

Planta desaladora de Collahuasi. Estrategias sísmicas de diseño (Chile)

Collahuasi Desalination Plant. Seismic design strategies (Chile)

Pedro de Dios Barrau ^a, David Solera Piña ^b,

Ángel Hernández Basterra ^c, Carlos Estévez Orán ^d, Marta Briones González ^e, Javier Mas Domínguez ^f

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Gerente de Estructuras. pedroantonio.dios.barrau@acciona.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Jefe de Departamento de Edificación y Obra Industrial.
david.solera.pina@acciona.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Ingeniero de Proyectos. anhernandezba2@acciona.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Ingeniero de Proyectos. caestevezor@acciona.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Ingeniero de Proyectos. marta.briones.gonzalez@acciona.com

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Acciona Ingeniería. Ingeniero de Proyectos. javier.mas.dominguez@acciona.com

RESUMEN

Al pie de la cordillera de los Andes, junto al océano Pacífico, se está construyendo la Planta Desaladora de Collahuasi (Chile). Esta infraestructura se encuentra en pleno cinturón de fuego del Pacífico, caracterizado por ser una de las zonas de subducción con mayor actividad sísmica del mundo. El presente documento presenta el análisis de una serie de escenarios de riesgo de especial interés dentro de este proyecto. Se pone un énfasis particular en el estudio y las estrategias de resistencia ante acciones sísmicas y otras particularidades de este tipo de infraestructuras.

ABSTRACT

At the foot of the Andes, next to the Pacific Ocean, the Collahuasi Desalination Plant is being built in Chile. This infrastructure is located within the Pacific Ring of Fire, known as one of the world's most seismically active subduction zones. This document presents an analysis of a series of risk scenarios of particular interest within this project. Special emphasis is placed on the study and strategies for seismic resisting structures, and other features of this kind of infrastructures.

PALABRAS CLAVE: desaladora, peligrosidad sísmica, ingeniería sismorresistente,

KEYWORDS: desalination plant, seismic hazard, quake-resistant engineering,

1. Descripción del proyecto

La infraestructura se ubica en el puerto minero Punta Patache a escasos metros de la costa del océano Pacífico. El objetivo de la planta es contribuir al incremento de la capacidad de producción de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

La planta está compuesta de múltiples edificios que hacen posible el proceso de desalación. A continuación, se describen los edificios más importantes de la planta en cuanto a sus elementos estructurales:

- Edificio de toma
- Edificio DAF
- Edificio OI
- Edificio UF

El edificio de toma o sentina recoge el agua marina y la impulsa al resto de la desaladora. Su estructura de hormigón está enterrada casi 25 metros bajo el terreno.

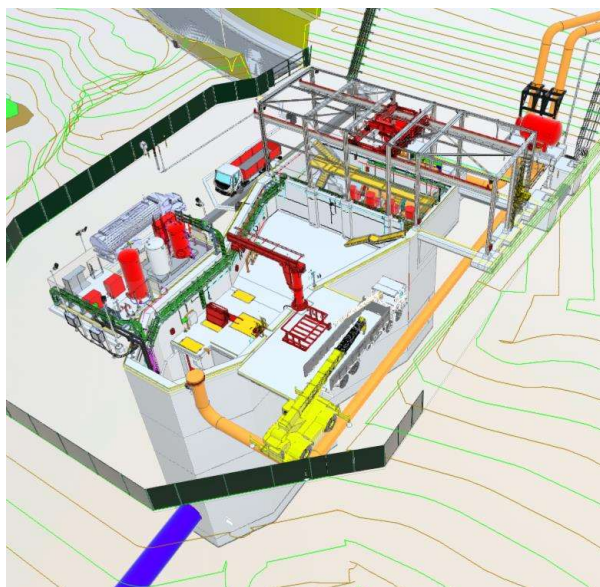


Figura 1. Modelo 3D del edificio de toma

Debido a su profundidad y proximidad a la costa presenta, un nivel freático elevado

respecto a su cimentación lo que, junto con las acciones sísmicas condiciona la masiva estructura de contención del edificio.



Figura 2. Vista aérea del edificio de toma durante su construcción

En el edificio de flotación por aire disuelto (DAF por sus siglas en inglés) se desarrollan tratamientos para reducir la carga de sólidos en el agua en tanques de hormigón de grandes dimensiones.

Este edificio está resuelto con una estructura de hormigón armado sin juntas con una planta aproximada de 70x40 metros y una altura de 7 metros. La estructura de los tanques está coronada por una nave metálica que los cubre y da soporte a los puentes grúa necesarios para el funcionamiento del edificio.



Figura 3. Modelo 3D del edificio DAF



Figura 4. Vista aérea del edificio DAF

El edificio de ósmosis inversa (OI) es considerado una de las estructuras más importantes de la planta, ya que alberga el proceso de ósmosis inversa, una fase fundamental en la desalación de agua de mar. Además, debido a la gran cantidad de equipos y tuberías que se deben instalar en su interior, suele ser uno de los edificios de mayor tamaño dentro de la planta.

Dentro del edificio de Ultrafiltración (UF) se lleva a cabo un proceso previo a la ósmosis inversa, que consiste en tratar el agua mediante su paso a través de membranas de ultrafiltración, lo que permite obtener un producto en mejores condiciones antes de la ósmosis inversa. En este sentido, el edificio debe estar equipado con todos los sistemas y racks necesarios para

garantizar el correcto desarrollo de dicho proceso.

El diseño de los edificios OI y UF corresponde a naves de acero cuyo sistema resistente se compone de pórticos rígidos a momento en la dirección transversal, mientras que en dirección longitudinal los pórticos están arriostrados mediante diagonales concéntricas. Debido a la elevada demanda sísmica de la zona, ambos sistemas estructurales han sido diseñados rigurosamente siguiendo los códigos locales, con el objetivo de disipar eficientemente la energía inducida por los terremotos característicos de la región.



Figura 5. Modelo 3D de los edificios UF y OI



Figura 6. Vista aérea de la obra

2. Análisis sísmico

2.1 Acción sísmica

Las acciones sísmicas para estructuras industriales en Chile se rigen por la norma NCh2369 [1]. No obstante, debido a la importancia y ubicación de la infraestructura se realiza un estudio sísmico particularizado para la ubicación del proyecto y así se establece la demanda sísmica de diseño del proyecto.

La amenaza sísmica se cuantifica en función de la aceleración horizontal máxima del suelo para un cierto nivel de diseño definido de dos maneras complementarias. La primera en términos de probabilidad de excedencia de ese nivel de diseño en un intervalo de tiempo dado (modelo probabilístico) y la segunda en términos de la información de terremotos históricos en la región en estudio (modelo determinístico) que permiten acotar el llamado Sismo Máximo Creíble para la zona.

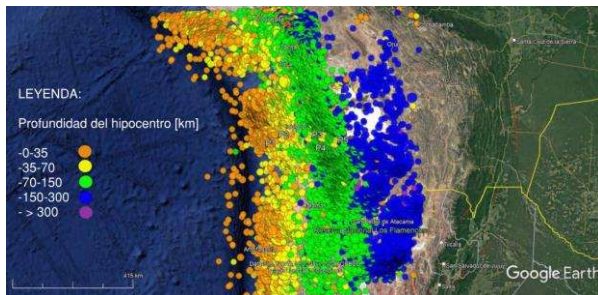


Figura 7. Hipocentro de los sismos registrados históricamente en la región

Tras comparar los resultados de los análisis probabilístico y determinístico ambos se combinan con diferentes pesos para obtener un resultado recomendado final. El resultado final obtenido implica un aumento de casi un 6% respecto de las aceleraciones sísmicas que se obtendrían utilizando los parámetros de la norma NCh2369 [1].

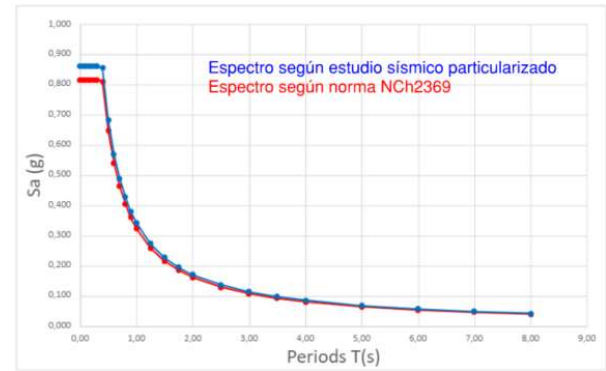


Figura 8. Comparativa de espectros de respuesta para sismos elásticos

2.2 Tsunami

Debido a la proximidad al mar de la obra es necesario estudiar el riesgo de tsunamis. Para ello se desarrollan modelos hidrodinámicos para evaluar el efecto de dos sismos seleccionados a partir de la historia sísmica de la zona.

En primer lugar, se obtiene el movimiento relativo entre placas necesario para haber producido las acciones sísmicas registradas. Una vez conocido el desplazamiento entre placas se puede conocer a su vez la perturbación inicial que éste produce en la superficie libre del mar lo cual se toma como condición inicial del modelo hidrodinámico del tsunami.

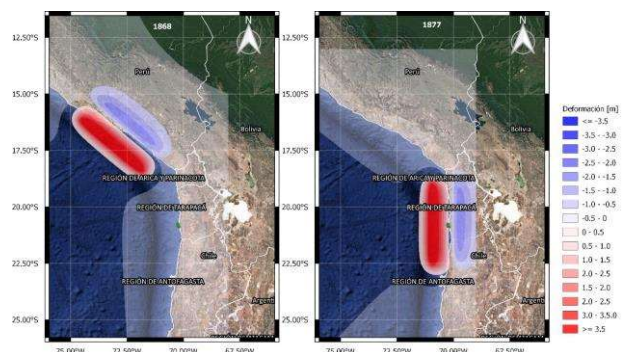


Figura 9. Deformación inicial de la superficie del mar para los sismos modelados

La forma de la perturbación es proporcional al área de la corteza activada durante el sismo, con dimensiones del orden de cientos de kilómetros. La onda de tsunami se propaga en todas direcciones con altas celeridades, del orden de varios cientos de kilómetros por hora. Estas celeridades son

mayores en aguas profundas y disminuyen a medida que las ondas se acercan a zonas costeras.

Para modelar la propagación se utiliza el programa MIKE 21 Flexible Mesh con el que se realizan dos modelos a diferentes escalas.

Del modelo regional se obtiene la evolución temporal de las ondas que se producen en la zona.

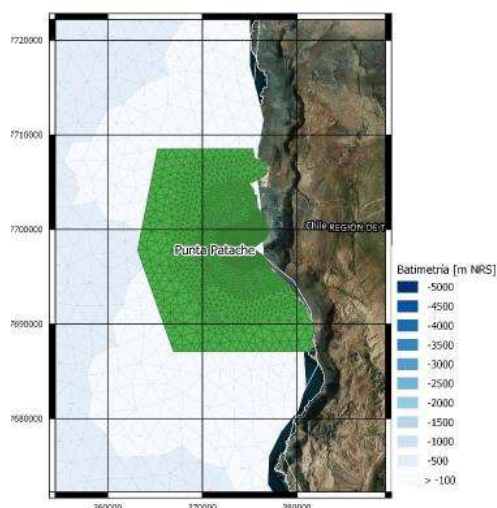


Figura 10. Batimetría del modelo regional

Del modelo local se obtiene el análisis de inundación controlando los niveles en diferentes puntos de control de la zona para analizar la afección al proyecto.

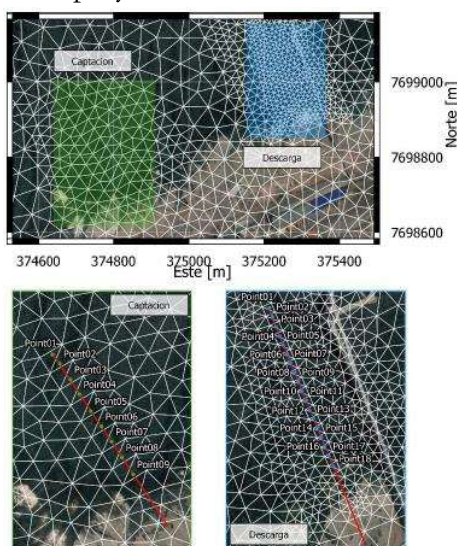


Figura 11. Mallado del modelo local

De los resultados de estos análisis se comprueba que el área inundada por los sismos se encuentra fuertemente acotada y no inunda la

infraestructura ubicada en las áreas terrestres del proyecto.

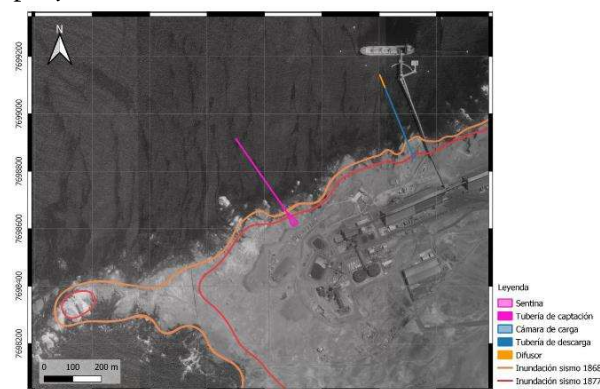


Figura 12. Límites de inundación

2.3 Estrategias resistentes

Existe una gran variedad de estrategias para asegurar la resistencia sísmica de los edificios que se manifiesta en diferentes soluciones y requisitos normativos. Chile, con su vasta experiencia en eventos sísmicos, tiene un importante bagaje en cuanto a soluciones que permitan la resistencia y mantenimiento de las estructuras en zonas donde los eventos sísmicos son recurrentes.

Un concepto que se usa en el diseño de las estructuras sismorresistentes en Chile es el rol en la disipación de energía que cumplen los pernos de anclaje de las estructuras metálicas.

En muchos países y sus respectivas normativas el diseño de las placas de anclaje y sus pernos se conciben como elementos que por ser difícilmente reemplazables no deben sufrir daños para lo que se les da una sobre resistencia que implica que no serán elementos disipadores de energía.

En contraposición, en Chile desde los años 60 del siglo XX, la experiencia durante eventos sísmicos severos ha detectado que los pernos de anclaje, aun diseñados con sobre-resistencia, sufren alargamientos significativos y eventualmente alcanzan su deformación de rotura y se cortan. Todo ello ha sido ratificado en todos los sismos importantes sufridos en los últimos 60 años.

El efecto disipador de energía de los pernos contribuye a reducir las solicitaciones en la estructura, sin embargo, requiere que después del evento se realice una inspección de los pernos, se reaprieten las tuercas después de alargamientos inelásticos menores y eventualmente, se reparen los pernos muy dañados o que se hayan cortado.

Esas tareas se facilitan con el uso de “sillas” que dejan expuesta una parte de su vástago, lo que permite la inspección y eventualmente el refuerzo de los pernos de anclaje.

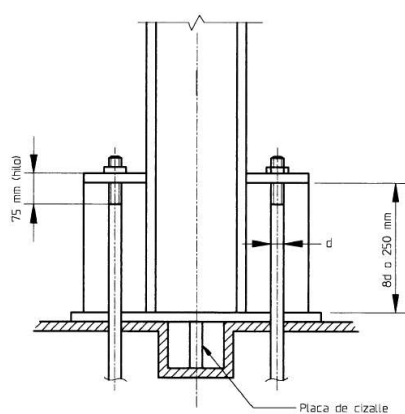


Figura 13. Esquema de pernos inspeccionables con silla de la norma NCh2369

Si bien la norma NCh2369 [1] permite el diseño de pernos no inspeccionables, esta opción está penalizada en la misma norma siendo la práctica habitual el uso de pernos inspeccionables.

Los elementos de la cimentación, en general de hormigón armado, con los que estarán conectados estos pernos, se diseñan asegurando una resistencia mayor a la resistencia de los elementos de las placas de anclaje. Para asegurar esta capacidad se considera el 120% de la capacidad resistente de los elementos de la placa.

2.4 Fuerzas sísmicas en depósitos circulares

Las grandes cantidades de agua y otros líquidos involucrados en el proceso de desalación de agua

de mar requieren, en algunos casos, sistemas de almacenamiento de gran tamaño. Para tal fin, se han incluido en el diseño una serie de estanques metálicos en diversas zonas de la planta, como en las áreas de ultrafiltración y postratamiento, con diámetros de hasta 9,5 m y alturas de 11 m. Considerando la alta peligrosidad sísmica de la zona y las grandes masas de agua almacenadas, ha sido necesario estimar las fuerzas inerciales generadas dentro de los depósitos durante un evento sísmico típico de la zona, con el fin de realizar un diseño de cimentación óptimo y seguro.



Figura 14. Depósitos de almacenamiento-Retrolavado - UF.

Para ello, se han seguido las prescripciones establecidas en la normativa chilena NCh 2369 [1], en conjunto con los parámetros de la normativa API 650 [2]. Esta última se basa en los métodos de Housner para estimar la proporción de masa convectiva e impulsiva dentro de la masa total de líquido del tanque, así como la altura del punto de aplicación de las fuerzas inerciales provocadas por el movimiento de dichas masas.

Una vez calculadas las fuerzas utilizando ambas normativas, se aplican a la cimentación con el objetivo de comprobar la respuesta de la misma según los distintos estados límites (ELS y ELU). Estos cálculos han sido posteriormente corroborados con los realizados por el fabricante de los depósitos, obteniendo un rango de valores muy próximo al estimado.

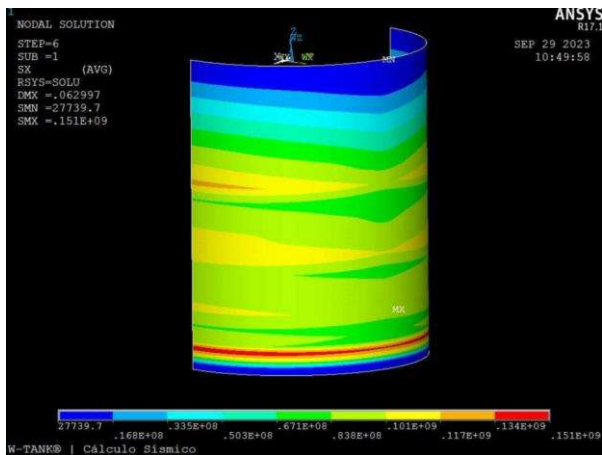


Figura 15. Tensiones horizontales σ_h en las paredes del depósito [pa] – Tanque de Retrolavado - UF.

3. Otras particularidades estructurales

3.1 Análisis dinámico de cimentaciones para equipos (Bombas de alta presión)

Para movilizar los grandes caudales de agua y cumplir con los niveles de presión requeridos durante el proceso de desalación, como es habitual en este tipo de plantas, es necesario disponer de bombas de alta presión que se adapten a estas necesidades. Estas son máquinas rotativas que operan a altas frecuencias. Debido al elevado peso de sus componentes, se generan fuerzas causadas por el desequilibrio natural de los mismos, lo que provoca vibraciones. Las vibraciones adquieren una gran relevancia en el momento de diseñar la cimentación de este tipo de equipos.

Para mitigar las vibraciones y garantizar que el diseño de la cimentación mantenga el sistema "Equipo-cimentación-suelo" en perfecta armonía y funcionamiento, se han seguido los procedimientos de análisis indicados en el informe ACI 351-3R-18 [3]. Para cumplir con las recomendaciones de dicho informe, las cimentaciones de estas bombas se han diseñado como aisladas del resto de la losa de cimentación, cumpliendo con criterios específicos de rigidez y peso del bloque de hormigón.

Estos requisitos son fundamentales para establecer un sistema suficientemente rígido, de modo que el modelo de análisis sea equivalente a un sistema de un grado de libertad dinámico (masa-muelle-amortiguador). Las condiciones del terreno de apoyo, combinadas con las características del equipo, son compatibles con el método de análisis de Richart – Whitman, que permite utilizar rigideces y amortiguamientos del terreno independientes de la frecuencia, para determinados rangos de frecuencia adimensional. Este enfoque simplifica considerablemente el análisis, facilitando la obtención de las rigideces y amortiguamientos dinámicos del sistema, que se utilizan para evaluar la respuesta en términos de amplitud (desplazamiento, velocidad y aceleración) y frecuencia.

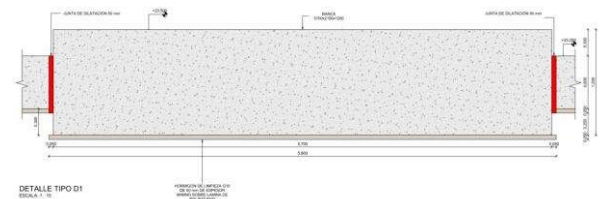


Figura 16. Detalle de Bloque de cimentación aislado para bomba de alta presión.

Se han aplicado los criterios de aceptación de amplitudes de vibración y frecuencias proporcionados en el ACI 351-3R-18 [3]. Tal como se muestra en la figura 17, a partir de los resultados de amplitud de desplazamientos, velocidad y aceleración, considerando velocidad de operación, se determinan las condiciones de funcionamiento del sistema equipo-cimentación-suelo.

Además, los cálculos manuales han sido validados mediante la modelización del sistema en el software SAP2000. En este caso, la figura 18 se extrae de una de las ventanas de resultados generados por el programa. Esta muestra una curva sinusoidal (verde), donde el eje de ordenadas representa la amplitud de desplazamiento en μm , mientras que el eje de abscisas indica el tiempo en segundos. Se

observa una amplitud de desplazamiento máxima de $0.59 \mu\text{m}$.

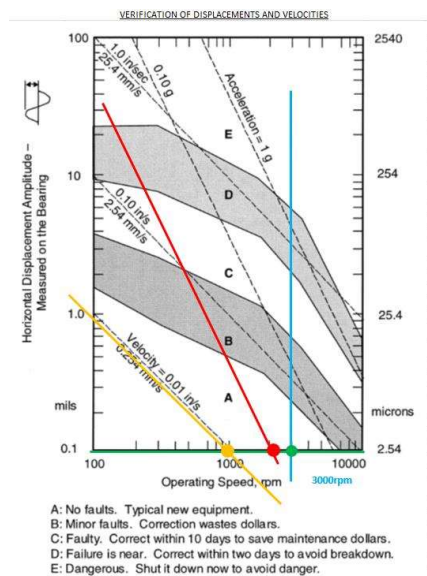


Figura 17. Gráfica de criterios de aceptación de amplitudes – Blake 1964 [3]

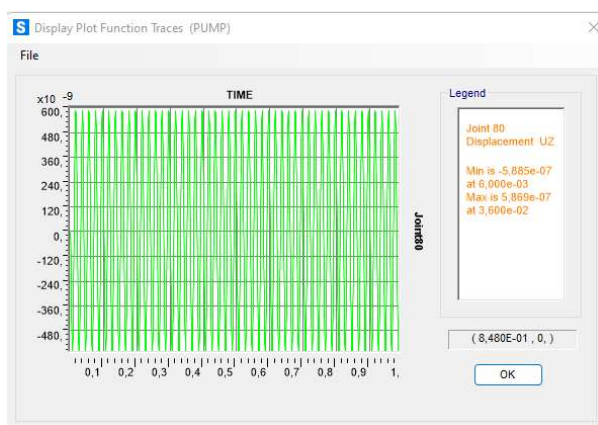


Figura 18. Amplitudes de desplazamiento vertical $[\mu\text{m}]$ vs. Tiempo $[\text{s}]$ - Modelo SAP2000

Agradecimientos

A todo el equipo de Acciona Ingeniería que ha participado en el proyecto con la colaboración multidisciplinar entre los departamentos de estructuras, industrial, geotecnia y puertos.

A Aurelio Ignacio López Mier, Pablo Casillas Gamarra y Raquel Barriuso López, integrantes del equipo de Acciona Agua en Chile. A Ramón

Montecinos y Cristhian Steib por su colaboración en el proyecto como revisores sísmicos del proyecto. A Gerardo Cabezas Enriquez, Jefe de Proyecto de Acciona Ingeniería, por su eficaz gestión e integración de todas las disciplinas en el proyecto.

Referencias

- [1] Instituto Nacional de Normalización (INN), *Norma Chilena NCh 2369. Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*, Santiago, Chile, 2003.
- [2] American Petroleum Institute (API), *API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage*, Washington D.C., USA, 2020.
- [3] American Concrete Institute (ACI), *ACI 351.3R-18. Report on Foundations for Dynamic Equipment*, Farmington Hills, MI, USA, 2018.