6.1.4*, Shell Course Liquid Surface to Analysis Point Distance (Y) = 3.45 m

$$N_i = 5.22 * A_i * G * (D^2) * ((Y / (0.75 * D)) - (0.5 * ((Y / (0.75 * D))^2)))$$

$$N_i = 5.22 * 0.2417 * 1 * (18.0^2) * ((3.45 / (0.75 * 18.0)) - (0.5 * ((3.45 / (0.75 * 18.0))^2)))$$

$$N_i = 91.1181 \text{ N/mm}$$

$$N_c = (1.85 * A_c * G * (D^2) * \cosh(((3.68 * (H - Y)) / D))) / \cosh(((3.68 * H) / D))$$

$$N_c = (1.85 * 0.0523 * 1 * (18.0^2) * \cosh(((3.68 * (14.85 - 3.45)) / 18.0))) / \cosh(((3.68 * 14.85) / 18.0))$$

$$N_c = 15.5949 \text{ N/mm}$$

$$N_h = 4.9 * (H - H_{\text{offset}}) * D * G$$

$$N_h = 4.9 * (3.45 - 0) * 18.0 * 1$$

$$N_h = 304.29 \text{ N/mm}$$

sigma_T- = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

sigma_T+ = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

$$\sigma_{T+} = (N_h + \sqrt{((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = (304.29 + \sqrt{((91.1181^2) + (15.5949^2) + (((0.3609 * 304.29) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = 92.418 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{T-} = (N_h - \sqrt{((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = (304.29 - \sqrt{((91.1181^2) + (15.5949^2) + (((0.3609 * 304.29) / 2.5)^2)})) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = 45.8957 \text{ MPa}$$

$$S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * S_d), (0.9 * F_y * E))$$

$$S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * 160.0), (0.9 * 250.0 * 1))$$

$$S_d\text{-seismic} = 212.8 \text{ MPa}$$

$$t_s = ((\sigma_{T+} * (t_n - CA)) / S_{\text{membrane}}) + CA$$

$$t_s = ((92.418 * (6 - 1.6)) / 212.8) + 1.6$$

$$t_s = 3.5109 \text{ mm}$$

Minimum Required Thickness

$$t_{\text{-min}} = \text{MAX}(t_{\text{erec}}, t_d, t_t, t_s)$$

$$t_{\text{-min}} = \text{MAX}(6, 3.3364, 1.6247, 3.5109)$$

$$t_{\text{-min}} = 6 \text{ mm}$$

Rating of Installed Thickness

$$H_{\text{-max}} = (((t - CA) * S_d * JE) / (4.9 * D * SG)) + 0.3 + loc$$

$$H_{\text{-max}} = (((6 - 1.6) * 160.0 * 1) / (4.9 * 18.0 * 1)) + 0.3 + 11.4$$

$$H_{\text{-max}} = 19.6819 \text{ m}$$

$$H_{\text{-max-@-Pi}} = \text{MAX}(H_{\text{-max}}, 0)$$

$$H_{\text{-max-@-Pi}} = \text{MAX}(19.6819, 0)$$

$$H_{\text{-max-@-Pi}} = 19.6819 \text{ m}$$

$$Pi_{\text{-max-@-H}} = \text{MAX}((((H_{\text{-max}} - (H + loc)) * (9.8 * SG)) + P), 0)$$

$$Pi_{\text{-max-@-H}} = \text{MAX}((((19.6819 - (3.45 + 11.4)) * (9.8 * 1)) + 0.0), 0)$$

Pi-max-@-H = 47.3522 kPa

Course # 7 Design

CA = Corrosion allowance per API-650 5.3.2 (mm)

D7 = Shell Course Centerline Diameter (m)

H = Design Liquid Level per API-650 5.6.3.2 (m)

H' = Effective Design Liquid Level per API-650 Section F.2 (m)

h7 = Course Height (m)

H-Hydrotest = Hydrotest Liquid Level per API-650 5.6.3.2 (m)

H-max = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness (m)

H-max-@-Pi = Maximum Liquid Level for the Installed Thickness @ Design Internal Pressure (m)

Ht' = Effective Hydrostatic Test Liquid Level per API-650 F.2 (m)

JE = Joint efficiency

loc = Course Location (m)

Ma = Course Material

Pi-max-@-H = Maximum Allowable Internal Pressure for the Installed Thickness @ Design Liquid Level (kPa)

Rwi = Impulsive Force Reduction Factor

t = Installed Thickness (mm)

t_d = Course Design Thickness per API-650 Section 5.6.3.2 (mm)

t-min = Minimum Required Thickness (mm)

t_t = Course Hydrostatic Test Thickness per API-650 5.6.3.2 (mm)

W-7 = Shell Course Nominal Weight (kg)

W-7-corr = Shell Course Nominal Weight (kg)

CA = 1.6 mm

H = 1.65 m

h7 = 1.8 m

H-Hydrotest = 1.65 m

JE = 1

loc = 13.2 m

Ma = A36

Rwi = 4

t = 6 mm

Shell Course Center of Gravity (CG-7) = 14.1 m

D7 = ID + t

D7 = 18.0 + 0.006

D7 = 18.006 m

W-7 = pi * Dc * t * h7 * d

W-7 = pi * 18.006 * 0.006 * 1.8 * 7,840

W-7 = 4,789.6848 kg

W-7-corr = pi * Dc * (t - CA) * h7 * d

W-7-corr = pi * 18.006 * (0.006 - 0.0016) * 1.8 * 7,840

W-7-corr = 3,512.4355 kg

Material Properties

Material = A36

Minimum Tensile Strength (Sut) = 400.0 MPa

Minimum Yield Strength (Sy) = 250.0 MPa

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd) = 160.0 MPa

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Hydrostatic Test Stress (St) = 171.0 MPa

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible) = -12.0 °C

Thickness Required by Erection

As per API-650 5.6.1.1, Thickness Required by Erection (t_erec) = 6 mm

Thickness Required by Design

$$H' = H$$

$$H' = 1.65$$

$$H' = 1.65 \text{ m}$$

$$t_d = ((4.9 * D * (H' - 0.3) * SG) / Sd) + CA$$

$$t_d = ((4.9 * 18.0 * (1.65 - 0.3) * 1) / 160.0) + 1.6$$

$$t_d = 2.3442 \text{ mm}$$

Hydrostatic Test Required Thickness

$$H_t' = H\text{-Hydrotest}$$

$$H_t' = 1.65$$

$$H_t' = 1.65 \text{ m}$$

$$t_t = (4.9 * D * (H_t' - 0.3) * SG_t) / S_t$$

$$t_t = (4.9 * 18.0 * (1.65 - 0.3) * 1) / 171.0$$

$$t_t = 0.6963 \text{ mm}$$

Seismic Design Required Thickness

Nc = Convective Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)

Nh = Product Hydrostatic Membrane Force per *API 650 Section E.6.1.4 and Section 5.6.3.2* (N/mm)

Ni = Impulsive Hoop Membrane Unit Force per *API 650 Section E.6.1.4* (N/mm)

Sd-seismic = Maximum Allowable Hoop Tension Membrane Stress per *API-650 E.6.2.4* (MPa)

ts = Seismic Minimum Thickness per *API 650 Section E.6.2.4* (mm)

As per *API 650 Section E.6.1.4*, Shell Course Liquid Surface to Analysis Point Distance (Y) = 1.65 m

$$N_i = 5.22 * A_i * G * (D^2) * ((Y / (0.75 * D)) - (0.5 * ((Y / (0.75 * D))^2)))$$

$$N_i = 5.22 * 0.2417 * 1 * (18.0^2) * ((1.65 / (0.75 * 18.0)) - (0.5 * ((1.65 / (0.75 * 18.0))^2)))$$

$$N_i = 46.909 \text{ N/mm}$$

$$N_c = (1.85 * A_c * G * (D^2) * \text{COSH}(((3.68 * (H - Y)) / D))) / \text{COSH}(((3.68 * H) / D))$$

$$N_c = (1.85 * 0.0523 * 1 * (18.0^2) * \text{COSH}(((3.68 * (14.85 - 1.65)) / 18.0))) / \text{COSH}(((3.68 * 14.85) / 18.0))$$

$$N_c = 22.4222 \text{ N/mm}$$

$$N_h = 4.9 * (H - H_{\text{offset}}) * D * G$$

$$N_h = 4.9 * (1.65 - 0) * 18.0 * 1$$

$$N_h = 145.53 \text{ N/mm}$$

sigma_T- = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

sigma_T+ = Total Combined Hoop Stress per *API 650 Eq E.6.1.4-6, Sections E.6.1.4, EC.6.1.3* (MPa)

$$\sigma_{T+} = (N_h + \text{SQRT}(((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = (145.53 + \text{SQRT}(((46.909^2) + (22.4222^2) + (((0.3609 * 145.53) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T+} = 45.8197 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{T-} = (N_h - \text{SQRT}(((N_i^2) + (N_c^2) + (((A_v * N_h) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((t - CA), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = (145.53 - \text{SQRT}(((46.909^2) + (22.4222^2) + (((0.3609 * 145.53) / 2.5)^2)))) / \text{MAX}((6 - 1.6), 0.0001)$$

$$\sigma_{T-} = 20.3303 \text{ MPa}$$

$$S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * S_d), (0.9 * F_y * E))$$

$$S_d\text{-seismic} = \text{MIN}((1.33 * 160.0), (0.9 * 250.0 * 1))$$

Sd-seismic = 212.8 MPa

$ts = ((\sigma_T + * (tn - CA)) / S_{\text{membrane}}) + CA$
 $ts = ((45.8197 * (6 - 1.6)) / 212.8) + 1.6$
 $ts = 2.5474 \text{ mm}$

Minimum Required Thickness

$t_{\text{-min}} = \text{MAX}(t_{\text{erec}}, t_d, t_t, ts)$
 $t_{\text{-min}} = \text{MAX}(6, 2.3442, 0.6963, 2.5474)$
 $t_{\text{-min}} = 6 \text{ mm}$

Rating of Installed Thickness

$H_{\text{-max}} = (((t - CA) * S_d * JE) / (4.9 * D * SG)) + 0.3 + loc$
 $H_{\text{-max}} = (((6 - 1.6) * 160.0 * 1) / (4.9 * 18.0 * 1)) + 0.3 + 13.2$
 $H_{\text{-max}} = 21.4819 \text{ m}$

$H_{\text{-max-@-Pi}} = \text{MAX}(H_{\text{-max}}, 0)$
 $H_{\text{-max-@-Pi}} = \text{MAX}(21.4819, 0)$
 $H_{\text{-max-@-Pi}} = 21.4819 \text{ m}$

$Pi_{\text{-max-@-H}} = \text{MAX}((((H_{\text{-max}} - (H + loc)) * (9.8 * SG)) + P), 0)$
 $Pi_{\text{-max-@-H}} = \text{MAX}((((21.4819 - (1.65 + 13.2)) * (9.8 * 1)) + 0.0), 0)$
 $Pi_{\text{-max-@-H}} = 64.9922 \text{ kPa}$

Shell Design Summary Results

$W_{\text{-ins}} = t_{\text{-ins}} * d_{\text{-ins}} * \pi * (OD + t_{\text{-ins}}) * H$
 $W_{\text{-ins}} = 0.0 * 130 * \pi * (18.024 + 0.0) * 15.0$
 $W_{\text{-ins}} = 0.0 \text{ kg}$

$W_{\text{-shell-corr}} = (W_{\text{-1-corr}} + W_{\text{-2-corr}} + W_{\text{-3-corr}} + W_{\text{-4-corr}} + W_{\text{-5-corr}} + W_{\text{-6-corr}} + W_{\text{-7-corr}}) + W_{\text{-shell-add}}$
 $W_{\text{-shell-corr}} = (11,073.1824 + 7,877.6829 + 6,812.7528 + 4,683.2474 + 3,512.4355 + 3,512.4355 + 3,512.4355) + 0$
 $W_{\text{-shell-corr}} = 40,984.1722 \text{ kg}$

$W_{\text{-shell}} = (W_{\text{-1}} + W_{\text{-2}} + W_{\text{-3}} + W_{\text{-4}} + W_{\text{-5}} + W_{\text{-6}} + W_{\text{-7}}) + W_{\text{-shell-add}}$
 $W_{\text{-shell}} = (12,776.7489 + 9,580.9657 + 8,515.941 + 6,386.2464 + 4,789.6848 + 4,789.6848 + 4,789.6848) + 0$
 $W_{\text{-shell}} = 51,628.9566 \text{ kg}$

$CG_{\text{-shell}} = ((CG_{\text{-1}} * W_{\text{-1}}) + (CG_{\text{-2}} * W_{\text{-2}}) + (CG_{\text{-3}} * W_{\text{-3}}) + (CG_{\text{-4}} * W_{\text{-4}}) + (CG_{\text{-5}} * W_{\text{-5}}) + (CG_{\text{-6}} * W_{\text{-6}}) + (CG_{\text{-7}} * W_{\text{-7}})) / W_{\text{-shell}}$
 $CG_{\text{-shell}} = ((1.2 * 12,776.7489) + (3.6 * 9,580.9657) + (6.0 * 8,515.941) + (8.4 * 6,386.2464) + (10.5 * 4,789.6848) + (12.3 * 4,789.6848) + (14.1 * 4,789.6848)) / 51,628.9566$
 $CG_{\text{-shell}} = 6.417 \text{ m}$

Shell Design Summary

Course	Height (m)	Material	CA (mm)	JE	Sy (mpa)	Sut (mpa)	Sd (mpa)	St (mpa)	t_erec (mm)
7	1.8	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6
6	1.8	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6
5	1.8	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6
4	2.4	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6
3	2.4	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6
2	2.4	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6
1	2.4	A36	1.6	1	250.0	400.0	160.0	171.0	6

Shell Design Summary (continued)

Course	t-design (mm)	t-test (mm)	t-seismic (mm)	t-ext (mm)	t-min (mm)	t-installed (mm)	Status	H-max-@-Pi (m)	Pi-max-@-H (kPa)
7	2.3442	0.6963	2.5474	N/A	6	6	PASS	21.4819	64.9922
6	3.3364	1.6247	3.5109	N/A	6	6	PASS	19.6819	47.3522
5	4.3287	2.5532	4.4568	N/A	6	6	PASS	17.8819	29.7122
4	5.6517	3.7911	5.6758	N/A	6	6	PASS	15.4819	6.1922
3	6.9747	5.0289	6.8462	N/A	6.9747	8	PASS	16.71	18.2278
2	8.2977	6.2668	7.9712	N/A	8.2977	9	PASS	16.124	12.4856
1	9.6207	7.5047	9.0607	N/A	9.6207	12	PASS	19.1662	42.2989

Intermediate Stiffeners Design

Stiffeners Design For Wind Loading

D = Nominal Tank Diameter (m)

H1 = Maximum Unstiffened Transformed Shell Height per *API-650 5.9.6.1* (m)

N = Actual Wind Girders Quantity

Ns = Required Number of Girders per *API 650 5.9.6.3 and 5.9.6.4*

Pwd = Design Wind Pressure Including Inward Drag per *API-650 5.9.6.1* (kPa)

Pwv = Wind Pressure where Design Wind Speed V is Used per *API-650 5.9.6.1* (kPa)

ts_min = Thickness of the Thinnest Shell Course (mm)

V = Wind velocity (km/hr)

D = 18.0 m

N = 0

V = 97.0 km/hr

Shell Courses Heights (W) = [2.4 2.4 2.4 2.4 1.8 1.8 1.8] m

ts_min = MIN(ts_1 , ts_2 , ts_3 , ts_4 , ts_5 , ts_6 , ts_7)

ts_min = MIN(12 , 9 , 8 , 6 , 6 , 6 , 6)

ts_min = 6 mm

Stiffeners Required Quantity

HTS = Height of Transformed Shell per *API 650 5.9.6.2* (m)

Transformed shell courses heights

Variable	Equation	Value	Unit		
Wtr_1	$W_1 * \text{SQRT}(((t_{\min} / ts_1)^5))$	0.4243	m	N/A	N/A
Wtr_2	$W_2 * \text{SQRT}(((t_{\min} / ts_2)^5))$	0.8709	m	N/A	N/A
Wtr_3	$W_3 * \text{SQRT}(((t_{\min} / ts_3)^5))$	1.1691	m	N/A	N/A
Wtr_4	$W_4 * \text{SQRT}(((t_{\min} / ts_4)^5))$	2.4000	m	N/A	N/A
Wtr_5	$W_5 * \text{SQRT}(((t_{\min} / ts_5)^5))$	1.8000	m	N/A	N/A
Wtr_6	$W_6 * \text{SQRT}(((t_{\min} / ts_6)^5))$	1.8000	m	N/A	N/A
Wtr_7	$W_7 * \text{SQRT}(((t_{\min} / ts_7)^5))$	1.8000	m	N/A	N/A

HTS = Wtr_1 + Wtr_2 + Wtr_3 + Wtr_4 + Wtr_5 + Wtr_6 + Wtr_7

HTS = 0.4243 + 0.8709 + 1.1691 + 2.4 + 1.8 + 1.8 + 1.8

HTS = 10.2643 m

$P_{wv} = 1.48 * ((V / 190)^2)$
 $P_{wv} = 1.48 * ((97.0 / 190)^2)$
 $P_{wv} = 0.3857 \text{ kPa}$

$P_{wd} = P_{wv} + 0.24$
 $P_{wd} = 0.3857 + 0.24$
 $P_{wd} = 0.6257 \text{ kPa}$

$H1 = 9.47 * ts_{min} * \text{SQRT}(((ts_{min} / D)^3)) * (1.72 / P_{wd})$
 $H1 = 9.47 * 6 * \text{SQRT}(((6 / 18.0)^3)) * (1.72 / 0.6257)$
 $H1 = 30.0574 \text{ m}$

$Ns = \text{CEILING}(((HTS / H_{safe}) - 1))$
 $Ns = \text{CEILING}(((10.2643 / 30.0574) - 1))$
 $Ns = 0$

$N \geq Ns \Rightarrow \text{PASS}$

Flat Bottom: Annular Plate Design [Back](#)

Bottom Type = Cone Up with Annular Ring

Bottom Support Type = Continuously Supported on Foundation

Ann-w-min = Annular Ring Total Required Width (mm)

CA = Corrosion allowance (mm)

CA_1 = Bottom Shell Course Corrosion Allowance (mm)

CA-ann = Annular Plates Corrosion Allowance (mm)

chime = Outside Projection (Chime Distance) (mm)

E = Joint efficiency

H-effective = Effective Product Height (m)

L = Minimum width of annular plate as measured from inside edge of the shell to the edge of the plate in the remainder of the bottom per *API-650 5.5.2* (mm)

lw = Lap of the Bottom Plates Over the Annular Plate (mm)

Ma_1 = Bottom Shell Course Material

Ma-ann = Annular Plates Material

Ma-bottom = Material

S = Bottom Shell Course Maximum Stress (MPa)

S1 = Bottom Shell Course Product Stress per *API-650 Table 5.1a Note b* (MPa)

S2 = Bottom Shell Course Hydrostatic Stress per *API-650 Table 5.1a Note b* (MPa)

Sd_1 = Bottom Shell Course Allowable Design Stress (MPa)

slope = Cone slope (rise/run)

St_1 = Bottom Shell Course Allowable Hydrostatic Test Stress (MPa)

tb = Installed Thickness (mm)

tb-ann = Annular Plate Thickness (mm)

tb-ann-req = Annular Plates Required Thickness per *API-650 5.5.3* (mm)

tb-req = Bottom Required Thickness (mm)

td_1 = Bottom Shell Course Design Thickness (mm)

ts_1 = Bottom Shell Course Nominal Thickness (mm)

tt_1 = Bottom Shell Course Hydrotest Thickness (mm)

w-ann = Annular Plate Actual Width (mm)

CA = 1.6 mm

CA_1 = 1.6 mm

CA-ann = 1.6 mm

chime = 50 mm

E = 1

lw = 40 mm

Ma_1 = A36

Ma-ann = A36

Ma-bottom = A36

Sd_1 = 160.0 MPa

slope = 0.01

St_1 = 171.0 MPa

tb = 8 mm

tb-ann = 8 mm

td_1 = 9.62 mm

ts_1 = 12 mm

tt_1 = 7.5 mm

w-ann = 710 mm

Bottom Plates Material Properties

Material = A36

Minimum Tensile Strength (Sut-btm) = 400.0 MPa

Minimum Yield Strength (Sy-btm) = 250.0 MPa

Density (d-btm) = 7,840 kg/m³

Bottom Annular Ring Material Properties

Material = A36

Minimum Yield Strength at Ambient Temperature (Sy-ambient-ann) = 250.0 MPa

Minimum Yield Strength (Sy-ann) = 250.0 MPa

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-ann) = -10.57 °C

Calculation of Hydrostatic Test Stress & Product Stress per API-650 Section 5.5.1

$$S1 = ((td_1 - CA_1) / (ts_1 - CA_1)) * Sd_1$$

$$S1 = ((9.6207 - 1.6) / (12 - 1.6)) * 160.0$$

$$S1 = 123.4 \text{ MPa}$$

As per API-650 5.5.1, first shell course material, A36, is in Group I; therefore, butt welded annular plates are not required

$$S2 = (tt_1 / ts_1) * St_1$$

$$S2 = (7.5047 / 12) * 171.0$$

$$S2 = 106.94 \text{ MPa}$$

As per API-650 5.5.1, first shell course material, A36, is in Group I; therefore, butt welded annular plates are not required

$$S = \text{MAX}(S1, S2)$$

$$S = \text{MAX}(123.3952, 106.9425)$$

$$S = 123.4 \text{ MPa}$$

Bottom Weight

A-ann = Annular Ring Surface Area (m²)

A-btm = Bottom Surface Area (m²)

CA = Corrosion allowance (mm)

CA-ann = Annular Plates Corrosion Allowance (mm)

chime = Outside Projection (Chime Distance) (mm)

ID-ann = Annular Ring Inner Diameter (m)

lw = Lap of the Bottom Plates Over the Annular Plate (mm)

OD-ann = Annular Ring Outer Diameter (m)

OD-btm = Bottom Outer Diameter (m)

slope = Cone slope (rise/run)

tb = Installed Thickness (mm)

tb-ann = Annular Plate Thickness (mm)

Theta = Slope Angle (deg)

w-ann = Annular Plate Actual Width (mm)

Wb-pl = Bottom Plates Weight (kg)

Wb-pl-add = Bottom Additional Weight (kg)

Wb-pl-corr = Bottom Corroded Plates Weight (kg)

Wb-pl-corroded-overlap = Bottom Weight Corroded Overlap (kg)

Wb-pl-overlap = Bottom Overlap Weight (kg)

$$CA = 1.6 \text{ mm}$$

$$CA\text{-ann} = 1.6 \text{ mm}$$

$$\text{chime} = 50 \text{ mm}$$

$$lw = 40 \text{ mm}$$

$$\text{slope} = 0.01$$

$$tb = 8 \text{ mm}$$

$$tb\text{-ann} = 8 \text{ mm}$$

$$w\text{-ann} = 710 \text{ mm}$$

$$Wb\text{-pl-add} = 0 \text{ kg}$$

$$Wb\text{-pl-corroded-overlap} = 346.26 \text{ kg}$$

$$Wb\text{-pl-overlap} = 432.82 \text{ kg}$$

$$OD\text{-ann} = OD + (\text{chime} * 2)$$

$$OD\text{-ann} = 18.024 + (0.05 * 2)$$

$$OD\text{-ann} = 18.12 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} ID\text{-ann} &= OD\text{-ann} - (w\text{-ann} * 2) \\ ID\text{-ann} &= 18.124 - (0.71 * 2) \\ ID\text{-ann} &= 16.7 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} OD\text{-btm} &= ID\text{-ann} + (lw * 2) \\ OD\text{-btm} &= 16.704 + (0.04 * 2) \\ OD\text{-btm} &= 16.78 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A\text{-ann} &= \pi * (((OD\text{-ann} / 2)^2) - ((ID\text{-ann} / 2)^2)) \\ A\text{-ann} &= \pi * (((18.124 / 2)^2) - ((16.704 / 2)^2)) \\ A\text{-ann} &= 38.84 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Theta} &= \text{ARCTAN}(\text{slope}) \\ \text{Theta} &= \text{ARCTAN}(0.01) \\ \text{Theta} &= 0.57 \text{ deg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A\text{-btm} &= (\pi * ((OD\text{-btm} / 2)^2)) / \text{COS}(\text{Theta}) \\ A\text{-btm} &= (\pi * ((16.784 / 2)^2)) / \text{COS}(0.5729) \\ A\text{-btm} &= 221.26 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Wb\text{-pl} &= ((A\text{-btm} * tb * d\text{-btm}) + Wb\text{-pl-overlap} + Wb\text{-pl-add}) + (A\text{-ann} * tb\text{-ann} * d\text{-ann}) \\ Wb\text{-pl} &= ((221,259,810.8075 * 8 * 7.840000000000001E-6) + 432.8238 + 0) + (38,842,463.0734 \\ &\quad * 8 * 7.840000000000001E-6) \\ Wb\text{-pl} &= 16,746.44 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Wb\text{-pl-corr} &= ((A\text{-btm} * (tb - CA) * d\text{-btm}) + Wb\text{-pl-corroded-overlap} + Wb\text{-pl-add}) + (A\text{-ann} * (tb\text{-ann} \\ &\quad - CA\text{-ann}) * d\text{-ann}) \\ Wb\text{-pl-corr} &= ((221,259,810.8075 * (8 - 1.6) * 7.840000000000001E-6) + 346.2591 + 0) + \\ &\quad (38,842,463.0734 * (8 - 1.6) * 7.840000000000001E-6) \\ Wb\text{-pl-corr} &= 13,397.15 \text{ kg} \end{aligned}$$

Bottom Design due to External Pressure

P-btm = Downward Pressure (kPa)

Liquid Height to Pressure Conversion Factor (f) = 9.81

$$\begin{aligned} P\text{-btm} &= (d\text{-btm} * 9.80665 * (tb - CA\text{-btm}) * (1 / 1.0E6)) + (L\text{min} * f * SG) \\ P\text{-btm} &= (7,840 * 9.80665 * (8 - 1.6) * (1 / 1.0E6)) + (1.89 * 9.8064 * 1) \\ P\text{-btm} &= 19.03 \text{ kPa} \end{aligned}$$

P-btm >= Pv ==> There is no uplift due to external pressure

Bottom Required Thickness

As per API-650 5.4.1, Required Thickness by Erection (tb-erec) = 7.6 mm

$$\begin{aligned} tb\text{-req} &= tb\text{-erec} \\ tb\text{-req} &= 7.6 \\ tb\text{-req} &= 7.6 \text{ mm} \end{aligned}$$

tb >= tb-req ==> PASS

Bottom Outside Projection

As per API-650 5.4.2, Minimum Required Outside Projection (chime) = 50 mm

chime >= chime ==> PASS

Annular Ring Required Thickness

As per API-650 5.5.3, Annular Plates Required Thickness based on the Product Stress of the First Shell Course (tb-ann-req_1) = 6 mm

As per API-650 5.5.3, Annular Plates Required Thickness based on the Hydrostatic Test Stress of the First Shell Course (tb-ann-req_2) = 6 mm

tb-ann-req = MAX((tb-ann-req_1 + CA-ann) , tb-ann-req_2 , tb-req)
tb-ann-req = MAX((6 + 1.6) , 6 , 7.6)
tb-ann-req = 7.6 mm

tb-ann >= tb-ann-req ==> PASS

Annular Ring Effective Product Height Limit

H-effective = Lmax * SG
H-effective = 14.85 * 1
H-effective = 14.85 m

As per API-650 5.5.3
H-effective <= 23 ==> PASS

Annular Ring Required Width

As per API-650 5.5.2, Density Factor of Water (Y) = 0.009810000000000001 MPa/m

$L = 2 * tb_ann * \sqrt{(Sy_ambient_ann / (2 * Y * \min(SG, 1) * Lmax))}$
 $L = 2 * 8 * \sqrt{(250.0 / (2 * 0.0098 * \min(1, 1) * 14.85))}$
L = 468.68 (Set to 600 mm since it cannot be less than 600)

Ann-w-min = L + chime + ts_1 + lw
Ann-w-min = 600 + 50 + 12 + 40
Ann-w-min = 702 mm

w-ann >= Ann-w-min ==> PASS

Wind Moment (Per API-650 Section 5.11) [Back](#)

Wind Pressures per API-650 & ASCE7-05

I = Wind Importance Factor per ASCE 7-05 Table 6-1

P_{WR} = Roof Design Wind Pressure per API-650 5.2.1.k (kPa)

P_{WS} = Shell Design Wind Pressure per API-650 5.2.1.k (kPa)

V = Design Wind Velocity (3-sec gust) per ASCE 7-05 (kph)

V_s = Adjusted Design Wind Velocity per API 650 Section 5.2.1.k (kph)

I = 1

V = 97.0 kph

Wind Velocity per API-650 and ASCE7-05

V_s = V * SQRT(I)

V_s = 97.0 * SQRT(1)

V_s = 97.0 kph

Roof Wind Pressure

P_{WR} = 0

P_{WR} = 0

P_{WR} = 0 kPa

As per API-650 Section 5.2.1.k.1 and Table 5.20a, P_{WR} shall be taken as zero for supported cone roofs meeting the requirements of API-650 Section 5.10.4.

Shell Wind Pressure

P_{WS} = 0.89 * ((V_s / 190)²)

P_{WS} = 0.89 * ((97.0 / 190)²)

P_{WS} = 0.23 kPa

Wind Overturning and Sliding Stability

A_h = Roof Horizontal Projected Area (m²)

A_{h-total} = Roof Horizontal Projected Area Including Insulation (m²)

A_s = Shell Total Vertical Projected Area (m²)

A_{v-roof} = Roof Vertical Projected Area (m²)

CA₁ = Bottom Shell Course Corrosion Allowance (mm)

CA_{btm} = Corrosion Allowance of Bottom Plates Under the Shell (mm)

CG_{roof} = Roof Center of Gravity (m)

COF = Maximum Allowable Sliding Friction Coefficient

D_{LR} = Nominal Weight of Roof Plates and Attached Structural (N)

D_{LS} = Nominal Weight of Shell Plates and Framing (N)

D_{outer} = Tank Max Outer Diameter (m)

F_{by} = Yield Strength of Bottom Plates Under the Shell (MPa)

F_{friction} = Friction Force (N)

F_{wind} = Sliding Force (N)

M_{DL} = Moment About the Shell-To-Bottom Joint from the Nominal Weight of the Shell (N.m)

M_{D_{LR}} = Moment About the Shell-To-Bottom Joint from the Nominal Weight of the Roof Plate Plus any Attached Structural (N.m)

M_F = Moment About the Shell-To-Bottom Joint From Liquid Weight (N.m)

M_{Pi} = Moment About the Shell-To-Bottom Joint From Design Internal Pressure per API-650 5.11.2.2 (N.m)

M_w = Overturning Moment About the Shell-To-Bottom Joint from Wind Pressures per API-650

5.11.2.2 (N.m)

M_{WR} = Roof Wind Overturning Moment per API-650 5.11.2.2 (N.m)

M_{WS} = Shell Wind Overturning Moment per API-650 5.11.2.2 (N.m)

Rh = Roof Horizontal Radius (m)

tb = Thickness of Bottom Plates Under the Shell (mm)

tr-ins = Roof Insulation Thickness (mm)

ts₁ = Bottom Shell Course Nominal Thickness (mm)

ts-ins = Shell Insulation Thickness (mm)

W-access-corr = Access Corroded Weight (N)

W-app-corr = Appurtenances Corroded Weight (N)

Wb-pl-corr = Bottom Corroded Plates Weight (N)

wind-uplift = Wind Uplift per API-650 5.2.1.k (kPa)

wL = Tank Content Resisting Weight per API-650 5.11.2.3 (N/m)

Wr-pl = Roof New Plates Weight (N)

Wr-pl-corr = Roof Corroded Plates Weight (N)

Ws-framing = Shell New Framing Weight (N)

Ws-framing-corr = Shell Corroded Framing Weight (N)

Ws-pl = Shell New Plates Weight (N)

Ws-pl-corr = Shell Corroded Plates Weight (N)

Ws-struct-corr = Roof Corroded Structure Weight Supported by Shell (N)

W-stairs-corr = Stairways Corroded Weight (N)

W-struct = Roof New Structure Weight (N)

W-struct-corr = Roof Corroded Structure Weight (N)

W-windgirder-corr = Wind Girder Corroded Weight (N)

Xs = Moment Arm of Wind Force on Shell (m)

Xw = Moment Arm of Wind Force on Roof (m)

Ah = 255.6 m²

Av-roof = 13.02 m²

CA₁ = 1.6 mm

CA-btm = 1.6 mm

CG-roof = 0.48 m

COF = 0.4

DLR = 135,794.37 N

DLS = 534,554.73 N

Fby = 250.0 MPa

Rh = 9.02 m

tb = 8 mm

tr-ins = 0 mm

ts₁ = 12 mm

ts-ins = 0 mm

W-access-corr = 7,943.39 N

W-app-corr = 16,488.69 N

Wb-pl-corr = 131,381.17 N

Wr-pl = 119,409.79 N

Wr-pl-corr = 103,488.49 N

Ws-framing = 2,646.38 N

Ws-framing-corr = 1,946.32 N

Ws-pl = 506,307.11 N

Ws-pl-corr = 401,917.43 N

Ws-struct-corr = 20,589.3 N

W-stairs-corr = 17,779.46 N

W-struct = 70,794.92 N

W-struct-corr = 59,168.82 N

W-windgirder-corr = 0.0 N

Design Uplift Pressure per API-650 5.2.1.k

As per API-650 Section 5.2.1.k.1 and Table 5.20a, P_{WR} shall be taken as zero for supported cone roofs meeting the requirements of API-650 Section 5.10.4.

wind-uplift = 0 kPa

Overturning Moments

$$X_w = D / 2$$

$$X_w = 18.0 / 2$$

$$X_w = 9.0 \text{ m}$$

$$A_{h\text{-total}} = \pi * ((R_h + t_{r\text{-ins}})^2)$$

$$A_{h\text{-total}} = \pi * ((9.02 + 0.0)^2)$$

$$A_{h\text{-total}} = 255.6 \text{ m}^2$$

$$M_{\text{Pi}} = P_g * A_h * X_w$$

$$M_{\text{Pi}} = 0.0 * 255.6012 * 9.0$$

$$M_{\text{Pi}} = 0.0 \text{ N.m}$$

$$M_{\text{WR}} = \text{wind-uplift} * A_{h\text{-total}} * X_w$$

$$M_{\text{WR}} = 0.0 * 255.6012 * 9.0$$

$$M_{\text{WR}} = 0.0 \text{ N.m}$$

$$D_{\text{outer}} = OD + (2 * (t_{s\text{-ins}} / 1000))$$

$$D_{\text{outer}} = 18.024 + (2 * (0 / 1000))$$

$$D_{\text{outer}} = 18.02 \text{ m}$$

$$A_s = D_{\text{outer}} * H$$

$$A_s = 18.024 * 15.0$$

$$A_s = 270.36 \text{ m}^2$$

$$X_s = H / 2$$

$$X_s = 15.0 / 2$$

$$X_s = 7.5 \text{ m}$$

$$M_{\text{WS}} = P_{\text{WS}} * A_s * X_s$$

$$M_{\text{WS}} = 231.967 * 270.36 * 7.5$$

$$M_{\text{WS}} = 470,359.56 \text{ N.m}$$

$$M_w = M_{\text{WR}} + M_{\text{WS}}$$

$$M_w = 0.0 + 470,359.5589$$

$$M_w = 470,359.56 \text{ N.m}$$

Resistance to Overturning per API-650 5.11.2

$$M_{\text{DL}} = (D / 2) * DLS$$

$$M_{\text{DL}} = (18.0 / 2) * 534,554.7262$$

$$M_{\text{DL}} = 4,810,992.54 \text{ N.m}$$

$$M_{\text{DLR}} = (D / 2) * DLR$$

$$M_{\text{DLR}} = (18.0 / 2) * 135,794.3694$$

$$M_{\text{DLR}} = 1,222,149.32 \text{ N.m}$$

$$wL = \text{MIN}((70.4 * L_{\text{max}} * D), (59 * (t_{b\text{-req}} - CA_{\text{btm}}) * \text{SQRT}((F_{by} * L_{\text{max}}))))$$

$$wL = \text{MIN}((70.4 * 14.85 * 18.0), (59 * (7.6 - 1.6) * \text{SQRT}((250.0 * 14.85))))$$

$$wL = 18,817.92 \text{ N/m}$$

$$M_{\text{F}} = (D / 2) * wL * \pi * D$$

$$M_{\text{F}} = (18.0 / 2) * 18,817.92 * \pi * 18.0$$

$$M_{\text{F}} = 9,577,154.75 \text{ N.m}$$

An unanchored tank with supported cone roof must meet with the criteria from API-650 5.11.2.2

Criterion for supported cone roofs meeting the requirements of API-650 5.10.4

$$(M_{\text{WS}} + (F_p * M_{\text{Pi}})) < ((M_{\text{DL}} / 1.5) + M_{\text{DLR}})$$

$(470,359.5589 + (0.4 * 0.0)) < ((4,810,992.5357 / 1.5) + 1,222,149.3248)$
 $470,359.5589 < 4,429,477.6819 \implies$ Tank is stable

Resistance to Sliding per API-650 5.11.4

$F_{\text{wind}} = P_{\text{WS}} * A_s$
 $F_{\text{wind}} = 231.967 * 270.36$
 $F_{\text{wind}} = 62,714.61 \text{ N}$

$F_{\text{friction}} = \text{COF} * (W_{\text{r-pl-corr}} + W_{\text{struct-corr}} + W_{\text{s-pl-corr}} + W_{\text{s-framing-corr}} + W_{\text{b-pl-corr}} + W_{\text{stairs-corr}} + W_{\text{access-corr}} + W_{\text{app-corr}} + W_{\text{windgirder-corr}})$
 $F_{\text{friction}} = 0.4 * (103,488.4866 + 59,168.8176 + 401,917.4319 + 1,946.32 + 131,381.1685 + 17,779.4564 + 7,943.3865 + 16,488.6877 + 0.0)$
 $F_{\text{friction}} = 296,045.5 \text{ N}$

$F_{\text{friction}} \geq F_{\text{wind}} \implies$ Tank is stable

Anchorage Requirement

Tank anchorage due to wind is not required per API-650 5.11

Seismic Design [Back](#)

Site Ground Motion Design

Seismic Method = ASCE7-MAPPED-SS-AND-S1

Ac = Convective Design Response Spectrum Acceleration Coefficient per *API 650 Sections E.4.6.1*

Ac-min = Adjusted Convective Design Response Spectrum Acceleration Coefficient

Af = Acceleration Coefficient for Sloshing Wave Height per *API 650 Sections E.7.2*

Ai = per *API 650 Sections E.4.6.1*

Ai = Impulsive Design Response Spectrum Acceleration Coefficient per *API 650 Sections E.4.6.1*

Anchorage_System = Anchorage System

Av = Vertical Ground Acceleration Coefficient per *API 650 Sections E.6.1.3 and E.2.2*

D = Nominal Tank Diameter (m)

Fa = Site Acceleration Coefficient

Fv = Site Velocity Coefficient

H = Maximum Design Product Level (m)

I = Importance Factor

K = Spectral Acceleration Adjustment Coefficient

Ks = Sloshing Coefficient per *API 650 Section E.4.5.2*

Q = MCE to Design Level Scale Factor

rho_product = Product Mass Density (kg/m³)

Rwc = Convective Force Reduction Factor

Rwi = Impulsive Force Reduction Factor

S1 = Spectral Response Acceleration at a Period of One Second

SD1 = Design Spectral Response Acceleration at a Period of One Second per *API 650 Sections E.4.6.1 and E.2.2*

SDS = Design Spectral Response Acceleration at Short Period per *API 650 Sections E.4.6.1 and E.2.2*

Seismic_Site_Class = Seismic Site Class

Seismic_Use_Group = Seismic Use Group

shell-course-modulus-of-elasticity-information-list = Shell Course Modulus of Elasticity Information List (MPa)

shell-course-thickness-information-list = Shell Course Thickness Information List (mm)

Ss = Spectral Response Acceleration Short Period

Tc = Convective Natural Period per *API 650 Section E.4.5.2* (sec)

TL = Regional Dependent Transistion Period for Longer Period Ground Motion (sec)

Anchorage_System = MECHANICALLY-ANCHORED

D = 18.0 m

Fa = 1.0

Fv = 1.0

H = 14.85 m

I = 1.25

K = 1.5

Q = 0.6667

rho_product = 1,000.0 kg/m³

Rwc = 2

Rwi = 4

S1 = 0.37

Seismic_Site_Class = SEISMIC-SITE-CLASS-B

Seismic_Use_Group = SEISMIC-USE-GROUP-II

shell-course-modulus-of-elasticity-information-list = [199,000 199,000 199,000.0] MPa

shell-course-thickness-information-list = [6 12 7.76] mm

Ss = 1.16

TL = 16 sec

$SDS = Q * Fa * Ss$
 $SDS = 0.6667 * 1.0 * 1.16$
 $SDS = 0.7733$

$SD1 = Q * Fv * S1$
 $SD1 = 0.6667 * 1.0 * 0.37$
 $SD1 = 0.2467$

$Ks = 0.578 / \text{SQRT}(\text{TANH}(((3.68 * H) / D)))$
 $Ks = 0.578 / \text{SQRT}(\text{TANH}(((3.68 * 14.85) / 18.0)))$
 $Ks = 0.5793$

$Tc = 1.8 * Ks * \text{SQRT}(D)$
 $Tc = 1.8 * 0.5793 * \text{SQRT}(18.0)$
 $Tc = 4.4242 \text{ sec}$

$Ai = SDS * (I / Rwi)$
 $Ai = 0.7733 * (1.25 / 4)$
 $Ai = 0.2417$

$Ai = \text{MAX}(Ai, 0.007)$
 $Ai = \text{MAX}(0.2417, 0.007)$
 $Ai = 0.2417$

$Tc \leq TL$

$Ac = K * SD1 * (1 / Tc) * (I / Rwc)$
 $Ac = 1.5 * 0.2467 * (1 / 4.4242) * (1.25 / 2)$
 $Ac = 0.0523$

$Ac\text{-min} = \text{MIN}(Ac, Ai)$
 $Ac\text{-min} = \text{MIN}(0.0523, 0.2417)$
 $Ac\text{-min} = 0.0523$

$Av = (2 / 3) * 0.7 * SDS$
 $Av = (2 / 3) * 0.7 * 0.7733$
 $Av = 0.3609$

Vertical Ground Acceleration Coefficient Specified by user (Av) = 0.3609

$Af = K * SD1 * I * (4 / (Tc^2))$
 $Af = 1.5 * 0.2467 * 1.25 * (4 / (4.4242^2))$
 $Af = 0.0945$

Seismic Design

A = Roof Surface Area (m^2)
 Ac = Convective Design Response Spectrum Acceleration Coefficient
 Af = Acceleration Coefficient for Sloshing Wave Height
 $Ah\text{-shell}$ = Roof Horizontal Projected Area Supported by The Shell (m^2)
 Ai = Impulsive Design Response Spectrum Acceleration Coefficient
 Anchorage_System = Anchorage System
 $A\text{-rs}$ = Roof Area Supported by The Shell (m^2)
 Av = Vertical Ground Acceleration Coefficient
 $ca1$ = Bottom Shell Course Corrosion Allowance (mm)
 $ca_annular_ring$ = Annular Ring Corrosion Allowance (mm)
 ca_bottom = Bottom Corrosion Allowance (mm)
 D = Nominal Tank Diameter (m)
 Δ = Sloshing Wave Height Above Product Design Height per *API 650 Section E.7.2* (m)
 Event_Type = Event Type
 Fa = Site Acceleration Coefficient

F_c = Allowable Longitudinal Shell Compression Stress per *API 650 Section E.6.2.2.3, Eq E.6.2.2.3-1a* (MPa)
 Freeboard = Actual Freeboard (m)
 Freeboard_required = Minimum Required Freeboard per *API-650 Table E.7* (m)
 F_v = Site Velocity Coefficient
 F_y = Yield Strength (MPa)
 G = Specific Gravity
 G_e = Effective Specific Gravity per *API 650 Section E.2.2*
 H = Maximum Design Product Level (m)
 H_{rcg} = Top of Shell to Roof and roof appurtenances Center of Gravity (m)
 h_s = Additional Shell Height Required Above Sloshing Height (mm)
 H_{shell} = Shell height (m)
 I = Importance Factor
 J = Anchorage Ratio per *API 650 Section E.6.2.1.1.1*
 K = Spectral Acceleration Adjustment Coefficient
 K_s = Sloshing Coefficient
 L_{max} = Annular Ring Required Minimum Width Max Limit per *API 650 Section E.6.2.1.1.2* (m)
 $L_{min-seismic}$ = Annular Ring Required Minimum Width per *API 650 Section E.6.2.1.1.2* (m)
 L_s = Actual Annular Ring Width (m)
 $Min_Anchor_Quantity$ = Minimum Anchor Quantity
 $Min_Anchor_Spacing$ = Minimum Anchor Spacing (m)
 M_{rw} = Ringwall Overturning Moment per *API 650 Section E.6.1.5* (N.m)
 M_s = Slab Overturning Moment per *API 650 Section E.6.1.5* (N.m)
 MU = Friction Coefficient
 Overturn_Stability_Ratio = Overturning Stability Ratio per *API 650 Section E.6.2.3*
 P = Design Pressure (MPa)
 Q = MCE to Design Level Scale Factor
 S_1 = Spectral Response Acceleration at a Period of One Second
 S_b = Roof Balanced Snow Load (Pa)
 SD_1 = Design Spectral Response Acceleration at a Period of 1 Second
 SDS = Design Spectral Response Acceleration at Short Period
 Seismic_Site_Class = Seismic Site Class
 Seismic_Use_Group = Seismic Use Group
 σ_c = Mechanically Anchored Maximum Longitudinal Shell Compression Stress per *API 650 Section E.6.2.2.2, Eq E.6.2.2.2-1a* (MPa)
 S_s = Spectral Response Acceleration Short Period
 t_a = Thickness, excluding corrosion allowance, of the bottom annulus under the shell required to provide the resisting force for self anchorage per *API-650 E.2.2* (mm)
 $t_{annular_ring}$ = Annular Ring Thickness (mm)
 t_b = Calculated Annular Ring Thickness Holddown (mm)
 $t_{b-ann-corr}$ = Annular Ring Corroded Thickness (mm)
 t_{b-corr} = Bottom Plates Corroded Thickness (mm)
 t_{bottom} = Bottom Plate Thickness (mm)
 T_c = Convective Natural Period (sec)
 T_L = Regional Dependent Transistion Period for Longer Period Ground Motion (sec)
 ts_1 = Bottom Shell Course Thickness (mm)
 ts_{1_c} = Shell Course 1 Corroded Thickness (mm)
 V = Total Design Base Shear per *API 650 Section E.6.1* (N)
 V_c = Design Base Shear for Convective Component per *API 650 Section E.6.1* (N)
 V_i = Design Base Shear for Impulsive Component per *API 650 Section E.6.1* (N)
 V_{max} = Local Shear Transfer per *API 650 Section E.7.7* (N/m)
 V_s = Self Anchored Sliding Resistance Maximum Allowable Base Shear per *API 650 Section E.7.6* (N)
 w_a = Force Resisting Uplift - Self Anchored per *API 650 Section E.6.2.1.1* (N/m)
 $w_a = (N/m)$
 w_{a_limit} = Self Anchored Force Resisting Uplift Max Limit per *API 650 Section E.6.2.1.1, Eq E.6.2.1.1-1a* (N/m)
 $w_{a_self-anchored}$ = Self Anchored Force Resisting Uplift per *API 650 Section E.6.2.1.1, Eq E.6.2.1.1-1a* (N/m)
 $W_{b-attachments}$ = Bottom Attachments Weight (kg)

W_{b-pl} = Bottom Plates Weight (kg)
 W_c = Convective Effective Weight per *API 650 Section E.6.1.1* (N)
 W_{eff} = Total Effective Weight per *API 650 Section E.6.1.1* (N)
 W_f = Tank Bottom Total Weight (N)
 W_{fd} = Tank Foundation Weight (N)
 W_g = Soil Weight (N)
 W_i = Impulsive Effective Weight per *API 650 Section E.6.1.1* (N)
 w_{int} = Calculated Design Uplift Due to Product Pressure (N/m)
 W_p = Tank Contents Total Weight (N)
 W_r = Total Weight of Fixed Tank Roof including Framing, Knuckles, any Permanent Attachments and 10 % of the Roof Balanced Design Snow Load (N)
 $W_{r-attachments}$ = Roof Attachments Weight (kg)
 $W_{r-DL-add}$ = Roof Additional Dead Weight (kg)
 W_{r-pl} = Roof Plates Nominal Weight (kg)
 W_{rs} = Roof Load Acting on The Tank Shell Including 10 % of the Roof Balanced Design Snow Load (N)
 w_{rs} = Specified Tank Roof Load Acting on Tank Shell (N/m)
 W_s = Total Weight of Tank Shell and Appurtenances (N)
 $W_{s-attachments}$ = Shell Attachments Weight (kg)
 $W_{s-framing}$ = Shell Framing Weight (kg)
 W_{s-pl} = Shell Plates Nominal Weight (kg)
 W_{ss} = Roof Structure Weight Supported by The Tank Shell (kg)
 W_{struct} = Roof Structure Weight (kg)
 W_T = Total Weight of Tank Shell, Roof, Framing, Knuckles, Product, Bottom, Attachments, Appurtenances, Participating Balanced Snow Load per *API-650 Eq E.6.2.3-1* (N)
 w_t = Tank and Roof Weight Acting at base of Shell per *API 650 Section E.6.2.1.1.1* (N/m)
 X_c = Height from tank shell bottom to the center of action of convective lateral force for computing ringwall overturning moment per *API 650 Section E.6.1.2.1* (m)
 X_{cs} = Height from tank shell bottom to the center of action of convective lateral force for computing slab overturning moment per *API 650 Section E.6.1.2.2* (m)
 X_i = Height from tank shell bottom to the center of action of impulsive lateral force for computing ringwall overturning moment per *API 650 Section E.6.1.2.1* (m)
 X_{is} = Height from tank shell bottom to the center of action of impulsive lateral force for computing slab overturning moment per *API 650 Section E.6.1.2.2* (m)
 X_r = Height from tank shell bottom to the center of gravity of roof and roof appurtenances per *API 650 Section E.6.1.2* (m)
 X_s = Height from tank shell bottom to shell's center of gravity (m)
 y_u = Self Anchored Tank Uplift Estimate per *API 650 Section E.7.3.1* (mm)

$A = 258.85 \text{ m}^2$
 $A_c = 0.05$
 $A_f = 0.09$
 $A_{h-shell} = 185.62 \text{ m}^2$
 $A_i = 0.24$
 Anchorage_System = MECHANICALLY-ANCHORED
 $A_{rs} = 187.98 \text{ m}^2$
 $A_v = 0.36$
 $ca_1 = 1.6 \text{ mm}$
 $ca_{annular_ring} = 1.6 \text{ mm}$
 $ca_{bottom} = 1.6 \text{ mm}$
 $D = 18.0 \text{ m}$
 Event_Type = MAXIMUM-CONSIDERED-EARTHQUAKE-MCE
 $F_a = 1.0$
 $F_v = 1.0$
 $F_y = 250.0 \text{ MPa}$
 $G = 1$
 $H = 14.85 \text{ m}$
 $H_{rcg} = 0.48 \text{ m}$
 $h_s = 0 \text{ mm}$
 $H_{shell} = 15.0 \text{ m}$

$I = 1.25$
 $K = 1.5$
 $K_s = 0.58$
 $L_s = 0.61 \text{ m}$
 $\text{Min_Anchor_Quantity} = 6$
 $\text{Min_Anchor_Spacing} = 3 \text{ m}$
 $MU = 0.4$
 $P = 0.0 \text{ MPa}$
 $Q = 0.67$
 $S1 = 0.37$
 $S_b = 336.0 \text{ Pa}$
 $SD1 = 0.25$
 $SDS = 0.77$
 $\text{Seismic_Site_Class} = \text{SEISMIC-SITE-CLASS-B}$
 $\text{Seismic_Use_Group} = \text{SEISMIC-USE-GROUP-II}$
 $S_s = 1.16$
 $t_{\text{annular_ring}} = 8 \text{ mm}$
 $t_b = 7.6 \text{ mm}$
 $t_{\text{bottom}} = 8 \text{ mm}$
 $T_c = 4.42 \text{ sec}$
 $TL = 16 \text{ sec}$
 $ts1 = 12 \text{ mm}$
 $W_{b\text{-attachments}} = 0 \text{ kg}$
 $W_{b\text{-pl}} = 16,746.44 \text{ kg}$
 $W_{fd} = 0 \text{ N}$
 $W_g = 0 \text{ N}$
 $W_p = 36,997,309.81 \text{ N}$
 $W_{r\text{-attachments}} = 860.76 \text{ kg}$
 $W_{r\text{-DL-add}} = 7,558.58 \text{ kg}$
 $W_{r\text{-pl}} = 12,176.41 \text{ kg}$
 $W_{s\text{-attachments}} = 4,805.77 \text{ kg}$
 $W_{s\text{-framing}} = 269.86 \text{ kg}$
 $W_{s\text{-pl}} = 51,628.96 \text{ kg}$
 $W_{ss} = 2,610.6 \text{ kg}$
 $W_{\text{struct}} = 7,219.07 \text{ kg}$
 $X_s = 6.42 \text{ m}$

Seismic Method (seismic-method) = ASCE7-MAPPED-SS-AND-S1

Weights

$W_f = W_{b\text{-pl}}$
 $W_f = 164,226.4607$
 $W_f = 164,226.46 \text{ N}$

$W_r = (W_{r\text{-pl}} + W_{r\text{-attachments}} + W_{\text{struct}} + W_{r\text{-DL-add}}) + (0.1 * S_b * A_h)$
 $W_r = (119,409.7922 + 8,441.1907 + 70,794.9224 + 74,124.3581) + (0.1 * 336.0 * 255.6012)$
 $W_r = 281,358.46 \text{ N}$

$W_{rs} = ((W_{r\text{-pl}} + W_{r\text{-attachments}} + W_{r\text{-DL-add}}) * (A_{rs} / A)) + W_{ss} + (0.1 * S_b * A_{h\text{-shell}})$
 $W_{rs} = ((119,409.7922 + 8,441.1907 + 74,124.3581) * (187.976 / 258.8523)) + 25,601.243 + (0.1 * 336.0 * 185.6152)$
 $W_{rs} = 178,510.46 \text{ N}$

$W_s = W_{s\text{-pl}} + W_{s\text{-framing}} + W_{s\text{-attachments}}$
 $W_s = 506,307.1071 + 2,646.376 + 47,128.5231$
 $W_s = 556,082.01 \text{ N}$

$W_T = W_s + W_r + W_p + W_f$
 $W_T = 556,082.0063 + 281,358.465 + 36,997,309.8094 + 164,226.4607$
 $W_T = 37,998,976.74 \text{ N}$

Effective Weight of Product

$$W_i = (1.0 - (0.218 * (D / H))) * W_p$$

$$W_i = (1.0 - (0.218 * (18.0 / 14.85))) * 36,997,309.8094$$

$$W_i = 27,221,050.97 \text{ N}$$

$$W_c = 0.23 * (D / H) * \tanh(((3.67 * H) / D)) * W_p$$

$$W_c = 0.23 * (18.0 / 14.85) * \tanh(((3.67 * 14.85) / 18.0)) * 36,997,309.8094$$

$$W_c = 10,266,141.6 \text{ N}$$

$$W_{eff} = W_i + W_c$$

$$W_{eff} = 27,221,050.9749 + 10,266,141.6027$$

$$W_{eff} = 37,487,192.58 \text{ N}$$

Design Loads

$$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i)$$

$$V_i = 0.2417 * (556,082.0063 + 281,358.465 + 164,226.4607 + 27,221,050.9749)$$

$$V_i = 6,821,430.92 \text{ N}$$

$$V_c = A_c * W_c$$

$$V_c = 0.0523 * 10,266,141.6027$$

$$V_c = 536,919.21 \text{ N}$$

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2}$$

$$V = \sqrt{(6,821,430.9181^2) + (536,919.2058^2)}$$

$$V = 6,842,528.92 \text{ N}$$

Center of Action for Effective Lateral Forces

$$X_r = H_{shell} + H_{rcg}$$

$$X_r = 15.0 + 0.4811$$

$$X_r = 15.48 \text{ m}$$

$$X_i = (0.5 - (0.094 * (D / H))) * H$$

$$X_i = (0.5 - (0.094 * (18.0 / 14.85))) * 14.85$$

$$X_i = 5.73 \text{ m}$$

$$X_c = (1.0 - ((\cosh(((3.67 * H) / D)) - 1) / (((3.67 * H) / D) * \sinh(((3.67 * H) / D)))) * H$$

$$X_c = (1.0 - ((\cosh(((3.67 * 14.85) / 18.0)) - 1) / (((3.67 * 14.85) / 18.0) * \sinh(((3.67 * 14.85) / 18.0)))) * 14.85$$

$$X_c = 10.4 \text{ m}$$

$$X_{is} = (0.5 + (0.06 * (D / H))) * H$$

$$X_{is} = (0.5 + (0.06 * (18.0 / 14.85))) * 14.85$$

$$X_{is} = 8.51 \text{ m}$$

$$X_{cs} = (1.0 - ((\cosh(((3.67 * H) / D)) - 1.937) / (((3.67 * H) / D) * \sinh(((3.67 * H) / D)))) * H$$

$$X_{cs} = (1.0 - ((\cosh(((3.67 * 14.85) / 18.0)) - 1.937) / (((3.67 * 14.85) / 18.0) * \sinh(((3.67 * 14.85) / 18.0)))) * 14.85$$

$$X_{cs} = 10.84 \text{ m}$$

Overtaking Moment

$$M_{rw} = \sqrt{((A_i * (W_i * X_i) + (W_s * X_s) + (W_r * X_r))^2 + (A_c * (W_c * X_c))^2)}$$

$$M_{rw} = \sqrt{((0.2417 * ((27,221,050.9749 * 5.733) + (556,082.0063 * 6.417) + (281,358.465 * 15.4811)))^2 + ((0.0523 * (10,266,141.6027 * 10.3984))^2)}$$

$$M_{rw} = 40,025,845.95 \text{ N.m}$$

$$M_s = \sqrt{((A_i * (W_i * X_{is}) + (W_s * X_s) + (W_r * X_r))^2 + (A_c * (W_c * X_{cs}))^2)}$$

$$M_s = \sqrt{((0.2417 * ((27,221,050.9749 * 8.505) + (556,082.0063 * 6.417) + (281,358.465 * 15.4811)))^2 + ((0.0523 * (10,266,141.6027 * 10.8446))^2)}$$

$$M_s = 58,164,618.33 \text{ N.m}$$

Resistance to Design Loads

$$G_e = G * (1 - (0.4 * A_v))$$

$$G_e = 1 * (1 - (0.4 * 0.3609))$$

$$G_e = 0.86$$

$$w_{rs} = W_{rs} / (\pi * D)$$

$$w_{rs} = 178,510.4572 / (\pi * 18.0)$$

$$w_{rs} = 3,156.76 \text{ N/m}$$

$$w_t = (W_s / (\pi * D)) + w_{rs}$$

$$w_t = (556,082.0063 / (\pi * 18.0)) + 3,156.758$$

$$w_t = 12,990.45 \text{ N/m}$$

$$w_{int} = P * 1000000 * ((\pi * (D^2) / 4) / (\pi * D))$$

$$w_{int} = 0.0 * 1000000 * ((\pi * (18.0^2) / 4) / (\pi * 18.0))$$

$$w_{int} = 0.0 \text{ N/m}$$

Bottom Annular Plates Requirements

$$tb_corr = t_bottom - ca_bottom$$

$$tb_corr = 8 - 1.6$$

$$tb_corr = 6.4 \text{ mm}$$

$$ts1_c = ts1 - ca1$$

$$ts1_c = 12 - 1.6$$

$$ts1_c = 10.4 \text{ mm}$$

$$ta = \text{MIN}(tb_ann_corr, ts1_c)$$

$$ta = \text{MIN}(6.4, 10.4)$$

$$ta = 6.4 \text{ mm}$$

$$tb_ann_corr = t_annular_ring - ca_annular_ring$$

$$tb_ann_corr = 8 - 1.6$$

$$tb_ann_corr = 6.4 \text{ mm}$$

$$L_max = 0.035 * D$$

$$L_max = 0.035 * 18.0$$

$$L_max = 0.63 \text{ m}$$

$$6.4 \geq tb_corr \Rightarrow \text{PASS}$$

$$L_{min-seismic} = \text{MIN}(L_{max}, \text{MAX}(0.45, (0.01723 * ta * \text{SQRT}((F_y / (H * G_e))))))$$

$$L_{min-seismic} = \text{MIN}(0.63, \text{MAX}(0.45, (0.01723 * 6.4 * \text{SQRT}((250.0 / (14.85 * 0.8556))))))$$

$$L_{min-seismic} = 0.49 \text{ m}$$

$$w_a_self-anchored \leq w_a_limit$$

$$L_s \geq L_{min-seismic}$$

$$w_a_limit = 201.1 * H * D * G_e$$

$$w_a_limit = 201.1 * 14.85 * 18.0 * 0.8556$$

$$w_a_limit = 45,994.1 \text{ N/m}$$

$$w_a_self-anchored = 99 * ta * \text{SQRT}((F_y * H * G_e))$$

$$w_a_self-anchored = 99 * 6.4 * \text{SQRT}((250.0 * 14.85 * 0.8556))$$

$$w_a_self-anchored = 35,710.34 \text{ N/m}$$

$$w_a = \text{MIN}(w_a_self-anchored, w_a_limit)$$

$$w_a = \text{MIN}(35,710.3362, 45,994.0982)$$

$$w_a = 35,710.34 \text{ N/m}$$

$w_a = w_a$
 $w_a = 35,710.3362$
 $w_a = 35,710.34 \text{ N/m}$

Tank Stability

$J = Mrw / ((D^2) * (((wt * (1 - (0.4 * Av))) + wa) - (Fp * wint)))$
 $J = 40,025,845.954 / ((18.0^2) * (((12,990.4469 * (1 - (0.4 * 0.3609))) + 35,710.3362) - (0.4 * 0.0)))$
 $J = 2.64$

$J > 1.54 \Rightarrow$ Tank is not stable, anchoring is required

Seismic Method (seismic-method) = ASCE7-MAPPED-SS-AND-S1

$\sigma_c = ((wt * (1 + (0.4 * Av))) + ((1.273 * Mrw) / (D^2))) * (1 / (1000 * ts))$
 $\sigma_c = ((12,990.4469 * (1 + (0.4 * 0.3609))) + ((1.273 * 40,025,845.954) / (18.0^2))) * (1 / (1000 * 10.4))$
 $\sigma_c = 16.55 \text{ MPa}$

$F_c = 83 * (ts / D)$
 $F_c = 83 * (10.4 / 18.0)$
 $F_c = 47.96 \text{ MPa}$

$\sigma_c < F_c$

$\text{Overturn_Stability_Ratio} = (0.5 * D * (W_T + W_{fd} + W_g)) / M_s$
 $\text{Overturn_Stability_Ratio} = (0.5 * 18.0 * (37,998,976.7413 + 0 + 0)) / 58,164,618.3338$
 $\text{Overturn_Stability_Ratio} = 5.88$

$\text{Overturn_Stability_Ratio} \geq 2.0 \Rightarrow$ PASS

Freeboard

$\Delta TAs = 0.42 * D * Af$
 $\Delta TAs = 0.42 * 18.0 * 0.0945$
 $\Delta TAs = 0.71 \text{ m}$

$\text{Freeboard} = H_{\text{shell}} - L_{\text{max-operating}}$
 $\text{Freeboard} = 15.0 - 14.15$
 $\text{Freeboard} = 0.85 \text{ m [850.0 mm]}$

$\text{Freeboard_required} = 0.7 * \Delta TAs$
 $\text{Freeboard_required} = 0.7 * 0.7144$
 $\text{Freeboard_required} = 0.5 \text{ m [500.09 mm]}$

$\text{Freeboard} \geq \text{Freeboard_required} \Rightarrow$ PASS

$y_u = (12.1 * F_y * (L^2)) / t_b$
 $y_u = (12.1 * 250.0 * (0.4891^2)) / 7.6$
 $y_u = 95.23 \text{ mm}$

Sliding Resistance

$V_s = MU * (W_s + W_r + W_f + W_p) * (1.0 - (0.4 * Av))$
 $V_s = 0.4 * (556,082.0063 + 281,358.465 + 164,226.4607 + 36,997,309.8094) * (1.0 - (0.4 * 0.3609))$
 $V_s = 13,005,377.78 \text{ N}$

$V \leq V_s$

Local Shear Transfer

$V_{\max} = (2 * V) / (\pi * D)$
 $V_{\max} = (2 * 6,842,528.9187) / (\pi * 18.0)$
 $V_{\max} = 242,004.96 \text{ N/m}$

Anchor Bolt Design [Back](#)

A-s = Installed Bolt Nominal Root Area (mm²)
A-s-r = Anchor Required Root Area (mm²)
Av = Seismic Vertical Earthquake Acceleration Coefficient (g)
Ca-anchor = Anchor Corrosion Allowance (mm)
d = Anchor Bolt Diameter (mm)
D = Tank nominal diameter (m)
Dac = Bolt Circle Diameter (m)
d-req = Bolt Required Diameter per *ANSI B1.1* (mm)
Fp = Design Pressure Operating Ratio
Fty = Minimum Yield Strength of the Bottom Shell Course (MPa)
Fy = Anchor Yield Strength per *API-650 Table 5.21a* (MPa)
Fy-ambient = Anchor Yield Strength at Ambient Temperature per *API-650 Table 5.21a* (MPa)
H = Tank Height (m)
Ma-anchor = Anchor Material
Mrw = Seismic Overturning Moment (N.m)
MWS = Shell Wind Overturning Moment (N.m)
N = Anchors Quantity
n = Number of threads per unit length (mm)
N-min = Minimum Required Number of Anchors per *API-650 5.12.3*
OD = Tank Outer diameter (m)
P = Internal Pressure (kPa)
p = Bolt Thread Pitch (mm)
P_attachment = Anchor Attachment Design Load per *API-650 Section 5.12.13 and Steel Plate Engineering Data-Volume 2 Part V* (N)
position_angles = Anchors Position Angles (deg)
Pt = Test Pressure (kPa)
PWR = Roof Wind Pressure (kPa)
S_d = Allowable Anchor Stress per *API-650 Table 5.20a* (MPa)
S_d_shell = Allowable Shell Stress at Anchor Attachment per *API-650 Table 5.20a* (MPa)
T_b = Load per Anchor per *API-650 5.12.2* (N)
U = Net Uplift Load per *API-650 Section 5.12.2 and Table 5.20a* (N)
W1 = Corroded Weight of the Roof Plates Plus the Corroded Weight of the Shell and any Other Corroded Permanent Attachments Acting on the Shell (N)
W2 = Corroded Weight of the Shell and any Corroded Permanent Attachments Acting on the Shell Including the Portion of the Roof Plates and Framing Acting on The Shell (N)
W3 = Nominal Weight of the Roof Plates Plus the Nominal Weight of the Shell and any Other Permanent Attachments Acting on the Shell (N)
Wr-pl = Roof Plates Nominal Weight (N)
Wr-pl-corr = Roof Corroded Plates Weight (N)
Wrs-pl-corr = Roof Plates Corroded Weight Acting on The Shell (N)
Ws-framing = Shell New Framing Weight (stiffeners) (N)
Ws-framing-corr = Shell Corroded Framing Weight (stiffeners) (N)
Ws-pl = Shell Plates Nominal Weight (N)
Ws-pl-corr = Shell Corroded Plates Weight (N)
Wss = Roof Structure Nominal Weight Acting on The Shell (N)
Wss-corr = Roof Structure Corroded Weight Acting on The Shell (N)
Y-bolt = Anchor Yield Load (N)

Av = 0.36 g
Ca-anchor = 1.6 mm
D = 18.0 m
d = 57.15 mm
Dac = 18.21 m
Fp = 0.4
Fty = 250.0 MPa
H = 15.0 m
Ma-anchor = A307

$M_{rw} = 40,025,845.95 \text{ N.m}$
 $M_{WS} = 470,359.56 \text{ N.m}$
 $n = 4.5 \text{ mm}$
 $N = 20$
 $OD = 18.02 \text{ m}$
 $p = 0.22 \text{ mm}$
 $P = 0.0 \text{ kPa}$
 $position_angles = [0 \ 18 \ 36 \ 54 \ 72 \ 90 \ 108 \ 126 \ 144 \ 162 \ 180 \ 198 \ 216 \ 234 \ 252 \ 270 \ 288 \ 306 \ 324 \ 342] \text{ deg}$
 $P_t = 0.0 \text{ kPa}$
 $PWR = 0 \text{ kPa}$
 $W_{r-pl} = 119,409.79 \text{ N}$
 $W_{r-pl-corr} = 103,488.49 \text{ N}$
 $W_{rs-pl-corr} = 75,152.34 \text{ N}$
 $W_{s-framing} = 2,646.38 \text{ N}$
 $W_{s-framing-corr} = 1,946.32 \text{ N}$
 $W_{s-pl} = 506,307.11 \text{ N}$
 $W_{s-pl-corr} = 401,917.43 \text{ N}$
 $W_{ss} = 25,601.24 \text{ N}$
 $W_{ss-corr} = 20,589.3 \text{ N}$

Anchors Spacing Requirements

Max Allowable Spacing Between Anchors at Shell Outer Diameter per API-650 5.12.3

Max Allowable Spacing ($max_allowable_spacing$) = 3 m

Actual Spacing ($actual_spacing$) = 2.83 m

$actual_spacing \leq max_allowable_spacing \implies \text{PASS}$

$N_{min} = \text{CEILING}(((\pi * OD) / 3))$

$N_{min} = \text{CEILING}(((\pi * 18.024) / 3))$

$N_{min} = 19$

$N \geq N_{min} \implies \text{PASS}$

Anchors meet spacing requirements.

Anchors Average Spacing (half the span on each side of the anchor) at Bolt Circle

Anchors are equally spaced.

Average Spacing ($average_spacing$) = 2.86 m

Bolt loads will be based on equally spaced anchors.

Anchor Material Properties

Material = A307

Minimum Tensile Strength ($S_{ut-anchor}$) = 380 MPa

Minimum Yield Strength at Ambient Temperature ($S_{y-ambient-anchor}$) = 250 MPa

Minimum Yield Strength ($S_{y-anchor}$) = 250 MPa

$F_y = \text{MIN}(S_{y-anchor}, 380)$

$F_y = \text{MIN}(250, 380)$

$F_y = 250 \text{ MPa}$

$F_{y-ambient} = \text{MIN}(S_{y-ambient-anchor}, 380)$

$F_{y-ambient} = \text{MIN}(250, 380)$

$F_{y-ambient} = 250 \text{ MPa}$

Uplift Load Cases per API-650 Table 5.20a

$W_1 = W_{s-pl-corr} + W_{s-framing-corr} + W_{r-pl-corr}$

$W_1 = 401,917.4319 + 1,946.32 + 103,488.4866$

$W_1 = 507,352.24 \text{ N}$

$$W2 = Ws-pl-corr + Ws-framing-corr + Wrs-pl-corr + Wss-corr$$

$$W2 = 401,917.4319 + 1,946.32 + 75,152.341 + 20,589.3032$$

$$W2 = 499,605.4 \text{ N}$$

$$W3 = Ws-pl + Ws-framing + Wr-pl + Wss$$

$$W3 = 506,307.1071 + 2,646.376 + 119,409.7922 + 25,601.243$$

$$W3 = 653,964.52 \text{ N}$$

As per API-650 Section 5.12.13, Seismic Attachment Load Multiplier ($f_{seismic}$) = 3.0
 Seismic anchoring is required and API-650 Section 5.12.13 requires a multiplier of 3.

Uplift Case 1: Design Pressure Only

$$U = (P * (D^2) * 785) - W1$$

$$U = (0.0 * (18.0^2) * 785) - 507,352.2384$$

$$U = -507,352.24 \text{ (Set to 0 N since it cannot be less than 0)}$$

$$T_b = U / N$$

$$T_b = 0 / 20$$

$$T_b = 0 \text{ N}$$

$$S_d = (5 / 12) * F_y$$

$$S_d = (5 / 12) * 250$$

$$S_d = 104.17 \text{ MPa}$$

$$A-s-r = T_b / S_d$$

$$A-s-r = 0 / 104.1667$$

$$A-s-r = 0.0 \text{ mm}^2$$

$$P_{attachment} = 1.5 * T_b$$

$$P_{attachment} = 1.5 * 0$$

$$P_{attachment} = 0.0 \text{ N}$$

$$S_{d_shell} = (2 / 3) * F_{ty}$$

$$S_{d_shell} = (2 / 3) * 250.0$$

$$S_{d_shell} = 166.67 \text{ MPa}$$

Uplift Case 2: Test Pressure Only

$$U = (P_t * (D^2) * 785) - W3$$

$$U = (0.0 * (18.0^2) * 785) - 653,964.5184$$

$$U = -653,964.52 \text{ (Set to 0 N since it cannot be less than 0)}$$

$$T_b = U / N$$

$$T_b = 0 / 20$$

$$T_b = 0 \text{ N}$$

$$S_d = (5 / 9) * F_{y-ambient}$$

$$S_d = (5 / 9) * 250$$

$$S_d = 138.89 \text{ MPa}$$

$$A-s-r = T_b / S_d$$

$$A-s-r = 0 / 138.8889$$

$$A-s-r = 0.0 \text{ mm}^2$$

$$P_{attachment} = 1.5 * T_b$$

$$P_{attachment} = 1.5 * 0$$

$$P_{attachment} = 0.0 \text{ N}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * F_{ty}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * 250.0$$

$$S_{d_shell} = 208.33 \text{ MPa}$$

Uplift Case 3: Wind Load Only

$$U = ((PWR * (D^2) * 785) + ((4 * MWS) / D)) - W2$$

$$U = ((0 * (18.0^2) * 785) + ((4 * 470,359.5589) / 18.0)) - 499,605.3961$$

$$U = -395,081.05 \text{ (Set to 0 N since it cannot be less than 0)}$$

$$T_b = U / N$$

$$T_b = 0 / 20$$

$$T_b = 0 \text{ N}$$

$$S_d = 0.8 * F_y$$

$$S_d = 0.8 * 250$$

$$S_d = 200.0 \text{ MPa}$$

$$A-s-r = T_b / S_d$$

$$A-s-r = 0 / 200.0$$

$$A-s-r = 0.0 \text{ mm}^2$$

$$P_{\text{attachment}} = 1.5 * T_b$$

$$P_{\text{attachment}} = 1.5 * 0$$

$$P_{\text{attachment}} = 0.0 \text{ N}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * F_{ty}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * 250.0$$

$$S_{d_shell} = 208.33 \text{ MPa}$$

Uplift Case 4: Seismic Load Only

$$U = ((4 * Mrw) / D) - (W2 * (1 - (0.4 * A_v)))$$

$$U = ((4 * 40,025,845.954) / 18.0) - (499,605.3961 * (1 - (0.4 * 0.3609)))$$

$$U = 8,467,150.07 \text{ N}$$

$$T_b = U / N$$

$$T_b = 8,467,150.0731 / 20$$

$$T_b = 423,357.5 \text{ N}$$

$$S_d = 0.8 * F_y$$

$$S_d = 0.8 * 250$$

$$S_d = 200.0 \text{ MPa}$$

$$A-s-r = T_b / S_d$$

$$A-s-r = 423,357.5037 / 200.0$$

$$A-s-r = 2,116.79 \text{ mm}^2$$

$$P_{\text{attachment}} = f_{\text{seismic}} * T_b$$

$$P_{\text{attachment}} = 3.0 * 423,357.5037$$

$$P_{\text{attachment}} = 1,270,072.51 \text{ N}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * F_{ty}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * 250.0$$

$$S_{d_shell} = 208.33 \text{ MPa}$$

Uplift Case 5: Design Pressure + Wind Load

$$U = (((F_p * P) + PWR) * (D^2) * 785) + ((4 * MWS) / D) - W1$$

$$U = (((0.4 * 0.0) + 0) * (18.0^2) * 785) + ((4 * 470,359.5589) / 18.0) - 507,352.2384$$

$$U = -402,827.89 \text{ (Set to 0 N since it cannot be less than 0)}$$

$$T_b = U / N$$

$$T_b = 0 / 20$$

$$T_b = 0 \text{ N}$$

$$S_d = (5 / 9) * F_y$$

$$S_d = (5 / 9) * 250$$

$$S_d = 138.89 \text{ MPa}$$

$$A-s-r = T_b / S_d$$

$$A-s-r = 0 / 138.8889$$

$$A-s-r = 0.0 \text{ mm}^2$$

$$P_{\text{attachment}} = 1.5 * T_b$$

$$P_{\text{attachment}} = 1.5 * 0$$

$$P_{\text{attachment}} = 0.0 \text{ N}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * F_{ty}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * 250.0$$

$$S_{d_shell} = 208.33 \text{ MPa}$$

Uplift Case 6: Design Pressure + Seismic Load

$$U = ((F_p * P * (D^2) * 785) + ((4 * Mrw) / D)) - (W1 * (1 - (0.4 * A_v)))$$

$$U = ((0.4 * 0.0 * (18.0^2) * 785) + ((4 * 40,025,845.954) / 18.0)) - (507,352.2384 * (1 - (0.4 * 0.3609)))$$

$$U = 8,460,521.56 \text{ N}$$

$$T_b = U / N$$

$$T_b = 8,460,521.565 / 20$$

$$T_b = 423,026.08 \text{ N}$$

$$S_d = 0.8 * F_y$$

$$S_d = 0.8 * 250$$

$$S_d = 200.0 \text{ MPa}$$

$$A-s-r = T_b / S_d$$

$$A-s-r = 423,026.0782 / 200.0$$

$$A-s-r = 2,115.13 \text{ mm}^2$$

$$P_{\text{attachment}} = f_{\text{seismic}} * T_b$$

$$P_{\text{attachment}} = 3.0 * 423,026.0782$$

$$P_{\text{attachment}} = 1,269,078.23 \text{ N}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * F_{ty}$$

$$S_{d_shell} = (5 / 6) * 250.0$$

$$S_{d_shell} = 208.33 \text{ MPa}$$

Uplift Case 7: Frangibility Pressure

Not applicable. It is applied if the roof to shell joint is frangible.

Summary of Uplift Cases

Uplift Cases	Total Uplift Load (N)	Load per Anchor (N)	Anchor Allowable Stress (MPa)	Anchor Required Area (mm ²)	Anchor Bolt Required Diameter (mm)	Attachment Design Load (N)	Allowable Shell Stress at Anchor Attachment (MPa)
Design Pressure	0	0	104.17	0.0	3.47	0.0	166.67
Test Pressure	0	0	138.89	0.0	3.47	0.0	208.33
Wind Load	0	0	200.0	0.0	3.47	0.0	208.33

Seismic Load	8,467,150.07	423,357.5	200.0	2,116.79	55.39	1,270,072.51	208.33
Design Pressure + Wind	0	0	138.89	0.0	3.47	0.0	208.33
Design Pressure + Seismic	8,460,521.56	423,026.08	200.0	2,115.13	55.36	1,269,078.23	208.33
- Anchor Bolt Required Diameter = $\text{SQRT}((A-s-r * (4 / \pi))) + (1.22687 * p) + (Ca\text{-anchor} * 2)$ - Governing Uplift Case = Seismic Load - Anchor Bolt Minimum Required Area = 2,116.79 mm²							

Bolt Required Diameter per ANSI B1.1

$$d\text{-req} = \text{SQRT}((A * (4 / \pi))) + (1.22687 * p) + (Ca * 2)$$

$$d\text{-req} = \text{SQRT}((2,116.7875 * (4 / \pi))) + (1.22687 * 0.22) + (1.6 * 2)$$

$$d\text{-req} = 55.39 \text{ mm}$$

$$d \geq d\text{-req} \Rightarrow \text{PASS}$$

$$A-s = (\pi / 4) * ((d - (1.22687 * n))^2)$$

$$A-s = (\pi / 4) * ((57.15 - (1.22687 * 0.22))^2)$$

$$A-s = 2,541.03 \text{ mm}^2$$

$$Y\text{-bolt} = A-s * Sy\text{-ambient-anchor}$$

$$Y\text{-bolt} = 2,541.0336 * 250$$

$$Y\text{-bolt} = 635,258.4 \text{ N}$$

Anchorage Summary

Required Number of Anchors = 19

Actual Number of Anchors = 20

Bolt Hole Circle Radius = 9.11 m

Required Bolt Diameter = 55.39 mm

Actual Bolt Diameter = 57.15 mm

Bolt Thread Pitch = 0.22 mm

Anchor Chair Design [Back](#)

Anchor Chair Design per AISI T-192 Part V

a = Top Plate Width Along Shell (mm)

b = Top Plate Length (mm)

bmin = Top Plate Minimum Length (mm)

c = Top Plate Thickness (mm)

CA = Chair Corrosion Allowance (mm)

c_corr = Top Plate Corroded Thickness (mm)

D = Tank Nominal Diameter (m)

d = Anchor Bolt Diameter (mm)

e = Anchor Bolt Eccentricity (mm)

Earthquakes-Considered = Earthquakes Considered

emin = Minimum Calculated Eccentricity (mm)

emin-btm = Minimum Eccentricity Based on Bolt Clearance From Bottom Plates per *API-650 5.12.4* (mm)

emin-req = Minimum Required Eccentricity (mm)

Et = Bottom Plates Thermal Expansion Coefficient per *API-650 Table P.1a* (mm/m.cdeg)

f = Top Plate Outside To Hole Edge Distance (mm)

f_min = Distance from Outside of Top Plate to Edge of Hole per *AISI T-192 Part V, Notation* (mm)

g = Vertical Plates Distance (mm)

g_min = Minimum Distance Between Vertical Plates per *AISI T-192, PartV, Notation* (mm)

h = Chair Height (mm)

h-eff = Effective Chair Height (mm)

hmax = Chair Maximum Height (mm)

j = Vertical Plate Thickness (mm)

j_corr = Vertical Plate Corroded Thickness (mm)

j_min = Vertical Plate Minimum Thickness per *AISI T-192 Part V, Vertical Side Plates* (mm)

k = Vertical Plates Average Width (mm)

m = Base or Bottom Plate Thickness (mm)

Ma-chair = Chair Material

outside-projection = Bottom Outside Projection (mm)

R = Nominal Shell Radius (mm)

Ssw-chair = Chair Allowable Stress for Seismic or Wind Design per *API-650 5.12.9* (MPa)

T = Difference between ambient and design temperature per *API 650 5.12.4* (°C)

t = Shell Thickness (mm)

T_ambient = Ambient Temperature (°C)

T_design = Design Temperature (°C)

V = Wind Velocity (kph)

Y-bolt = Anchor Bolt Yield Load (N)

a = 400 mm

b = 200 mm

c = 40 mm

CA = 0 mm
 d = 57.15 mm
 D = 18.0 m
 e = 95 mm
 Earthquakes-Considered = ASCE7-MAPPED-SS-AND-S1
 Et = 1.2E-5 mm/m.cdeg
 f = 54.0 mm
 g = 100 mm
 h = 675 mm
 j = 30 mm
 k = 126.11 mm
 m = 8 mm
 Ma-chair = A36
 outside-projection = 50 mm
 R = 9,000 mm
 t = 12 mm
 T_ambient = 20 °C
 T_design = 15 °C
 V = 97.0 kph
 Y-bolt = 635,258.4 N



Anchor Chair Material Properties

Material = A36
 Minimum Tensile Strength (Sut-chair) = 400.0 MPa
 Minimum Yield Strength (Sy-chair) = 250.0 MPa
 As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd-chair) = 160.0 MPa
 As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Hydrostatic Test Stress (St-chair) = 171.0 MPa

Ssw-chair = 1.33 * Sd-chair
 Ssw-chair = 1.33 * 160.0
 Ssw-chair = 212.8 MPa

Size Requirements

c_corr = c - (2 * CA)
 c_corr = 40 - (2 * 0)
 c_corr = 40 mm

j_corr = j - (2 * CA)
 j_corr = 30 - (2 * 0)
 j_corr = 30 mm

Chair Minimum Height (hmin) = 305 mm

h >= hmin ==> PASS

hmax = 3 * a
 hmax = 3 * 400
 hmax = 1,200 mm

$h_{eff} = \text{MIN}(h_{max}, h)$
 $h_{eff} = \text{MIN}(1,200, 675)$
 $h_{eff} = 675 \text{ mm}$

$e_{min} = (0.886 * d) + 15$
 $e_{min} = (0.886 * 57.15) + 15$
 $e_{min} = 65.63 \text{ mm}$

$T = T_{design} - T_{ambient}$
 $T = 15 - 20$
 $T = -5$ (Set to 0.0 °C since it cannot be less than 0.0)

$e_{min-btm} = (d / 2) + \text{outside-projection} + 3 + (500 * E_t * D * T)$
 $e_{min-btm} = (57.15 / 2) + 50 + 3 + (500 * 1.2E-5 * 18.0 * 0.0)$
 $e_{min-btm} = 81.58 \text{ mm}$

$e_{min-req} = \text{MAX}(e_{min}, e_{min-btm})$
 $e_{min-req} = \text{MAX}(65.6349, 81.575)$
 $e_{min-req} = 81.58 \text{ mm}$

$e \geq e_{min-req} \Rightarrow \text{PASS}$

$g_{min} = d + 26$
 $g_{min} = 57.15 + 26$
 $g_{min} = 83.15 \text{ mm}$

$g \geq g_{min} \Rightarrow \text{PASS}$

$f_{min} = (d / 2) + 4$
 $f_{min} = (57.15 / 2) + 4$
 $f_{min} = 32.58 \text{ mm}$

$f \geq f_{min} \Rightarrow \text{PASS}$

$j_{min} = \text{MAX}(13, (0.04 * (h_{eff} - c_{corr})), ((P_{design} / (172.3689 * k)) + (2 * CA)))$
 $j_{min} = \text{MAX}(13, (0.04 * (675 - 40)), ((635,258.403 / (172.3689 * 126.1098)) + (2 * 0)))$
 $j_{min} = 29.22 \text{ mm}$

$j \geq j_{min} \Rightarrow \text{PASS}$

$b_{min} = e_{min} + d + 7$
 $b_{min} = 65.6349 + 57.15 + 7$
 $b_{min} = 129.78 \text{ mm}$

$b \geq b_{min} \Rightarrow \text{PASS}$

Top Plate Minimum Required Thickness

Uplift Cases	P-chair (N)	P-design (N)	Sd-chair (MPa)	c_min (mm)	Status
Design Pressure	0.0	0.0	160.0	0.0	PASS
Test Pressure	0.0	0.0	171.0	0.0	PASS
Wind Load	0.0	0.0	212.8	0.0	PASS
Seismic Load	1,270,072.51	635,258.4	212.8	37.12	PASS
Design Pressure + Wind	0.0	0.0	212.8	0.0	PASS
Design Pressure + Seismic	1,269,078.23	635,258.4	212.8	37.12	PASS

- P-chair = Anchor Chair Uplift Load
- P-design = Anchor Chair Design Load = min(P-chair, Y-bolt)
- Sd-chair = Anchor Chair Allowable Stress
- c_min = Top Plate Minimum Required Thickness
- $c_{min} = \sqrt[3]{((P\text{-design} / (Sd\text{-chair} * f)) * ((0.375 * g) - (0.22 * d)))) + (2 * CA)}$
- Governing Uplift Case = Seismic Load
- Governing Thickness (c_min) = 37.12 mm

Top Plate Stress

Uplift Cases	P-chair (N)	P-design (N)	S_top-plate (MPa)	Sd-chair (MPa)	Stress Ratio	Status
Design Pressure	0.0	0.0	0.0	160.0	0.0%	PASS
Test Pressure	0.0	0.0	0.0	171.0	0.0%	PASS
Wind Load	0.0	0.0	0.0	212.8	0.0%	PASS
Seismic Load	1,270,072.51	635,258.4	183.28	212.8	86.13%	PASS
Design Pressure + Wind	0.0	0.0	0.0	212.8	0.0%	PASS
Design Pressure + Seismic	1,269,078.23	635,258.4	183.28	212.8	86.13%	PASS

- P-chair = Anchor Chair Uplift Load
- P-design = Anchor Chair Design Load = min(P-chair, Y-bolt)
- S_top-plate = Top Plate Stress
- $S_{top\text{-plate}} = (P\text{-design} / (f * (c_{corr}^2))) * ((0.375 * g) - (0.22 * d))$
- Sd-chair = Anchor Chair Allowable Stress
- Governing Uplift Case = Seismic Load
- Governing Stress (S_top-plate) = 183.28 MPa

Z = Chair Reduction Factor per *AISI T-192 Part V, Eq 5-4*

Shell Stress at Anchor Attachment

$$Z = 26 / (((0.177 * a * m) / \sqrt[3]{(R * t)}) * ((m / t)^2) + 26)$$

$$Z = 26 / (((0.177 * 400 * 8) / \sqrt[3]{(9,000 * 12)}) * ((8 / 12)^2) + 26)$$

$$Z = 0.97$$

Uplift Cases	P-chair (N)	P-design (N)	S_Shell (MPa)	Sd-shell (MPa)	Stress Ratio	Status
Design Pressure	0.0	0.0	0.0	166.67	0.0%	PASS
Test Pressure	0.0	0.0	0.0	208.33	0.0%	PASS
Wind Load	0.0	0.0	0.0	208.33	0.0%	PASS
Seismic Load	1,270,072.51	635,258.4	202.03	208.33	96.97%	PASS
Design Pressure + Wind	0.0	0.0	0.0	208.33	0.0%	PASS
Design Pressure + Seismic	1,269,078.23	635,258.4	202.03	208.33	96.97%	PASS

- P-chair = Anchor Chair Uplift Load
- P-design = Anchor Chair Design Load = min(P-chair, Y-bolt)
- S_Shell = Stress at Attachment

- $S_{\text{Shell}} = ((P\text{-design} * e) / (t^2)) * (((1.32 * Z) / (((1.43 * a * (h^2)) / (R * t)) + ((4 * a * (h^2))^{0.333}))) + (0.031 / \text{SQRT}((R * t))))$
- Sd-shell = Allowable Stress at Anchor Attachment
- Governing Uplift Case = Seismic Load
- Governing Stress (S_{Shell}) = 202.03 MPa
- Governing Allowable Stress (Sd-Shell) = 208.33 MPa

Appurtenances Design [Back](#)

Plan View

LABEL	MARK	CUST. MARK	DESCRIPTION	OUTSIDE PROJ (mm)	INSIDE PROJ (mm)	ORIENT	RADIUS (mm)	REMARKS	REF DWG
Barandas	WR01A		WINGRAIL	--	--	27.86'	8920		
Flush-Drain-0001	BD01		10" FLUSH DRAIN	124	305	100'	0	RADIAL	
MH1	RM01A		24" ROOF MANWAY	250	0	348'	6500		
N1	RN01A	Alimentación-Est. Intermedia 001/B	16" ROOF NOZZLE	254	0	200'	6500		
N2	RN02A	Alimentación-Est. Clarificación	12" ROOF NOZZLE	200	0	228'	6500		
N3	RN02A	Alimentación-Est. Clarificación	12" ROOF NOZZLE	200	0	215'	6500		
N4	RN03A	Alimentación-Est. No1	30" ROOF NOZZLE	305	0	240'	6500		
N5	RN04A	Instrumentación	6" ROOF NOZZLE	150	0	148'	2500		
N6	RN05A	Retorno	14" ROOF NOZZLE	254	0	65'	6500		
N-Ventao	RV01		12" GOOSENECK ROOF VENT	200	0	0'	0		

Elevation View

LABEL	MARK	CUST. MARK	DESCRIPTION	OUTSIDE PROJ (mm)	INSIDE PROJ (mm)	ORIENT	ELEVATION (mm)	REMARKS	REF DWG
Anchor-Chair-Bolts	AC01A		ANCHOR CHAIRS	--	--	SEE TABLE	--		
Circular	SM01A		24" SHELL MANWAY	271	0	315'	750	W/ DAVIT	

Manway-0002								
Escalera	AS01A		DOUBLE STRINGER STAIRWAY (CW)	--	--	277'	--	
N7	SN01A	Rebose-Referencial	20" SHELL NOZZLE	275	0	100'	14400	
N8	SN02A	Descarga 1	24" SHELL NOZZLE	300	0	350'	735	
N9	SN02A	Descarga 2	24" SHELL NOZZLE	300	0	10'	735	
Name-Plate	NP01A		STD API	--	--	0'	1010	

Shell Nozzle: N7

Repad Design

NOZZLE Description : 20 in SCH 30 TYPE RFSO
Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
t_n = (Thickness of Neck)
Sd_n = (Stress of Neck Material)
Sd_s = (Stress of Shell Course Material)
CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON SHELL 7 : Elevation = 14.4 m

COURSE PARAMETERS:

t_{calc} = 2.55 mm
t_{cr} = 0.95 mm (Course t_{calc} less C.A.)
t_c = 4.4 mm (Course t less C.A.)
t_{Basis} = 0.95 mm
Repad Type: Circular
Repad Size (Do): = 1055 mm

(SHELL NOZZLE REF. API-650 TABLE 5.6A, AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-7)

Required Area = t_{Basis} * D
Required Area = 0.95 * 508
Required Area = 481.28 mm²

Available Shell Area = (t_c - t_{Basis}) * D
Available Shell Area = (4.4 - 0.95) * 508
Available Shell Area = 1753.92 mm²

Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - CA) * MIN((Sd_n/Sd_s) 1)
Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (12.7 - 1.6)) + 4.4] * (12.7 - 1.6) * MIN((103.42/160) 1)
Available Nozzle Neck Area = 700.27 mm²

$A_{-rpr} = (\text{Required Area} - \text{Available Shell Area} - \text{Available Nozzle Neck Area})$
 $A_{-rpr} = 481.28 - 1753.92 - 700.27$
 $A_{-rpr} = 0 \text{ mm}^2$

Since $A_{-rpr} \leq 0$, $t_{-rpr} = 0$

No Reinforcement Pad required.

$t_{\text{shell_PWHT}}$ = Thickness of the shell plate, insert plate, or thickened insert plate for PWHT (mm)

Nozzle Neck Material Properties

Material = A53-B

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress ($S_d\text{-neck}$) = 160.0 MPa

Nozzle Repad Material Properties

Material = A36

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-repad) = -12.0 °C

$t_{\text{shell_PWHT}} = \text{MAX}(t_{\text{-repad}}, t_{\text{-plate}})$

$t_{\text{shell_PWHT}} = \text{MAX}(6, 6)$

$t_{\text{shell_PWHT}} = 6 \text{ mm}$

Thermal Stress Relief (PWHT) Requirements

D = Nozzle Nominal Diameter (NPS) (in)

Group = Shell Material Group

t_{shell} = Shell Plate Thickness (mm)

$D = 20 \text{ in}$ [508.0 mm]

Group = I

$t_{\text{shell}} = 6 \text{ mm}$

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Plate Thickness Limit for PWHT (t_{PWHT}) = 25 mm

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Nozzle Diameter Limit for PWHT (D_{PWHT}) = 12 in

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Time Required for PWHT for incremental thickness ($T_{\text{ratio_PWHT}}$) = 25 mm/hr

Shell thickness (6 mm) is less than or equal to specified lower limit (25 mm).

Diameter (20 in [508.0 mm]) is larger than or equal to specified lower limit (12 in).

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Thermal Stress Relief (PWHT) is not required.

Shell Nozzle: N8

Repad Design

NOZZLE Description : 24 in SCH 30 TYPE RFSO

Material: A53-B

t_{-rpr} = (Repad Required Thickness)

t_{-n} = (Thickness of Neck)

S_d_{-n} = (Stress of Neck Material)

S_d_{-s} = (Stress of Shell Course Material)

CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON SHELL 1 : Elevation = 0.74 m

COURSE PARAMETERS:

t-calc = 9.62 mm

t_cr = 8.02 mm (Course t-calc less C.A)

t_c = 10.4 mm (Course t less C.A.)

t_Basis = 8.02 mm

Repad Type: Circular

Repad Size (Do): = 1255 mm

(SHELL NOZZLE REF. API-650 TABLE 5.6A, AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-7)

Required Area = t_Basis * D

Required Area = 8.02 * 609.6

Required Area = 4889.41 mm²

Available Shell Area = (t_c - t_Basis) * D

Available Shell Area = (10.4 - 8.02) * 609.6

Available Shell Area = 1450.43 mm²

Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - CA) * MIN((Sd_n/Sd_s) 1)

Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (14.3 - 1.6)) + 10.4] * (14.3 - 1.6) * MIN((103.42/160) 1)

Available Nozzle Neck Area = 1004.79 mm²

A-rpr = (Required Area - Available Shell Area - Available Nozzle Neck Area)

A-rpr = 4889.41 - 1450.43 - 1004.79

A-rpr = 2434.19 mm²

t_rpr = (A_rpr / (repad-min-OD - D)) + repad_CA

t_rpr = (2434.19 / (1,255 - 609.6)) + 1.6

t_rpr = 5.37 mm

Reinforcement Pad is required.

Based on Shell Nozzle Size of 24"

Repad Size (Do) Must be = 1255 mm

t_shell_PWHT = Thickness of the shell plate, insert plate, or thickened insert plate for PWHT (mm)

Nozzle Neck Material Properties

Material = A53-B

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd-neck) = 160.0 MPa

Nozzle Repad Material Properties

Material = A36

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-repad) = -7.72 °C

t_shell_PWHT = MAX(t-repad , t-plate)

t_shell_PWHT = MAX(12 , 12)

t_shell_PWHT = 12 mm

Thermal Stress Relief (PWHT) Requirements

D = Nozzle Nominal Diameter (NPS) (in)

Group = Shell Material Group

t_shell = Shell Plate Thickness (mm)

D = 24 in [609.6 mm]

Group = I

t_shell = 12 mm

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Plate Thickness Limit for PWHT (t_{PWHT}) = 25 mm
 As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Nozzle Diameter Limit for PWHT (D_{PWHT}) = 12 in
 As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Time Required for PWHT for incremental thickness (T_{ratio_PWHT}) = 25 mm/hr
 Shell thickness (12 mm) is less than or equal to specified lower limit (25 mm).
 Diameter (24 in [609.6 mm]) is larger than or equal to specified lower limit (12 in).
 As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Thermal Stress Relief (PWHT) is not required.

Shell Nozzle: N9

Repad Design

NOZZLE Description : 24 in SCH 30 TYPE RFSO
 Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
 t_n = (Thickness of Neck)
 Sd_n = (Stress of Neck Material)
 Sd_s = (Stress of Shell Course Material)
 CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON SHELL 1 : Elevation = 0.74 m

COURSE PARAMETERS:

t_{calc} = 9.62 mm
 t_{cr} = 8.02 mm (Course t_{calc} less C.A.)
 t_c = 10.4 mm (Course t less C.A.)
 t_{Basis} = 8.02 mm
 Repad Type: Circular
 Repad Size (Do): = 1255 mm

(SHELL NOZZLE REF. API-650 TABLE 5.6A, AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-7)

Required Area = $t_{Basis} * D$
 Required Area = $8.02 * 609.6$
 Required Area = 4889.41 mm²

Available Shell Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
 Available Shell Area = $(10.4 - 8.02) * 609.6$
 Available Shell Area = 1450.43 mm²

Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - CA) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
 Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (14.3 - 1.6)) + 10.4] * (14.3 - 1.6) * \text{MIN}((103.42/160) 1)$
 Available Nozzle Neck Area = 1004.79 mm²

A_{rpr} = (Required Area - Available Shell Area - Available Nozzle Neck Area)
 A_{rpr} = $4889.41 - 1450.43 - 1004.79$
 A_{rpr} = 2434.19 mm²

t_{rpr} = $(A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad_CA}$
 t_{rpr} = $(2434.19 / (1,255 - 609.6)) + 1.6$
 t_{rpr} = 5.37 mm

Reinforcement Pad is required.
Based on Shell Nozzle Size of 24"
Repad Size (Do) Must be = 1255 mm

t_shell_PWHT = Thickness of the shell plate, insert plate, or thickened insert plate for PWHT (mm)

Nozzle Neck Material Properties

Material = A53-B

As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd-neck) = 160.0 MPa

Nozzle Repad Material Properties

Material = A36

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-repad) = -7.72 °C

t_shell_PWHT = MAX(t-repad , t-plate)

t_shell_PWHT = MAX(12 , 12)

t_shell_PWHT = 12 mm

Thermal Stress Relief (PWHT) Requirements

D = Nozzle Nominal Diameter (NPS) (in)

Group = Shell Material Group

t_shell = Shell Plate Thickness (mm)

D = 24 in [609.6 mm]

Group = I

t_shell = 12 mm

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Plate Thickness Limit for PWHT (t_PWHT) = 25 mm

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Nozzle Diameter Limit for PWHT (D_PWHT) = 12 in

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Time Required for PWHT for incremental thickness (T_ratio_PWHT) = 25 mm/hr

Shell thickness (12 mm) is less than or equal to specified lower limit (25 mm).

Diameter (24 in [609.6 mm]) is larger than or equal to specified lower limit (12 in).

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Thermal Stress Relief (PWHT) is not required.

Shell Manway: Circular-Manway-0002

Repad Design

MANWAY Description : 24 in Neck Thickness 6.35

Material: A36

t_rpr = (Repad Required Thickness)

t_n = (Thickness of Neck)

Sd_n = (Stress of Neck Material)

Sd_s = (Stress of Shell Course Material)

CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON SHELL 1 : Elevation = 0.75 m

COURSE PARAMETERS:

$t_{calc} = 9.62 \text{ mm}$
 $t_{cr} = 8.02 \text{ mm}$ (Course t_{calc} less C.A.)
 $t_c = 10.4 \text{ mm}$ (Course t less C.A.)
 $t_{Basis} = 8.02 \text{ mm}$
 Repad Type: Dog House
 Repad Size (Do): = 1257.3 mm

(SHELL MANWAY REF. API-650 TABLE 5-6, AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-7)

Required Area = $t_{Basis} * D$
 Required Area = $8.02 * 609.6$
 Required Area = 4889.41 mm²

Available Shell Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
 Available Shell Area = $(10.4 - 8.02) * 609.6$
 Available Shell Area = 1450.43 mm²

Available Manway Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - CA) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
 Available Manway Neck Area = $2 * [(4 * (6.35 - 1.6)) + 10.4] * (6.35 - 1.6) * \text{MIN}((160/160) 1)$
 Available Manway Neck Area = 279.3 mm²

$A_{rpr} = (\text{Required Area} - \text{Available Shell Area} - \text{Available Manway Neck Area})$
 $A_{rpr} = 4889.41 - 1450.43 - 279.3$
 $A_{rpr} = 3159.68 \text{ mm}^2$

$t_{rpr} = (A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad}_{CA}$
 $t_{rpr} = (3159.68 / (1,257.3 - 609.6)) + 1.6$
 $t_{rpr} = 6.48 \text{ mm}$

Reinforcement Pad is required.
 Based on Shell Manway Size of 24"
 Repad Size (Do) Must be = 1257.3 mm

t_{shell_PWHT} = Thickness of the shell plate, insert plate, or thickened insert plate for PWHT (mm)

Manway Neck Material Properties

Material = A36
 As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd_{neck}) = 160.0 MPa
 Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-neck) = -11.75 °C

Manway Repad Material Properties

Material = A36
 Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-repad) = -7.72 °C

$t_{shell_PWHT} = \text{MAX}(t_{repad}, t_{plate})$
 $t_{shell_PWHT} = \text{MAX}(12, 12)$
 $t_{shell_PWHT} = 12 \text{ mm}$

Thermal Stress Relief (PWHT) Requirements

D = Nozzle Nominal Diameter (NPS) (in)
 Group = Shell Material Group
 t_{shell} = Shell Plate Thickness (mm)

$D = 24.0 \text{ in}$ [609.6 mm]
 Group = I
 $t_{shell} = 12 \text{ mm}$

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Plate Thickness Limit for PWHT (t_{PWHT}) =

25 mm

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Nozzle Diameter Limit for PWHT (D_{PWHT}) = 12 in

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Time Required for PWHT for incremental thickness (T_{ratio_PWHT}) = 25 mm/hr

Shell thickness (12 mm) is less than or equal to specified lower limit (25 mm).

Diameter (24.0 in [609.6 mm]) is larger than or equal to specified lower limit (12 in).

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Thermal Stress Relief (PWHT) is not required.

Cover Plate and Bolting Flange Design

CA-cover = Cover Plate and Bolting Flange Corrosion Allowance (mm)

Db = Bolt Circle Diameter (mm)

H = Design Liquid Level (m)

Ma-cover = Cover Plate Material

Ma-flange = Bolting Flange Material

Sd = Allowable Stress per API-650 5.7.5.6 (MPa)

SG = Product Specific Gravity

tc = Cover Plate Thickness (mm)

tc-design = Cover Plate Required Thickness per API-650 5.7.5.6 (mm)

tc-req = Cover Plate Minimum Required Thickness (mm)

tf = Bolting Flange Thickness (mm)

tf-design = Cover Plate Required Thickness per API-650 5.7.5.6 (mm)

tf-req = Bolting Flange Minimum Required Thickness (mm)

CA-cover = 1.6 mm

Db = 768.35 mm

H = 14.85 m

Ma-cover = A36

Ma-flange = A36

SG = 1

tc = 19 mm

tf = 16 mm

Water Density (γ) = 0.00981 MPa/m

As per API-650 5.7.5.6, Coefficient For Circular Plate (C) = 0.3

Cover Plate Material Properties and Required Thickness

Material = A36

Minimum Yield Strength (S_y -cover) = 250.0 MPa

Plate is impact tested

$S_d = \text{MIN}(S_y\text{-cover}, 205) / 2 = 102.5 \text{ MPa}$

As per API-650 5.7.5.6, Cover Plate Erection Thickness ($t_{c\text{-erect}}$) = 8 mm

$t_{c\text{-design}} = (D_b * \text{SQRT}(((C * \gamma * H * \text{MAX}(SG, 1)) / S_d))) + \text{CA-cover}$

$t_{c\text{-design}} = (768.35 * \text{SQRT}(((0.3 * 0.0098 * 14.85 * \text{MAX}(1, 1)) / 102.5))) + 1.6$

$t_{c\text{-design}} = 17.47 \text{ mm}$

$t_{c\text{-req}} = \text{MAX}(t_{c\text{-erect}}, t_{c\text{-design}})$

$t_{c\text{-req}} = \text{MAX}(8, 17.4656)$

$t_{c\text{-req}} = 17.47 \text{ mm}$

$t_{\text{cover}} \geq t_{c\text{-req}} \implies \text{PASS}$

Bolting Flange Material Properties and Required Thickness

Material = A36

Minimum Yield Strength (S_y -flange) = 250.0 MPa

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-flange) = -2.75 °C

As per API-650 5.7.5.6, Bolting Flange Erection Thickness (tf-erec) = 6 mm

tf-design = tc-design - 3

tf-design = 17.4656 - 3

tf-design = 14.47 mm

tf-req = MAX(tf-erec , tf-design)

tf-req = MAX(6 , 14.4656)

tf-req = 14.47 mm

t-flange >= tf-req ==> PASS

Roof Nozzle: N1

Repad Design

(Per API-650 and other references below)

NOZZLE Description : 16 in SCH 30 TYPE RFSO

Material: A53-B

t_rpr = (Repad Required Thickness)

t_n = (Thickness of Neck)

Sd_n = (Stress of Neck Material)

Sd_s = (Stress of Roof Material)

CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON ROOF: Elevation = 15.42 m

ROOF PARAMETERS:

t-calc = 5.8 mm

t_cr = 5.2 mm (Roof t-act less C.A)

t_c = 6 mm

t_Basis = 5.8 mm

Repad Type: Circular

Repad Size (Do): = 812.8 mm

(FOR ROOF NOZZLES, REF. API-650 FIG 5-19, TABLE 5-14 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-14, or API-650 FIG 5-20, TABLE 5-15 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-15)

Required Area = t_Basis * D

Required Area = 5.8 * 406.4

Required Area = 2357.12 mm²

Available Roof Area = (t_c - t_Basis) * D

Available Roof Area = (6 - 5.8) * 406.4

Available Roof Area = 81.28 mm²

Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * MIN((Sd_n/Sd_s) 1)

Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (9.53 - 1.6)) + 6] * (9.53 - 1.6) * MIN((103.42/160) 1)

Available Nozzle Neck Area = 386.24 mm²

$A_{rpr} = (\text{Required Area} - \text{Available Roof Area} - \text{Available Nozzle Neck Area})$
 $A_{rpr} = 2357.12 - 81.28 - 386.24$
 $A_{rpr} = 1889.6 \text{ mm}^2$

$t_{rpr} = (A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad_CA}$
 $t_{rpr} = (1889.6 / (812.8 - 406.4)) + 1.6$
 $t_{rpr} = 6.25 \text{ mm}$

Reinforcement Pad is required.
 Based on Roof Nozzle Size of 16"

NOTE: Roof Nozzle Size is Too Large Based on API References.

Roof Nozzle: N2

Repad Design

(Per API-650 and other references below)

NOZZLE Description : 12 in SCH 40 TYPE RFSO
 Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
 t_n = (Thickness of Neck)
 Sd_n = (Stress of Neck Material)
 Sd_s = (Stress of Roof Material)
 CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON ROOF: Elevation = 15.42 m

ROOF PARAMETERS:

$t_{calc} = 5.8 \text{ mm}$
 $t_{cr} = 5.2 \text{ mm}$ (Roof t_{act} less C.A)
 $t_c = 6 \text{ mm}$
 $t_{Basis} = 5.8 \text{ mm}$
 Repad Type: Circular
 Repad Size (Do): = 609.6 mm

(FOR ROOF NOZZLES, REF. API-650 FIG 5-19, TABLE 5-14 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-14, or API-650 FIG 5-20, TABLE 5-15 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-15)

Required Area = $t_{Basis} * D$
 Required Area = $5.8 * 323.85$
 Required Area = 1878.33 mm^2

Available Roof Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
 Available Roof Area = $(6 - 5.8) * 323.85$
 Available Roof Area = 64.77 mm^2

Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
 Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (10.31 - 1.6)) + 6] * (10.31 - 1.6) * \text{MIN}((103.42/160) 1)$
 Available Nozzle Neck Area = 460.05 mm^2

$A_{rpr} = (\text{Required Area} - \text{Available Roof Area} - \text{Available Nozzle Neck Area})$
 $A_{rpr} = 1878.33 - 64.77 - 460.05$

$$A_{rpr} = 1353.51 \text{ mm}^2$$

$$t_{rpr} = (A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad_CA}$$

$$t_{rpr} = (1353.51 / (609.6 - 323.85)) + 1.6$$

$$t_{rpr} = 6.34 \text{ mm}$$

Reinforcement Pad is required.
Based on Roof Nozzle Size of 12"
Repad Size (OD) Must be = 600 mm

Roof Nozzle: N3

Repad Design

(Per API-650 and other references below)

NOZZLE Description : 12 in SCH 40 TYPE RFSO
Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
 t_n = (Thickness of Neck)
 Sd_n = (Stress of Neck Material)
 Sd_s = (Stress of Roof Material)
CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON ROOF: Elevation = 15.42 m

ROOF PARAMETERS:

t_{calc} = 5.8 mm
 t_{cr} = 5.2 mm (Roof t_{act} less C.A)
 t_c = 6 mm
 t_{Basis} = 5.8 mm
Repad Type: Circular
Repad Size (Do): = 609.6 mm

(FOR ROOF NOZZLES, REF. API-650 FIG 5-19, TABLE 5-14 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-14, or API-650 FIG 5-20, TABLE 5-15 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-15)

Required Area = $t_{Basis} * D$
Required Area = $5.8 * 323.85$
Required Area = 1878.33 mm²

Available Roof Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
Available Roof Area = $(6 - 5.8) * 323.85$
Available Roof Area = 64.77 mm²

Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (10.31 - 1.6)) + 6] * (10.31 - 1.6) * \text{MIN}((103.42/160) 1)$
Available Nozzle Neck Area = 460.05 mm²

A_{rpr} = (Required Area - Available Roof Area - Available Nozzle Neck Area)
 A_{rpr} = 1878.33 - 64.77 - 460.05
 A_{rpr} = 1353.51 mm²

$$t_{rpr} = (A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad_CA}$$

$$t_{rpr} = (1353.51 / (609.6 - 323.85)) + 1.6$$

$$t_{rpr} = 6.34 \text{ mm}$$

Reinforcement Pad is required.
Based on Roof Nozzle Size of 12"
Repad Size (OD) Must be = 600 mm

Roof Nozzle: N4

Repad Design

(Per API-650 and other references below)

NOZZLE Description : 30 in SCH 20 TYPE RFWN
Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
 t_n = (Thickness of Neck)
 Sd_n = (Stress of Neck Material)
 Sd_s = (Stress of Roof Material)
CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON ROOF: Elevation = 15.42 m

ROOF PARAMETERS:

t_{calc} = 5.8 mm
 t_{cr} = 5.2 mm (Roof t_{act} less C.A)
 t_c = 6 mm
 t_{Basis} = 5.8 mm
Repad Type: Circular
Repad Size (Do): = 1524 mm

(FOR ROOF NOZZLES, REF. API-650 FIG 5-19, TABLE 5-14 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-14, or API-650 FIG 5-20, TABLE 5-15 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-15)

Required Area = $t_{Basis} * D$
Required Area = $5.8 * 762$
Required Area = 4419.6 mm²

Available Roof Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
Available Roof Area = $(6 - 5.8) * 762$
Available Roof Area = 152.4 mm²

Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (12.7 - 1.6)) + 6] * (12.7 - 1.6) * \text{MIN}((103.42/160) 1)$
Available Nozzle Neck Area = 723.23 mm²

A_{rpr} = (Required Area - Available Roof Area - Available Nozzle Neck Area)
 A_{rpr} = $4419.6 - 152.4 - 723.23$
 A_{rpr} = 3543.97 mm²

t_{rpr} = $(A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad_CA}$
 t_{rpr} = $(3543.97 / (1,524 - 762)) + 1.6$
 t_{rpr} = 6.25 mm

Reinforcement Pad is required.
Based on Roof Nozzle Size of 30"

NOTE: Roof Nozzle Size is Too Large Based on API References.

Roof Nozzle: N5

Repad Design

(Per API-650 and other references below)

NOZZLE Description : 6 in SCH 40 TYPE RFSO
Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
 t_n = (Thickness of Neck)
 Sd_n = (Stress of Neck Material)
 Sd_s = (Stress of Roof Material)
CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON ROOF: Elevation = 16.06 m

ROOF PARAMETERS:

t_{calc} = 5.8 mm
 t_{cr} = 5.2 mm (Roof t_{act} less C.A)
 t_c = 6 mm
 t_{Basis} = 5.8 mm
Repad Type: Circular
Repad Size (Do): = 381 mm

(FOR ROOF NOZZLES, REF. API-650 FIG 5-19, TABLE 5-14 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-14, or API-650 FIG 5-20, TABLE 5-15 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-15)

Required Area = $t_{Basis} * D$
Required Area = $5.8 * 168.27$
Required Area = 975.99 mm²

Available Roof Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
Available Roof Area = $(6 - 5.8) * 168.27$
Available Roof Area = 33.66 mm²

Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (7.11 - 1.6)) + 6] * (7.11 - 1.6) * \text{MIN}((103.42/160) 1)$
Available Nozzle Neck Area = 199.86 mm²

A_{rpr} = (Required Area - Available Roof Area - Available Nozzle Neck Area)
 A_{rpr} = $975.99 - 33.66 - 199.86$
 A_{rpr} = 742.48 mm²

Since Nozzle size $\leq$ NPS 6 (per API-650 Table 5-14 Note a), $t_{rpr} = 0$

No Reinforcement Pad required.

Roof Nozzle: N6

Repad Design

(Per API-650 and other references below)

NOZZLE Description : 14 in SCH 30 TYPE RFSO
Material: A53-B

t_rpr = (Repad Required Thickness)
t_n = (Thickness of Neck)
Sd_n = (Stress of Neck Material)
Sd_s = (Stress of Roof Material)
CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON ROOF: Elevation = 15.42 m

ROOF PARAMETERS:

t-calc = 5.8 mm
t_cr = 5.2 mm (Roof t-act less C.A)
t_c = 6 mm
t_Basis = 5.8 mm
Repad Type: Circular
Repad Size (Do): = 711.2 mm

(FOR ROOF NOZZLES, REF. API-650 FIG 5-19, TABLE 5-14 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-14, or API-650 FIG 5-20, TABLE 5-15 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-15)

Required Area = t_Basis * D
Required Area = 5.8 * 355.6
Required Area = 2062.48 mm²

Available Roof Area = (t_c - t_Basis) * D
Available Roof Area = (6 - 5.8) * 355.6
Available Roof Area = 71.12 mm²

Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * MIN((Sd_n/Sd_s) 1)
Available Nozzle Neck Area = 2 * [(4 * (9.53 - 1.6)) + 6] * (9.53 - 1.6) * MIN((103.42/160) 1)
Available Nozzle Neck Area = 386.24 mm²

A_rpr = (Required Area - Available Roof Area - Available Nozzle Neck Area)
A_rpr = 2062.48 - 71.12 - 386.24
A_rpr = 1605.12 mm²

t_rpr = (A_rpr / (repad-min-OD - D)) + repad_CA
t_rpr = (1605.12 / (711.2 - 355.6)) + 1.6
t_rpr = 6.11 mm

Reinforcement Pad is required.
Based on Roof Nozzle Size of 14"

NOTE: Roof Nozzle Size is Too Large Based on API References.

Roof Manway: MH1

Repad Design

(Per API-650 Section 5.8.4 and other references below)
MANWAY Description : 24 in Neck Thickness 7
Material: A36

t_rpr = (Repad Required Thickness)
MOUNTED ON ROOF: Elevation = 15.42 m

ROOF PARAMETERS:

t_calc = 5.8 mm
t_cr = 5.2 mm (Roof t-act less C.A)
t_c = 6 mm
t_Basis = 5.8 mm
Repad Type: Circular
Repad Size (Do): = 1169 mm

(FOR ROOF MANWAY, REF. API-650 FIG 5-16, TABLE 5-13)

Required Area = t_Basis * D
Required Area = 5.8 * 610
Required Area = 3538 mm²

Available Roof Area = (t_c - t_Basis) * D
Available Roof Area = (6 - 5.8) * 610
Available Roof Area = 122 mm²

Available Manway Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
Available Manway Neck Area = $2 * [(4 * (7 - 1.6)) + 6] * (7 - 1.6) * \text{MIN}((160/160) 1)$
Available Manway Neck Area = 298.08 mm²

A_rpr = (Required Area - Available Roof Area - Available Manway Neck Area)
A_rpr = 3538 - 122 - 298.08
A_rpr = 3117.92 mm²

t_rpr = (A_rpr / (repad-min-OD - D)) + repad_CA
t_rpr = (3117.92 / (1,169 - 610)) + 1.6
t_rpr = 7.18 mm

Reinforcement Pad is required.
Based on Roof Manway Size of 24"
Repad Size (OD) Must be = 1150 mm

Roof Vent: N-Ventoe

Repad Design

(Per API-650 and other references below)

NOZZLE Description : 12 in SCH STD
Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
 t_n = (Thickness of Neck)
 Sd_n = (Stress of Neck Material)
 Sd_s = (Stress of Roof Material)
CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON ROOF: Elevation = 16.46 m

ROOF PARAMETERS:

t_{calc} = 5.8 mm
 t_{cr} = 5.2 mm (Roof t_{act} less C.A)
 t_c = 6 mm
 t_{Basis} = 5.8 mm
Repad Type: Circular
Repad Size (Do): = 607.025 mm

(FOR ROOF NOZZLES, REF. API-650 FIG 5-19, TABLE 5-14 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-14, or API-650 FIG 5-20, TABLE 5-15 AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-15)

Required Area = $t_{Basis} * D$
Required Area = $5.8 * 323.85$
Required Area = 1878.33 mm²

Available Roof Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
Available Roof Area = $(6 - 5.8) * 323.85$
Available Roof Area = 64.77 mm²

Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - ca) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (9.53 - 1.6)) + 6] * (9.53 - 1.6) * \text{MIN}((103.42/160) 1)$
Available Nozzle Neck Area = 386.24 mm²

A_{rpr} = (Required Area - Available Roof Area - Available Nozzle Neck Area)
 A_{rpr} = 1878.33 - 64.77 - 386.24
 A_{rpr} = 1427.32 mm²

t_{rpr} = $(A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad_CA}$
 t_{rpr} = $(1427.32 / (607.02 - 323.85)) + 1.6$
 t_{rpr} = 6.64 mm

Reinforcement Pad is required.
Based on Roof Nozzle Size of 12"
Repad Size (OD) Must be = 600 mm

Bottom Drain: Flush-Drain-0001

Repad Design

NOZZLE Description : 10 in SCH 60 TYPE RFWN
Material: A53-B

t_{rpr} = (Repad Required Thickness)
 t_n = (Thickness of Neck)
 Sd_n = (Stress of Neck Material)
 Sd_s = (Stress of Shell Course Material)
CA = (Corrosion Allowance of Neck)

MOUNTED ON SHELL 1 : Elevation = 0 m

COURSE PARAMETERS:

t_{calc} = 9.62 mm
 t_{cr} = 8.02 mm (Course t_{calc} less C.A.)
 t_c = 10.4 mm (Course t less C.A.)
 t_{Basis} = 8.02 mm
Repad Type: Dog House
Repad Size (Do): = 786.8 mm

(SHELL NOZZLE REF. API-650 TABLE 5.6A, AND FOOTNOTE A OF TABLE 5-7)

Required Area = $t_{Basis} * D$
Required Area = $8.02 * 273.05$
Required Area = 2190.05 mm²

Available Shell Area = $(t_c - t_{Basis}) * D$
Available Shell Area = $(10.4 - 8.02) * 273.05$
Available Shell Area = 649.67 mm²

Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (t_n - CA)) + t_c] * (t_n - CA) * \text{MIN}((Sd_n/Sd_s) 1)$
Available Nozzle Neck Area = $2 * [(4 * (12.7 - 1.6)) + 10.4] * (12.7 - 1.6) * \text{MIN}((103.42/160) 1)$
Available Nozzle Neck Area = 786.36 mm²

A-rpr = (Required Area - Available Shell Area - Available Nozzle Neck Area)
A-rpr = $2190.05 - 649.67 - 786.36$
A-rpr = 754.01 mm²

t_{rpr} = $(A_{rpr} / (\text{repad-min-OD} - D)) + \text{repad_CA}$
 t_{rpr} = $(754.01 / (786.8 - 273.05)) + 1.6$
 t_{rpr} = 3.07 mm

Reinforcement Pad is required.
Based on Shell Nozzle Size of 10"
Repad Size (Do) Must be = 585 mm

Notes:

- As per API-650 5.7.7.3, the reinforced opening shall be completely preassembled into a shell plate, and the completed unit, including the shell plate at the cleanout fitting, shall be thermally stress-relieved as described in API-650 5.7.4

t_{shell_PWHT} = Thickness of the shell plate, insert plate, or thickened insert plate for PWHT (mm)

Nozzle Neck Material Properties

Material = A53-B
As per API-650 Table 5-2 a, Allowable Design Stress (Sd_{neck}) = 160.0 MPa

Nozzle Repad Material Properties

Material = A36

Permissible Design Metal Temperature (MDMT-permissible-repad) = -7.72 °C

$t_{\text{shell_PWHT}} = \text{MAX}(t_{\text{repad}}, t_{\text{plate}})$

$t_{\text{shell_PWHT}} = \text{MAX}(12, 12)$

$t_{\text{shell_PWHT}} = 12 \text{ mm}$

Thermal Stress Relief (PWHT) Requirements

D = Nozzle Nominal Diameter (NPS) (in)

Group = Shell Material Group

t_{shell} = Shell Plate Thickness (mm)

D = 10 in [254.0 mm]

Group = I

$t_{\text{shell}} = 12 \text{ mm}$

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Plate Thickness Limit for PWHT (t_{PWHT}) = 25 mm

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Lower Nozzle Diameter Limit for PWHT (D_{PWHT}) = 12 in

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Time Required for PWHT for incremental thickness ($T_{\text{ratio_PWHT}}$) = 25 mm/hr

Shell thickness (12 mm) is less than or equal to specified lower limit (25 mm).

Diameter (10 in [254.0 mm]) is less than specified lower limit (12 in).

As per API 650, 13th Ed, Section 5.7.4.2, Thermal Stress Relief (PWHT) is not required.

Normal and Emergency Venting (API-2000 7th Edition) [Back](#)

Normal Venting

insulation_type = Insulation type

latitude = Latitude zone

R_i = Reduction factor for insulation per API-2000 Sections 3.3.2.3.2 and 3.3.2.3.3

T = Product storage temperature ($^{\circ}\text{C}$)

vapor-pressure-type = Vapor pressure type

V_i = Total required in-breathing volumetric flow rate (m^3/hr)

V_{ip} = Required in-breathing flow rate due to liquid movement per API-2000 Section 3.3.2.2, Eq 5 (m^3/hr)

V_{IT} = Required in-breathing flow rate due to thermal effects per API-2000 Section 3.3.2.3.3, Eq 9 (m^3/hr)

V_o = Total required out-breathing volumetric flow rate (m^3/hr)

V_{op} = Required out-breathing flow rate due to liquid movement per API-2000 Section 3.3.2.2.1-a, Eq 1 (m^3/hr)

V_{OT} = Required out-breathing flow rate due to thermal effects per API-2000 Section 3.3.2.3.2, Eq 7 (m^3/hr)

V_{pe} = Maximum emptying rate (m^3/hr)

V_{pf} = Maximum filling rate (m^3/hr)

V_{tk} = Tank capacity (m^3)

insulation_type = NO-INSULATION

latitude = BETWEEN-42-AND-58

$T = 50^{\circ}\text{C}$

vapor-pressure-type = HEXANE-OR-SIMILAR

$V_{pe} = 2,880 \text{ m}^3/\text{hr}$

$V_{pf} = 2,880 \text{ m}^3/\text{hr}$

$V_{tk} = 3,933.81 \text{ m}^3$

$R_i = 1$

$R_i = 1$

$R_i = 1$

In-breathing

$V_{ip} = V_{pe}$

$V_{ip} = 2,880$

$V_{ip} = 2,880 \text{ m}^3/\text{hr}$

As per API-2000 Section 3.3.2.3.3, Table 2, Vapor Pressure Factor (C) = 5

$V_{IT} = C * (V_{tk}^{0.7}) * R_i$

$V_{IT} = 5 * (3,933.8072^{0.7}) * 1$

$V_{IT} = 1,641.87 \text{ m}^3/\text{hr}$

$V_i = V_{ip} + V_{IT}$

$V_i = 2,880 + 1,641.8715$

$V_i = 4,521.87 \text{ m}^3/\text{hr}$

Out-breathing

$V_{op} = V_{pf}$

$V_{op} = 2,880$

$V_{op} = 2,880 \text{ m}^3/\text{hr}$

As per API-2000 Section 3.3.2.3.2, Table 1, Latitude Factor (Y) = 0.25

$$V_{OT} = Y * (V_{tk}^{0.9}) * R_i$$

$$V_{OT} = 0.25 * (3,933.8072^{0.9}) * 1$$

$$V_{OT} = 429.81 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$V_o = V_{op} + V_{OT}$$

$$V_o = 2,880 + 429.8053$$

$$V_o = 3,309.81 \text{ m}^3/\text{hr}$$

Emergency Venting

ATWS = Wetted surface area (m^2)

D = Tank diameter (m)

F = Environmental factor per *API-2000 Section 3.3.3.3.4*

H = Tank height (m)

insulation_type = Insulation type

P_g = Design pressure (kPa)

q = Required emergency venting capacity per *API-2000 Section 3.3.3.3.4, Table 5* (m^3/hr)

vapor-pressure-type = Vapor pressure type

D = 18.0 m

H = 15.0 m

insulation_type = NO-INSULATION

P_g = 0.0 kPa

vapor-pressure-type = HEXANE-OR-SIMILAR

As per API-2000 Table 9, Environmental factor for insulation (F_{ins}) = 1.0

As per API-2000 Table 9, Environmental factor for drainage (F_{drain}) = 1.0

$F = \text{MIN}(F_{ins}, F_{drain})$

$F = \text{MIN}(1.0, 1.0)$

$F = 1.0$

$ATWS = \pi * D * \text{MIN}(H, 9.14)$

$ATWS = \pi * 18.0 * \text{MIN}(15.0, 9.14)$

$ATWS = 516.85 \text{ m}^2$

$q = 19910 * F$

$q = 19910 * 1.0$

$q = 19,910 \text{ m}^3/\text{hr}$

Capacities and Weights [Back](#)

Capacity to Top of Shell (to Tank Height) : 3,810 m3

Capacity to Design Liquid Level : 3,772 m3

Capacity to Maximum Liquid Level : 3,594 m3

Working Capacity (to Normal Working Level) : 3,474 m3

Net working Capacity (Working Capacity - Min Capacity) : 3,000 m3

Minimum Capacity (to Min Liq Level) : 474 m3

Component	New Condition (N)	New Condition (Kg)	Corroded (N)	Corroded (Kg)
SHELL	506,308	51,629	401,918	40,985
ROOF	124,794	12,726	108,873	11,102
RAFTERS	51,203	5,222	41,179	4,200
GIRDERS	0	0	0	0
FRAMING	0	0	0	0
COLUMNS	15,084	1,539	13,481	1,375
TRUSS	0	0	0	0
STRUCTURE COMPONENTS	3,630	371	3,630	371
BOTTOM	164,179	16,742	132,192	13,480
STAIRWAYS	17,780	1,813	17,780	1,813
ACCESS	7,944	810	7,944	810
STIFFENERS	2,632	269	1,947	199
WIND GIRDERS	0	0	0	0
ANCHOR CHAIRS	11,886	1,212	11,886	1,212
SHELL APPURTENANCES	9,523	972	8,732	891
ROOF APPURTENANCES	8,442	861	7,758	792
BOTTOM APPURTENANCES	0	0	0	0
INSULATION	0	0	0	0
FLOATING ROOF	0	0	0	0
TOTAL	923,405	94,166	757,320	77,230

Weight of Tank, Empty : 94,166 kg

Weight of Tank, Full of Product (Design SG = 1) : 3,873,031 kg

Weight of Tank, Full of Water : 3,873,030.72 kg

Net Working Weight, Full of Product (Design SG = 1) : 3,392,084.3 kg

Net Working Weight Full of Water : 3,392,084.3 kg

Foundation Area Req'd : 257.98 m2

Foundation Loading, Empty : 3,579.26 N/m2

Foundation Loading, Full of Product Design : 147,222.13 N/m2

Foundation Loading, Full of Water : 147,222.12 N/m2

SURFACE AREAS

Roof : 258.85 m2

Shell : 848.23 m2

Bottom : 221.24 m2

Annular Ring : 38.84 m2

Internal Pressure Moment : 0 n-m
Wind Moment : 470,359.55 n-m
Seismic Moment (Ringwall) : 40,025,845.95 n-m
Seismic Moment (Slab) : 58,164,618.33 n-m

MISCELLANEOUS ATTACHED ROOF ITEMS
MISCELLANEOUS ATTACHED SHELL ITEMS

Reactions on Foundation [Back](#)

A = Roof Surface Area (m^2)
A_rsc = Area of Tank Roof Supported by the Tank Columns (per column) (m^2)
A_rss = Area of Tank Roof Supported by the Tank Shell (m^2)
A_v = Vertical Earthquake Acceleration Coefficient (g)
D = Tank Nominal Diameter (m)
F-wind = Wind Horizontal Force (N)
 γ_b = Bottom Plate Density (kg/m^3)
 γ_w = Water Density (kg/m^3)
Hs = Tank Height (Shell Only) (m)
L_dead_bottom = Dead Load on Bottom per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (kPa)
L_dead_column_center = Dead Load on Center Column per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N)
L_dead_shell = Dead Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N/m)
L_hydrostatic_bottom = Hydrostatic Load on Bottom per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (kPa)
L_internal-pressure_bottom = Internal Pressure Load on Bottom per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (kPa)
Lmax = Maximum Liquid Level (m)
L_minimum-roof-live-load_column_center = Minimum Roof Live Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N)
L_minimum-roof-live-load_shell = Minimum Roof Live Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N/m)
L_pressure-test_bottom = Pressure Test Load on Bottom per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (kPa)
Lr = Minimum Roof Live Load (kPa)
L_seismic_bottom = Seismic Load on Bottom per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (kPa)
L_seismic_shell = Seismic Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N/m)
L_snow_column_center = Snow Load on Center Column per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N)
L_snow_shell = Snow Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N/m)
L_stored-liquid_bottom = Stored Liquid Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (kPa)
L_vacuum_column_center = Vacuum Load on Center Column per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N)
L_vacuum_shell = Vacuum Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N/m)
L_wind_shell = Wind Load on Shell per *API 650, Section 5.13, Table 5.21* (N/m)
M_rw = Ringwall Foundation Seismic Overturning Moment (N.m)
M_s = Slab Foundation Seismic Overturning Moment (N.m)
P = Design Internal Pressure (kPa)
Pt = Test pressure (kPa)
Pv = Design External Pressure (kPa)
P_WS = Shell Wind Pressure (kPa)
S = Design Snow Load (kPa)
SG = Product Specific Gravity
tb = Bottom Plate Thickness (mm)
Wc = Columns Weights (N)
Wr-attachments = Roof Attachments Weight (kg)
Wr-ins = Roof Insulation Weight (kg)
Wr-pl = Roof Plates Nominal Weight (kg)
W_rsc = Dead Load on Columns (N)
Ws-attachments = Shell Attachments Weight (kg)
Ws-framing = Shell Framing Weight (kg)
Ws-ins = Shell Insulation Weight (kg)
Ws-pl = Shell Plates Nominal Weight (kg)
Wss = Roof Structure Weight Supported by The Tank Shell (kg)
W-wind = Wind Overturning Moment (N.m)

$$W_{\text{rss}} = ((W_{\text{r-pl}} + W_{\text{r-ins}} + W_{\text{r-attachments}}) * (A_{\text{rss}} / A)) + W_{\text{ss}}$$
$$W_{\text{rss}} = ((12,176.4101 + 0.0 + 860.7619) * (187.976 / 258.8523)) + 2,610.6003$$
$$W_{\text{rss}} = 12,078.07 \text{ kg}$$

$$W_{\text{s}} = W_{\text{s-pl}} + W_{\text{s-ins}} + W_{\text{s-attachments}} + W_{\text{s-framing}}$$
$$W_{\text{s}} = 51,628.9566 + 0.0 + 4,805.7719 + 269.8553$$
$$W_{\text{s}} = 56,704.58 \text{ kg}$$

Seismic	Shell	$((4 * (M_{rw} / D)) + (0.4 * (W_s + W_{rss}) * A_v)) / (\pi * D)$	159,013.6	N/m
Seismic	Bottom	$(32 * M_s) / (\pi * (D^3) * 1000)$	101.59	kPa
Snow	Shell	$(S * A_{rss}) / (\pi * D)$	1,116.91	N/m
Snow	Center Column	$S * A_{rsc-0}$	21,375.4	N
Stored Liquid	Bottom	$SG * L_{max} * \gamma_w * (9.80665 / 1000)$	145.63	kPa
Pressure Test	Bottom	Pt	0.0	kPa
Wind	Shell	$(2 * (H_s^2) * P_{WS}) / (\pi * D)$	1,845.94	N/m
- Seismic bottom reaction varies linearly from $32 * M_s / (\pi * D^3)$ at the tank shell to zero at the center of the tank - API 650, Section 5.13, Table 5.21				

$$L_{dead_shell} = (W_s + W_{rss}) / (\pi * D)$$

$$L_{dead_shell} = (556,082.0063 + 118,445.394) / (\pi * 18.0)$$

$$L_{dead_shell} = 11,928.26 \text{ N/m}$$

$$L_{dead_column_center} = W_{c-0} + W_{rsc-0}$$

$$L_{dead_column_center} = 15,083.1479 + 122,950.3831$$

$$L_{dead_column_center} = 138,033.53 \text{ N}$$

$$L_{dead_bottom} = t_b * \gamma_b * 9.806649999999999E-6$$

$$L_{dead_bottom} = 8 * 7,840 * 9.806649999999999E-6$$

$$L_{dead_bottom} = 0.62 \text{ kPa}$$

$$L_{internal_pressure_bottom} = P$$

$$L_{internal_pressure_bottom} = 0.0$$

$$L_{internal_pressure_bottom} = 0.0 \text{ kPa}$$

$$L_{vacuum_shell} = (P_v * A_{rss}) / (\pi * D)$$

$$L_{vacuum_shell} = (0.0 * 187.976) / (\pi * 18.0)$$

$$L_{vacuum_shell} = 0.0 \text{ N/m}$$

$$L_{vacuum_column_center} = P_v * A_{rsc-0}$$

$$L_{vacuum_column_center} = 0.0 * 63.6173$$

$$L_{vacuum_column_center} = 0.0 \text{ N}$$

$$L_{hydrostatic_bottom} = L_{max} * \gamma_w * (9.80665 / 1000)$$

$$L_{hydrostatic_bottom} = 14.85 * 1,000 * (9.80665 / 1000)$$

$$L_{hydrostatic_bottom} = 145.63 \text{ kPa}$$

$$L_{minimum_roof_live_load_shell} = (L_r * A_{rss}) / (\pi * D)$$

$$L_{minimum_roof_live_load_shell} = (1,000 * 187.976) / (\pi * 18.0)$$

$$L_{minimum_roof_live_load_shell} = 3,324.15 \text{ N/m}$$

$$L_{minimum_roof_live_load_column_center} = L_r * A_{rsc-0}$$

$$L_{minimum_roof_live_load_column_center} = 1,000 * 63.6173$$

$$L_{minimum_roof_live_load_column_center} = 63,617.25 \text{ N}$$

$$L_{seismic_shell} = ((4 * (M_{rw} / D)) + (0.4 * (W_s + W_{rss}) * A_v)) / (\pi * D)$$

$$L_{seismic_shell} = ((4 * (40,025,845.954 / 18.0)) + (0.4 * (556,082.0063 + 118,445.394) * 0.3609)) / (\pi * 18.0)$$

$$L_{seismic_shell} = 159,013.6 \text{ N/m}$$

$$L_{seismic_bottom} = (32 * M_s) / (\pi * (D^3) * 1000)$$

$L_seismic_bottom = (32 * 58,164,618.3338) / (\pi * (18.0^3) * 1000)$
 $L_seismic_bottom = 101.59 \text{ kPa}$

$L_snow_shell = (S * A_rss) / (\pi * D)$
 $L_snow_shell = (336.0 * 187.976) / (\pi * 18.0)$
 $L_snow_shell = 1,116.91 \text{ N/m}$

$L_snow_column_center = S * A_rsc - 0$
 $L_snow_column_center = 336.0 * 63.6173$
 $L_snow_column_center = 21,375.4 \text{ N}$

$L_stored-liquid_bottom = SG * Lmax * \gamma_w * (9.80665 / 1000)$
 $L_stored-liquid_bottom = 1 * 14.85 * 1,000 * (9.80665 / 1000)$
 $L_stored-liquid_bottom = 145.63 \text{ kPa}$

$L_pressure-test_bottom = P_t$
 $L_pressure-test_bottom = 0.0$
 $L_pressure-test_bottom = 0.0 \text{ kPa}$

$L_wind_shell = (2 * (H_s^2) * P_{WS}) / (\pi * D)$
 $L_wind_shell = (2 * (15.0^2) * 231.967) / (\pi * 18.0)$
 $L_wind_shell = 1,845.94 \text{ N/m}$