

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Evaluación del factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados
rectangulares de concreto armado considerando la demanda sísmica de la Norma
Técnica E.030 del Perú-2023**

Asesor:

MSc. Saavedra Ore Danilo

Autores:

Alfaro Contreras José

Contreras Achulli Franklin

Para optar el título profesional de: Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac – Perú
2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 095

En la ciudad de Abancay, a los veintinueve días del mes de **diciembre del 2025**, siendo las **6:00 pm** horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° **1086-2025- EPIC-FI-UTEA-SA** de fecha **19 de diciembre del 2025**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mag. Huanca Astoquillca, Luis
Dictaminante :	Ph. D. Vasquez Ramírez, Abbon Alex
Replicante :	Dr. Alarcón Camacho, Erick

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Evaluación del factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado considerando la demanda sísmica de la Norma Técnica E.030 del Perú – 2023

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: Contreras Achulli, Franklin

Br. Alfaro Contreras, José

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) **APROBADO (S)**:

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Contreras Achulli, Franklin	Aprobado
Alfaro Contreras, Jose	Aprobado

Siendo las **7:20pm** horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mag. Huanca Astoquillca, Luis

Dictaminante: Ph. D. Vasquez Ramírez, Abbon Alex

Replicante: Dr. Alarcón Camacho, Erick

Abancay 06 de enero del 2026




24% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 20%  Fuentes de Internet
- 7%  Publicaciones
- 20%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del autor	
Apellidos y nombres	: Alfaro Contreras José
Tipo de documento de identidad	: D.N.I.
Número de documento de identidad	: 74735487
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0006-2570-0136
Datos del autor	
Apellidos y nombres	: Contreras Achulli Franklin
Tipo de documento de identidad	: D.N.I.
Número de documento de identidad	: 47425621
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0009-7041-5037
Datos del asesor	
Apellidos y nombres	: MSc. Ing. Saavedra Ore Danilo
Tipo de documento de identidad	: DNI
Número de documento de identidad	: 72846839
URL ORCID	: https://orcid.org/0000-0002-1757-9616
Datos de investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería civil
Línea de investigación	: Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: 2023-2024
Fuente de financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de similitud	: 24%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a Dios, por guiarme y darme fortaleza en los momentos difíciles; a mis queridos padres, José y Ubaldina, por su amor incondicional y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la perseverancia y la honestidad, pilares fundamentales en mi formación personal y profesional.

Jose Alfaro Contreras

Dedico este trabajo de investigación a mi familia, por la paciencia que han cultivado como virtud y el aliento que, como faro, ha iluminado cada etapa de mi formación profesional. A ellos, que han sembrado en mí la tenacidad y el anhelo de superación, les ofrezco este logro como humilde tributo de gratitud y de orgullo compartido.

Franklin Contreras Achulli

Agradecimiento

Agradezco a Dios, por su guía y fortaleza en cada paso de este camino; a mis padres, José y Ubaldina, por su amor, sacrificio y apoyo constante; a la Universidad Tecnológica de los Andes, por brindarme la formación académica y los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación; y a todas las personas que, de una u otra forma, me brindaron su apoyo y aliento durante este proceso, mi más sincero agradecimiento.

Jose Alfaro Contreras

Expreso mi más sincero agradecimiento a nuestro asesor de tesis MSc. Ing. Danilo Saavedra Ore, por su orientación y dedicación durante el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco a mis docentes y compañeros, quienes con sus conocimientos, críticas y sugerencias contribuyeron a enriquecer este trabajo.

Franklin Contreras Achulli

Resumen

Esta tesis fue desarrollada con el objetivo de evaluar el factor de modificación de la respuesta sísmica (R) en tanques elevados rectangulares de concreto armado, considerando la demanda sísmica establecida en la Norma Técnica E.030 del Perú. El estudio se realizó en cuatro tanques elevados pertenecientes a instituciones educativas, ubicados en las zonas sísmicas Z1, Z2, Z3 y Z4. La metodología empleada fue de tipo aplicada, de nivel descriptivo, con diseño no experimental, utilizando análisis estático no lineal (Pushover) mediante el software SAP2000. La determinación del factor R se realizó aplicando la metodología del ATC-19, considerando los factores de ductilidad, sobrerresistencia y redundancia.

Los resultados obtenidos muestran que los valores reales del factor R para los tanques evaluados varían entre 2.43 y 3.81, siendo inferiores a los valores utilizados en los diseños originales ($R = 8$), lo que evidencia un sobredimensionamiento estructural. Asimismo, el rediseño estructural realizado con la ASCE/SEI 7-22 empleando $R = 2$ permitió obtener valores de R entre 2.62 y 5.21 según la zona sísmica.

Se concluye que el valor de R empleado en los proyectos originales resulta conservador, por lo que la metodología aplicada permite proponer criterios técnicos más reales para el diseño sismorresistente de tanques elevados de concreto armado en el Perú.

Palabras clave: tanque elevado, factor de modificación sísmica, análisis Pushover, comportamiento estructural, demanda sísmica.

Abstrac

This thesis was developed with the objective of evaluating the seismic response modification factor (R) for rectangular reinforced concrete elevated water tanks, considering the seismic demand established by the Peruvian Technical Standard E.030. The study was carried out on four elevated tanks belonging to educational institutions, located in seismic zones Z1, Z2, Z3, and Z4. The methodology adopted was applied research, with a descriptive level and a non-experimental design, using nonlinear static analysis (pushover) performed in SAP2000. The R factor was determined using the ATC-19 methodology, considering ductility, overstrength, and redundancy factors.

The results show that the actual R values for the evaluated tanks range from 2.43 to 3.81, which are lower than the values used in the original designs ($R = 8$), indicating an overestimation of the structural seismic performance. In addition, the structural redesign carried out in accordance with ASCE/SEI 7-22 using $R = 2$ resulted in R values between 2.62 and 5.21, depending on the seismic zone.

It is concluded that the R value used in the original projects is conservative; therefore, the applied methodology allows proposing more realistic technical criteria for the seismic design of reinforced concrete elevated water tanks in Peru.

Keywords: elevated tank, seismic modification factor, Pushover analysis, structural behavior, seismic demand.

Índice general

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Resumen	vii
Abstrac	viii
Índice general	ix
Índice de tablas	xii
Índice de figuras	xvii
Índice de anexos	xxi
I. Introducción	22
II. Planteamiento del problema	23
2.1 Descripción y formulación del problema	23
2.1.1 Descripción del problema.....	23
2.1.2 Formulación del problema.....	26
2.2 Objetivos.....	27
2.2.1 Objetivo general	27
2.2.2 Objetivo específico	27
2.3 Justificación e importancia	27

2.4	Hipótesis	29
2.4.1	Hipótesis general	29
2.4.2	Hipótesis específica	29
2.5	Variables	30
III. Marco teórico		32
3.1	Antecedentes.....	32
3.2	Bases teóricas	34
3.2.1	Factor de modificación de la respuesta sísmica (R)	34
3.2.2	Demanda sísmica según la Norma Técnica E.030	45
3.3	Definición de términos	50
IV. Metodología		53
4.1	Tipo y nivel de investigación.....	53
4.2	Ámbito temporal y espacial.....	55
4.3	Población y muestra	55
4.4	Instrumento	57
4.5	Procedimientos	57
4.6	Análisis de datos.....	58
4.7	Consideraciones éticas.....	58
V. Resultados y discusiones		60
5.1	Resultados.....	60
5.1.1	Resultados del objetivo general.....	60
5.1.2	Resultados del objetivo específico 1	61

5.1.3	Resultados del objetivo específico 2	82
5.1.4	Resultados del objetivo específico 3	102
5.1.5	Resultados del objetivo específico 4	123
5.2	Discusiones.....	143
5.3	Prueba de hipótesis	147
5.3.1	Validación de hipótesis general.....	147
5.3.2	Validación de hipótesis específicas	148
VI.	Conclusiones	150
VII.	Recomendaciones.....	153
VIII.	Referencias.....	159
IX.	Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	31
Tabla 2 Factor de redundancia RR	45
Tabla 3 Resultados de la iteración del factor R según el ATC-19	60
Tabla 4 Resultados del factor R calculado con ATC-19 para el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22	61
Tabla 5 Refuerzos de los elementos estructurales zona 1	62
Tabla 6 Propiedades de los materiales zona 1	63
Tabla 7 Parámetros sísmicos para la zona 1	63
Tabla 8 Combinación de cargas E.060 para la zona 1	65
Tabla 9 Resultados de parámetros básicos de diseño según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 1	66
Tabla 10 Verificación de cortante en columnas para la zona 1	68
Tabla 11 Verificación de diseño de vigas para la zona 1	68
Tabla 12 Factor de ductilidad ($R\mu$) zona 1	74
Tabla 13 Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 1	74
Tabla 14 Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 1	75
Tabla 15 Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 1	76
Tabla 16 Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 versus ASCE/SEI 7-22 zona 1	77
Tabla 17 Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 1	79
Tabla 18 Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 179	

Tabla 19 <i>Factor R calculado con ATC-19 para el modelo, con R=2 según ASCE/SEI 7-22 zona sísmica 1</i>	80
Tabla 20 <i>Resultados del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño y rediseño del tanque Z1</i>	81
Tabla 21 <i>Refuerzos de los elementos estructurales zona 2</i>	82
Tabla 22 <i>Propiedades de los materiales zona 2</i>	84
Tabla 23 <i>Parámetros sísmicos para la zona 2</i>	84
Tabla 24 <i>Combinación de cargas E.060 para la zona 2</i>	85
Tabla 25 <i>Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 2</i>	86
Tabla 26 <i>Verificación de cortante en columnas para la zona 2</i>	88
Tabla 27 <i>Verificación de diseño de vigas para la zona 2</i>	89
Tabla 28 <i>Factor de ductilidad ($R\mu$) zona 2</i>	94
Tabla 29 <i>Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 2</i>	94
Tabla 30 <i>Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 2</i>	95
Tabla 31 <i>Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 2</i>	96
Tabla 32 <i>Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 versus ASCE/SEI 7-22 zona 1</i>	97
Tabla 33 <i>Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2</i>	99
Tabla 34 <i>Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2</i>	99
Tabla 35 <i>Resultados del factor R con ATC-19 para el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22 zona 2</i>	100

Tabla 36 <i>Comparación del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño original y de ASCE/SEI 7-22 zona 2</i>	101
Tabla 37 <i>Refuerzos de los elementos estructurales zona 3</i>	102
Tabla 38 <i>Propiedades de los materiales zona 3</i>	104
Tabla 39 <i>Parámetros sísmicos para la zona 3</i>	104
Tabla 40 <i>Combinación de cargas E.060 para la zona 3</i>	106
Tabla 41 <i>Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 3</i>	106
Tabla 42 <i>Verificación de cortante en columnas para la zona 3</i>	109
Tabla 43 <i>Verificación de diseño de vigas para la zona 3</i>	110
Tabla 44 <i>Factor de ductilidad ($R\mu$) zona 3</i>	114
Tabla 45 <i>Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 3</i>	115
Tabla 46 <i>Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 3</i>	116
Tabla 47 <i>Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 3</i>	117
Tabla 48 <i>Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 versus ASCE/SEI 7-22 zona 3</i>	117
Tabla 49 <i>Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3</i>	120
Tabla 50 <i>Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3</i>	121
Tabla 51 <i>Resultados del factor R calculado con ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 para la Zona Sísmica 3</i>	122

Tabla 52 <i>Comparación del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño original y de ASCE/SEI 7-22 para el tanque Z3</i>	122
Tabla 53 <i>Refuerzos de los elementos estructurales zona 4</i>	123
Tabla 54 <i>Propiedades de los materiales zona 4</i>	125
Tabla 55 <i>Parámetros sísmicos para la zona 4</i>	125
Tabla 56 <i>Combinación de cargas E.060 para la zona 4</i>	126
Tabla 57 <i>Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 4</i>	127
Tabla 58 <i>Verificación de cortante en columnas para la zona 4</i>	129
Tabla 59 <i>Verificación de diseño de vigas para la zona 4</i>	130
Tabla 60 <i>Factor de ductilidad ($R\mu$) zona 4</i>	135
Tabla 61 <i>Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 4</i>	135
Tabla 62 <i>Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 4</i>	136
Tabla 63 <i>Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 4</i>	137
Tabla 64 <i>Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 versus ASCE/SEI 7-22 zona 4</i>	138
Tabla 65 <i>Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 4</i>	140
Tabla 66 <i>Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 4</i>	140
Tabla 67 <i>Resultados del factor R calculado con ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 para la zona sísmica 4</i>	141

Tabla 68 *Comparación del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño original y de ASCE/SEI 7-22 para el tanque Z4*142

Índice de figuras

Figura 1 <i>Definición de los factores de respuesta sísmica sobre una curva Pushover típica</i>	36
Figura 2 <i>Reacción producida por ductilidad de la estructura</i>	38
Figura 3 <i>Variación de respuesta debido a la ductilidad</i>	39
Figura 4 <i>Resistencia por ductilidad</i>	40
Figura 5 <i>Espectro de capacidad del punto de demanda</i>	41
Figura 6 <i>Deriva máxima contra cortante basal</i>	43
Figura 7 <i>Zonas sísmicas del Perú</i>	47
Figura 8 <i>Detalle general del tanque de la zona sísmica 1</i>	62
Figura 9 <i>Espectro de diseño usado para la zona sísmica 1</i>	64
Figura 10 <i>Distorsión de entrepiso zona 1</i>	66
Figura 11 <i>Diagrama de interacción de la columna zona 1 del eje 2</i>	67
Figura 12 <i>Diagrama de interacción de la columna zona 1 del eje 3</i>	67
Figura 13 <i>Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 1</i>	70
Figura 14 <i>Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z1</i>	71
Figura 15 <i>Configuración para Pushover zona 1</i>	72
Figura 16 <i>Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 1</i>	73
Figura 17 <i>Comparación de la curva Pushover con distintos factores R para la zona 1</i>	76
Figura 18 <i>Espectro de diseño Norma Técnica E.030 R=8 y ASCE/SEI 7-22 R=2 zona 1</i>	77
Figura 19 <i>Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 1 en el eje 2</i>	78
Figura 20 <i>Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 1 en el eje 3</i>	78

Figura 21 <i>Curva Pushover calculado con el ATC-19 para el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22 en la zona 1</i>	80
Figura 22 <i>Detalle general del tanque de la zona sísmica 2</i>	83
Figura 23 <i>Detalle general del tanque de la zona sísmica 2</i>	85
Figura 24 <i>Distorsión de entrepiso zona 2</i>	87
Figura 25 <i>Diagrama de interacción de la columna zona 2 en el eje 2</i>	87
Figura 26 <i>Diagrama de interacción de la columna zona 2 en el eje3</i>	88
Figura 27 <i>Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 2</i>	90
Figura 28 <i>Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z2</i>	91
Figura 29 <i>Configuración para Pushover zona 2</i>	92
Figura 30 <i>Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 2</i>	93
Figura 31 <i>Comparación de la curva Pushover con distintos factores R zona 2</i>	96
Figura 32 <i>Espectro de diseño Norma Técnica E.030 R=8 y ASCE/SEI 7-22 R=2 zona 2</i> ..	97
Figura 33 <i>Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2 eje 2</i>	98
Figura 34 <i>Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2 eje 3</i>	98
Figura 35 <i>Curva Pushover calculado con el ATC-19 para el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22 en la zona 2</i>	100
Figura 36 <i>Detalle general del tanque de la zona sísmica 3</i>	103
Figura 37 <i>Espectro de diseño usado para la zona sísmica 3</i>	105
Figura 38 <i>Distorsión de entrepiso zona 3</i>	107
Figura 39 <i>Diagrama de interacción de la columna C-1 zona 3 eje 2</i>	107
Figura 40 <i>Diagrama de interacción de la columna C-1 zona 3 eje 3</i>	108
Figura 41 <i>Diagrama de interacción de la columna C-2 zona 3 eje 3</i>	108

Figura 42 <i>Diagrama de interacción de la columna C-2 zona 3 eje 3</i>	109
Figura 43 <i>Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 3</i>	111
Figura 44 <i>Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z3</i>	112
Figura 45 <i>Configuración para Pushover zona 3</i>	113
Figura 46 <i>Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 3</i>	114
Figura 47 <i>Comparación de la curva Pushover con distintos factores R para zona 3</i>	116
Figura 48 <i>Espectro de diseño Norma Técnica E.030 R=6 y ASCE/SEI 7-22 R=2 zona 3</i>	118
Figura 49 <i>Diagrama de interacción de la columna C-1 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI</i> <i>7-22 zona 3 eje 2</i>	118
Figura 50 <i>Diagrama de interacción de la columna C-1 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI</i> <i>7-22 zona 3 eje 3</i>	119
Figura 51 <i>Diagrama de interacción de la columna C-2 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI</i> <i>7-22 zona 3 eje 2</i>	119
Figura 52 <i>Diagrama de interacción de la columna C-2 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI</i> <i>7-22 zona 3 eje 3</i>	120
Figura 53 <i>Curva Pushover calculado con el ATC-19 en el modelo con R=2 según</i> <i>ASCE/SEI 7-22 en la zona 3</i>	121
Figura 54 <i>Detalle general del tanque de la zona sísmica 4</i>	124
Figura 55 <i>Espectro de diseño usado para la zona sísmica 4</i>	126
Figura 56 <i>Distorsión de entrepiso zona 4</i>	128
Figura 57 <i>Diagrama de interacción de la columna zona 4 eje 2</i>	128
Figura 58 <i>Diagrama de interacción de la columna zona 4 eje 3</i>	129
Figura 59 <i>Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 4</i>	131
Figura 60 <i>Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z4</i>	132
Figura 61 <i>Configuración para Pushover zona 4</i>	133

Figura 62 <i>Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 4</i>	134
Figura 63 <i>Comparación de la curva Pushover con distintos factores R en la zona 4</i>	137
Figura 64 <i>Espectro de diseño Norma Técnica E.030 R=8 y ASCE/SEI 7-22 R=2 zona 4</i>	138
Figura 65 <i>Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22</i> <i>zona 4 eje 2</i>	139
Figura 66 <i>Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22</i> <i>zona 4 eje 3</i>	139
Figura 67 <i>Curva Pushover calculado con el ATC-19 para el modelo con R=2 según</i> <i>ASCE/SEI 7-22 en la zona 4</i>	141

Índice de anexos

Anexo 1 - Matriz de consistencia; **Error! Marcador no definido.**

Anexo 2 - Matriz de operacionalización de variables; **Error! Marcador no definido.**

Anexo 3 - Procedimiento metodológico para la validación de hipótesis .; **Error! Marcador no definido.**

Anexo 4 - Procedimiento de modelado, asignación de cargas y análisis estructural en SAP2000; **Error! Marcador no definido.**

I. Introducción

El sismo ocurrido en Pisco en el año 2007 evidenció la fragilidad de los tanques elevados de concreto armado, observándose deficiencias en vigas y uniones viga-columna que comprometieron su estabilidad estructural y los dejaron inoperativos ante el riesgo de colapso. En tal sentido, el diseño de los tanques elevados debe cumplir con los parámetros establecidos en las normativas vigentes; sin embargo, en el contexto nacional existe escasa información técnica sobre su comportamiento sísmico, lo que evidencia una brecha de conocimiento. Mientras que en otros países se han desarrollado estudios sobre el comportamiento sísmico de tanques elevados, en el Perú la mayoría de investigaciones se enfocan en edificaciones convencionales, limitando el análisis de estructuras hidráulicas elevadas (Banco Mundial [BM], 2011).

En la presente investigación se empleó la metodología del Applied Technology Council (ATC-19, 1995) para evaluar el factor de modificación de la respuesta sísmica, considerando los componentes de ductilidad, sobrerresistencia y redundancia. Asimismo, se realizó un rediseño estructural conforme al código de la American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI, 2022). El modelado y análisis estructural se desarrollaron mediante el software SAP2000, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

La tesis se estructura en cinco capítulos, el Capítulo I presenta el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y la hipótesis, el Capítulo II desarrolla el marco teórico y los antecedentes, el Capítulo III describe la metodología empleada, el Capítulo IV presenta los resultados obtenidos y el análisis del factor R, finalmente, el Capítulo V expone las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

2.1.1 Descripción del problema

A nivel internacional, Miranda y Bertero (1994) señalan que el factor de modificación de la respuesta sísmica (R) no es un valor fijo, sino que depende del comportamiento inelástico real de las estructuras, particularmente del nivel de ductilidad alcanzado. Cuando esta condición no es correctamente evaluada y se adoptan valores elevados de R sin sustento analítico, se genera una subestimación de las fuerzas sísmicas de diseño, lo que constituye una causa directa de daños estructurales significativos durante eventos sísmicos severos. Como consecuencia, las estructuras pueden presentar fallas prematuras en elementos críticos, reduciendo su capacidad de disipación de energía y aumentando el riesgo de colapso.

Husain y Tsopelas (2004) explican que la redundancia estructural influye de manera independiente en la respuesta sísmica, ya que permite redistribuir esfuerzos una vez superado el rango elástico. La omisión de este factor en la estimación del valor de R constituye una causa frecuente de evaluaciones sísmicas incompletas, lo que puede derivar en mecanismos frágiles de falla ante sollicitaciones sísmicas intensas. Como consecuencia, las estructuras con baja redundancia tienden a experimentar concentraciones de daño, disminuyendo su confiabilidad estructural y su desempeño sísmico global.

Soroushnia et al. (2011) indican que los tanques elevados de concreto armado presentan un comportamiento sísmico particular debido a la presencia de masas concentradas de fluido, irregularidades geométricas y efectos de interacción fluido–estructura. La falta de consideración de estas características específicas constituye una causa importante de modelaciones estructurales no representativas, lo que conlleva a daños recurrentes en vigas, columnas y uniones viga–columna durante sismos reales. Como consecuencia, los tanques

elevados pueden quedar inoperativos o sufrir colapsos parciales, afectando directamente su funcionalidad post-sismo.

El-Far et al. (2022) demuestran que el valor del factor R en tanques elevados varía significativamente en función de la altura del tanque, la masa almacenada y el espectro sísmico considerado. La adopción de valores normativos elevados y generalizados sin evaluar estas variables constituye una causa de sobrestimación de la capacidad de disipación de energía, lo que puede conducir a diseños inseguros. Como consecuencia, se incrementa la probabilidad de daños estructurales severos y pérdida de servicio en tanques elevados sometidos a fuertes demandas sísmicas.

A nivel nacional, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2019) establece en la Norma Técnica E.030 la clasificación del territorio peruano en cuatro zonas de peligrosidad sísmica (Z1, Z2, Z3 y Z4). Sin embargo, la normativa no define valores específicos del factor R para tanques elevados de concreto armado en función de dichas zonas. Esta ausencia normativa constituye una causa directa de incertidumbre en el diseño sismorresistente, obligando a los proyectistas a adoptar valores de R correspondientes a edificaciones convencionales o esenciales, como consecuencia de esta práctica, se emplean valores elevados de R, como $R = 8$, que no representan el comportamiento real de los tanques elevados, los cuales presentan irregularidades de masa y alta sensibilidad a la demanda sísmica. Esto puede generar subestimación de las fuerzas sísmicas, incrementando el riesgo de daños estructurales, fisuración excesiva y pérdida de capacidad resistente durante sismos severos.

El BM (2011) reporta que el sismo de Pisco ocurrido en el año 2007 ocasionó fallas estructurales significativas en reservorios elevados con soporte apoticado de concreto armado, destacándose daños en vigas y columnas que comprometieron la estabilidad global de estas estructuras. La principal causa de dichos daños estuvo asociada a un diseño

sismorresistente que no reflejó adecuadamente el comportamiento real de los reservorios elevados frente a sollicitaciones sísmicas severas, particularmente en lo referido a la capacidad de disipación de energía y al uso de parámetros de diseño no representativos. Como efecto, varios reservorios elevados quedaron inoperativos ante el riesgo de colapso, afectando directamente la continuidad del servicio de agua potable en zonas urbanas y evidenciando la vulnerabilidad sísmica de este tipo de infraestructuras esenciales. Este evento puso de manifiesto la necesidad de revisar los criterios normativos empleados en el diseño de reservorios elevados de concreto armado en el Perú, especialmente en lo relacionado con la estimación del factor de modificación de la respuesta sísmica (R), a fin de reducir el riesgo de daño estructural y garantizar un desempeño adecuado durante futuros eventos sísmicos.

La limitada investigación nacional sobre el comportamiento sísmico de tanques elevados mediante análisis no lineales y enfoques basados en desempeño impide contar con criterios técnicos locales para ajustar el factor R a las condiciones del país. Como consecuencia, ante sismos moderados o severos, estas estructuras pueden presentar daños significativos que comprometan su operatividad, afectando el abastecimiento de agua potable y la seguridad de la población.

A nivel local, no se dispone de estudios específicos que evalúen el factor de modificación de la respuesta sísmica en reservorios elevados rectangulares de concreto armado, aplicando la Norma Técnica E.030.

Por ello, se plantea la presente investigación con el fin de contribuir al conocimiento técnico y a la adecuada aplicación de la normativa sismorresistente en este tipo de estructuras.

2.1.2 Formulación del problema

Problema general

¿De qué manera evaluar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado considerando la demanda sísmica de la Norma Técnica E.030 del Perú-2023?

Problemas específicos

- ¿De qué manera analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z1=0,10g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano?
- ¿De qué manera analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z2=0,25g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano?
- ¿De qué manera analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z3=0,35g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano?
- ¿De qué manera analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z4=0,45g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano?

2.2 Objetivos

2.2.1 *Objetivo general*

Evaluar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado considerando la demanda sísmica de la Norma Técnica E.030 del Perú-2023.

2.2.2 *Objetivo específico*

- Analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z1=0,10g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano.
- Analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z2=0,25g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano.
- Analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z3=0,35g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano.
- Analizar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, para una aceleración máxima horizontal $Z4=0,45g$ en suelo rígido, correspondiente al territorio peruano.

2.3 Justificación e importancia

Justificación

Se desarrolló debido a que la normativa peruana no contempla criterios de diseño sismorresistente para tanques elevados de concreto armado, lo que genera un vacío técnico que podría conducir a diseños inadecuados y, por ende, a un posible colapso de estas estructuras durante un evento sísmico. Aunque existen antecedentes nacionales e internacionales relacionados al comportamiento de tanques elevados, ninguno se orienta

específicamente a establecer valores del factor R para tanques rectangulares sobre estructuras de concreto armado en el contexto peruano.

En la actualidad, la Norma Técnica E.030 propone un factor $R = 8$ para edificaciones esenciales, asumiendo que no presentan irregularidades. Sin embargo, los tanques elevados presentan comportamientos distintos a las edificaciones convencionales, lo cual los excluye del tratamiento normativo estándar. A pesar de ello, los sistemas estructurales de tanques elevados de concreto armado continúan diseñándose, empleando los valores normativos convencionales, lo cual no refleja adecuadamente su comportamiento real.

Adicionalmente, los códigos sísmicos internacionales muestran variabilidad significativa en el factor R para sistemas equivalentes. Por ejemplo, la NCh 433 (Chile) considera valores entre 7 y 11 para pórticos de hormigón armado; la NSR-10 (Colombia) establece $R = 7$; y la NEC-SE-DS-2015 (Ecuador) adopta valores más conservadores, como $R = 10$. Estas discrepancias evidencian la necesidad de evaluar y proponer valores adecuados para las condiciones sísmicas y tipológicas del Perú, evitando la aplicación directa de criterios extranjeros sin validación estructural.

Importancia

Es importante ya que existe ausencia de criterios normativos específicos para el diseño sismorresistente de tanques elevados rectangulares de concreto armado en el Perú. La inexistencia de parámetros claros para la determinación del factor R limita la capacidad de los ingenieros de predecir de manera precisa la respuesta estructural ante cargas sísmicas, lo que puede comprometer la seguridad y funcionalidad de estas obras esenciales. Dado que los tanques almacenan agua y forman parte de sistemas críticos de abastecimiento, su comportamiento estructural frente a sismos severos es determinante para garantizar la continuidad del servicio. Por estas razones, constituye un aporte original e inédito, proporcionando lineamientos de diseño específicos que permiten optimizar la seguridad y la

confiabilidad de los tanques elevados rectangulares bajo las condiciones sísmicas del contexto peruano.

Los tanques elevados, al ubicarse generalmente en la parte superior de las estructuras, presentan irregularidades de masa debido al almacenamiento de líquidos, lo que los convierte en sistemas altamente sensibles a la demanda sísmica. Su falla podría comprometer la continuidad del servicio de agua potable posterior a un sismo severo. Esto es crítico, considerando que este tipo de estructuras se clasifican como edificaciones esenciales (categoría A2 de la Norma Técnica E.030), las cuales no deberían colapsar bajo ningún escenario sísmico de diseño.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

El factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, estimado mediante la demanda sísmica establecida en la Norma Técnica E.030 del Perú, presentará valores diferentes a los reportados por referencias internacionales debido a las condiciones sísmicas locales.

2.4.2 Hipótesis específica

- Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z1=0.10g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.
- Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z2=0.25g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.

- Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z3=0.35g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.
- Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z4=0.45g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.

2.5 Variables

Variable independiente: Demanda sísmica de la Norma Técnica E.030

Variable dependiente: Factor de modificación de la respuesta sísmica

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición	Instrumento
Variable dependiente: Factor de modificación de la respuesta sísmica	Es un factor que reduce las fuerzas sísmicas elásticas de diseño, el cual considera la capacidad de la estructura para disipar la energía mediante deformaciones inelásticas controladas (ATC-19, 1995)	Se calculará aplicando la metodología ATC-19 (1995), multiplicando los factores de ductilidad, sobrerresistencia y redundancia obtenidos a partir del análisis no lineal del reservorio modelado en SAP2000.	<ul style="list-style-type: none"> • Ductilidad • Sobrerresistencia • Redundancia 	Factor de ductilidad (R_{μ}) Factor de sobrerresistencia (R_S) Factor de redundancia (R_R)	Razón	Software SAP2000 Metodología ATC-19 Hojas de cálculo (Excel) Hojas de cálculo (Mathcad)
Variable independiente: Demanda sísmica de la Norma Técnica E.030	La demanda sísmica es la acción o sollicitación generada por un sismo que debe considerarse en el diseño estructural. Según la Norma Técnica E.030, se expresa mediante un espectro de diseño que depende de la zona sísmica, el tipo de suelo y las características estructurales del sistema (MVCS, 2019).	Se obtendrá a partir del espectro de diseño establecido en la Norma Técnica E.030, variando los parámetros según la zona sísmica considerada para cada reservorio modelado en SAP2000.	<ul style="list-style-type: none"> • Aceleración máxima $Z1=0.10g$ • Aceleración máxima $Z2=0.25g$ • Aceleración máxima $Z3=0.35g$ • Aceleración máxima $Z4=0.45g$ 	Zona de peligrosidad sísmica Z1 Zona de peligrosidad sísmica Z2 Zona de peligrosidad sísmica Z3 Zona de peligrosidad sísmica Z4	(g)	Norma Técnica E.030 Espectro de diseño generado en SAP 2000 Documentación Técnica (planos originales del reservorio)

Nota. La tabla presenta la operacionalización de las variables dependiente e independiente consideradas en la investigación, especificando sus definiciones conceptuales, definiciones operacionales, dimensiones, indicadores, escalas de medición e instrumentos de análisis.

III. Marco teórico

3.1 Antecedentes

Miranda y Bertero (1994), en su investigación titulada “Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design”, tuvieron como propósito principal evaluar el factor de reducción sísmica en sistemas estructurales sometidos a comportamiento inelástico. La investigación se desarrolló mediante análisis no lineales de sistemas de un grado de libertad, considerando distintos niveles de ductilidad y demanda sísmica. Los resultados evidenciaron que el factor de modificación de la respuesta sísmica no es un valor constante, sino que depende directamente de la ductilidad alcanzada por la estructura y del nivel de sollicitación sísmica. Asimismo, se determinó que el uso de valores elevados de R sin una evaluación no lineal puede conducir a diseños conservadores. En consecuencia, los autores concluyeron que el factor R debe estimarse a partir del desempeño real de la estructura, lo cual respalda el enfoque adoptado en la presente investigación.

Husain y Tsopelas (2004), en el estudio denominado “Measures of structural redundancy in reinforced concrete buildings. II: Redundancy response modification factor (RR)”, plantearon como objetivo cuantificar la influencia de la redundancia estructural en el factor de modificación de la respuesta sísmica. La metodología empleada consistió en análisis no lineales aplicados a edificaciones de concreto armado con diferentes configuraciones estructurales. Los resultados demostraron que la redundancia incrementa significativamente la capacidad de disipación de energía y contribuye de manera independiente al valor del factor R . En consecuencia, se concluyó que la omisión del factor de redundancia puede generar una subestimación del comportamiento sísmico real, validando el uso de metodologías como el ATC-19 (1995), que considera explícitamente este componente.

Soroushnia et al. (2011) desarrollaron la investigación titulada “Seismic performance of RC elevated water tanks with frame staging and exhibition damage pattern”, cuyo objetivo fue evaluar el desempeño sísmico de tanques elevados de concreto armado con sistema estructural tipo pórtico. La investigación se basó en análisis no lineales y en la revisión de daños observados tras eventos sísmicos reales. Los resultados identificaron fallas recurrentes en vigas, columnas y uniones viga-columna, así como mecanismos de torsión global del sistema estructural. En consecuencia, se concluyó que los tanques elevados presentan un comportamiento sísmico distinto al de las edificaciones convencionales, por lo que requieren criterios específicos de diseño y evaluación, justificando la necesidad de determinar valores propios del factor R para este tipo de estructuras.

El-Far et al. (2022), en la investigación titulada “Evaluation of response reduction factor for reinforced concrete elevated water tanks and codes, comparative study”, tuvieron como objetivo evaluar el factor de reducción sísmica en tanques elevados de concreto armado diseñados conforme al código sísmico egipcio ECP-201. La metodología adoptada consistió en el análisis Pushover de 108 modelos estructurales mediante el software SAP2000, considerando los niveles de desempeño IO, LS y CP. Los resultados mostraron que el valor del factor R varía en función de la altura del tanque, la masa almacenada y el tipo de espectro sísmico, obteniéndose valores comprendidos entre 2 y 5. En consecuencia, se determinó que los valores normativos de R pueden resultar conservadores para ciertos tipos de tanques elevados, conclusión que guarda relación directa con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Pandian et al. (2024), en el estudio denominado “Modification of response reduction factors of overhead water tanks based on ductility factor”, plantearon como objetivo evaluar la influencia del factor de ductilidad en el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados. La investigación se desarrolló mediante análisis no lineales considerando

diferentes niveles de ductilidad estructural. Los resultados evidenciaron que el factor R aumenta significativamente con el incremento de la ductilidad, alcanzando valores entre 2 y 9, mientras que la influencia de las condiciones del suelo resultó secundaria. En consecuencia, se concluyó que el factor R no debe adoptarse como un valor fijo, sino determinarse en función del comportamiento inelástico real de la estructura, criterio coherente con la metodología aplicada en la presente tesis.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Factor de modificación de la respuesta sísmica (R)

La premisa del factor R de estudio es que las estructuras bien estructuradas pueden sufrir deformaciones significativas antes de colapsar y reduciendo las fuerzas generadas por el sismo hasta alcanzar un equivalente de fuerzas de diseño. Los proyectistas aceptan las simplificaciones siguientes después de aplicar los factores de reducción los cuales son mayor o igual a 1:

- a) Los programas de cálculo trabajan en un rango constante (lineal) y producen resultados aceptables en comparación con las respuestas brindadas que realmente tiene la estructuras.
- b) Cuando aceptamos de manera implícita un comportamiento no lineal, se espera que la construcción disipe energía, causando daño global significativo en el sistema estructural.
- c) Cada componentes o parte de una estructura tienen sus propias características en cuanto a ductilidad y a la sobre resistencia propias.

Con normativas extranjeras ATC-19 (1995), se calculó el factor de reducción R como el resultado del producto de tres factores:

- Factor de reducción por resistencia lo llamaremos R_s .
- Factor de reducción por ductilidad lo llamaremos R_μ .

- Factor de redundancia lo llamaremos R_R .

Esta base teórica no toma en cuenta los factores de amortiguamiento que podría tener la estructura, conduciendo a la siguiente condición:

$$R = R_S * R_\mu * R_R \quad (1)$$

Los dos primeros de estos tres factores dependen del período, a diferencia de los valores del factor de redundancia que suelen adoptar valores constantes según los diferentes tipos estructurales, pero su determinación no es clara debido a que se estila incluir dentro del factor de sobrerresistencia.

En cuanto a la ecuación 10, hay propuestas similares que tienen respaldo teórico y experimental, del mismo modo que lo plantea Bertero (1992). En esta la ecuación se muestra que el producto de cuatro factores es igual al factor R, la que a continuación se muestra:

$$R = R_S * R_\mu * R_{VG} * R_R \quad (2)$$

- En ese entender, el factor R se define como el resultado de la multiplicación de 4 factores los cuales son:
 - El factor R_S de reducción por resistencia, capacidad última de la estructura relacionada a la capacidad de diseño,
 - El factor R_μ por ductilidad, obtenido en un sistema de 1 grado de libertad.
 - El factor R_{VG} por dos o más grados de libertad del sistema estructural
- El factor R_R por redundancia que trata de transmitir las cargas en el rango no lineal con eficiencia de cada elemento de la estructura.

Aguiar (2007), utiliza como referencia lo ya establecido por el ATC-19 (1995), las cuales son los siguientes elementos a tomar en cuenta: factor por ductilidad, factor por sobrerresistencia y factor por redundancia. De esta manera se hace mención al análisis del factor R, dicho factor sísmico en estructuras de concreto armado conformadas por pórticos (columna-viga), según las normas de Chile, normas de Colombia, normas de Ecuador,

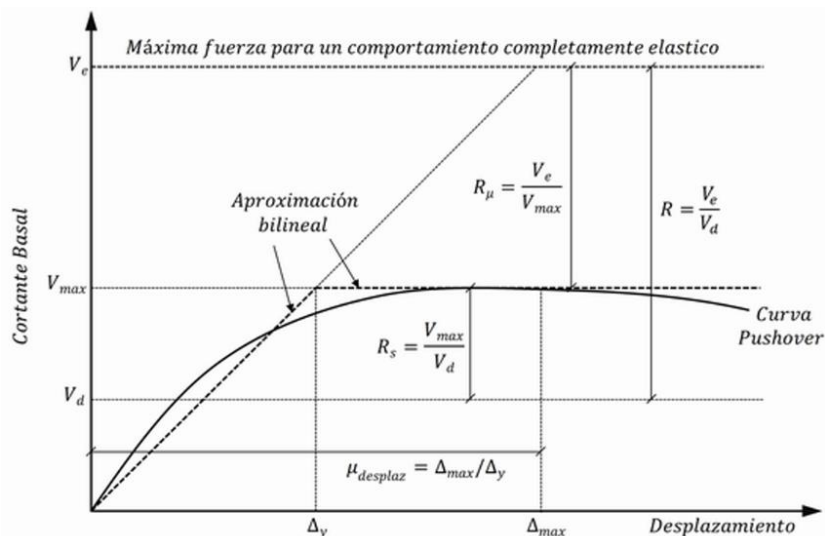
normas de Venezuela y las nuestras. Se compara el factor R de las cinco normativas sísmicas, para finalmente presentar los hallazgos de varios estudios globales que buscan cuantificar el factor R equivalente dados por:

- Factor R_μ por ductilidad.
- Factor R_S por sobrerresistencia.
- Factor R_R por redundancia.

Razmyar (2014) propone la siguiente figura 1, donde nos muestra la cortante basal y el desplazamiento y a su vez nos indica las fórmulas necesarias para poder determinar el factor de modificación de respuesta sísmica, tanto para la ductilidad, sobrerresistencia y redundancia.

Figura 1

Definición de los factores de respuesta sísmica sobre una curva Pushover típica



Nota. Esta figura representa la curva pushover y los factores de modificación de la respuesta sísmica asociados a la ductilidad, sobrerresistencia y demanda elástica, adaptado de Razmyar (2014).

Para determinar el factor de modificación relativo a la ductilidad, se utilizó la ecuación de Miranda y Bertero (1994), el cual se muestra a continuación:

$$R_{\mu} = \frac{\mu_{desplaz} - 1}{\phi} + 1 \quad (3)$$

El factor ϕ se determinó para una condición de sitio en roca, con la siguiente ecuación:

$$\phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu_{desplaz}T} - \frac{1}{2T} e^{-1.5[\ln(T)-0.6]^2} + 1 \quad (4)$$

Donde:

T : Periodo fundamental

$\mu_{desplaz}$: Factor de ductilidad (u_{max}/u_y).

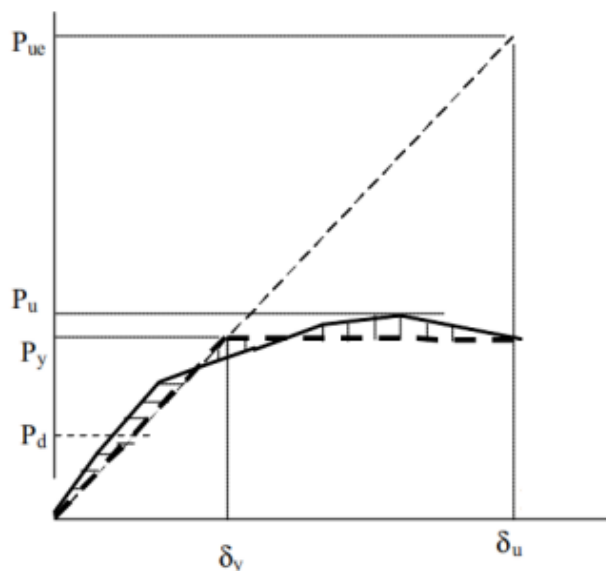
3.2.1.1 Dimensiones del factor R

3.2.1.1.1 Ductilidad. Se denomina factor de ductilidad traslacional (R_{μ}) de la estructura, a la relación que existe debido a la fuerza elástica límite (P_{ue}) que soporta un sistema de edificación y la carga inelástica también llevado al límite (P_y) que también soporta esa misma edificación con un sistema en el rango inelástico. Consecuentemente a ellos podemos decir que $P_u = P_y$, debido a la representación de dicha relación existente como una curva con comportamiento de doble entrada. Como en la Figura 2, y este factor de resistencia está representado mediante:

$$R_{\mu} = \frac{P_{ue}}{P_y} \quad (5)$$

Figura 2

Reacción producida por ductilidad de la estructura



Nota. Esta figura ilustra cómo la ductilidad de una estructura modifica su respuesta sísmica, representada sobre una curva pushover típica. La línea continua muestra el comportamiento real de la estructura, mientras que la línea discontinua representa una idealización bilineal utilizada en diseño. Adaptado de Daza-Duarte (2003).

Nathan y William (1982) realizó una de las investigaciones más importantes sobre el componente de ductilidad (R_μ), Se indica que este valor es muy sensible al período natural del sistema estructural según se calculó para responder a las aceleraciones del suelo medidas durante terremotos, en las siguientes estructuras en función su período:

- Periodos 0.03 segundos:

$$R_\mu = 1.00 \quad (6)$$

- Periodos 0.12 a 0.5 segundos:

$$R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \quad (7)$$

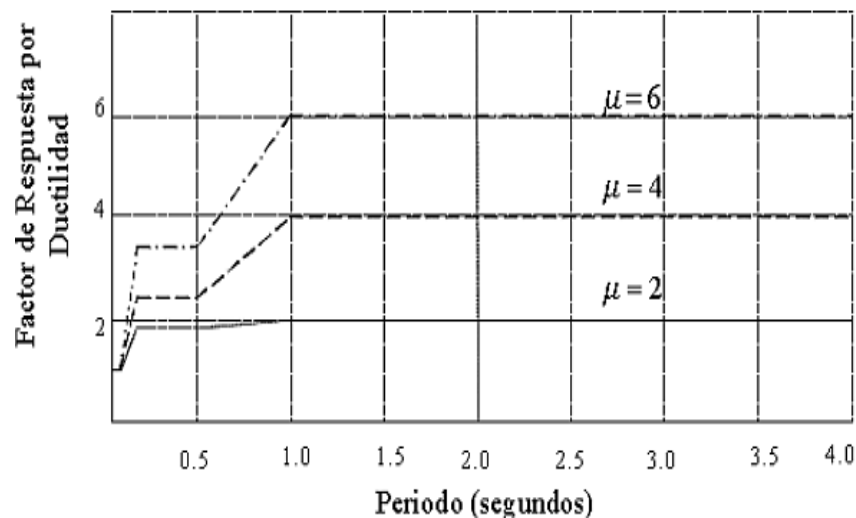
- Periodos sobre los 1.0 segundos

$$R_\mu = \mu \quad (8)$$

La ductilidad de desplazamientos ($\mu = \delta u / \delta y$) está definida por la causa del desplazamiento final y el correspondiente estado de cadencia. De otro lado, con la interpolación lineal podremos calcular el factor R_μ dentro de los periodos establecidos de 0.003seg, 0.5seg y 1.0seg. esto mismo podemos verlo en la figura 3.

Figura 3

Variación de respuesta debido a la ductilidad

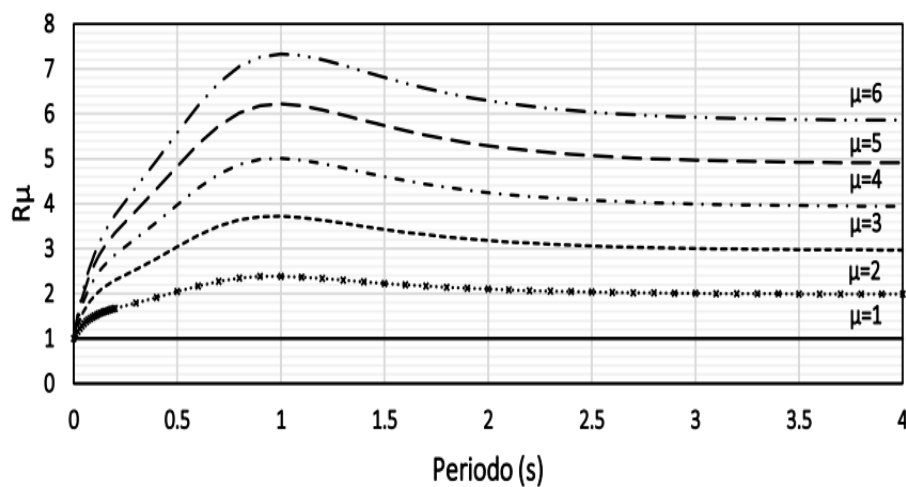


Nota. Esta figura muestra la variación del factor de respuesta sísmica asociado a la ductilidad estructural en función del periodo fundamental, para diferentes niveles de ductilidad ($\mu = 2, 4$ y 6), adaptado de Sequera y Vita (2016).

Miranda & Bertero (1994) Para analizar el suelo inelástico, el autor utilizó un modelo elastoplástico. La respuesta de la superficie se determinó en la no linealidad, en el que se consideró un sistema solo 1 grado de libertad. Las fórmulas finales son:

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\phi} + 1 \geq 1.0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \phi &= 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[-\frac{2}{3} \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] && \text{roca} \\ \phi &= 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] && \text{Depósitos aluviales} \\ \phi &= 1 + \frac{T_g}{3T - \mu T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[-3 \left(\ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] && \text{Suelos blandos} \end{aligned} \quad (10)$$

Figura 4*Resistencia por ductilidad*

Nota. Esta figura muestra la variación del factor de ductilidad R_μ en función del periodo fundamental del sistema estructural para distintos niveles de ductilidad ($\mu = 1$ a $\mu = 6$), adaptado de Miranda y Bertero (1994).

3.2.1.1.2 Sobrerresistencia. Se reconoce dos tipos de sobrerresistencia en una estructura, una hacia los elementos locales ($R_{\Omega L}$) y de la estructura misma (R_{Ω}). Ambos son factores utilizados para garantizar que la estructura utilice estos factores, pero lo podemos relacionar siguiente manera, Aguiar (2007)

- Sobrerresistencia debido al Diseño.
- Sobrerresistencia debido a un Análisis.
- Sobrerresistencia en la planificación y ejecución.

A la relación que existe entre ambas demandas del cortante, uno de ellos último en la base (V_U) y la de diseño (V_D) bajo un parámetro de fuerzas distribuidas a lo en toda la altura de las estructuras, se le denomina factor de sobrerresistencia de interés en la estructura, la que se expresa de la siguiente manera:

$$R_S = \frac{V_U}{V_D} \quad (11)$$

Donde:

V_U = Cortante último (hallada mediante un análisis Pushover).

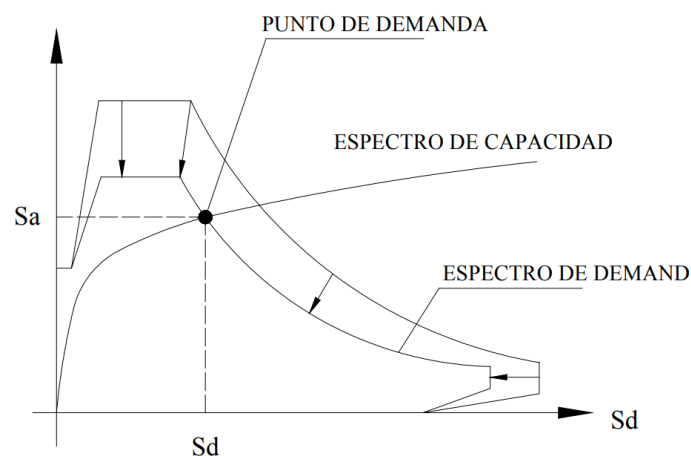
V_D = Cortante del diseño estructural.

Método espectro de capacidad

Está en relación entre espectro de capacidad de objeto de estudio y espectro que requiera la demanda de la misma. Al punto de intercepción de las curvas, se le denomina punto de demanda con su cortante respectivo, correspondiente al cortante de diseño. El cual se determina la sobrerresistencia de intercesión en la figura 5 a continuación.

Figura 5

Espectro de capacidad del punto de demanda



Nota. Esta figura nos muestra la representación del método espectro capacidad–demanda para la determinación del punto de demanda mediante la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda, adaptado de Chopra y Goel (1999).

Método de Aguiar (2007)

Según Aguiar (2007) su método se basa en la relación entre las derivas máximas entre pisos y la capacidad de reducción sísmica de la estructura. Al diseñar con un valor bajo de γ , la estructura se vuelve más rígida, presentando desplazamientos laterales reducidos y un factor de sobrerresistencia (R_s) elevado debido al menor cortante basal requerido. Este método permite evaluar cómo la rigidez, la ductilidad y las deformaciones inelásticas contribuyen conjuntamente a la reducción de fuerzas sísmicas, ofreciendo un procedimiento más realista para estimar R y garantizar un comportamiento seguro frente a distintas demandas sísmicas, y a continuación se describen los procedimientos empleados.

- Empleando la técnica del Pushover mediante un análisis en los rangos de la no linealidad de manera estática, se para poder hallar las curvas de capacidad sísmica que puede resistir la estructura,
- Se hallan la curva de cortante basal (CV) con la de deriva o desplazamientos de la estructura, con la curva de capacidad que se halló.
- Para finalmente, hallar la curva de capacidad con respecto a la deriva máxima ocurridas en los entrepisos de la edificación (γ) contra la fuerza cortante basal.

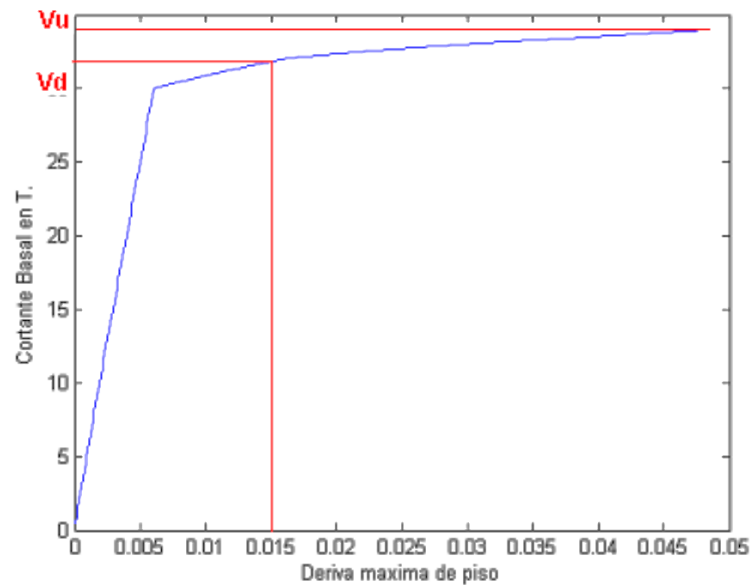
En donde se obtiene (γ) mediante la ecuación siguiente:

$$\gamma = \beta_2 * \gamma_g \quad (12)$$

$$\beta_2 = -0.0231N^2 + 0.3018N + 0.6759 \quad (13)$$

Figura 6

Deriva máxima contra cortante basal



Nota. Esta figura nos muestra la relación entre la deriva máxima de piso y el cortante basal obtenida a partir de una curva Pushover, utilizada para la estimación del factor de modificación de la respuesta sísmica R, adaptado de Aguiar (2007).

3.2.1.1.3 Redundancia. Calcula la capacidad de una estructura cuando se ingresa al rango inelástico, relacionando el cortante basal más alto con el cortante basal conseguido en el instante en que se conforma la articulación plástica en su inicio.

$$R_R = \frac{V_u}{V_1} \quad (14)$$

Donde:

V_U = Cortante último

V_1 = Cortante en la rotura próxima

El factor de redundancia se espera que sea mayor que 1. En ese sentido, es razonable ver que se muestre la primera rótula plástica si la estructura que no cuente con redundancia colapsará inmediatamente, entonces los valores de V_U será igual a V_1 .

El factor de redundancia depende de cuantos elementos y pórticos tenga una edificación. Es bien conocido que la cantidad de rotulas plásticas aumentará con la cantidad de elementos estructurales. Pero la cantidad de rotulas plásticas no es lo único que importa, sino también la capacidad de cada rotulas para entrar en el rango de la no linealidad. Como resultado, el factor R_R se halla utilizando primero el número de rotulas plásticas y luego poder ingresar al rango inelástico y observar el comportamiento de la misma.

Según Husain y Tsopelas (2004), que proponen una variedad de modelos para calcular el factor R_R , estos a su vez llegan a concluir que estos valores dependen de: primero, el índice en cuanto a redundancia por la resistencia r_s y segundo, el índice en cuanto a redundancia en la constitución de rotulas plásticas r_v , utilizando en la siguiente expresión:

$$R_R = r_s \left(\frac{1 - 0.12r_v}{0.88} \right) \quad (15)$$

Donde las constantes de 0.12 y 0.88 son hallados mediante la estadística. Se determinó el índice r_s es redundancia por resistencia, mostrada en la ecuación (16), donde V_y es el cortante a debido de fluencia, con un modelo bilineal que fue obtenido mediante de la curva de capacidad. Luego, para determinar el punto donde se presenta la fluencia Y , debe emplearse el criterio de áreas iguales.

$$r_s = \frac{V_u}{V_y} \quad (16)$$

Además Husain & Tsopelas (2004) para calcular el índice para las redundancias por la conformación de rotulas plásticas (r_v), formula lo siguiente.

$$r_v = \sqrt{\frac{1}{n} * \frac{1}{m - 1}} \quad (17)$$

Donde:

“m” : números de pórticos en la dirección que se analiza

“n” : número de rotulas plásticas del pórtico.

Respecto al factor de modificación relativo a la redundancia según el ATC-19 (1995), nos indica que depende de la cantidad de miembros estructurales que forman parte del sistema sismorresistente y la cantidad de rotulas plásticas que se generan hasta formar el mecanismo de colapso de la estructura, el cual se indica de acuerdo al literal 4.5, capítulo 4, del código Internacional ATC-19 – factores de modificación de la respuesta estructural, el cual se muestra a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2

Factor de redundancia R_R

Líneas de estructura sísmica vertical	Factor R_R
2	0.71
3	0.86
4	1.00

Nota. Esta tabla nos muestra la identificación de las líneas del sistema sismorresistente vertical empleadas para la evaluación del factor de redundancia R_r , adaptado del ATC-19 (1995).

3.2.2 *Demanda sísmica según la Norma Técnica E.030*

3.2.2.1 Factor de reducción de las fuerzas sísmicas R. La Norma Técnica E.030 establece que el factor R se obtiene mediante el producto entre el factor básico de reducción (R_0) y los factores de irregularidad en altura (I_a) e irregularidad en planta (I_p). Este procedimiento busca reflejar no solo la capacidad inherente del sistema estructural para disipar energía representada por R_0 sino también los efectos que pueden introducir las discontinuidades geométricas o estructurales a lo largo de la altura o en la distribución en planta. En conjunto, estos factores permiten ajustar de manera más realista la reducción de fuerzas sísmicas aplicable a una estructura y está dada por:

$$R = R_0 \cdot I_a \cdot I_p \quad (18)$$

3.2.2.2 Factor básico de reducción. Los sistemas estructurales se clasifican según los materiales utilizados y el tipo de sistema sismorresistente que actúa en cada dirección de análisis, tal como se indica en la Tabla . Cada sistema se asocia con un factor R_0 que refleja su capacidad de disipar energía ante un evento sísmico. Cuando una edificación presenta más de un sistema estructural en la misma dirección, se adopta el menor valor de R_0 , asegurando un diseño conservador. Esta medida considera los efectos combinados de ductilidad, sobrerresistencia y redundancia, optimizando la seguridad y desempeño estructural frente a cargas sísmicas.

Tabla 3

Factor básico de reducción sísmica

Sistema estructural	Coeficiente básico de reducción R_0
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	5
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	4
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	7
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	4
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería confinada	3
Madera	7

Nota. Esta tabla nos muestra los coeficientes básicos de reducción sísmica (R_0) según el tipo de sistema estructural, conforme a la Norma Técnica E.030 (2019). Para el caso de estructuras tipo pórtico de concreto armado alcanzan valores elevados de R_0 igual a 8, lo cual refleja una alta capacidad de disipación de energía ante eventos sísmicos y permite una reducción significativa de las fuerzas sísmicas de diseño.

3.2.2.3 Factor de zona (Z). Está dividida en cuatro zonas, mostrada en la Figura 7, y responde a un análisis que considera la localización y frecuencia de los sismos registrados, las características típicas de dichos movimientos y la forma en que se atenúan a medida que aumenta la distancia al epicentro, además de información de carácter neotectónico, estos a su vez cada zona está designada a cada nivel entre los distritos de nuestro territorio peruano.

Figura 7

Zonas sísmicas del Perú



Nota. Esta figura nos muestra la división del territorio peruano en zonas de peligrosidad sísmica Z1, Z2, Z3 y Z4, de acuerdo con los valores de aceleración máxima del suelo establecidos en la Norma Técnica E.030, adaptado del MVCS (2019).

En la Norma Técnica E.030 (2019), a cada una de las zonas se le asigna un factor de zona (Z), detallado en la Tabla . Dicho factor simboliza la aceleración horizontal máxima

esperada sobre un terreno rígido, con un 10% de probabilidad de ser excedida durante un periodo de 50 años y se expresa en relación fraccionaria con la aceleración de la gravedad.

Tabla 4

Factor Z

Zona	Z
1	0.10g
2	0.25g
3	0.35g
4	0.45g

Nota. Esta tabla nos muestra los valores del factor de zona sísmica **Z** asociados a cada zona de peligrosidad sísmica, conforme a la Norma Técnica E.030, adaptado del MVCS (2019).

3.2.2.4 Factor de suelo (S). La clasificación de los perfiles de suelo se basa en la velocidad media de propagación de las ondas de corte (V_s). De forma alternativa, para suelos granulares se considera el promedio ponderado del número de golpes obtenidos mediante el ensayo de penetración estándar (SPT), mientras que y para suelos cohesivos se emplea el promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada (S_u), que indica el tipo de suelo que corresponderá asumir para nuestros estudios. En el caso de suelos tipo S4, la clasificación se basa en el estudio de mecánica de suelos (EMS).

Tabla 5

Perfiles de suelos

Clasificación de perfiles de suelo			
Perfil	V_s	N_{60}	S_u
S0	> 1500 m/s	-	-
S1	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S3	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S4	Clasificación basada en el EMS		

Nota. Esta tabla nos muestra la clasificación de los perfiles de suelo en función de la velocidad de onda de corte V_s , el número de golpes N_{60} y la resistencia no drenada S_u , conforme a la Norma Técnica E.030, adaptado del MVCS (2019).

Tabla 6*Factor de suelo (S)*

Factor S				
	S0	S1	S2	S3
Z1	0.80	1.00	1.60	2.00
Z2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z4	0.80	1.00	1.05	1.10

Nota. Esta tabla nos muestra los valores del factor de suelo **S** en función del perfil de suelo y de la zona de peligrosidad sísmica, conforme a la Norma Técnica E.030, adaptado del MVCS (2019).

3.2.2.5 Factor de uso (U). El factor de uso, según la Norma Técnica E.030, lo clasifica de acuerdo a cuatro de categoría de edificación: edificaciones esenciales, edificaciones importantes, edificaciones comunes y edificaciones temporales, de estas depende el valor de **U**, en la siguiente tabla:

Tabla 7*Factor de uso*

Categoría	Factor U
A Edificaciones esenciales	1.5
B Edificaciones importantes	1.3
C Edificaciones comunes	1
D Edificaciones temporales	Criterio del proyectista

Nota. Esta tabla nos muestra los valores del factor de uso **U** según la categoría de la edificación. El tanque elevado analizado corresponde a la categoría A2 (edificaciones esenciales), para la cual se adopta un valor de **U = 1, 5**, conforme a la Norma Técnica E.030, adaptado del MVCS (2019).

3.2.2.6 Parámetros de sitio. Para los parámetros de sitio, se debe identificar el perfil de suelo que represente con mayor precisión las condiciones geotécnicas locales, a continuación, se detalla:

Tabla 8

Parámetros de sitio (T_p y T_l)

	S0	S1	S2	S3
T_p (s)	0.3	0.4	0.6	1.0
T_l (s)	3.0	2.5	2.0	1.6

Nota. Esta tabla nos muestra los valores de los parámetros de sitio T_p (periodo corto) y T_l (periodo largo) en función del perfil de suelo, utilizados para la definición del espectro de diseño sísmico, conforme a la Norma Técnica E.030, adaptado del MVCS (2019).

3.2.2.7 Factor de amplificación sísmica (C). Este coeficiente se entiende como el factor que expresa la amplificación de la aceleración estructural en relación con la aceleración registrada en el suelo, y esta función del periodo de vibración natural de la estructura.

$$T < T_p \quad C = 2.5 \quad (19)$$

$$T_p < T < T_l \quad C = 2.5 * \left(\frac{T_p}{T_l} \right) \quad (20)$$

$$T > T_l \quad C = 2.5 * \left(\frac{T_p * T_l}{T^2} \right) \quad (21)$$

3.3 Definición de términos

Factor de modificación de la respuesta sísmica. Factor que permite reducir las fuerzas sísmicas de diseño considerando la capacidad de la estructura para disipar energía mediante ductilidad, sobrerresistencia y redundancia (ATC-19, 1995).

Demanda sísmica. Es la exigencia dinámica que un sismo impone sobre una estructura, expresada en aceleraciones, desplazamientos o fuerzas internas, y que se obtiene a partir del espectro de diseño normativo (MVCS, 2019).

Norma Técnica E.030. Parte del Reglamento Nacional de Edificaciones (R.N.E.), del Perú, que establece los criterios para el diseño sismorresistente de edificaciones y obras de infraestructura, incluyendo la determinación de cargas sísmicas y parámetros como zona sísmica y tipo de suelo (MVCS, 2019).

Ductilidad estructural. Capacidad de una estructura para soportar grandes deformaciones inelásticas sin perder estabilidad, fundamental para la disipación de energía durante un sismo (Priestley et al., 2007).

Sobrerresistencia. Reserva adicional de capacidad resistente que posee una estructura respecto a la carga de diseño, proveniente de propiedades reales de materiales o redundancia en el sistema (Newmark y Hall, 1982).

Redundancia estructural. Presencia de múltiples elementos que comparten la resistencia sísmica, permitiendo redistribuir esfuerzos cuando un componente falla (ATC-19, 1995) .

Zona sísmica. Clasificación geográfica establecida por la Norma Técnica E.030 que define la intensidad sísmica de diseño según el nivel de amenaza sísmica del país (MVCS, 2019).

Espectro de diseño. Curva normativa que relaciona la aceleración espectral con el periodo estructural, usada para estimar las fuerzas sísmicas equivalentes en el análisis (Chopra, 2017).

Periodo fundamental de la estructura. Se define el período fundamental de la estructura (también llamado período natural de vibración, T_n) como el tiempo que tarda un sistema no amortiguado en completar un ciclo completo de vibración libre. Se trata de una

característica inherente al sistema, determinada únicamente por su masa (m) y su rigidez (k) (Chopra, 2017).

Tanque elevado. Se define como depósitos que almacenan agua potable para dar servicio a la población en general, mediante sistemas por gravedad (MVCS, 2012).

Concreto armado. Material compuesto por hormigón y acero de refuerzo que combina resistencia a compresión y tracción, ampliamente usado en estructuras sismorresistentes (Nilson et al., 2010). También la Norma Técnica E.0.60 lo define como concreto estructural reforzado con no menos de la cantidad mínima de acero, preesforzado o no (MVCS, 2009)

SAP2000. Software de análisis y diseño estructural por elementos finitos que permite modelar comportamientos lineales y no lineales, ampliamente utilizado en ingeniería civil según el Computers and Structures Inc (CSI, 2023).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación

Adopta un tipo de investigación aplicada, ya que está orientada a la utilización de conocimientos teóricos y normativos existentes para resolver un problema práctico de la ingeniería civil, específicamente la determinación del coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas (R) en tanques elevados rectangulares de concreto armado. Este tipo de investigación busca generar resultados con utilidad directa en el diseño estructural, permitiendo mejorar los criterios técnicos empleados en la práctica profesional.

Según Hernández et al. (2022), la investigación aplicada se caracteriza por emplear fundamentos teóricos y metodológicos con el propósito de proponer soluciones a situaciones reales y concretas, sin limitarse únicamente a la descripción del fenómeno. En este estudio, los lineamientos de la Norma Técnica E.030 del Perú, la metodología del ATC-19 (1995) y el código de diseño ASCE/SEI 7-22 (2022) son aplicados para evaluar y ajustar el valor del factor R en función de la respuesta sísmica real de los reservorios analizados.

Asimismo, la investigación presenta un enfoque cuantitativo, debido a que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos mediante modelación estructural y análisis no lineal, tales como aceleraciones sísmicas, fuerzas internas, desplazamientos y valores del coeficiente R . Estos datos fueron procesados mediante herramientas computacionales, permitiendo evaluar objetivamente el comportamiento estructural bajo diferentes escenarios sísmicos normativos y formular conclusiones técnicas verificables y replicables.

Nivel de investigación

De acuerdo con la clasificación propuesta por Hernández et al. (2022), la presente investigación corresponde a un nivel descriptivo, debido a que tiene como finalidad caracterizar y analizar el comportamiento del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) en tanques elevados rectangulares de concreto armado, considerando las diferentes demandas sísmicas establecidas en la Norma Técnica E.030 del Reglamento Nacional de Edificaciones para las zonas sísmicas Z1, Z2, Z3 y Z4 del territorio peruano.

Según Hernández et al. (2022), la investigación descriptiva se orienta a detallar las características, propiedades y el comportamiento de un fenómeno tal como ocurre en la realidad, sin manipular deliberadamente las variables ni establecer relaciones de causalidad. Por su parte Ñaupas et al. (2021), la investigación descriptiva tiene como propósito caracterizar y detallar el comportamiento de un fenómeno de estudio a partir de la observación y el análisis de sus propiedades, sin manipular las variables ni establecer relaciones causales, lo cual es coherente con el enfoque adoptado en la presente investigación.

En ese sentido, el presente estudio describe los valores adoptados por el factor R a partir del análisis estructural de los tanques elevados sometidos a distintos escenarios sísmicos normativos, manteniendo constantes las condiciones geométricas y estructurales de los modelos analizados. Asimismo, el nivel descriptivo se evidencia en la comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis estático no lineal (Pushover), lo cual permite observar la variación del factor R frente a diferentes demandas sísmicas, contribuyendo a una mejor comprensión de la respuesta sísmica de los tanques elevados de concreto armado, sin pretender establecer relaciones de causa–efecto.

4.2 Ámbito temporal y espacial

Temporal

El alcance temporal del proyecto de tesis “Evaluación del factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado considerando la demanda sísmica de la Norma Técnica E.030 del Perú”, se desarrolló entre los periodos 2023-2024.

Espacial

Se desarrolló en el contexto del territorio nacional peruano, considerando las cuatro zonas sísmicas definidas por la Norma Técnica E.030, la cual establece distintos niveles de aceleración sísmica según el riesgo geotectónico del país. De manera específica, el análisis se enfoca en tanques elevados de concreto armado ubicados en instituciones educativas públicas, representativas de cada una de las zonas sísmicas: Z1 (0.10g), Z2 (0.25g), Z3 (0.35g) y Z4 (0.45g). Esta delimitación geográfica permite evaluar el comportamiento del factor R frente a diferentes demandas sísmicas normativas, aplicadas a una infraestructura esenciales como lo son los tanques elevados de agua potable.

4.3 Población y muestra

Población

La población está conformada por los tanques elevados de concreto armado distribuidos en las cuatro zonas sísmicas del Perú, los cuales constituyen infraestructuras críticas por su función en el almacenamiento y suministro de agua potable, así como por su relevancia en la gestión del riesgo sísmico en instituciones educativas y centros de atención a la población.

Desde el punto de vista metodológico, Hernández et al. (2022) definen la población como el conjunto total de elementos, unidades o casos que comparten características

comunes y que resultan pertinentes para el cumplimiento de los objetivos de una investigación. Dichas unidades pueden corresponder a personas, instituciones, objetos o sistemas, siempre que respondan a los criterios previamente establecidos por el investigador. Bajo este enfoque, la población del presente estudio está constituida por los tanques elevados de concreto armado ubicados en distintas regiones del país y distribuidos en las zonas sísmicas Z1, Z2, Z3 y Z4, según la Norma Técnica E.030.

Muestras

La muestra está conformada por cuatro tanques elevados de concreto armado, cada uno ubicado en una institución educativa pública representativa de una de las zonas sísmicas definidas por la Norma Técnica E.030: Z1 (0,10 g) perteneciente al Instituto de Educación Superior Tecnológico Pedro A. del Águila Hidalgo, situado en la región de Loreto, provincia de Maynas, distrito de Iquitos, Z2 (0,25 g) perteneciente a la Institución Educativa Integrada: Warma Kuyay, ubicado en la región de Apurímac, provincia de Andahuaylas y distrito de San Jerónimo, Z3 (0,35 g) perteneciente al Instituto Educativa Secundaria San Juan, ubicado en la región de Puno, provincia de Puno y distrito de Huata y Z4 (0,45 g) perteneciente al Instituto Educativa I.E.S.T.P. Manuel Yarlequé Espinoza, ubicado en la región de Piura, provincia de Piura y distrito de Tacataos. La selección de estos casos se realizó mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, considerando criterios de representatividad geográfica, disponibilidad de información estructural y correspondencia con las condiciones normativas aplicables al análisis sísmico estructural.

Desde el punto de vista metodológico, Ñaupas et al. (2021) señalan que la muestra es un subconjunto representativo de la población que permite analizar un fenómeno de estudio de manera viable, siempre que conserve las características esenciales de dicha población. En ese sentido, los cuatro tanques elevados seleccionados representan distintos niveles de amenaza sísmica normativa, lo que permite analizar el comportamiento del factor

de modificación de la respuesta sísmica (R) bajo condiciones reales de diseño, sin necesidad de evaluar la totalidad de casos existentes.

4.4 Instrumento

Los instrumentos de recolección de datos constituyen herramientas fundamentales en el proceso de investigación, ya que permiten obtener, registrar y organizar la información necesaria para el análisis de las variables de estudio. Según Hernández et al. (2022) en las investigaciones cuantitativas estos instrumentos deben garantizar la precisión, confiabilidad y reproducibilidad de los datos obtenidos.

El principal instrumento de recolección de datos fue el software de análisis estructural SAP2000 (versión de prueba), mediante el cual se realizó el modelado, análisis dinámico y análisis estático no lineal (Pushover) de los cuatro tanques elevados de concreto armado correspondientes a las zonas sísmicas Z1, Z2, Z3 y Z4 del Perú. A través de este software se obtuvieron los resultados necesarios para la determinación del factor R , así como de sus componentes: factor de ductilidad (R_{μ}), factor de sobrerresistencia (R_S) y factor de redundancia (R_R).

Asimismo, se emplearon como instrumentos auxiliares los planos estructurales originales, memorias de cálculo y normas técnicas vigentes, tales como la Norma Técnica E.030 del Reglamento Nacional de Edificaciones, el documento ATC-19 (1995) y la ASCE/SEI 7-22 (2022), los cuales permitieron una correcta definición de materiales, secciones estructurales, cargas y parámetros sísmicos. Los resultados obtenidos fueron sistematizados mediante hojas de cálculo (Microsoft Excel) para su análisis e interpretación.

4.5 Procedimientos

Según Ñaupas et al. (2021), un procedimiento metodológico se define como una secuencia ordenada y lógica de actividades que se siguen para ejecutar un proceso de

investigación y alcanzar los objetivos planteados, estableciendo el orden y la coherencia necesarios para garantizar la consistencia y validez de los resultados obtenidos.

En ese sentido, el procedimiento empleado en la presente investigación consistió en una secuencia ordenada de etapas que incluyó el análisis de los planos estructurales, el modelado de los tanques elevados en el software SAP2000, la aplicación del análisis estático no lineal (Pushover) y la iteración de los factores de modificación de la respuesta sísmica conforme a los criterios establecidos en el ATC-19 (1995). Asimismo, el procesamiento y sistematización de los cálculos se realizó mediante hojas de cálculo, siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica E.030 del Perú y, de manera complementaria, los lineamientos del ASCE/SEI 7-22 (2022).

4.6 Análisis de datos

Según Hernández et al. (2022), el análisis de datos es el proceso mediante el cual se examinan, depuran, transforman e interpretan los datos recolectados con el fin de extraer información significativa y dar respuesta a los objetivos de investigación.

En la presente investigación, el análisis de datos se realizó procesando los resultados obtenidos del modelado en SAP2000 y del análisis Pushover, organizando los valores en Microsoft Excel para calcular e interpretar el factor R mediante el procedimiento ATC-19 (1995) y contrastando estos valores con los establecidos por las Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 (2022).

4.7 Consideraciones éticas

Se desarrolló conforme a los principios establecidos en el Reglamento del Comité de Ética de Investigación de la Universidad Tecnológica de los Andes, (2020), el cual define de manera clara los deberes fundamentales del investigador relacionados con la integridad académica, la transparencia y el respeto a los valores humanos e institucionales. Según dicho reglamento, el investigador debe actuar con responsabilidad, honestidad, rigurosidad

científica y claridad en todas las etapas del proceso investigativo (art. 11.2), así como respetar la dignidad humana, la diversidad, la privacidad y la confidencialidad de las personas o entidades vinculadas (art. 11.3). En esta investigación, aunque no se incluyeron sujetos humanos, se utilizaron planos estructurales y memorias de cálculo de tanques elevados pertenecientes a instituciones educativas públicas, los cuales fueron manejados con reserva, sin fines de lucro y con fines estrictamente académicos (art. 11.5). Además, se cumplió con las disposiciones legales vigentes y se establecieron mecanismos transparentes para evitar conflictos de intereses (art. 11.8 y 11.10). Estas acciones garantizan que el estudio respete el marco ético institucional y contribuya de manera responsable al avance del conocimiento técnico en ingeniería estructural.

V. Resultados y discusiones

5.1 Resultados

5.1.1 Resultados del objetivo general

Se obtuvieron los siguientes resultados a partir de la verificación realizada en los cuatro tanques elevados para cada una de las zonas sísmicas, bajo los parámetros sísmicos de la Norma E.030. Los siguientes resultados fueron obtenidos a partir de la iteración del factor R original y fueron reduciéndose sin comprometer fallas en la estructura, aplicando el ATC-19, en la Tabla 3 se detalla estos valores.

Tabla 3

Resultados de la iteración del factor R según el ATC-19

Tanques	R iterado	R_{μ}	R_S	R_R	R
Z1	8	3.29	8.91	0.71	20.80
	6	3.29	6.69	0.71	15.60
	4	3.29	4.46	0.71	10.40
	3	3.29	3.34	0.71	7.80
	2	3.29	2.23	0.71	5.21
	1.1	3.29	1.23	0.71	2.86
Z2	8	3.79	3.78	0.71	10.16
	6	3.79	2.82	0.71	7.62
	4	3.79	1.89	0.71	5.08
	3	3.79	1.42	0.71	3.81
	2.4	3.79	0.94	0.71	2.54
Z3	8	2.55	4.62	0.71	8.35
	7	2.55	4.04	0.71	7.31
	6	2.55	3.46	0.71	6.26
	5	2.55	2.89	0.71	5.22
	4	2.55	2.31	0.71	4.18
	3	2.55	1.73	0.71	3.13
	2.33	2.55	1.35	0.71	2.43
Z4	6	2.39	3.83	0.71	6.49
	4	2.39	3.83	0.71	4.33
	3.5	2.39	2.23	0.71	3.79

Nota. Esta tabla muestra los resultados de la iteración del factor de reducción sísmica R según el procedimiento del ATC-19, aplicado a distintos tanques estructurales.

Adicionalmente se usó la norma ASCE/SEI 7-22 que nos indica usar un factor $R=2$ para el diseño de tanques elevados, usando esto y rediseñando la estructura se obtuvo los siguientes resultados en la Tabla 4 usando la metodología del ATC-19.

Tabla 4

Resultados del factor R calculado con ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22

N°	Tanques	Factor de reducción				
		R rediseño	R_μ	R_s	R_R	R
1	Z1	2	3.29	2.23	0.71	5.21
2	Z2	2	3.03	1.47	0.71	3.16
3	Z3	2	2.21	1.91	0.71	2.99
4	Z4	2	2.66	1.39	0.71	2.62

Nota. La tabla presenta los valores del factor R calculado mediante ATC-19 para un modelo con $R=2$, según ASCE/SEI 7-22. Estos resultados permiten evaluar la capacidad sísmica real de los tanques rediseñados en función de su ductilidad, sobrerresistencia y redundancia.

5.1.2 Resultados del objetivo específico 1

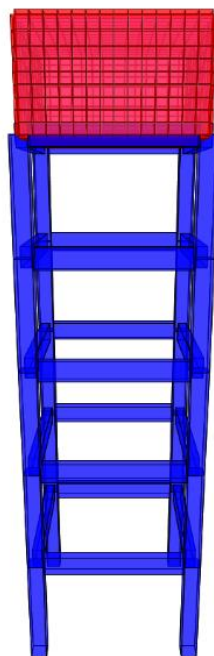
5.1.2.1 Datos generales y condiciones de diseño para la zona 1

5.1.2.1.1 Descripción de los tanques utilizados en el modelado. En la Tabla 5 se presenta los detalles del tanque elevado perteneciente al Instituto de Educación Superior Tecnológico Pedro A. del Águila Hidalgo, situado en la región de Loreto, provincia de Maynas, distrito de Iquitos. Esta estructura fue diseñada en el año 2023 y su construcción se completó en 2024, cumpliendo con los criterios de diseño estructural y normas sísmicas vigentes en el Perú. El tanque tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 45 m³, su diseño considera tanto la estabilidad frente a cargas gravitacionales como la resistencia a fuerzas sísmicas, incorporando elementos estructurales de concreto armado que permiten garantizar la integridad de la estructura bajo diferentes escenarios de carga.

Tabla 5*Refuerzos de los elementos estructurales zona 1*

Elemento estructural	Dimensiones	Acero longitudinal	Acero transversal
Columnas	0.50x0.50 m	16Ø5/8"	Ø3/8" 1@0.05 8@0.10 R@0.25
Vigas	0.30x0.60 m	6Ø5/8" más 2Ø1/2".	Ø3/8" 1@0.05 8@0.10 R@0.25
Muro del contenedor	e=0.20m	2Ø1/2"@0.25	2Ø5/8"@0.25
Losa inferior del contenedor	e=0.20m	2Ø1/2"@0.25	2Ø5/8"@0.25
Losa Techo	e=0.20m	2Ø1/2"@0.25	2Ø1/2"@0.25

Nota. La tabla muestra las dimensiones y el refuerzo de acero longitudinal y transversal adoptados para los principales elementos estructurales del tanque elevado en la zona sísmica 1.

Figura 8*Detalle general del tanque de la zona sísmica 1*

Nota. Esta figura nos muestra el tanque elevado de la zona sísmica 1 está construido de concreto armado. El contenedor superior tiene una capacidad de 45 m³ de agua, este modelo de tanque fue utilizado como base para el proceso de modelado estructural y diseño sísmico.

5.1.2.1.2 Propiedad de los materiales empleados en el tanque elevado

Tabla 6

Propiedades de los materiales zona 1

Material	Propiedades	Vigas	Columnas	Contenedor
Concreto	Peso específico, γ_c (kgf/m^3)	2400	2400	2400
	Densidad, ρ_c ($kgf * s^2/m^4$)	244.73	244.73	244.73
	Resistencia a la Compresión, f'_c (kg/cm^2)	280	280	280
	Módulo de Elasticidad, E_c (kg/cm^2)	250998.01	250998.01	250998.01
	Coeficiente de Poisson, ν	0.15	0.15	0.15
	Módulo de Corte, G_c (kg/cm^2)	109129.57	109129.57	109129.57
Acero de refuerzo	Peso Específico, γ_s (kgf/m^3)	7849.05	7849.05	7849.05
	Densidad, ρ_s ($kgf * s^2/m^4$)	800.38	800.38	800.38
	Resistencia a la fluencia, f_y (kg/cm^2)	4200	4200	4200
	Módulo de Elasticidad, E_s (kg/cm^2)	2×10^6	2×10^6	2×10^6

Nota. Esta tabla nos muestra las propiedades de los materiales del tanque elevado de la zona 1 empleados para su diseño en el programa SAP2000.

5.1.2.1.3 Parámetros sísmicos

Tabla 7

Parámetros sísmicos para la zona 1

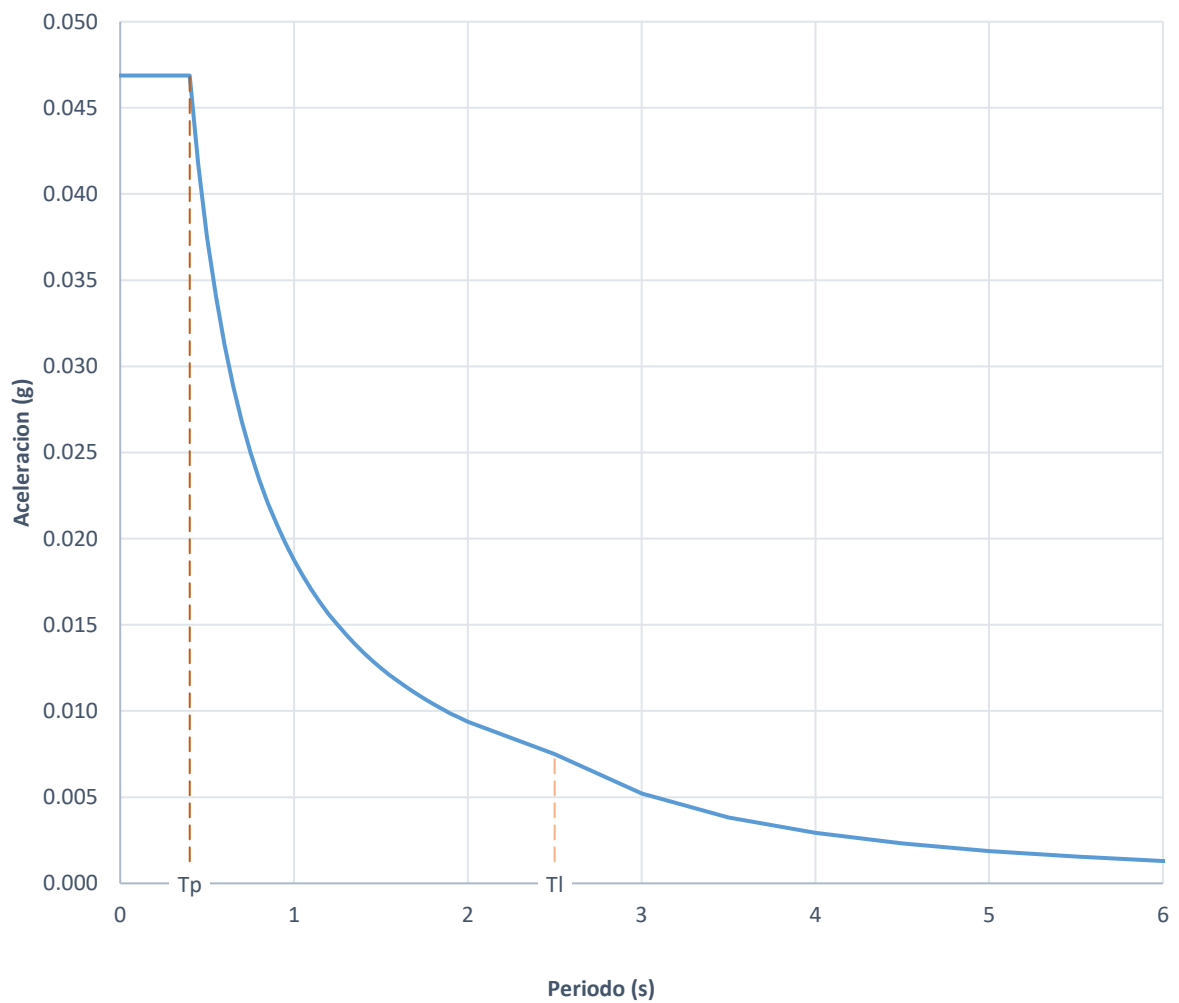
Parámetros	Zona 1
Factor de zona (Z)	0.10
Factor de suelo (S)	1
Periodo que define la plataforma del factor C (TP)	0.4
Periodo que define el desplazamiento constante (TL)	2.5
Factor de uso (U)	1.5
Factor R	8

Nota. Esta tabla nos muestra los parámetros sísmicos aplicados en el programa SAP2000 para el diseño del tanque elevado de concreto armado respecto a la zona 1.

Seguidamente se detalla los espectros de diseño sísmicos en la Figura 9 *Espectro de diseño usado para la zona sísmica 1* para los modelos de los tanques elevados rectangulares de concreto armado.

Figura 9

Espectro de diseño usado para la zona sísmica 1



Nota. Esta figura nos muestra el espectro de diseño presentado corresponde al comportamiento sísmico esperado para un tanque elevado de concreto armado ubicado en la zona sísmica 1.

5.1.2.1.4 Combinaciones de cargas. Para la combinación de cargas consideramos lo dispuesto en la Norma Técnica de Concreto Armado E.060, tal como se muestra a continuación.

Tabla 8

Combinación de cargas E.060 para la zona 1

Combinación de carga según E.060	
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV$	Comb. 1
$CU = 1.25 (CM + CV) + CS$	Comb. 2
$CU = 1.25 (CM + CV) - CS$	Comb. 3
$CU = 0.9 CM + CS$	Comb. 4
$CU = 0.9 CM - CS$	Comb. 5
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV + 1.4 CL$	Comb. 6

Nota. En esta tabla se presentan las combinaciones de carga establecidas por la Norma Técnica E.060 para la evaluación estructural en la zona sísmica Z1. Las combinaciones consideran los efectos de las cargas muertas (CM), cargas vivas (CV) y cargas sísmicas (CS). Estas expresiones se utilizan para verificar la seguridad y resistencia de los elementos estructurales del tanque elevado, adaptada según Norma Técnica E.060 (2009).

Donde:

CM : Carga muerta.

CV : Carga viva.

CL : Carga por la presión de fluidos.

CS : Carga por efectos de cargas producidas por sismo.

5.1.2.2 Análisis de diseño según la Norma Técnica E.030. Para el diseño se realizó mediante un modelo computacional Sap2000 (versión trial), con el que se obtienen los resultados de los análisis estáticos y dinámicos del tanque elevado para la zona 1, con el factor de modificación de respuesta $R=8$ que fue considerada en el diseño.

Tabla 9

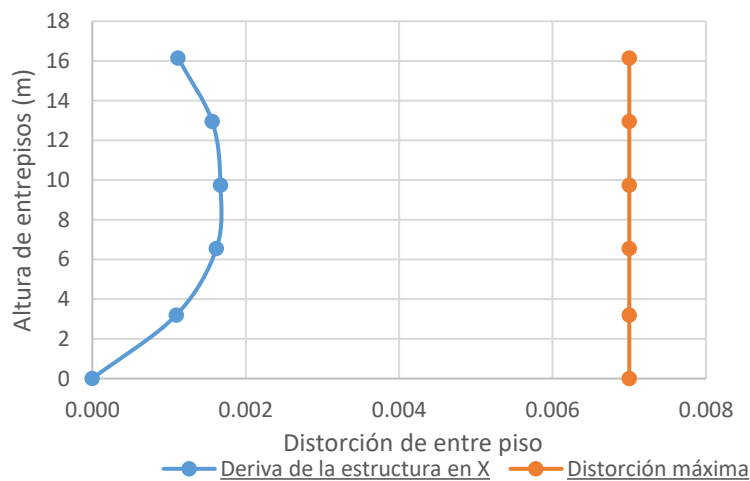
Resultados de parámetros básicos de diseño según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 1

Parámetros	Resultados
Periodo fundamental, T (s)	0.667
Cortante estático, V_s (kgf)	4852.32
Cortante dinámico, V_d (kgf)	4389.63
Momento (kgf.m)	67938.72
Cuantía (%)	1.37

Nota. En esta tabla se presentan los principales parámetros de diseño sísmico obtenidos para la zona Z1, considerando los criterios establecidos en las Normas Técnicas E.030 y E.060. Los resultados incluyen el período fundamental, los valores de cortante estático y dinámico, el momento máximo y la cuantía de refuerzo. Estos parámetros permiten evaluar el comportamiento estructural del tanque elevado frente a la demanda sísmica.

Figura 10

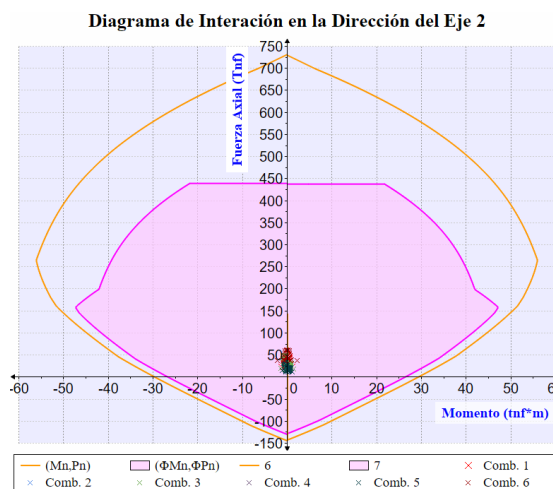
Distorsión de entrepiso zona 1



Nota. La figura muestra la variación de la distorsión de entrepiso a lo largo de la altura de la estructura para la zona sísmica Z1, considerando la dirección X. Se compara la deriva obtenida en el análisis estructural con el valor máximo permitido por la normativa vigente. Estos resultados permiten verificar el cumplimiento de los límites de deformación y evaluar el desempeño sísmico del tanque elevado.

Figura 11

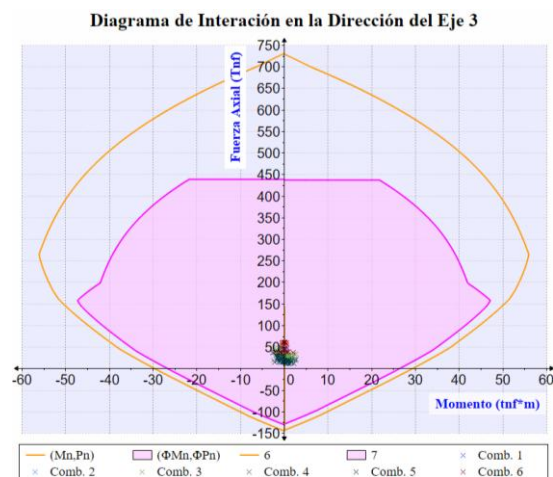
Diagrama de interacción de la columna zona 1 del eje 2



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 1.

Figura 12

Diagrama de interacción de la columna zona 1 del eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 1.

Tabla 10*Verificación de cortante en columnas para la zona 1*

Cortante	Componente	Resultado (kgf)
Cortante última más crítica.	V2	1444.07
	V3	1177.30
Cortante resistente (V_c+V_s)	V2	33172.11
	V3	33172.11

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente ($V_c + V_s$) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z1. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado. La comparación entre ambos valores permite verificar que la capacidad resistente de las columnas es suficiente frente a la demanda sísmica, garantizando la seguridad estructural.

Tabla 11*Verificación de diseño de vigas para la zona 1*

Cortantes y Momentos	Resultado
Cortante último más crítico (kgf)	11518.25
Cortante resistente (kgf)	34263.74
Momento último más crítico (kgf.m)	3620.46
Momento resistente (kgf.m)	12015.47

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante y momento último más críticos, así como las resistencias correspondientes de las vigas del tanque elevado en la zona sísmica Z1. Los resultados permiten comparar la demanda estructural con la capacidad resistente del elemento. Esta verificación asegura que las vigas cumplen con los criterios de seguridad establecidos por la normativa de diseño estructural.

5.1.2.3 Pushover – análisis estático no lineal

5.1.2.3.1 Configuración y ejecución del análisis no lineal Pushover. Para evaluar la capacidad estructural no lineal del tanque ante la acción sísmica, se desarrolló un análisis Pushover. Este procedimiento consiste en aplicar cargas laterales incrementales a la estructura hasta alcanzar su condición límite, permitiendo observar su comportamiento más allá del rango elástico. A través de este enfoque, se identifican los mecanismos de falla, la secuencia de plastificación de los elementos y la capacidad de disipación de energía del sistema estructural.

El análisis Pushover resulta fundamental para estimar el factor de reducción sísmica R , ya que proporciona una visión más realista del desempeño estructural frente a eventos sísmicos severos. Al comparar la curva de capacidad obtenida con la demanda sísmica, es posible determinar el nivel de ductilidad y sobrerresistencia de la estructura, elementos clave para ajustar el diseño y garantizar la seguridad estructural conforme a los estándares normativos vigentes. El proceso inició con la creación de una carga gravitacional no lineal, la cual incluyó:

- Carga muerta (escala 1.0).
- Carga viva (escala 0.5).
- Presión del agua (escala 1.0).

Figura 13

Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 1

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: CGNL [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	Carga muerta	1.
Load Pattern	Carga viva	0.5
Load Pattern	Presion Agua	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: Masa 1 CV 0.5

Other Parameters:

- Load Application: [Full Load] [Modify/Show...]
- Results Saved: [Final State Only] [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: [Default] [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Nota. La figura muestra la configuración del caso de carga gravitacional no lineal utilizada en el análisis estructural del tanque elevado para la zona sísmica Z1 en el software SAP2000. Se consideran las cargas muertas, cargas vivas y la presión del agua, aplicadas bajo un análisis estático no lineal. Esta configuración permite evaluar el comportamiento real de la estructura antes de la aplicación de las cargas sísmicas.

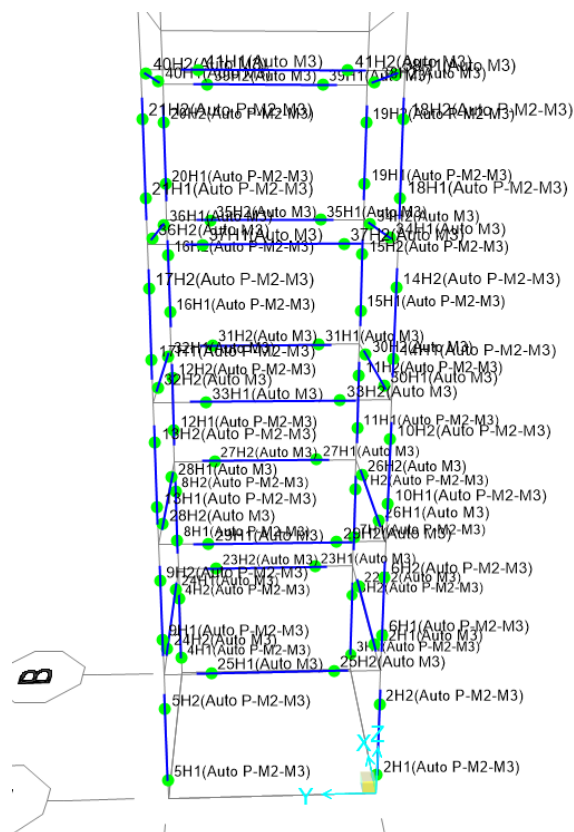
Esta carga fue definida como tipo Static – Nonlinear, y utilizada como carga base para el análisis progresivo, posteriormente se asignaron rotulas plásticas en las vigas y columnas conforme a la norma ASCE 41-13:

- Para las vigas se empleó la Tabla 10-7 (Concrete Beams – Flexure, M3), con rotulas ubicadas a distancias relativas basadas en la geometría de cada viga.

- Para las columnas se empleó la Tabla 10-8 (Concrete Columns), con la ubicación de rotulas según el nivel, respecto al primer piso la rótula inferior se ubicó a 0.001 por ausencia de viga inferior.

Figura 14

Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z1



Nota. La figura muestra la ubicación de las rótulas plásticas asignadas a las columnas y vigas del tanque elevado en el modelo correspondiente a la zona sísmica Z1. Su aplicación es fundamental para identificar los mecanismos de falla, la ductilidad estructural y el desempeño sísmico global del sistema.

A continuación, se creó un Load Case tipo Pushover, de tipo Static – Nonlinear, tomando como condición inicial el estado final de la carga gravitacional no lineal previamente definida, como patrón de carga se utilizó el sismo estático en la dirección X, y se configuraron parámetros adicionales:

- En aplicación de carga se puso un punto de control de desplazamiento.

- La magnitud de desplazamiento objetivo se puso de 0.5 unidades.
- El punto de control de desplazamiento a elegir fue el que es ubicado en el medio de la mitad de la masa del agua.

Para optimizar el proceso, se ajustaron los parámetros numéricos:

- Máximo de pasos estáticos: 150.
- Máximo de pasos nulos: 30.
- Resultados guardados en múltiples estados (mínimo 10 y máximo 100).

Figura 15

Configuración para Pushover zona 1

S Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: PUSH X [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case [CGNL]

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	Sismo Estatico X	1.
Load Pattern	Sismo Estatico X	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: Masa 1 CV 0.5

Other Parameters:

- Load Application: [Displ Control] [Modify/Show...]
- Results Saved: [Multiple States] [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: [User Defined] [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

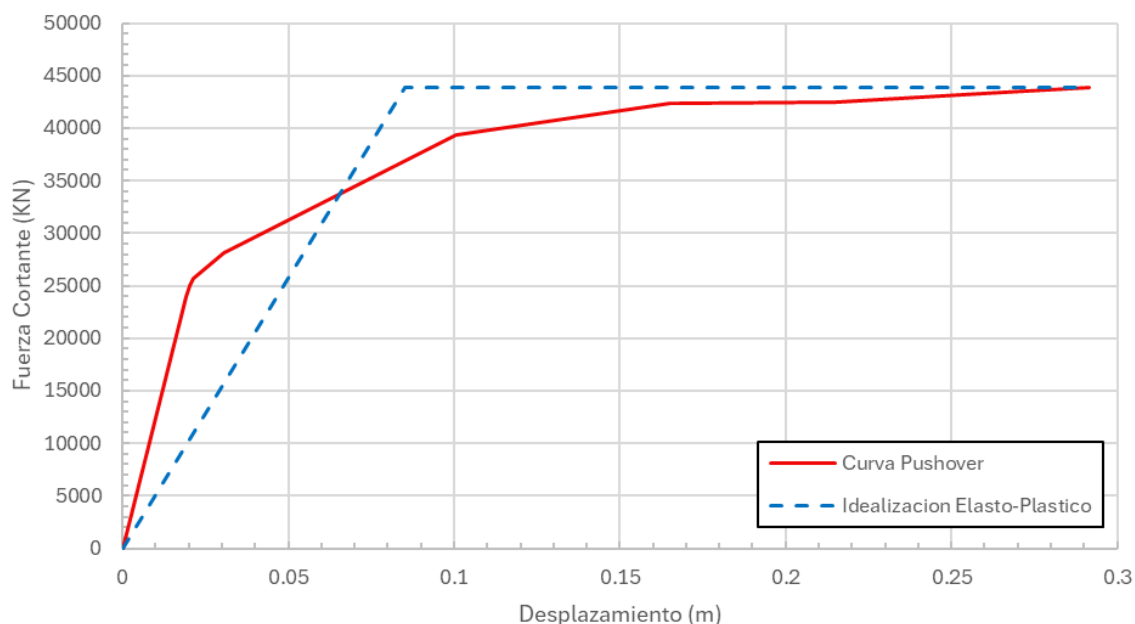
Nota. La figura presenta la configuración del caso de carga no lineal estático (Pushover) aplicada al tanque elevado en la zona sísmica Z1. Se utilizó un patrón de carga sísmica en la dirección X, con control por desplazamiento y análisis no lineal activado. Esta configuración permite evaluar la capacidad estructural, la formación de rótulas plásticas y el comportamiento inelástico global del sistema.

Con esta configuración, el modelo fue ejecutado con éxito, obteniéndose la curva capacidad, que permitió evaluar el comportamiento no lineal del sistema estructural.

5.1.2.3.2 Curva Pushover. Se determinaron las curvas Pushover para el tanque elevado rectangular de concreto armado a partir del análisis que se hizo anteriormente y considerando los parámetros sísmicos, con el cual se podrá obtener el factor de modificación de respuesta sísmica, las curva Pushover con su respectiva idealización elasto-plásticas se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 1



Nota. La figura muestra la curva Pushover del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z1, representando la relación entre el desplazamiento lateral y la fuerza cortante basal. La idealización elasto-plástica permite identificar el punto de fluencia y la capacidad última de la estructura. Esta curva se utiliza para evaluar la ductilidad, la sobrerresistencia y el comportamiento inelástico del sistema estructural.

5.1.2.4 Factor de reducción para la determinación de R

5.1.2.4.1 Factor de reducción por ductilidad. Se calculo el factor de reducción por ductilidad mediante la ecuación de Mirada y Bertero (1994). En la tabla 12 se muestra el resultado obtenido para la zona sísmica 1.

Tabla 12

Factor de ductilidad (R_{μ}) zona 1

Tanque	Factor de reducción por ductilidad					
	Δ_{max}	Δ_y	$\mu_{desplaz.}$	$T(seg.)$	ϕ	R_{μ}
Z1	0.29163	0.085	3.43	0.667	1.06	3.29

Nota. La tabla presenta el cálculo del factor de reducción por ductilidad (R_{μ}) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z1, a partir de los desplazamientos máximos (Δ_{max}) y de fluencia (Δ_y) obtenidos del análisis Pushover, también se incluyen el período fundamental, el factor ϕ y el valor final de R_{μ} .

5.1.2.4.2 Factor de reducción sobre resistencia. Se calculó el Factor de reducción por sobrerresistencia (R_s), igual al cociente entre el cortante basal máximo (V_{max}) y la cortante de diseño (V_d). En la Tabla 13 se muestra el resultado obtenido para el tanque Z1.

Tabla 13

Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 1

Tanques	Factor de reducción por sobrerresistencia		
	$V_{max}(kgf)$	$V_d(kgf)$	R_s
Z1	43819.55	35750.25	1.23

Nota. La tabla muestra el cálculo del factor de sobrerresistencia (R_s) del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z1, obtenido a partir de la relación entre la fuerza cortante máxima (V_{max}) y la fuerza de diseño (V_d) extraídas de la curva Pushover. Este factor representa la capacidad adicional de resistencia estructural más allá del nivel de diseño.

5.1.2.4.3 Factor de reducción de por redundancia. El factor de reducción por redundancia R_R se determinó mediante el literal 4.5, capítulo 4 del ítem 4.5.3 del código internacional ATC 19 (Structural Modification Factors). Para el caso de tanques elevados con soporte aporticado los números de ejes de columnas es reducido por lo que el factor de reducción por redundancia será igual a 0.71.

5.1.2.5 Ajuste del factor R mediante análisis iterativo. Una vez obtenidos los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica R a través del método propuesto por el ATC-19 (1995), con el objetivo de verificar la capacidad real del sistema.

Este proceso consistió en reducir el valor del factor R en el espectro hasta alcanzar el punto en el que la estructura mantuviera un Capacity Ratio (relación de capacidad) menor a 1.0.

Tabla 14

Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 1

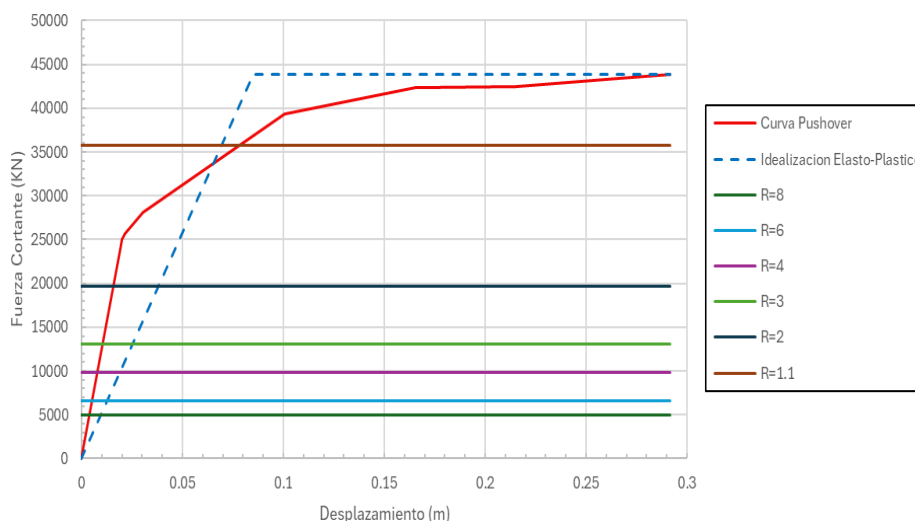
Tanques	R iterado	R_μ	R_s	R_R	R
Z1	8	3.29	8.91	0.71	20.80
	6	3.29	6.69	0.71	15.60
	4	3.29	4.46	0.71	10.40
	3	3.29	3.34	0.71	7.80
	2	3.29	2.23	0.71	5.20
	1.1	3.29	1.23	0.71	2.86

Nota. La tabla presenta los resultados de la iteración del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z1, considerando los factores de ductilidad (R_μ), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_r), conforme a la metodología ATC-19 (1995). El valor final de R se obtiene como el producto de dichos factores para distintos valores de R iterado.

En la figura 17 se muestra la curva Pushover obtenida a partir del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y las curvas horizontales.

Figura 17

Comparación de la curva Pushover con distintos factores R para la zona 1



Nota. La figura muestra la comparación de la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z1 con diferentes valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R). Se observa cómo la reducción de fuerzas sísmicas varía en función del valor de R adoptado.

5.1.2.5.1 Factor de modificación de respuesta sísmica. El factor de modificación de respuesta sísmica será igual al producto del factor de reducción por ductilidad con el factor de reducción por sobrerresistencia y el factor de reducción por redundancia.

Tabla 15

Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 1

Tanques	Factor de reducción			
	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z1	3.29	1.23	0.71	2.86

Nota. La tabla presenta los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) obtenidos mediante el análisis Pushover para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z1. El valor final de R se calcula como el producto de los factores de ductilidad (R_{μ}), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_R), reflejando el comportamiento inelástico real de la estructura frente a la demanda sísmica.

5.1.2.6 Comparación del diseño y rediseño basado en la Norma ACE/SEI 7-22.

Adicionalmente, se desarrolló un modelo estructural considerando la norma ASCE/SEI 7-22 para poder evaluar ambos diseños y compararlos.

5.1.2.6.1 Parámetros de rediseño

Tabla 16

Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 versus ASCE/SEI 7-22

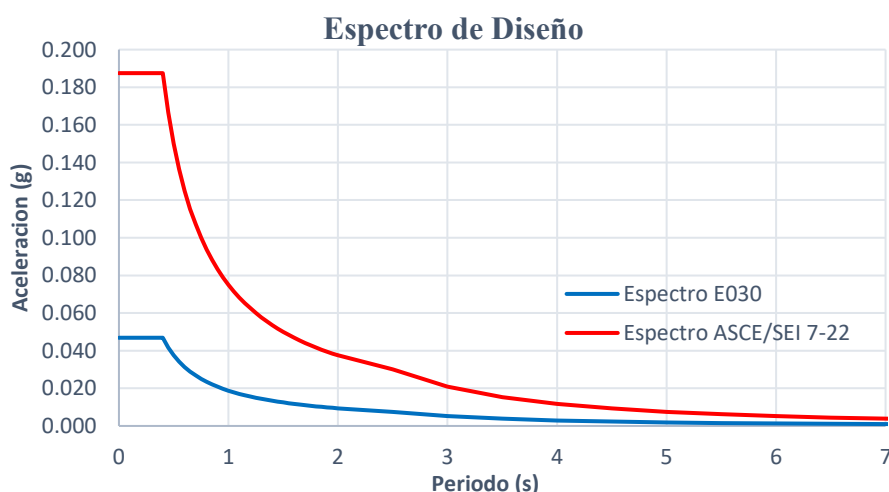
zona 1

Parámetros	E.030	ASCE/SEI 7-22
Factor de reducción sísmica R	8	2
Periodo fundamental, T (s)	0.667	0.667
Cortante estático, V_s (kg.f)	4852.32	19409.26
Cortante dinámico, V_d (kg.f)	4389.63	17542.53
Momento (kgf * m)	67938.72	271504.90
Cuantía (%)	1.37	1.37

Nota. En la tabla se observa que el uso de un factor de reducción sísmica menor en ASCE/SEI 7-22 ($R = 2$) genera mayores fuerzas internas, incrementando los valores de cortante y momento.

Figura 18

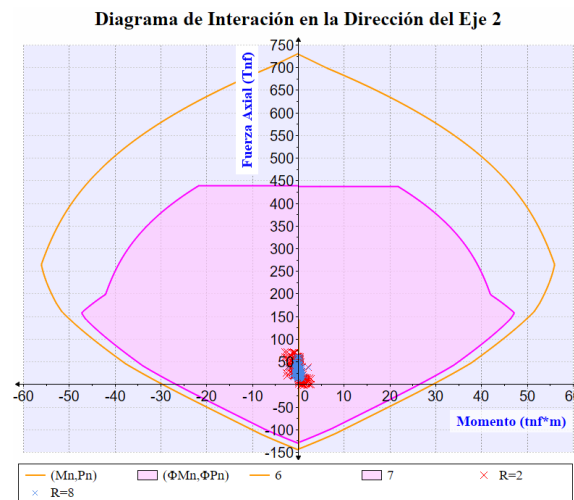
Espectro de diseño Norma Técnica E.030 $R=8$ y ASCE/SEI 7-22 $R=2$ zona 1



Nota. El gráfico muestra el espectro de diseño sísmico generado conforme a la Norma Técnica E.030 para la zona sísmica correspondiente, se observa que la aceleración espectral es mayor para periodos cortos.

Figura 19

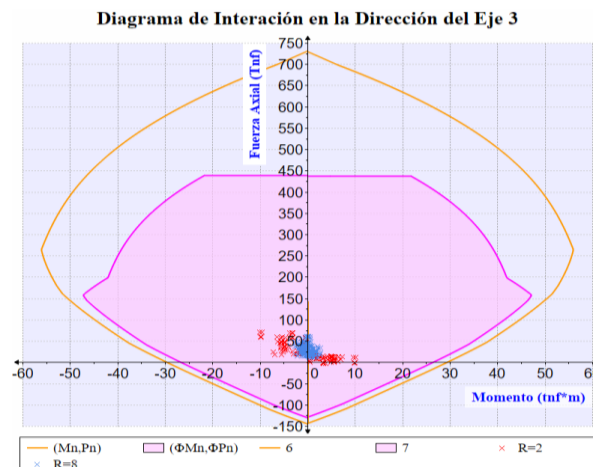
Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 1 en el eje 2



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 1.

Figura 20

Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 1 en el eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 1.

Tabla 17

Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 1

Cortante	Componente	Norma Técnica E.030	ASCE/SEI 7-22
		R=8 (kgf)	R=2 (kgf)
Cortante última más crítica.	V2	1444.07	4625.53
	V3	1177.30	1484.11
Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	33172.11	33172.11
	V3	33172.11	33172.11

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente (Vc + Vs) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z1. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado. La comparación entre ambos valores permite verificar que la capacidad resistente de las columnas es suficiente frente a la demanda sísmica, garantizando la seguridad estructural.

Tabla 18

Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 1

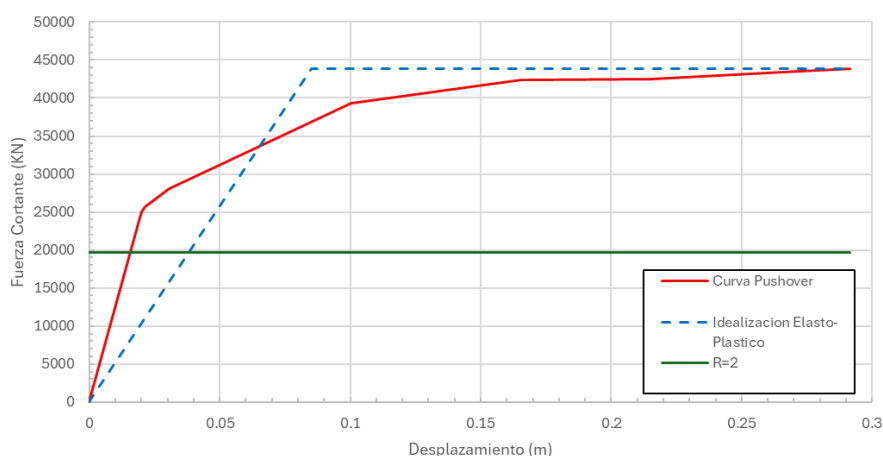
Cortante y Momento	Norma Técnica E.030	ASCE/SEI 7-22
	R=8	R=2
Cortante último más crítico (kgf)	7704.52	13082.11
Cortante Resistente (kgf)	34263.74	34263.74
Momento último más crítico (kgf.m)	3620.46	12280.09
Momento resistente (kgf.m)	12015.47	12015.47

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante y momento último más críticos, así como las resistencias correspondientes de las vigas del tanque elevado en la zona sísmica Z1. Los resultados permiten comparar la demanda estructural con la capacidad resistente del elemento. Esta verificación asegura que las vigas cumplen con los criterios de seguridad establecidos por la normativa de diseño estructural.

5.1.2.6.2 Curva Pushover. Vemos la curva Pushover obtenida del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y la curva horizontal calculado con ATC-19 para $R=2$.

Figura 21

Curva Pushover calculado con el ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 en la zona 1



Nota. La figura presenta la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z1, considerando un factor de reducción sísmica $R = 2$ según el ASCE/SEI 7-22, se observa que la demanda sigue por debajo.

Posteriormente, se evaluó el nuevo diseño utilizando el procedimiento ATC-19, el cual permitió obtener los valores de R alcanzables. En la Tabla 19 veremos este resultado.

Tabla 19

Factor R calculado con ATC-19 para el modelo, con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 zona sísmica 1

Tanques	Factor de reducción sísmica			
	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z1	3.29	2.23	0.71	5.21

Nota. La tabla muestra el valor del factor de modificación de la respuesta sísmica R obtenido mediante la metodología ATC-19 (1995) para el tanque elevado de la zona sísmica Z1, considerando un rediseño con $R = 2$ según el ASCE/SEI 7-22.

5.1.2.7 Resultados del diseño y rediseño para la zona 1. En la siguiente Tabla 20, se podrá observar el factor de modificación de respuesta sísmica obtenido mediante el ATC-19 tanto para el diseño original y el modificado con el ASCE/SEI 7-22.

Tabla 20

Resultados del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño y rediseño del tanque Z1

Modelos	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z1 de diseño	3.29	1.23	0.71	2.86
Z1 de rediseño	3.29	2.23	0.71	5.21

Nota. La tabla presenta la comparación de los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica R obtenidos mediante la metodología ATC-19 (1995) para el tanque Z1 en su condición de diseño original y rediseño según el ASCE/SEI 7-22. Se observa un incremento de R de 2.86 a 5.21, debido principalmente al aumento del factor de sobrerresistencia. Este resultado evidencia que el rediseño mejora la capacidad estructural de disipación de energía sísmica.

5.1.3 Resultados del objetivo específico 2

5.1.3.1 Datos generales y condiciones de diseño para la zona 2

5.1.3.1.1 Descripción de los tanques utilizados en el modelado. En la Tabla 21 se presenta los detalles del tanque elevado de la Institución Educativa Integrada: Warma Kuyay, ubicado en la región de Apurímac, provincia de Andahuaylas y distrito de San Jerónimo. Esta estructura fue diseñada en el año 2021 y construida el 2024, el cual tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 12.60 m³. a continuación, se detallan las características del tanque elevado.

Tabla 21

Refuerzos de los elementos estructurales zona 2

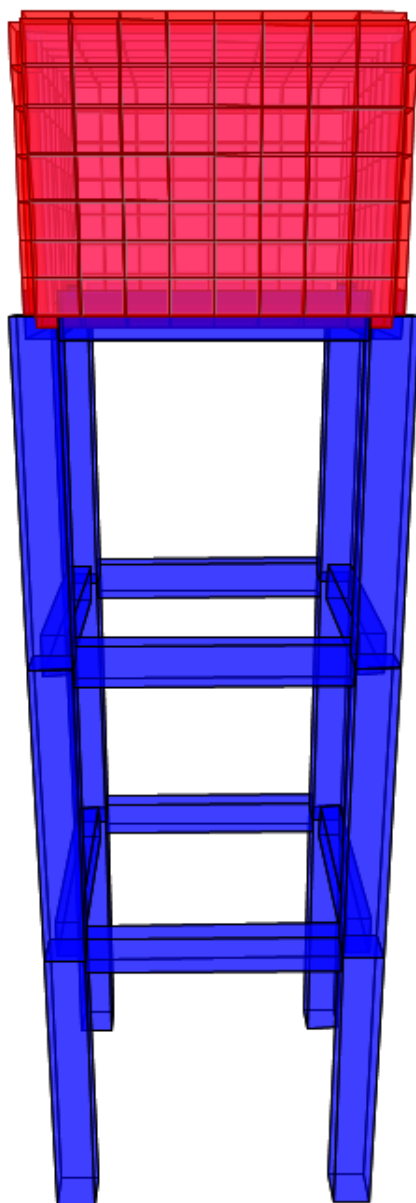
Elemento estructural	Dimensiones	Acero longitudinal	Acero transversal
Columnas	0.40x0.40 m	4Ø3/4" más 4Ø1/2".	Ø3/8" 1@0.05 5@0.10 1@0.15 R@0.20
Vigas	0.30x0.60 m	4Ø5/8" más 2Ø1/2".	Ø3/8" 1@0.05 7@0.10 1@0.15 R@0.20
Muro del contenedor	e=0.20m	2Ø1/2"@0.20	2Ø1/2"@0.20
Losa inferior del contenedor	e=0.20m	2Ø1/2"@0.20	2Ø1/2"@0.20
Losa Techo	e=0.15m	2Ø1/2"@0.20	2Ø1/2"@0.20

Nota. La tabla muestra las dimensiones y el refuerzo de acero longitudinal y transversal adoptados para los principales elementos estructurales del tanque elevado en la zona sísmica 2. Se incluyen columnas, vigas, muros y losas del contenedor, considerando los requisitos de resistencia y confinamiento establecidos.

Estas características fueron verificadas de acuerdo con la Norma Técnica E.060, mediante un análisis lineal estático y dinámica utilizando un factor de respuesta sísmica de R=8, valor de diseño original con el que fue modelado.

Figura 22

Detalle general del tanque de la zona sísmica 2



Nota. El tanque elevado de la zona sísmica 2 está construido de concreto armado. El contenedor superior tiene una capacidad de 12.60 m³ de agua, este modelo de tanque fue utilizado como base para el proceso de modelado estructural y diseño sísmico, con el fin de evaluar su comportamiento estructural.

5.1.3.1.2 Propiedad de los materiales empleados en el tanque elevado. En todos los modelos se emplearon las propiedades de los materiales los cuales se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22

Propiedades de los materiales zona 2

Material	Propiedades	Vigas	Columnas	Contenedor
Concreto	Peso específico, γ_c ($kg \cdot f/m^3$)	2400	2400	2400
	Densidad, ρ_c ($kg \cdot f - s^2/m^4$)	244.73	244.73	244.73
	Resistencia a la Compresión, f'_c (kg/cm^2)	280	280	280
	Módulo de Elasticidad, E_c (kg/cm^2)	250998.01	250998.01	250998.01
	Coeficiente de Poisson, ν	0.15	0.15	0.15
	Módulo de Corte, G_c (kg/cm^2)	109129.57	109129.57	109129.57
	Acero de refuerzo	Peso Específico, γ_s ($kg \cdot f/m^3$)	7849.05	7849.05
Densidad, ρ_s ($kg \cdot f - s^2/m^4$)		800.38	800.38	800.38
Resistencia a la fluencia, f_y (kg/cm^2)		4200	4200	4200
Módulo de Elasticidad, E_s (kg/cm^2)		2×10^6	2×10^6	2×10^6

Nota. Esta tabla nos muestra las propiedades de los materiales del tanque elevado de la zona 2 empleados para su diseño en el programa SAP2000.

5.1.3.1.3 Parámetros sísmicos

Tabla 23

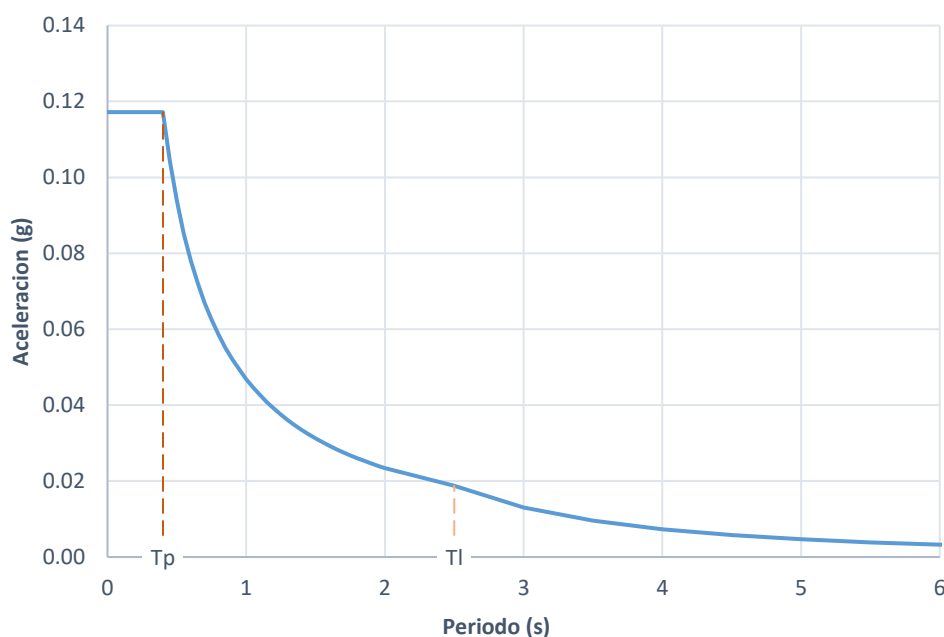
Parámetros sísmicos para la zona 2

Parámetros	Zona 2
Factor de zona (Z)	0.25
Factor de suelo (S)	1
Periodo que define la plataforma del factor C (Tp)	0.4
Periodo que define el desplazamiento constante (Tl)	2.5
Factor de uso (U)	1.5
Factor de modificación de respuesta (R)	8

Nota. Esta tabla nos muestra los parámetros sísmicos aplicados en el programa SAP2000 para el diseño del tanque elevado de concreto armado respecto a la zona 2.

Figura 23

Detalle general del tanque de la zona sísmica 2



Nota. Esta figura nos muestra el espectro de diseño presentado corresponde al comportamiento sísmico esperado para un tanque elevado de concreto armado ubicado en la zona sísmica 2.

5.1.3.1.4 Combinaciones de cargas. Para la combinación de cargas consideramos la Norma E.060, tal como se muestra:

Tabla 24

Combinación de cargas E.060 para la zona 2

Combinación de carga según E.060	
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV$	Comb. 1
$CU = 1.25 (CM + CV) + CS$	Comb. 2
$CU = 1.25 (CM + CV) - CS$	Comb. 3
$CU = 0.9 CM + CS$	Comb. 4
$CU = 0.9 CM - CS$	Comb. 5
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV + 1.4 CL$	Comb. 6

Nota. En esta tabla se presentan las combinaciones de carga establecidas por la Norma Técnica E.060 para la evaluación estructural en la zona sísmica Z2. Las combinaciones consideran los efectos de las cargas muertas (CM), cargas vivas (CV) y cargas sísmicas (CS), adaptada según Norma Técnica E.060 (2009).

Donde:

CM : Carga muerta.

CV : Carga viva.

CL : Carga por la presión de fluidos.

CS : Carga por efectos de cargas producidas por sismo.

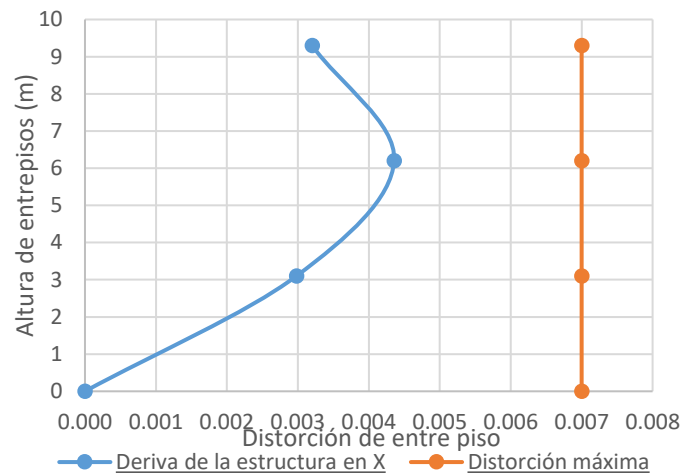
5.1.3.2 Análisis de diseño según la Norma Técnica E030. Para el diseño se realizó mediante un modelo computacional Sap2000 v.26.2.0, con el que se obtienen los resultados de los análisis estáticos y dinámicos del tanque elevado para la zona 2, con el factor de modificación de respuesta $R=8$ que fue considerada en el diseño de esta.

Tabla 25

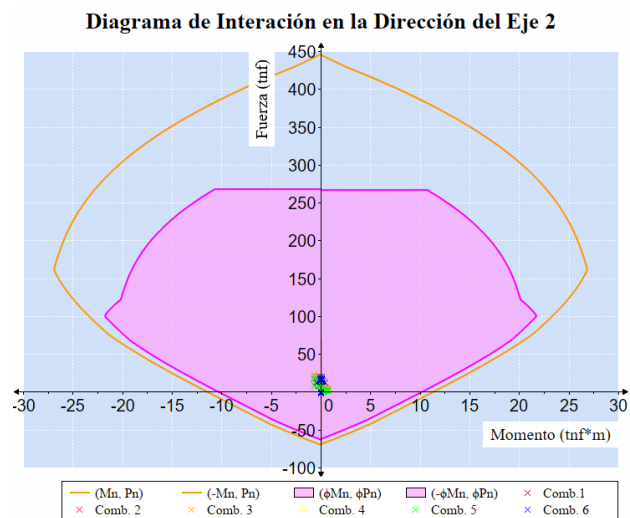
Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 2

Parámetros	Resultados
Periodo fundamental, T (s)	0.404452
Cortante estático, Vs (kgf)	6237.80
Cortante dinámico, Vd (kgf)	5750.18
Momento (kgf.m)	67938.72
Cuantía (%)	1.03

Nota. En esta tabla se presentan los principales parámetros de diseño sísmico obtenidos para la zona Z2, considerando los criterios establecidos en las Normas Técnicas E.030 y E.060. Los resultados incluyen el período fundamental, los valores de cortante estático y dinámico, el momento máximo y la cuantía de refuerzo. Estos parámetros permiten evaluar el comportamiento estructural del tanque elevado frente a la demanda sísmica.

Figura 24*Distorsión de entrepiso zona 2*

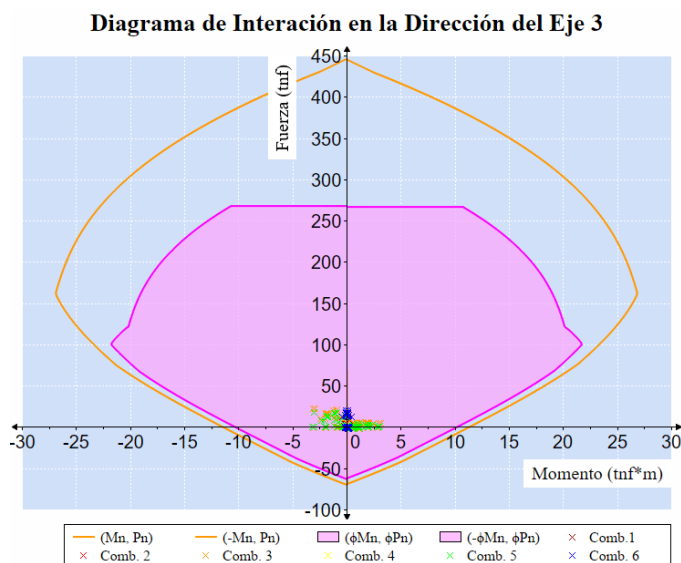
Nota. La figura muestra la variación de la distorsión de entrepiso a lo largo de la altura de la estructura para la zona sísmica Z2, se compara la deriva obtenida en el análisis estructural con el valor máximo permitido.

Figura 25*Diagrama de interacción de la columna zona 2 en el eje 2*

Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 2.

Figura 26

Diagrama de interacción de la columna zona 2 en el eje3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 2.

Tabla 26

Verificación de cortante en columnas para la zona 2

Cortante	Componente	Resultado (kgf)
Cortante última más crítica.	V2	1483.50
	V3	396.40
Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	23037.61
	V3	23037.61

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente (Vc + Vs) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z2. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado. La comparación entre ambos valores permite verificar que la capacidad resistente de las columnas es suficiente frente a la demanda sísmica, garantizando la seguridad estructural.

Tabla 27*Verificación de diseño de vigas para la zona 2*

Cortante	Resultado
Cortante último más crítico (kgf)	4577.00
Cortante resistente (kgf)	18170.16
Momento último más crítico (kgf.m)	3196.51
Momento resistente (kgf.m)	6601.79

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante y momento último más críticos, así como las resistencias correspondientes de las vigas del tanque elevado en la zona sísmica Z2. Los resultados permiten comparar la demanda estructural con la capacidad resistente del elemento. Esta verificación asegura que las vigas cumplen con los criterios de seguridad establecidos por la normativa de diseño estructural.

5.1.3.3 Pushover – Análisis estático no lineal

5.1.3.3.1 Configuración y ejecución del análisis no lineal Pushover. Para evaluar la capacidad estructural no lineal del tanque ante la acción sísmica, se desarrolló un análisis Pushover, este procedimiento permite determinar el comportamiento inelástico de la estructura y estimar el factor R.

El proceso inició con la creación de una carga gravitacional no lineal, la cual incluyó:

- Carga muerta (escala 1.0).
- Carga viva (escala 0.5).
- Presión del agua (escala 1.0).

En la Figura 27 se muestra la configuración hecha para el tanque elevado de la zona sísmica 2.

Figura 27

Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 2

The screenshot shows the 'Load Case Data - Nonlinear Static' dialog box in SAP2000. The 'Load Case Name' is 'CGNL'. The 'Load Case Type' is 'Static'. The 'Analysis Type' is 'Nonlinear'. The 'Geometric Nonlinearity Parameters' are set to 'None'. The 'Mass Source' is 'Masa 1 CV 0.5'. The 'Loads Applied' table is as follows:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	Carga muerta	1.
Load Pattern	Carga viva	0.5
Load Pattern	Presion Agua	1.

Other parameters include 'Load Application' set to 'Full Load', 'Results Saved' set to 'Final State Only', and 'Nonlinear Parameters' set to 'Default'.

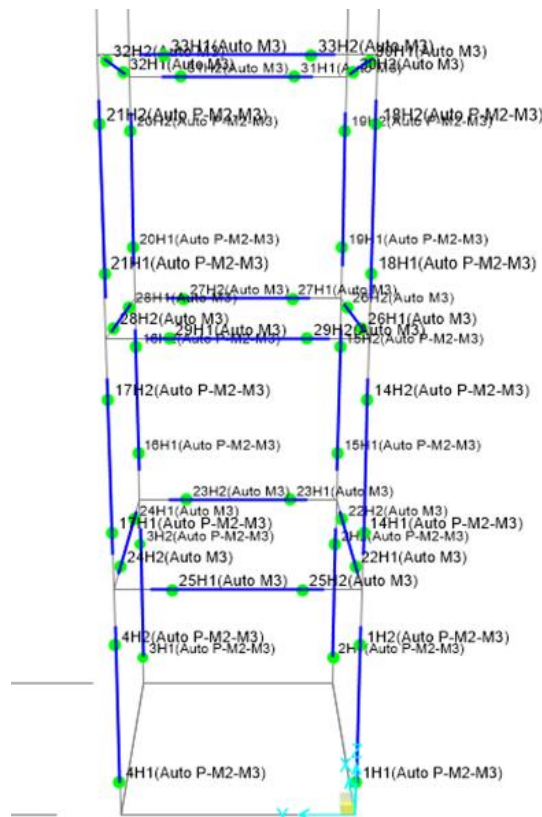
Nota. La figura muestra la configuración del caso de carga gravitacional no lineal utilizada en el análisis estructural del tanque elevado para la zona sísmica Z2 en el software SAP2000. Se consideran las cargas muertas, cargas vivas y la presión del agua, aplicadas bajo un análisis estático no lineal. Esta configuración permite evaluar el comportamiento real de la estructura antes de la aplicación de las cargas sísmicas.

Esta carga fue definida como tipo Static – Nonlinear, y utilizada como carga base para el análisis progresivo, posteriormente se asignaron rotulas plásticas en las vigas y columnas conforme a la norma ASCE 41-13:

- Para las vigas se empleó la Tabla 10-7 (Concrete Beams – Flexure, M3), con rotulas ubicadas a distancias relativas basadas en la geometría de cada viga.
- Para las columnas se empleó la Tabla 10-8 (Concrete Columns), con la ubicación de rotulas según el nivel, respecto al primer piso la rótula inferior se ubicó a 0.001 por ausencia de viga inferior.

Figura 28

Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z2



Nota. La figura muestra la ubicación de las rótulas plásticas asignadas a las columnas y vigas del tanque elevado en el modelo correspondiente a la zona sísmica Z2. Su aplicación es fundamental para identificar los mecanismos de falla, la ductilidad estructural y el desempeño sísmico global del sistema.

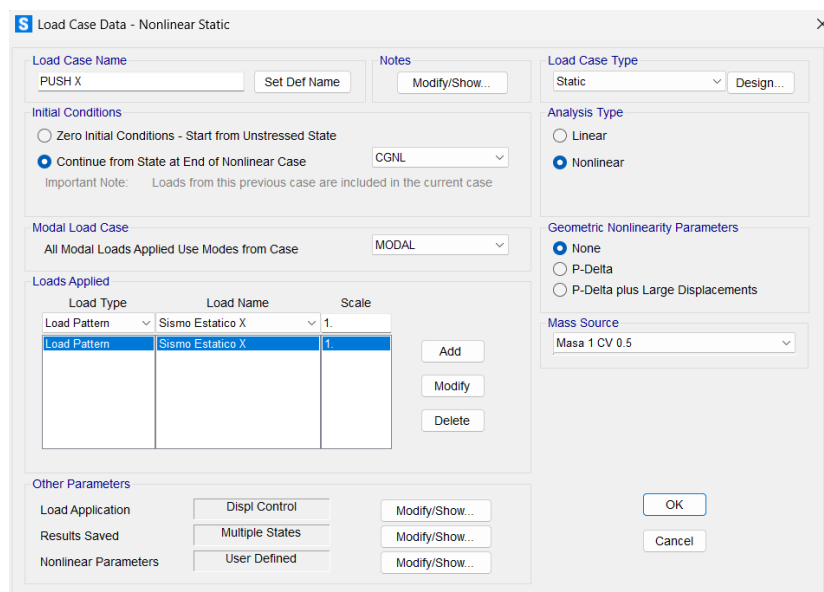
A continuación, se creó un Load Case tipo Pushover, de tipo Static – Nonlinear, tomando como condición inicial el estado final de la carga gravitacional no lineal previamente definida, como patrón de carga se utilizó el sismo estático en la dirección X, y se configuraron parámetros adicionales:

- En aplicación de carga se puso un punto de control de desplazamiento.
- La magnitud de desplazamiento objetivo se puso de 0.5 unidades.
- El punto de control de desplazamiento a elegir fue el que es ubicado en el medio de la mitad de la masa del agua.

- Para optimizar el proceso, se ajustaron los parámetros numéricos:
- Máximo de pasos estáticos: 150.
- Máximo de pasos nulos: 30.
- Resultados guardados en múltiples estados (mínimo 10 y máximo 100).

Figura 29

Configuración para Pushover zona 2



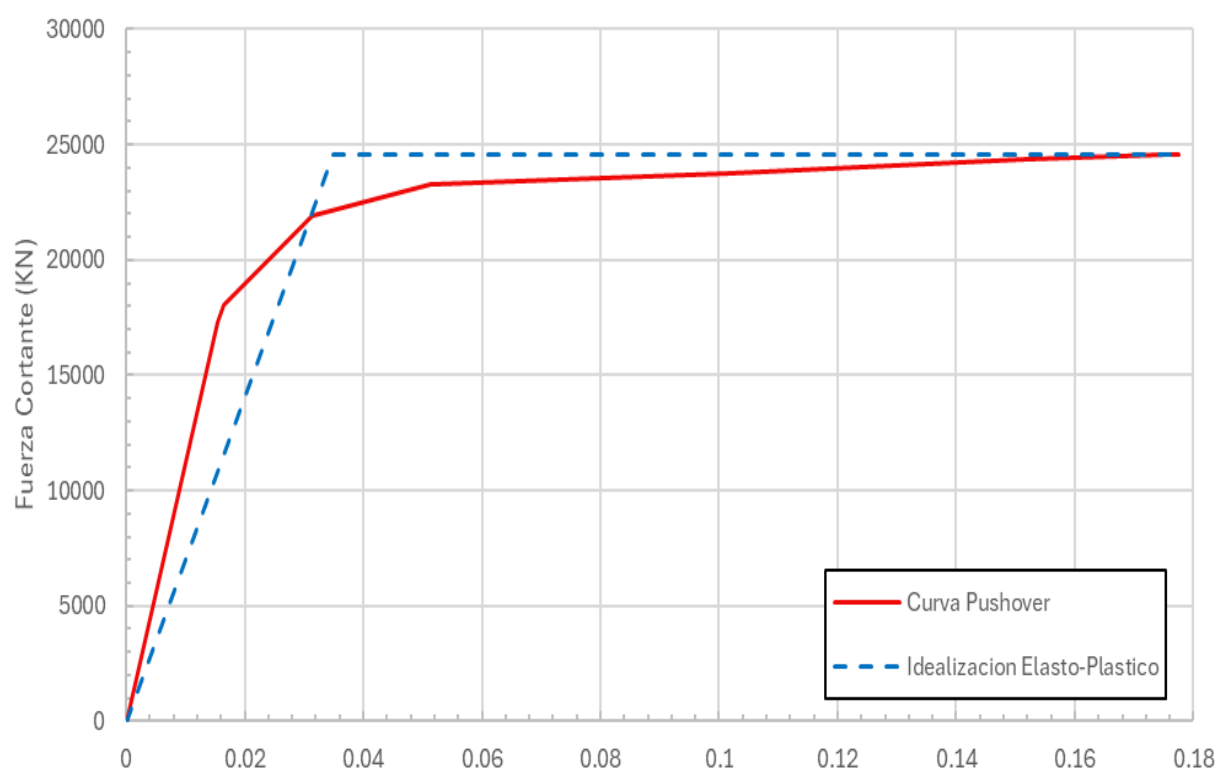
Nota. La figura presenta la configuración del caso de carga no lineal estático (Pushover) aplicada al tanque elevado en la zona sísmica Z2. Se utilizó un patrón de carga sísmica en la dirección X, con control por desplazamiento y análisis no lineal activado. Esta configuración permite evaluar la capacidad estructural, la formación de rótulas plásticas y el comportamiento inelástico global del sistema.

Con esta configuración, el modelo fue ejecutado con éxito, obteniéndose la curva capacidad, que permitió evaluar el comportamiento no lineal del sistema estructural.

5.1.3.3.2 Curva Pushover. Se determinaron las curvas Pushover para el tanque elevado rectangular de concreto armado a partir del análisis que se hizo anteriormente y considerando los parámetros sísmicos, con el cual se podrá obtener el factor de modificación de respuesta sísmica, la curva Pushover con su respectiva idealización elasto-plásticas se muestra a continuación:

Figura 30

Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 2



Nota. La figura muestra la curva Pushover del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z2, representando la relación entre el desplazamiento lateral y la fuerza cortante basal. La idealización elasto-plástica permite identificar el punto de fluencia y la capacidad última de la estructura. Esta curva se utiliza para evaluar la ductilidad, la sobrerresistencia y el comportamiento inelástico del sistema estructural.

5.1.3.4 Factor de reducción para la determinación de R

5.1.3.4.1 Factor de reducción por ductilidad. Se calculo el factor de reducción por ductilidad mediante la ecuación de Mirada y Bertero (1994). En la Tabla 28 se muestra el resultado obtenido para la zona sísmica 2.

Tabla 28

Factor de ductilidad (R_μ) zona 2

Tanque	Factor de reducción por ductilidad					
	Δ_{max}	Δ_y	$\mu_{desplaz.}$	$T(seg.)$	ϕ	R_μ
Z2	0.17753	0.035	5.07	0.405	1.46	3.79

Nota. La tabla presenta el cálculo del factor de reducción por ductilidad (R_μ) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z2, a partir de los desplazamientos máximos (Δ_{max}) y de fluencia (Δ_y) obtenidos del análisis Pushover, también se incluyen el período fundamental, el factor ϕ y el valor final de R_μ .

5.1.3.4.2 Factor de reducción sobrerresistencia. Se calculo el factor de reducción por sobrerresistencia (R_s) igual al cociente entre el cortante basal máximo (V_{max}) y la cortante de diseño (V_d). En la Tabla 29 se muestra el resultado obtenido para el tanque Z2.

Tabla 29

Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 2

Tanque	Factor de reducción por sobrerresistencia		
	$V_{max}(kgf)$	$V_d(kgf)$	R_s
Z2	24571.98	26029.38	2.54

Nota. La tabla muestra el cálculo del factor de sobrerresistencia (R_s) del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z2, obtenido a partir de la relación entre la fuerza cortante máxima (V_{max}) y la fuerza de diseño (V_d) extraídas de la curva Pushover. Este factor representa la capacidad adicional de resistencia estructural más allá del nivel de diseño.

5.1.3.4.3 Factor de reducción de por redundancia. El factor de reducción por redundancia R_R se determinó mediante la Tabla 31, del código internacional ATC 19. Para el caso de tanques elevados con soporte aporticado los números de ejes de columnas es reducido por lo que el factor de reducción por redundancia será igual a 0.71.

5.1.3.5 Ajuste del factor R mediante análisis iterativo. Una vez obtenidos los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica R a través del método propuesto por el ATC-19 (1995), con el objetivo de verificar la capacidad real del sistema.

Este proceso consistió en reducir el valor de R en el espectro hasta alcanzar el punto en el que la estructura mantuviera un Capacity Ratio (relación de capacidad) menor a 1.0.

Tabla 30

Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 2

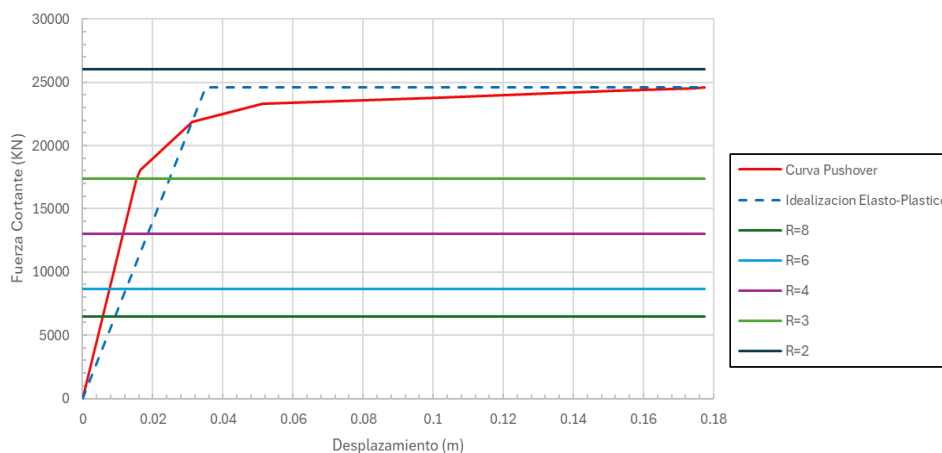
Tanques	R iterado	R_μ	R_s	R_R	R
	8	3.79	3.78	0.71	10.16
	6	3.79	2.82	0.71	7.62
Z2	4	3.79	1.89	0.71	5.08
	3	3.79	1.42	0.71	3.81
	2	3.79	0.94	0.71	2.54

Nota. La tabla presenta los resultados de la iteración del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z2, considerando los factores de ductilidad (R_μ), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_r), conforme a la metodología ATC-19 (1995). El valor final de R se obtiene como el producto de dichos factores para distintos valores de R iterado.

En la figura 31 se muestra la curva Pushover obtenida a partir del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y las curvas horizontales que representan diferentes valores del factor R.

Figura 31

Comparación de la curva Pushover con distintos factores R zona 2



Nota. La figura muestra la comparación de la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z2 con diferentes valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R). Se observa cómo la reducción de fuerzas sísmicas varía en función del valor de R adoptado.

5.1.3.5.1 Factores de modificación de respuesta sísmica. El factor de modificación de respuesta sísmica será igual al producto del factor de reducción por ductilidad con el factor de reducción por sobrerresistencia y el factor de reducción por redundancia. En la Tabla 31 se muestra el resultado obtenido para el tanque Z2.

Tabla 31

Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 2

Tanque	Factor de reducción			
	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z2	3.79	0.94	0.71	2.54

Nota. La tabla presenta los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) obtenidos mediante el análisis Pushover para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z2. El valor final de R se calcula como el producto de los factores de ductilidad (R_{μ}), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_R), reflejando el comportamiento inelástico real de la estructura frente a la demanda sísmica.

5.1.3.6 Comparación del diseño y rediseño basado en la Norma ASCE/SEI 7-22.

Adicionalmente, se desarrolló un modelo estructural considerando la norma ASCE/SEI 7-22 para poder evaluar ambos diseños y compararlos.

5.1.3.6.1 Parámetros de rediseño

Tabla 32

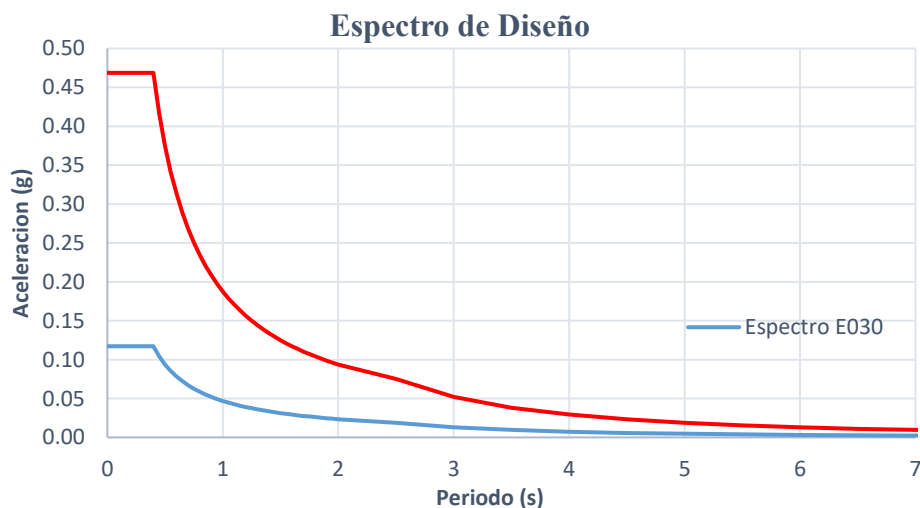
Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 versus ASCE/SEI 7-22 zona 1

Parámetros	E.030	ASCE/SEI 7-22
Factor de reducción sísmica R	8	2
Periodo fundamental, T (s)	0.404452	0.404452
Cortante estático, V_s (kg.f)	6237.80	24951.21
Cortante dinámico, V_d (kg.f)	5750.18	22997.91
Momento (kgf * m)	67938.72	34496.87
Cuantía (%)	1.03	1.03

Nota. En la tabla se observa que el uso de un factor de reducción sísmica menor en ASCE/SEI 7-22 ($R = 2$) genera mayores fuerzas internas, incrementando los valores de cortante y momento.

Figura 32

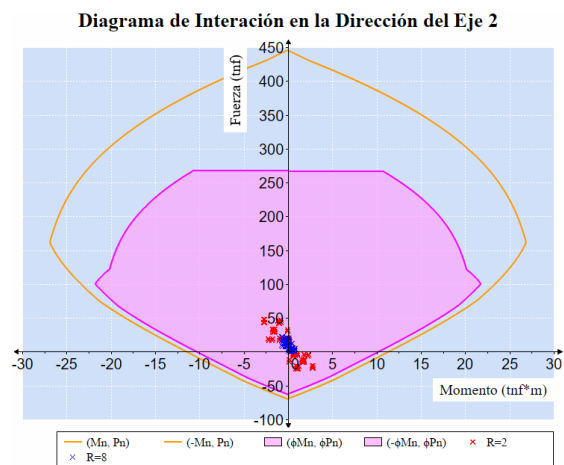
Espectro de diseño Norma Técnica E.030 $R=8$ y ASCE/SEI 7-22 $R=2$ zona 2



Nota. El gráfico muestra el espectro de diseño sísmico generado conforme a la Norma Técnica E.030 para la zona sísmica correspondiente, se observa que la aceleración espectral es mayor para periodos cortos.

Figura 33

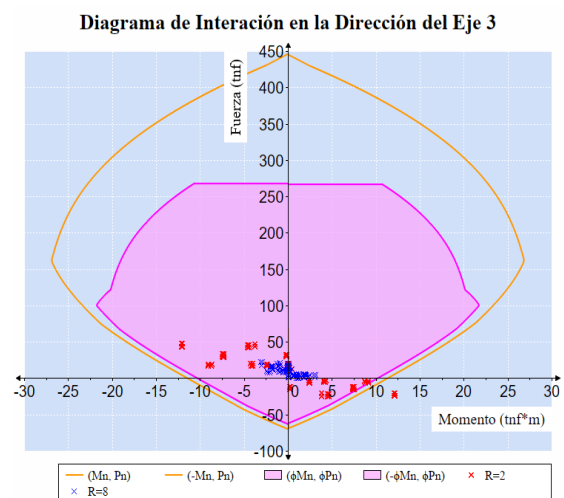
Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2 eje 2



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 2.

Figura 34

Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 2.

Tabla 33

Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2

Cortante	Componente	Norma Técnica E.030 R=8 (kgf)	ASCE/SEI 7-22 R=2 (kgf)
Cortante última más crítica.	V2	1483.50	5795.97
	V3	396.40	1354.85
Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	23037.61	23037.61
	V3	23037.61	23037.61

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente (Vc + Vs) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z2. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado. La comparación entre ambos valores permite verificar que la capacidad resistente de las columnas es suficiente frente a la demanda sísmica, garantizando la seguridad estructural.

Tabla 34

Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 2

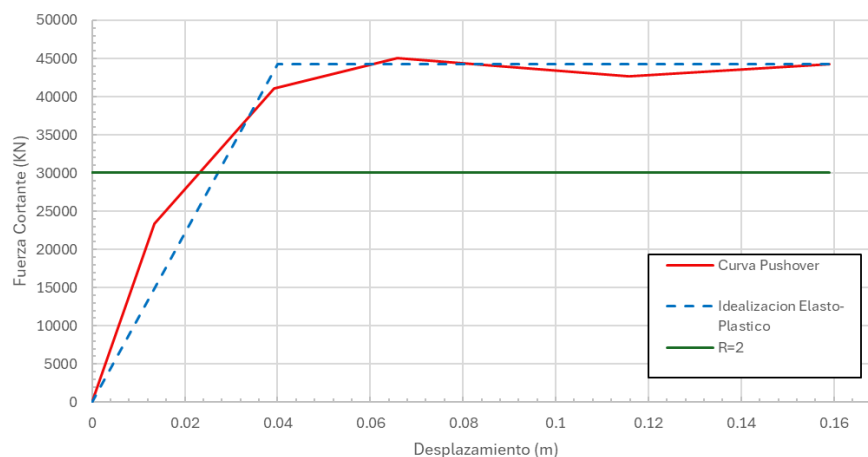
Cortante	Norma Técnica E.030	ASCE/SEI 7-22
Cortante último más crítico (kgf)	4577.00	15292.42
Cortante Resistente (kgf)	18170.16	18170.16
Momento último más crítico (kgf.m)	3196.51	12408.11
Momento resistente (kgf.m)	6601.79	6601.79

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante y momento último más críticos.

5.1.3.6.2 Curva Pushover. En la Figura 35 veremos la curva Pushover obtenida a partir del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y la curva horizontal calculado con ATC-19 para el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22.

Figura 35

Curva Pushover calculado con el ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 en la zona 2



Nota. La figura presenta la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z2, considerando un factor de reducción sísmica $R = 2$ según el ASCE/SEI 7-22, se observa que la demanda sigue por debajo.

Posteriormente, se evaluó el nuevo diseño utilizando el procedimiento ATC-19, el cual permitió obtener los valores de R alcanzables por la estructura bajo la demanda sísmica en la zona sísmica 2. En la Tabla 35 veremos este resultado.

Tabla 35

Resultados del factor R con ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 zona 2

Tanques	Factor de reducción			
	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z2	3.03	1.47	0.71	3.16

Nota. La tabla muestra el valor del factor de modificación de la respuesta sísmica R obtenido mediante la metodología ATC-19 (1995) para el tanque elevado de la zona sísmica Z2, considerando un rediseño con $R = 2$ según el ASCE/SEI 7-22.

5.1.3.7 Resultados del diseño y rediseño par la zona 2. En la siguiente Tabla 36 se podrá observar el factor de modificación de respuesta sísmica obtenido mediante el ATC-19 tanto para el diseño original y el modificado con el ASCE/SEI 7-22.

Tabla 36

Comparación del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño original y de ASCE/SEI 7-22 zona 2

Modelos	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z2 de diseño	3.79	0.94	0.71	2.54
Z2 de rediseño	3.03	1.47	0.71	3.16

Nota. La tabla presenta la comparación de los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica R obtenidos mediante la metodología ATC-19 (1995) para el tanque Z2 en su condición de diseño original y rediseño según el ASCE/SEI 7-22. Se observa un incremento de R de 2.54 a 3.16, debido principalmente al aumento del factor de sobrerresistencia. Este resultado evidencia que el rediseño mejora la capacidad estructural de disipación de energía sísmica.

5.1.4 Resultados del objetivo específico 3

5.1.4.1 Datos generales y condiciones de diseño para la zona 3

5.1.4.1.1 Descripción del tanque utilizado en el modelado. En la Figura 36 se presenta el tanque elevado de Instituto Educativa Secundaria San Juan, ubicado en la región de Puno, provincia de Puno y distrito de Huata. Esta estructura fue diseñada en el año 2021 y construida en el 2024, y tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 15.31 m³.

Tabla 37

Refuerzos de los elementos estructurales zona 3

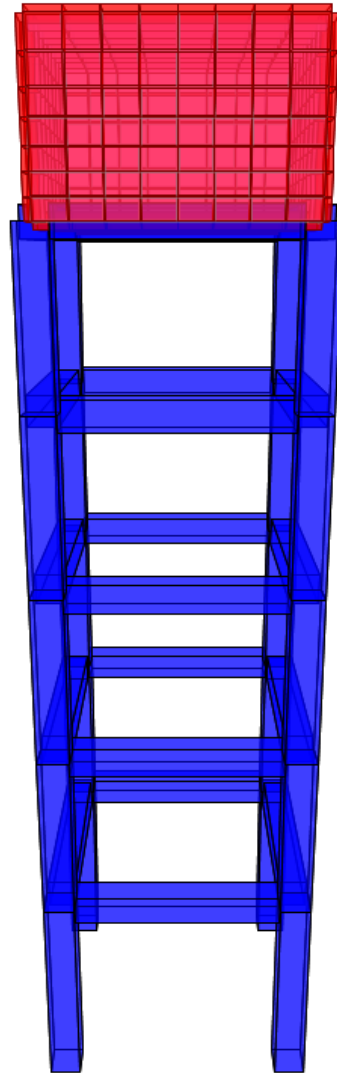
Elemento estructural	Dimensiones	Acero longitudinal	Acero transversal
Columnas C-1	0.45x0.45 m	12Ø1"	3Ø3/8" 1@0.05 5@0.10 R@0.25
Columnas C-2	0.45x0.45 m	12Ø3/4"	3Ø3/8" 1@0.05 5@0.10 R@0.20
Vigas	0.40x0.40 m	5Ø5/8" más 5Ø5/8".	1Ø1/2" 1@0.05 11@0.075 R@0.125
Muro del contenedor	e=0.20m	2Ø1/2"@0.25	2Ø1/2"@0.25
Losa inferior del contenedor	e=0.20m	2Ø1/2"@0.25	2Ø1/2"@0.25
Losa Techo	e=0.20m	2Ø5/8"@0.25	2Ø5/8"@0.25

Nota. La tabla muestra las dimensiones y el refuerzo de acero longitudinal y transversal adoptados para los principales elementos estructurales del tanque elevado en la zona sísmica 3. Se incluyen columnas, vigas, muros y losas del contenedor, considerando los requisitos de resistencia y confinamiento establecidos.

Estas características fueron verificadas de acuerdo a la Norma Técnica E.060, mediante un análisis lineal estático y dinámica utilizando un factor de respuesta sísmica de R=8, valor de diseño original con el que fue modelado.

Figura 36

Detalle general del tanque de la zona sísmica 3



Nota. El tanque elevado de la zona sísmica 3 está construido de concreto armado. El contenedor superior tiene una capacidad de 15.31 m³ de agua, este modelo de tanque fue utilizado como base para el proceso de modelado estructural y diseño sísmico, con el fin de evaluar su comportamiento estructural.

5.1.4.1.2 Propiedad de los materiales empleados en el tanque elevado

Tabla 38

Propiedades de los materiales zona 3

Material	Propiedades	Vigas	Columnas	Contenedor
Concreto	Peso específico, γ_c ($kg \cdot f/m^3$)	2400	2400	2400
	Densidad, ρ_c ($kg \cdot f - s^2/m^4$)	244.73	244.73	244.73
	Resistencia a la Compresión, f^c (kg/cm^2)	280	280	280
	Módulo de Elasticidad, E_c (kg/cm^2)	250998.01	250998.01	250998.01
	Coefficiente de Poisson, ν	0.15	0.15	0.15
	Módulo de Corte, G_c (kg/cm^2)	109129.57	109129.57	109129.57
	Acero de refuerzo	Peso Específico, γ_s ($kg \cdot f/m^3$)	7849.05	7849.05
Densidad, ρ_s ($kg \cdot f - s^2/m^4$)		800.38	800.38	800.38
Resistencia a la fluencia, f_y (kg/cm^2)		4200	4200	4200
Módulo de Elasticidad, E_s (kg/cm^2)		2×10^6	2×10^6	2×10^6

Nota. Esta tabla nos muestra las propiedades de los materiales del tanque elevado de la zona 3 empleados para su diseño en el programa SAP2000.

5.1.4.1.3 Parámetros sísmicos

Tabla 39

Parámetros sísmicos para la zona 3

Parámetros	Zona 3
Factor de zona (Z)	0.35
Factor de suelo (S)	1
Periodo que define la plataforma del factor C (TP)	0.4
Periodo que define el desplazamiento constante (TL)	2.5
Factor de uso (U)	1.5
Factor de modificación de respuesta (R)	6

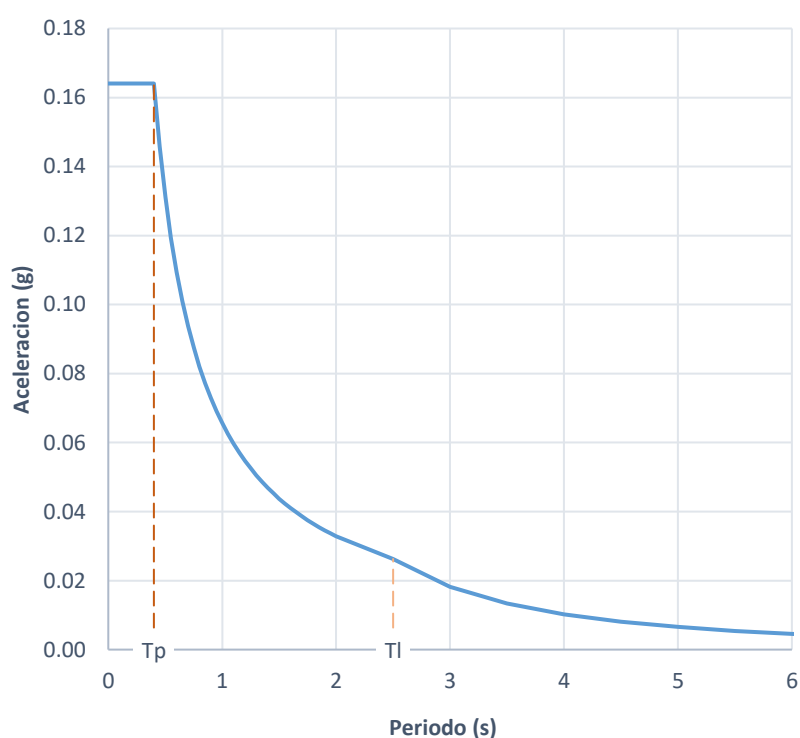
Nota. Esta tabla nos muestra los parámetros sísmicos aplicados en el programa SAP2000 para el diseño del tanque elevado de concreto armado respecto a la zona 3.

Seguidamente, se presentan los espectros de diseño sísmicos en la Figura 37, correspondientes a los modelos analizados de tanques elevados rectangulares de concreto

armado. Estos espectros fueron obtenidos considerando las condiciones de sitio, la zonificación sísmica y los parámetros establecidos en la Norma Técnica E.030, para cada uno de los escenarios evaluados. Su análisis permite determinar la demanda sísmica que actúa sobre la estructura en función del período fundamental y, por ende, establecer la base para el dimensionamiento y verificación del diseño estructural.

Figura 37

Espectro de diseño usado para la zona sísmica 3



Nota. El espectro de diseño presentado corresponde al comportamiento sísmico esperado para un tanque elevado de concreto armado ubicado en la zona sísmica 3.

5.1.4.1.4 Combinaciones de cargas. Para la combinación de cargas consideramos lo dispuesto en la Norma Técnica de Concreto Armado E.060, Las combinaciones utilizadas se muestran a continuación, sirviendo como base para el dimensionamiento y verificación de los elementos estructurales del modelo.

Tabla 40

Combinación de cargas E.060 para la zona 3

Combinación de carga según E.060	
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV$	Comb. 1
$CU = 1.25 (CM + CV) + CS$	Comb. 2
$CU = 1.25 (CM + CV) - CS$	Comb. 3
$CU = 0.9 CM + CS$	Comb. 4
$CU = 0.9 CM - CS$	Comb. 5
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV + 1.4 CL$	Comb. 6

Nota. En esta tabla se presentan las combinaciones de carga establecidas por la Norma Técnica E.060 para la evaluación estructural en la zona sísmica Z3.

Donde:

CM : Carga muerta.

CV : Carga viva.

CL : Carga por la presión de fluidos.

CS : Carga por efectos de cargas producidas por sismo.

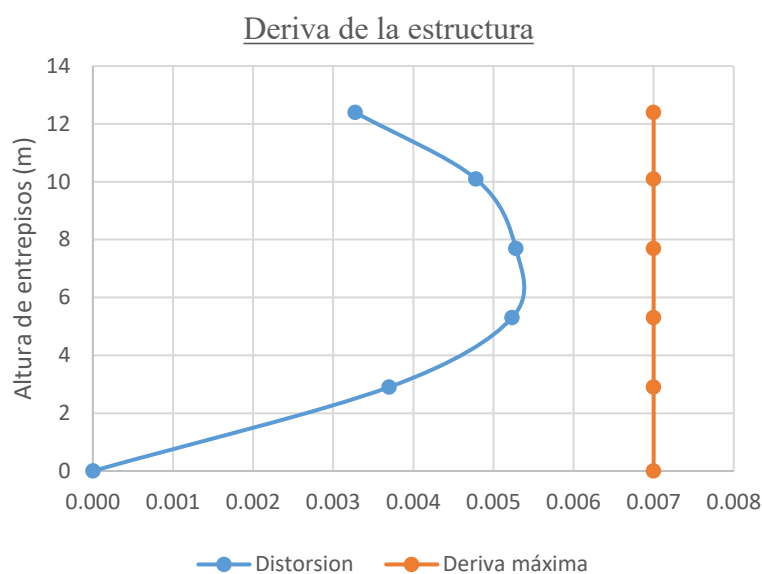
5.1.4.2 Análisis de diseño según la Norma Técnica E030. Para el diseño se realizó mediante un modelo computacional Sap2000 v.26.2.0, con el que se obtienen los resultados de los análisis estáticos y dinámicos del tanque elevado para la zona 1, con el factor de modificación de respuesta $R=8$ que fue considerada en el diseño de esta.

Tabla 41

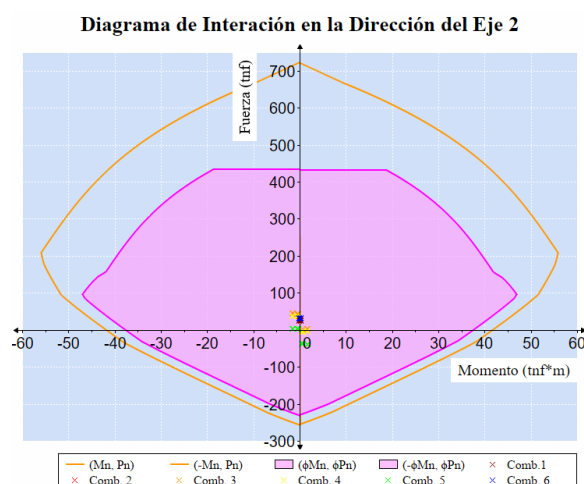
Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 3

Parámetros	Resultados
Periodo fundamental, T (s)	0.447648
Cortante estático, Vs (kgf)	13147.69
Cortante dinámico, Vd (kgf)	11799.17
Momento (kgf.m)	136457.64
Cuantía (%) para C-1	3.02
Cuantía (%) para C-2	1.69

Nota. En esta tabla se presentan los principales parámetros de diseño sísmico obtenidos para la zona Z3, considerando los criterios establecidos en las Normas Técnicas E.030 y E.060.

Figura 38*Distorsión de entrepiso zona 3*

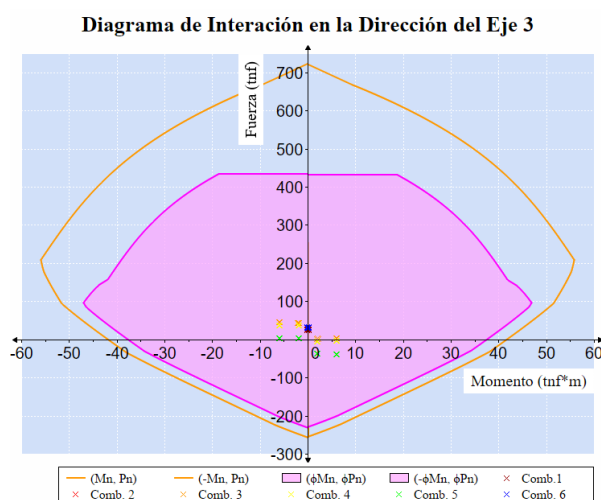
Nota. La figura muestra la variación de la distorsión de entrepiso a lo largo de la altura de la estructura para la zona sísmica Z3, se compara la deriva obtenida en el análisis estructural con el valor máximo permitido.

Figura 39*Diagrama de interacción de la columna C-1 zona 3 eje 2*

Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-1 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Figura 40

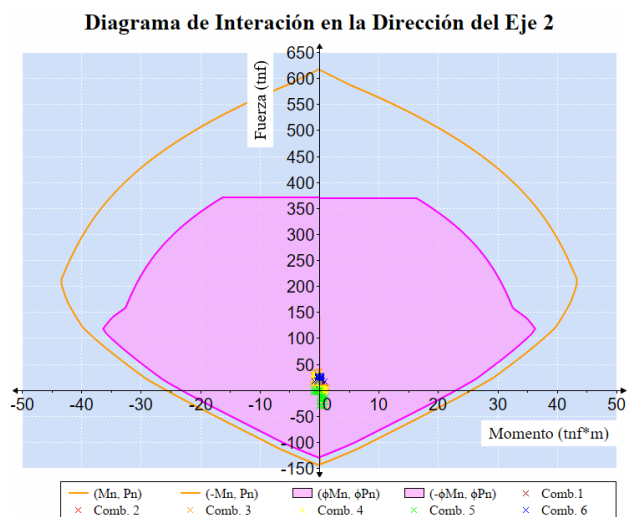
Diagrama de interacción de la columna C-1 zona 3 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-1 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Figura 41

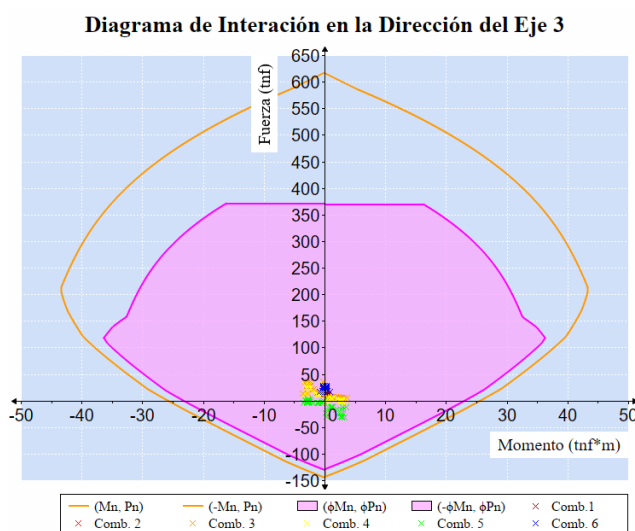
Diagrama de interacción de la columna C-2 zona 3 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-2 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Figura 42

Diagrama de interacción de la columna C-2 zona 3 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-2 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Tabla 42

Verificación de cortante en columnas para la zona 3

Tipo de columna	Cortante	Componente	Resultado (kgf)
Columna C-1	Cortante última más crítica.	V2	3040.14
		V3	887.25
	Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	27935.31
		V3	27935.31
Columna C-2	Cortante última más crítica.	V2	3073.01
		V3	984.50
	Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	27935.31
		V3	27935.31

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente (Vc + Vs) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z3. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado. La comparación entre ambos valores permite verificar que la capacidad resistente de las columnas es suficiente frente a la demanda sísmica, garantizando la seguridad estructural.

Tabla 43*Verificación de diseño de vigas para la zona 3*

Cortante	Resultado
Cortante último más crítico (kgf)	6476.21
Cortante Resistente (kgf)	28360.44
Momento último más crítico (kgf.m)	5800.06
Momento resistente (kgf.m)	12338.48

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante y momento último más críticos, así como las resistencias correspondientes de las vigas del tanque elevado en la zona sísmica Z3. Los resultados permiten comparar la demanda estructural con la capacidad resistente del elemento. Esta verificación asegura que las vigas cumplen con los criterios de seguridad establecidos por la normativa de diseño estructural.

5.1.4.3 Pushover – análisis estático no lineal

5.1.4.3.1 Configuración y ejecución del análisis no lineal Pushover. Para evaluar la capacidad estructural no lineal del tanque ante la acción sísmica, se desarrolló un análisis Pushover, este procedimiento permite determinar el comportamiento inelástico de la estructura.

El proceso inició con la creación de una carga gravitacional no lineal, la cual incluyó:

- Carga muerta (escala 1.0).
- Carga viva (escala 0.5).
- Presión del agua (escala 1.0).

Figura 43

Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 3

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: CGNL [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	Carga muerta	1.
Load Pattern	Carga viva	0.5
Load Pattern	Presion Agua	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: Masa 1 CV 0.5

Other Parameters:

- Load Application: Full Load [Modify/Show...]
- Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

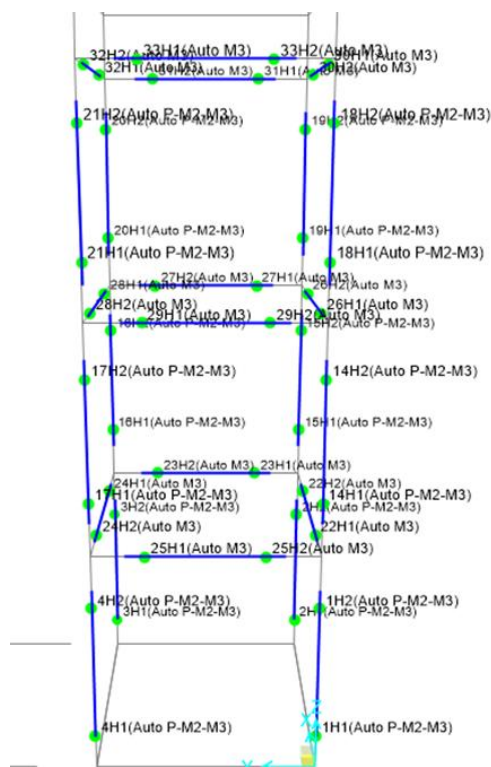
Nota. La figura muestra la configuración del caso de carga gravitacional no lineal utilizada en el análisis estructural del tanque elevado para la zona sísmica Z3 en el software SAP2000. Se consideran las cargas muertas, cargas vivas y la presión del agua, aplicadas bajo un análisis estático no lineal.

Esta carga fue definida como tipo Static – Nonlinear, y utilizada como carga base para el análisis progresivo, posteriormente se asignaron rotulas plásticas en las vigas y columnas conforme a la norma ASCE 41-13:

- Para las vigas se empleó la Tabla 10-7 (Concrete Beams – Flexure, M3), con rotulas ubicadas a distancias relativas basadas en la geometría de cada viga.
- Para las columnas se empleó la Tabla 10-8 (Concrete Columns), con la ubicación de rotulas según el nivel, respecto al primer piso la rótula inferior se ubicó a 0.001 por ausencia de viga inferior.

Figura 44

Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z3



Nota. La figura muestra la ubicación de las rótulas plásticas asignadas a las columnas y vigas del tanque elevado en el modelo correspondiente a la zona sísmica Z3. Su aplicación es fundamental para identificar los mecanismos de falla, la ductilidad estructural y el desempeño sísmico global del sistema.

A continuación, se creó un Load Case tipo Pushover, de tipo Static – Nonlinear, tomando como condición inicial el estado final de la carga gravitacional no lineal previamente definida, como patrón de carga se utilizó el sismo estático en la dirección X, y se configuraron parámetros adicionales como se muestra en la Figura 45:

- En aplicación de carga se puso un punto de control de desplazamiento.
- El punto de control de desplazamiento a elegir fue el que es ubicado en el medio de la mitad de la masa del agua.
- Para optimizar el proceso, se ajustaron los parámetros numéricos.

Figura 45

Configuración para Pushover zona 3

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: PUSH X [Set Def Name] [Modify/Show...]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case [CGNL]

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	Sismo Estatico X	1.
Load Pattern	Sismo Estatico X	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: Masa 1 CV 0.5

Other Parameters:

- Load Application: [Displ Control] [Modify/Show...]
- Results Saved: [Multiple States] [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: [User Defined] [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

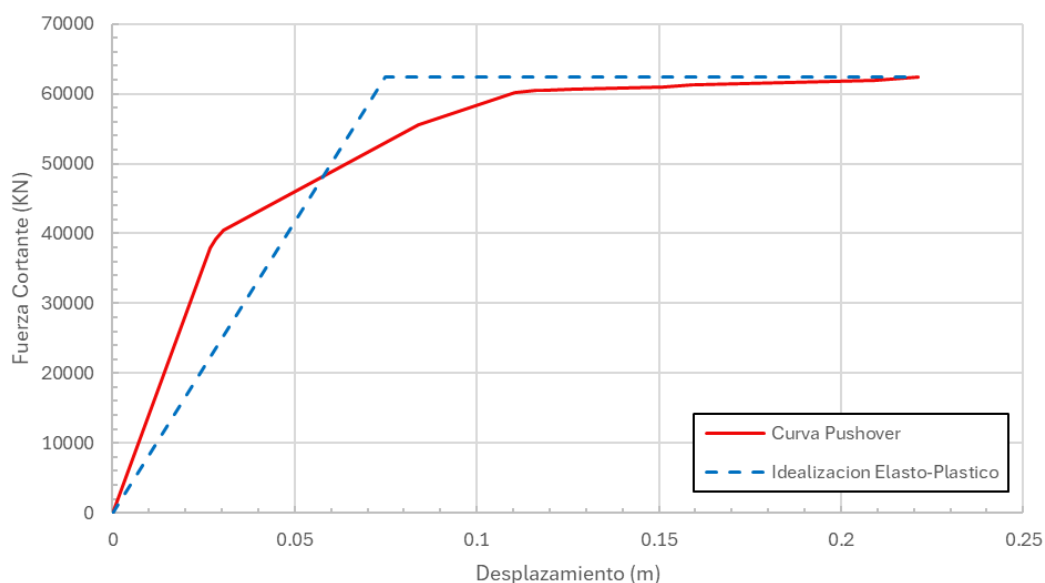
Nota. La figura presenta la configuración del caso de carga no lineal estático (Pushover) aplicada al tanque elevado en la zona sísmica Z3. Se utilizó un patrón de carga sísmica en la dirección X, con control por desplazamiento y análisis no lineal activado.

Con esta configuración, el modelo fue ejecutado con éxito, obteniéndose la curva capacidad, que permitió evaluar el comportamiento no lineal del sistema estructural.

5.1.4.3.2 Curva Pushover. Se determinaron las curvas Pushover para el tanque elevado rectangular de concreto armado a partir del análisis que se hizo anteriormente y considerando los parámetros sísmicos, con el cual se podrá obtener el factor de modificación de respuesta sísmica, las curva Pushover con su respectiva idealización elasto-plásticas se muestra en la Figura 46.

Figura 46

Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 3



Nota. La figura muestra la curva Pushover del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z3, representando la relación entre el desplazamiento lateral y la fuerza cortante basal. La idealización elasto-plástica permite identificar el punto de fluencia y la capacidad última de la estructura. Esta curva se utiliza para evaluar la ductilidad, la sobrerresistencia y el comportamiento inelástico del sistema estructural.

5.1.4.4 Factor de reducción para la determinación de R

5.1.4.4.1 Factor de reducción por ductilidad. Se calculo el factor de reducción por ductilidad mediante la ecuación de Mirada y Bertero (1994). En la Tabla 44, se muestra el resultado obtenido para la zona sísmica 3.

Tabla 44

Factor de ductilidad (R_{μ}) zona 3

Tanques	Factor de reducción por ductilidad					
	Δ_{max}	Δ_y	$\mu_{desplaz.}$	$T(seg.)$	ϕ	R_{μ}
Z3	0.22103	0.075	2.95	0.448	1.26	2.55

Nota. La tabla presenta el cálculo del factor de reducción por ductilidad (R_{μ}) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z2, a partir de los desplazamientos máximos (Δ_{max}) y de fluencia (Δ_y).

5.1.4.4.2 Factor de reducción de sobrerresistencia. Se calculo el factor de reducción por sobrerresistencia (R_s) igual al cociente entre el cortante basal máximo (V_{max}) y la cortante de diseño (V_d). En la Tabla 45 se muestra el resultado obtenido para el tanque Z3.

Tabla 45

Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 3

Tanque	Factor de Reducción por Sobrerresistencia		
	$V_{max}(kgf)$	$V_d(kgf)$	R_s
Z3	62344.11	46345.12	1.35

Nota. La tabla muestra el cálculo del factor de sobrerresistencia (R_s) del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z3, obtenido a partir de la relación entre la fuerza cortante máxima (V_{max}) y la fuerza de diseño (V_d) extraídas de la curva Pushover. Este factor representa la capacidad adicional de resistencia estructural más allá del nivel de diseño.

5.1.4.4.3 Factor de reducción de por redundancia. El Factor de reducción por redundancia R_R se determinó mediante el literal 4.5, capítulo 4 del ítem 4.5.3 del código internacional ATC 19 (Structural Modification Factors). Para el caso de tanques elevados con soporte aporticado los números de ejes de columnas es reducido por lo que el factor de reducción por redundancia será igual a 0.71.

5.1.4.5 Ajuste del factor R mediante análisis iterativo. Una vez obtenidos los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica R a través del método propuesto por el ATC-19 (1995), con el objetivo de verificar la capacidad real del sistema.

Este proceso consistió en reducir el valor de R en el espectro hasta alcanzar el punto en el que la estructura mantuviera un Capacity Ratio (relación de capacidad) menor a 1.0.

Tabla 46

Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 3

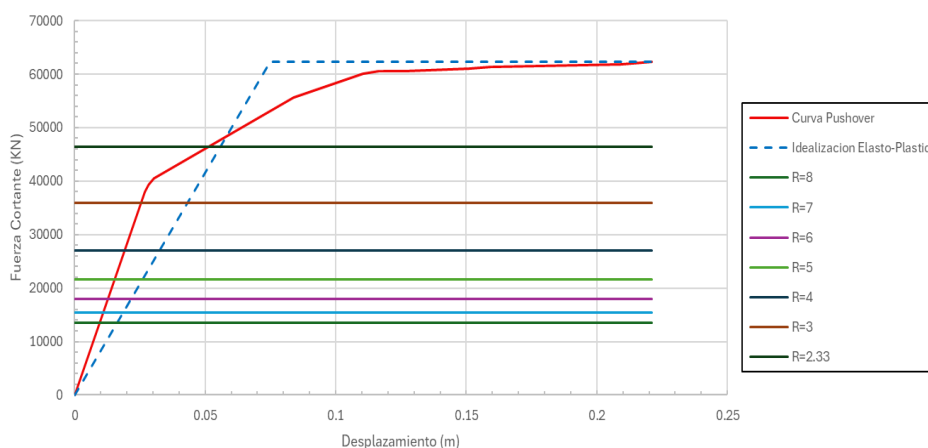
Tanques	R iterado	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z3	8	2.55	4.04	0.71	8.35
	7	2.55	4.04	0.71	7.31
	6	2.55	3.46	0.71	6.26
	5	2.55	2.89	0.71	5.22
	4	2.55	2.31	0.71	4.18
	3	2.55	1.73	0.71	3.13
	2.33	2.55	1.35	0.71	2.43

Nota. La tabla presenta los resultados de la iteración del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z3, considerando los factores de ductilidad (R_{μ}), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_r).

En la Figura 47 se muestra la curva Pushover obtenida a partir del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y las curvas horizontales que representan diferentes valores del factor R.

Figura 47

Comparación de la curva Pushover con distintos factores R para zona 3



Nota. La figura muestra la comparación de la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z3 con diferentes valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R). Se observa cómo la reducción de fuerzas sísmicas varía en función del valor de R adoptado.

5.1.4.5.1 Factor de modificación de respuesta sísmica. El factor de modificación de respuesta sísmica será igual al producto del factor de reducción por ductilidad con el factor de reducción por sobrerresistencia y el factor de reducción por redundancia. En la Tabla 47 se muestra el resultado para el tanque Z3.

Tabla 47

Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 3

Tanque	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z3	2.55	1.35	0.71	2.43

Nota. La tabla presenta los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) obtenidos mediante el análisis Pushover para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z3. El valor final de R se calcula como el producto de los factores de ductilidad (R_{μ}), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_R), reflejando el comportamiento inelástico real de la estructura frente a la demanda sísmica.

5.1.4.6 Comparación del diseño y rediseño basado en la Norma ASCE/SEI 7-22

5.1.4.6.1 Parámetros de rediseño

Tabla 48

Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 versus ASCE/SEI 7-22

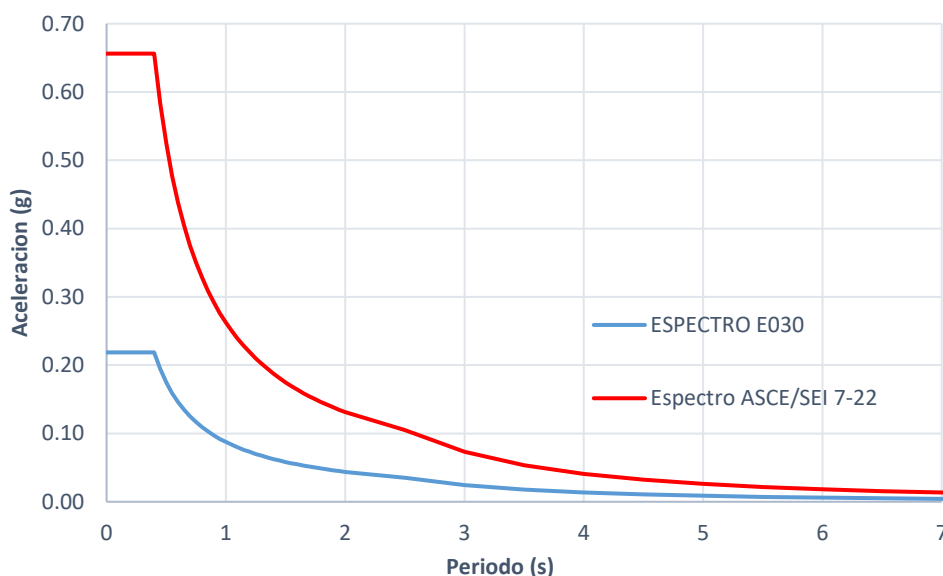
zona 3

Parámetros	Norma Técnica E.030	ASCE/SEI 7-22
Factor de reducción sísmica R	8	2
Periodo fundamental, T (s)	0.447648	0.447648
Cortante estático, V_s (kg.f)	13147.69	52590.77
Cortante dinámico, V_d (kg.f)	11799.17	47197.82
Momento (kgf * m)	136457.64	81416.24
Cuantía (%) para C-1	3.02	3.02
Cuantía (%) para C-2	1.69	1.69

Nota. En la tabla se observa que el uso de un factor de reducción sísmica menor en ASCE/SEI 7-22 ($R = 2$) genera mayores fuerzas internas, incrementando los valores de cortante y momento.

Figura 48

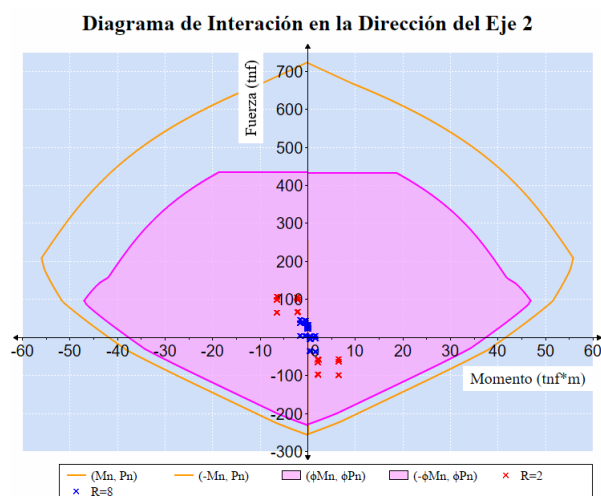
Espectro de diseño Norma Técnica E.030 R=6 y ASCE/SEI 7-22 R=2 zona 3



Nota. El gráfico muestra el espectro de diseño sísmico generado conforme a la Norma Técnica E.030 para la zona sísmica correspondiente, se observa que la aceleración espectral es mayor para periodos cortos.

Figura 49

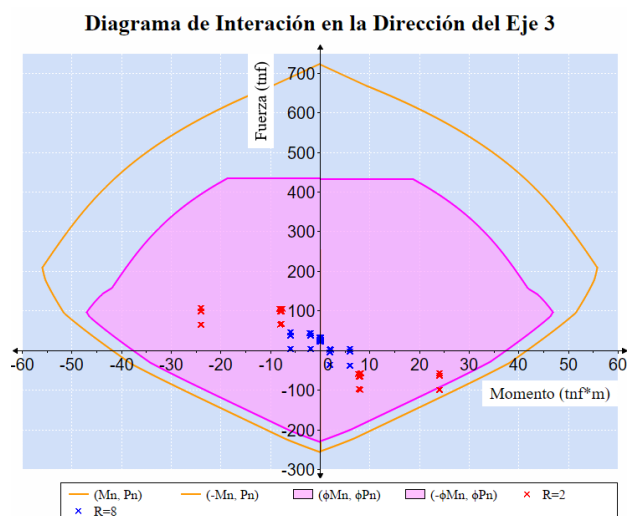
Diagrama de interacción de la columna C-1 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3 eje 2



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-1 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Figura 50

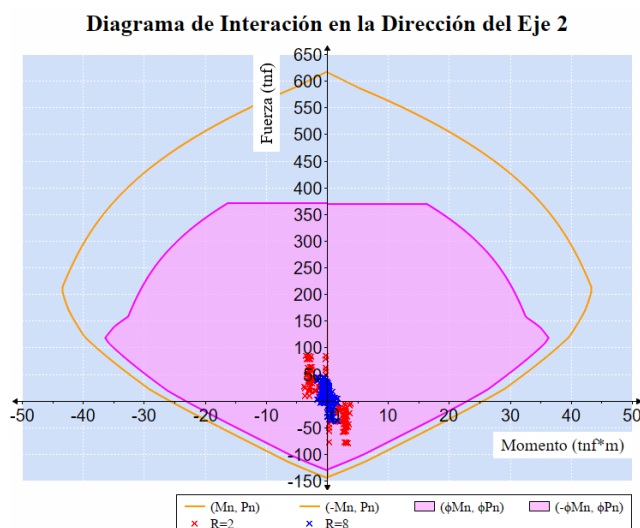
Diagrama de interacción de la columna C-1 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-1 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Figura 51

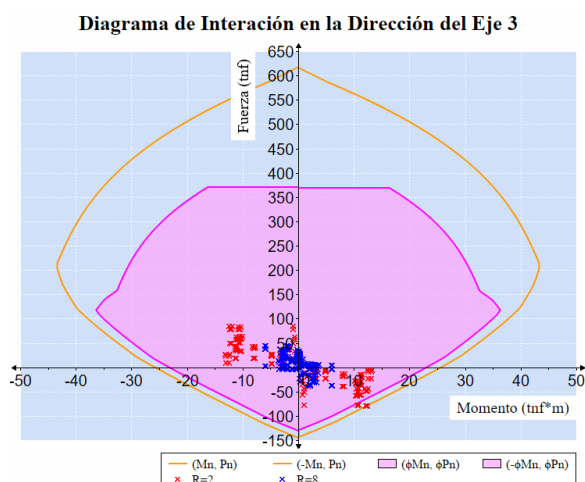
Diagrama de interacción de la columna C-2 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3 eje 2



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-2 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Figura 52

Diagrama de interacción de la columna C-2 Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna C-2 en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Tabla 49

Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3

Tipo de columna	Cortante	Componente	Norma Técnica E.030 (kgf)	ASCE/SEI 7-22 (kgf)
Columna C-1	Cortante última más crítica.	V2	3040.14	11889.83
		V3	887.25	3277.26
	Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	27935.31	27935.31
		V3	27935.31	27935.31
Columna C-2	Cortante última más crítica.	V2	3073.01	11627.85
		V3	984.50	3272.88
	Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	27935.31	27935.31
		V3	27935.31	27935.31

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente (Vc + Vs) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z3. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado.

Tabla 50

Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 3

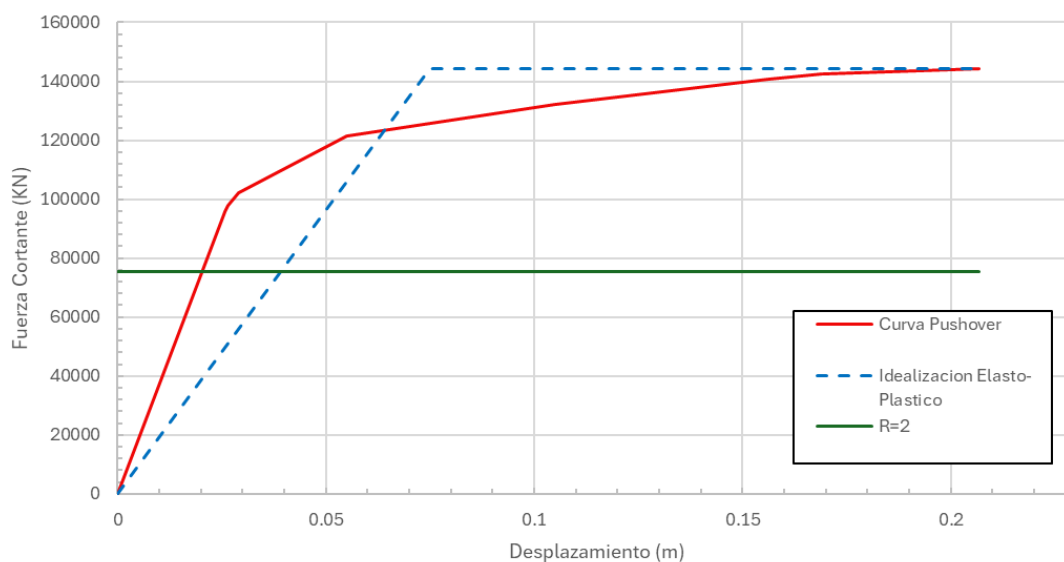
Cortante	Norma Técnica E.030	ASCE/SEI 7-22
Cortante último más crítico (kgf)	6476.21	20963.39
Cortante Resistente (kgf)	28360.44	28360.44
Momento último más crítico (kgf.m)	5800.06	22289.72
Momento resistente (kgf.m)	12338.48	12338.48

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante y momento último más críticos, así como las resistencias correspondientes de las vigas del tanque elevado en la zona sísmica Z3.

5.1.4.6.2 Curva Pushover. En la Figura 53 veremos la curva Pushover obtenida a partir del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y la curva horizontal calculado con ATC-19 para el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22.

Figura 53

Curva Pushover calculado con el ATC-19 en el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22 en la zona 3



Nota. La figura presenta la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z3, considerando un factor de reducción sísmica R = 2 según el ASCE/SEI 7-22, se observa que la demanda sigue por debajo.

Tabla 51

Resultados del factor R calculado con ATC-19 para el modelo con R=2 según ASCE/SEI 7-22 para la Zona Sísmica 3

Tanques	Factor de reducción			
	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z3	2.21	1.91	0.71	2.99

Nota. La tabla muestra el valor del factor de modificación de la respuesta sísmica R obtenido mediante la metodología ATC-19 (1995) para el tanque elevado de la zona sísmica Z3, considerando un rediseño con R = 2 según el ASCE/SEI 7-22.

5.1.4.7 Resultados del diseño y rediseño par la zona 3. En la siguiente Tabla 52, se podrá observar el factor de modificación de respuesta sísmica obtenido mediante el ATC-19 tanto para el diseño original y el modificado con el ASCE/SEI 7-22.

Tabla 52

Comparación del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño original y de ASCE/SEI 7-22 para el tanque Z3

Modelos	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z3 de diseño	2.55	1.35	0.71	2.43
Z3 de rediseño	2.21	1.91	0.71	2.99

Nota. La tabla presenta la comparación de los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica R obtenidos mediante la metodología ATC-19 (1995) para el tanque Z3 en su condición de diseño original y rediseño según el ASCE/SEI 7-22. Se observa un incremento de R de 2.43 a 2.99, debido principalmente al aumento del factor de sobrerresistencia. Este resultado evidencia que el rediseño mejora la capacidad estructural de disipación de energía sísmica.

5.1.5 Resultados del objetivo específico 4

5.1.5.1 Datos generales y condiciones de diseño para la zona 4

5.1.5.1.1 Descripción del tanque utilizado en el modelado. En la Figura 54 se presenta el tanque elevado de Instituto Educativa I.E.S.T.P. Manuel Yarlequé Espinoza, ubicado en la región de Piura, provincia de Piura y distrito de Tacataos. Esta estructura fue diseñada en el año 2022 y construida en el 2024, y tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 16.25 m³.

Tabla 53

Refuerzos de los elementos estructurales zona 4

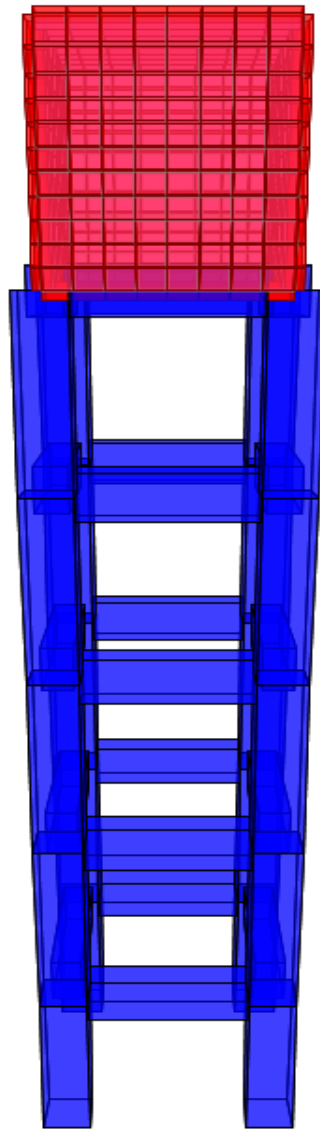
Elemento estructural	Dimensiones	Acero longitudinal	Acero transversal
Columnas	0.60x0.60 m	14Ø3/4"	1Ø3/8" 1@0.05 6@0.10 R@0.25
Vigas 001	0.40x0.60 m	12Ø3/4"	1Ø3/8" 1@0.05 10@0.10 R@0.25
Vigas 002	0.40x0.60 m	8Ø3/4"	1Ø3/8" 1@0.05 10@0.10 R@0.25
Vigas 003	0.40x0.60 m	6Ø3/4"+4Ø1/2"	1Ø3/8" 1@0.05 10@0.10 R@0.25
Muro del contenedor	e=0.20m	2Ø3/8"@0.25	2Ø3/8"@0.25
Losa inferior del contenedor	e=0.20m	2Ø3/8"@0.25	2Ø3/8"@0.25
Losa Techo	e=0.15m	2Ø3/8"@0.25	2Ø3/8"@0.25

Nota. La tabla muestra las dimensiones y el refuerzo de acero longitudinal y transversal adoptados para los principales elementos estructurales del tanque elevado en la zona sísmica 4. Se incluyen columnas, vigas, muros y losas del contenedor, considerando los requisitos de resistencia y confinamiento establecidos.

Estas características fueron verificadas de acuerdo a la Norma Técnica E.060, mediante un análisis lineal estático y dinámica utilizando un factor de respuesta sísmica de R=6, valor de diseño original con el que fue modelado.

Figura 54

Detalle general del tanque de la zona sísmica 4



Nota. El tanque elevado de la zona sísmica 4 está construido de concreto armado. El contenedor superior tiene una capacidad de 16.25 m³ de agua, este modelo de tanque fue utilizado como base para el proceso de modelado estructural y diseño sísmico, con el fin de evaluar su comportamiento estructural.

5.1.5.1.2 Propiedad de los materiales empleados en el tanque elevado

Tabla 54

Propiedades de los materiales zona 4

Material	Propiedades	Vigas	Columnas	Contenedor
Concreto	Peso específico, γ_c ($kg \cdot f / m^3$)	2400	2400	2400
	Densidad, ρ_c ($kg \cdot f - s^2 / m^4$)	244.73	244.73	244.73
	Resistencia a la Compresión, f'_c (kg/cm^2)	280	280	280
	Módulo de Elasticidad, E_c (kg/cm^2)	250998.01	250998.01	250998.01
	Coefficiente de Poisson, ν	0.15	0.15	0.15
	Módulo de Corte, G_c (kg/cm^2)	109129.57	109129.57	109129.57
Acero de refuerzo	Peso Específico, γ_s ($kg \cdot f / m^3$)	7849.05	7849.05	7849.05
	Densidad, ρ_s ($kg \cdot f - s^2 / m^4$)	800.38	800.38	800.38
	Resistencia a la fluencia, f_y (kg/cm^2)	4200	4200	4200
	Módulo de Elasticidad, E_s (kg/cm^2)	2×10^6	2×10^6	2×10^6

Nota. Esta tabla nos muestra las propiedades de los materiales del tanque elevado de la zona 3 empleados para su diseño en el programa SAP2000.

5.1.5.1.3 Parámetros sísmicos

Tabla 55

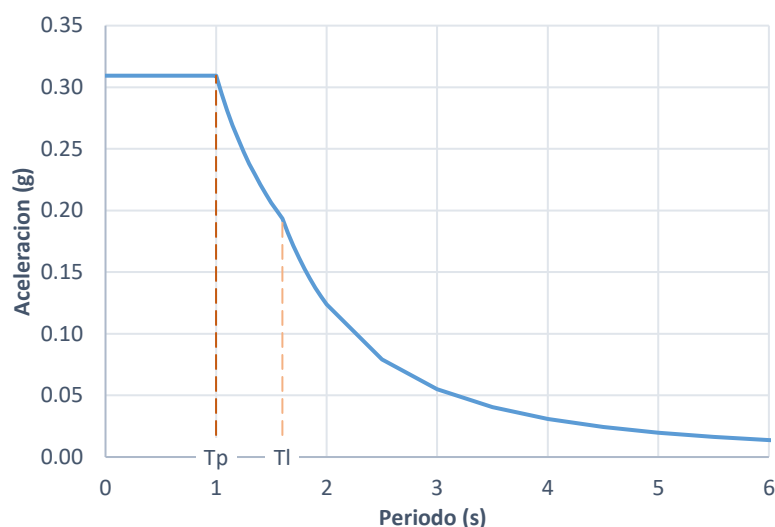
Parámetros sísmicos para la zona 4

Parámetros	Zona 4
Factor de zona (Z)	0.45
Factor de suelo (S)	1.10
Periodo que define la plataforma del factor C (TP)	1
Periodo que define el desplazamiento constante (TL)	1.6
Factor de uso (U)	1.5
Factor de modificación de respuesta (R)	6

Nota. Esta tabla nos muestra los parámetros sísmicos aplicados en el programa SAP2000 para el diseño del tanque elevado de concreto armado respecto a la zona 4.

Figura 55

Espectro de diseño usado para la zona sísmica 4



Nota. El espectro de diseño presentado corresponde al comportamiento sísmico esperado para un tanque elevado de concreto armado ubicado en la zona sísmica 4. Este espectro permite estimar la aceleración máxima que la estructura podría experimentar según su periodo natural.

5.1.5.1.4 Combinaciones de cargar. Para la combinación de cargas consideramos lo dispuesto en la Norma Técnica de Concreto Armado E.060, tal como se muestra a continuación.

Tabla 56

Combinación de cargas E.060 para la zona 4

Combinación de carga según E.060	
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV$	Comb. 1
$CU = 1.25 (CM + CV) + CS$	Comb. 2
$CU = 1.25 (CM + CV) - CS$	Comb. 3
$CU = 0.9 CM + CS$	Comb. 4
$CU = 0.9 CM - CS$	Comb. 5
$CU = 1.4 CM + 1.7 CV + 1.4 CL$	Comb. 6

Nota. En esta tabla se presentan las combinaciones de carga establecidas por la Norma Técnica E.060 para la evaluación estructural en la zona sísmica Z3. Las combinaciones consideran los efectos de las cargas muertas (CM), cargas vivas (CV) y cargas sísmicas (CS), adaptada según Norma Técnica E.060 (2009).

Donde:

CM : Carga muerta.

CV : Carga viva.

CL : Carga por la presión de fluidos.

CS : Carga por efectos de cargas producidas por sismo.

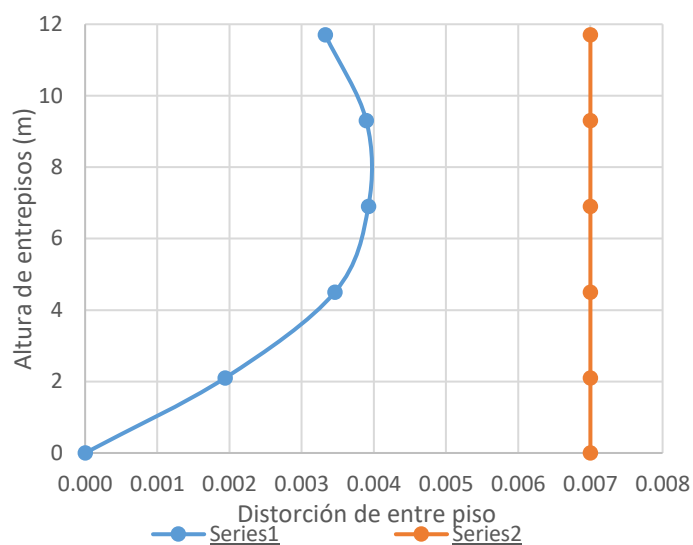
5.1.5.2 Análisis de diseño según la Norma Técnica E030. Para el diseño se realizó mediante un modelo computacional Sap2000 v.26.2.0, con el que se obtienen los resultados de los análisis estáticos y dinámicos del tanque elevado para la zona 1, con el factor de modificación de respuesta $R=8$ que fue considerada en el diseño de esta.

Tabla 57

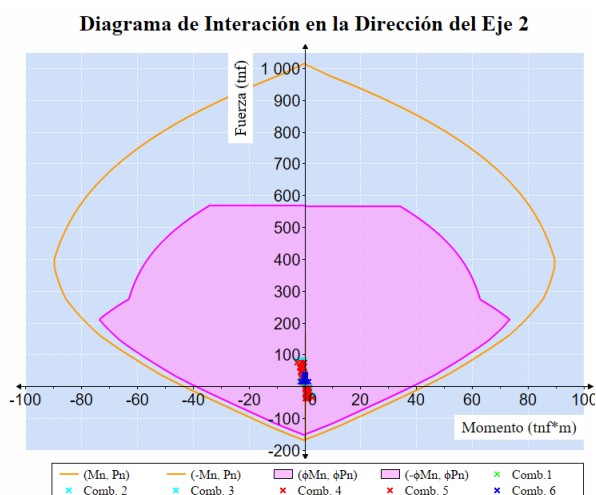
Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 zona 4

Parámetros	Resultados
Periodo fundamental, T (s)	0.250356
Cortante estático, Vs (kgf)	32314.8
Cortante dinámico, Vd (kgf)	26193.77
Momento (kgf.m)	284015.08
Cuantía (%)	1.10

Nota. En esta tabla se presentan los principales parámetros de diseño sísmico obtenidos para la zona Z4, considerando los criterios establecidos en las Normas Técnicas E.030 y E.060. Los resultados incluyen el período fundamental, los valores de cortante estático y dinámico, el momento máximo y la cuantía de refuerzo.

Figura 56*Distorsión de entrepiso zona 4*

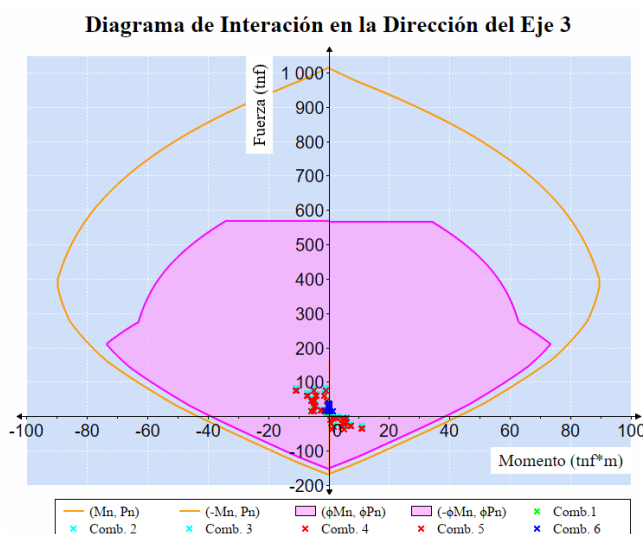
Nota. La figura muestra la variación de la distorsión de entrepiso a lo largo de la altura de la estructura para la zona sísmica Z4, se compara la deriva obtenida en el análisis estructural con el valor máximo permitido.

Figura 57*Diagrama de interacción de la columna zona 4 eje 2*

Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 4.

Figura 58

Diagrama de interacción de la columna zona 4 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 3, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 4.

Tabla 58

Verificación de cortante en columnas para la zona 4

Cortante	Componente	Resultado (kgf)
Cortante última más crítica.	V2	6674.57
	V3	1754.03
Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	27935.31
	V3	27935.31

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente (Vc + Vs) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z4. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado. La comparación entre ambos valores permite verificar que la capacidad resistente de las columnas es suficiente frente a la demanda sísmica, garantizando la seguridad estructural.

Tabla 59*Verificación de diseño de vigas para la zona 4*

	Cortante y Momentos	Resultado
VIGA 001	Cortante último más crítico (kgf)	11121.06
	Cortante resistente (kgf)	44566.40
	Momento último más crítico (kgf.m)	10817.67
	Momento resistente (kgf.m)	33005.27
VIGA 002	Cortante último más crítico (kgf)	10050.94
	Cortante Resistente (kgf)	44566.40
	Momento último más crítico (kgf.m)	10383.17
	Momento resistente (kgf.m)	27840.67
VIGA 003	Cortante último más crítico (kgf)	11001.95
	Cortante Resistente (kgf)	44566.40
	Momento último más crítico (kgf.m)	8204.09
	Momento resistente (kgf.m)	22049.56

Nota. En esta tabla se presentan los valores de cortante y momento último más críticos, así como las resistencias correspondientes de las vigas del tanque elevado en la zona sísmica Z4. Los resultados permiten comparar la demanda estructural con la capacidad resistente del elemento. Esta verificación asegura que las vigas cumplen con los criterios de seguridad establecidos por la normativa de diseño estructural.

5.1.5.3 Pushover – análisis estático no lineal

5.1.5.3.1 Configuración y ejecución del análisis no lineal Pushover. Para evaluar la capacidad estructural no lineal del tanque ante la acción sísmica, se desarrolló un análisis Pushover, este procedimiento permite determinar el comportamiento inelástico de la estructura y estimar el factor de modificación de la respuesta sísmica R. El proceso inició con la creación de una carga gravitacional no lineal, la cual incluyó:

- Carga muerta (escala 1.0).
- Carga viva (escala 0.5).
- Presión del agua (escala 1.0).

Figura 59

Configuración del caso de carga gravitacional no lineal zona 4

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: CGNL

Load Case Type: Static

Initial Conditions: Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Analysis Type: Nonlinear

Geometric Nonlinearity Parameters: None

Mass Source: Masa 1 CV 0.5

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	Carga muerta	1
Load Pattern	Carga viva	0.5
Load Pattern	Presion Agua	1

Other Parameters: Load Application: Full Load; Results Saved: Final State Only; Nonlinear Parameters: Default

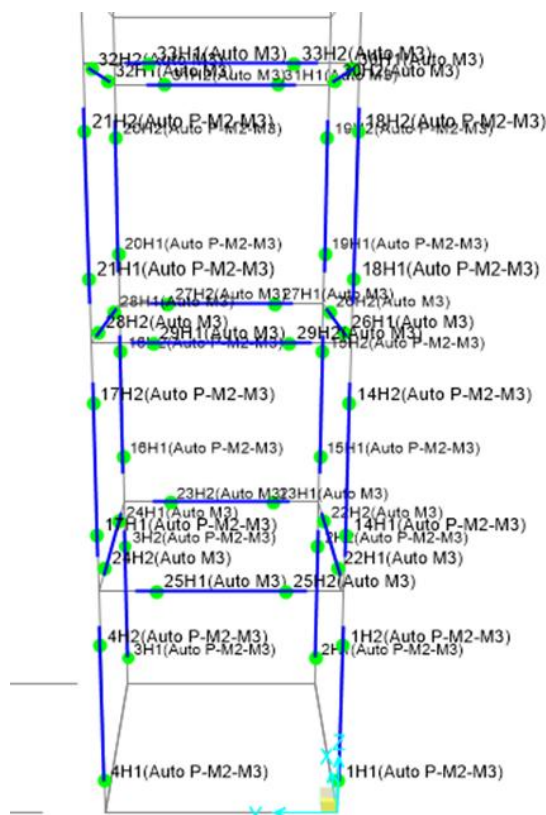
Nota. La figura muestra la configuración del caso de carga gravitacional no lineal utilizada en el análisis estructural del tanque elevado para la zona sísmica Z4 en el software SAP2000. Se consideran las cargas muertas, cargas vivas y la presión del agua, aplicadas bajo un análisis estático no lineal.

Esta carga fue definida como tipo Static – Nonlinear, y utilizada como carga base para el análisis progresivo, posteriormente se asignaron rotulas plásticas en las vigas y columnas conforme a la norma ASCE 41-13:

- Para las vigas se empleó la Tabla 10-7 (Concrete Beams – Flexure, M3), con rotulas ubicadas a distancias relativas basadas en la geometría de cada viga.
- Para las columnas se empleó la Tabla 10-8 (Concrete Columns), con la ubicación de rotulas según el nivel, respecto al primer piso la rótula inferior se ubicó a 0.001 por ausencia de viga inferior.

Figura 60

Rotulas aplicadas a las columnas y vigas en el modelo Z4



Nota. La figura muestra la ubicación de las rótulas plásticas asignadas a las columnas y vigas del tanque elevado en el modelo correspondiente a la zona sísmica Z4. Su aplicación es fundamental para identificar los mecanismos de falla, la ductilidad estructural y el desempeño sísmico global del sistema.

A continuación, se creó un Load Case tipo Pushover, de tipo Static – Nonlinear, tomando como condición inicial el estado final de la carga gravitacional no lineal previamente definida, como patrón de carga se utilizó el sismo estático en la dirección X, y se configuraron parámetros adicionales:

- En aplicación de carga se puso un punto de control de desplazamiento.
- La magnitud de desplazamiento objetivo se puso de 0.5 unidades.
- El punto de control de desplazamiento a elegir fue el que es ubicado en el medio de la mitad de la masa del agua.

Para optimizar el proceso, se ajustaron los parámetros numéricos:

- Máximo de pasos estáticos: 150.
- Máximo de pasos nulos: 30.
- Resultados guardados en múltiples estados (mínimo 10 y máximo 100).

Figura 61

Configuración para Pushover zona 4

S Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: PUSH X [Set Def Name]

Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- Continue from State at End of Nonlinear Case [CGNL]

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale
Load Pattern	Sismo Estatico X	1.
Load Pattern	Sismo Estatico X	1.

[Add] [Modify] [Delete]

Analysis Type:

- Linear
- Nonlinear

Geometric Nonlinearity Parameters:

- None
- P-Delta
- P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: Masa 1 CV 0.5

Other Parameters:

- Load Application: [Displ Control] [Modify/Show...]
- Results Saved: [Multiple States] [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: [User Defined] [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

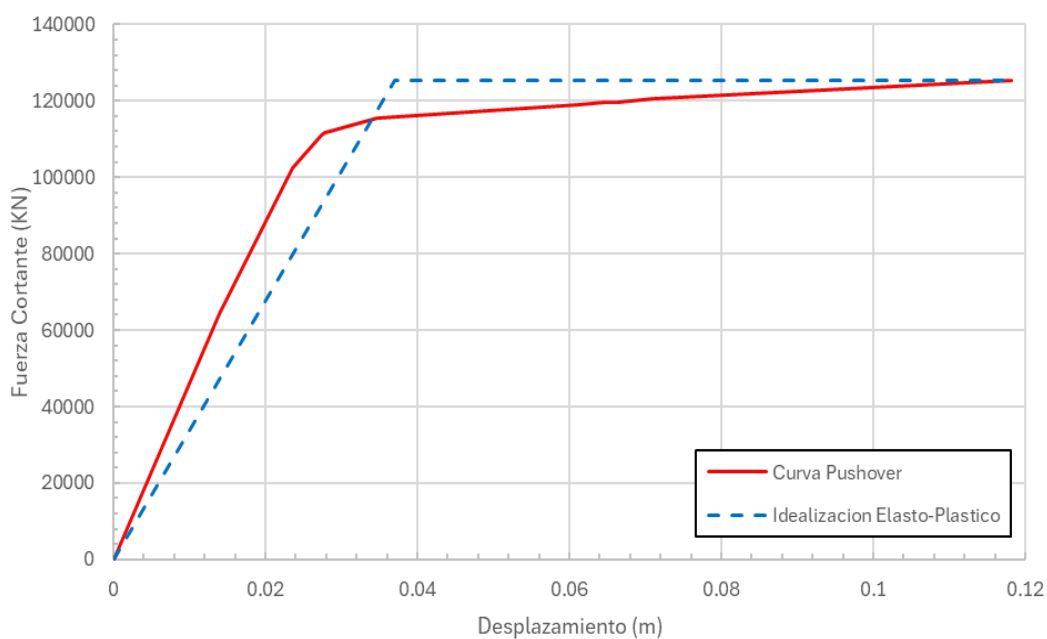
Nota. La figura presenta la configuración del caso de carga no lineal estático (Pushover) aplicada al tanque elevado en la zona sísmica Z4. Se utilizó un patrón de carga sísmica en la dirección X, con control por desplazamiento y análisis no lineal activado.

Con esta configuración, el modelo fue ejecutado con éxito, obteniéndose la curva capacidad, que permitió evaluar el comportamiento no lineal del sistema estructural.

5.1.5.3.2 Curva Pushover. Se determinaron las curvas Pushover para el tanque elevado rectangular de concreto armado a partir del análisis que se hizo anteriormente y considerando los parámetros sísmicos, con el cual se podrá obtener el factor de modificación de respuesta sísmica, las curva Pushover con su respectiva idealización elasto-plásticas se muestra en la Figura 62.

Figura 62

Curva Pushover del tanque de la zona sísmica 4



Nota. La figura muestra la curva Pushover del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z4, representando la relación entre el desplazamiento lateral y la fuerza cortante basal. La idealización elasto-plástica permite identificar el punto de fluencia y la capacidad última de la estructura. Esta curva se utiliza para evaluar la ductilidad, la sobrerresistencia y el comportamiento inelástico del sistema estructural.

5.1.5.4 Factor de reducción para la determinación de R

5.1.5.4.1 Factor de reducción por ductilidad. Se calculo el factor de reducción por ductilidad mediante la ecuación de Mirada y Bertero (1994). En la Tabla 60 se muestra el resultado obtenido para la zona sísmica 4.

Tabla 60

Factor de ductilidad (R_{μ}) zona 4

Tanques	Factor de reducción por ductilidad					
	Δ_{max}	Δ_y	$\mu_{desplaz.}$	$T(seg.)$	ϕ	R_{μ}
Z4	0.11814	0.037	3.19	0.250	1.58	2.39

Nota. La tabla presenta el cálculo del factor de reducción por ductilidad (R_{μ}) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z2, a partir de los desplazamientos máximos (Δ_{max}) y de fluencia (Δ_y) obtenidos del análisis Pushover, también se incluyen el período fundamental, el factor ϕ y el valor final de R_{μ} .

5.1.5.4.2 Factor de reducción sobrerresistencia. Se calculo el factor de reducción por sobrerresistencia (R_s) igual al cociente entre el cortante basal máximo (V_{max}) y la cortante de diseño (V_d). En la Tabla 61 se muestra el resultado obtenido para el tanque Z4.

Tabla 61

Factor de sobrerresistencia (R_s) zona 4

Tanques	Factor de reducción por sobrerresistencia		
	$V_{max}(kgf)$	$V_d(kgf)$	R_s
Z4	125465.23	56157.52	2.23

Nota. La tabla muestra el cálculo del factor de sobrerresistencia (R_s) del tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z4, obtenido a partir de la relación entre la fuerza cortante máxima (V_{max}) y la fuerza de diseño (V_d) extraídas de la curva Pushover. Este factor representa la capacidad adicional de resistencia estructural más allá del nivel de diseño.

5.1.5.4.3 Factor de reducción de por redundancia. El factor de reducción por redundancia R_R se determinó mediante el literal 4.5, capítulo 4 del ítem 4.5.3 del código internacional ATC 19 (Structural Modification Factors). Para el caso de tanques elevados con soporte aporticado los números de ejes de columnas es reducido por lo que el factor de reducción por redundancia será igual a 0.71.

5.1.5.5 Ajuste del factor R mediante análisis iterativo. Una vez obtenidos los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica R a través del método propuesto por el ATC-19 (1995), con el objetivo de verificar la capacidad real del sistema.

Este proceso consistió en reducir el valor de R en el espectro hasta alcanzar el punto en el que la estructura mantuviera un Capacity Ratio (relación de capacidad) menor a 1.0.

Tabla 62

Resultados de la iteración de los factores de reducción sísmica según el ATC-19 (1995) zona 4

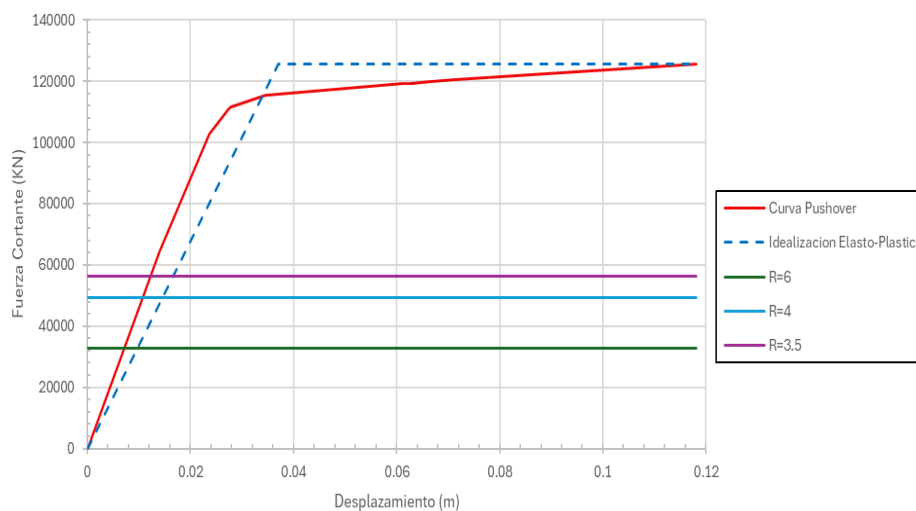
Tanques	R iterado	R_μ	R_s	R_R	R
	6	2.39	3.83	0.71	6.49
Z4	4	2.39	3.83	0.71	4.33
	3.5	2.39	2.55	0.71	3.79

Nota. La tabla presenta los resultados de la iteración del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z4, considerando los factores de ductilidad (R_μ), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_r).

En las Figura 63 se muestra la curva Pushover obtenida a partir del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y las curvas horizontales que representan diferentes valores del factor R.

Figura 63

Comparación de la curva Pushover con distintos factores R en la zona 4



Nota. La figura muestra la comparación de la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z4 con diferentes valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R). Se observa cómo la reducción de fuerzas sísmicas varía en función del valor de R adoptado.

5.1.5.5.1 Factor de modificación de respuesta sísmica. El factor de modificación de respuesta sísmica será igual al producto del factor de reducción por ductilidad con el factor de reducción por sobrerresistencia y el factor de reducción por redundancia. En la Tabla 63 se muestra el resultado obtenido para el tanque Z4.

Tabla 63

Factor de modificación de respuesta sísmica basado en el análisis Pushover zona 4

Tanques	Factor de reducción			
	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z4	2.39	2.23	0.71	3.79

Nota. La tabla presenta los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) obtenidos mediante el análisis Pushover para el tanque elevado ubicado en la zona sísmica Z4. El valor final de R se calcula como el producto de los factores de ductilidad (R_{μ}), sobrerresistencia (R_s) y redundancia (R_R), reflejando el comportamiento inelástico real de la estructura frente a la demanda sísmica.

5.1.5.6 Comparación del diseño y rediseño basado en la Norma ASCE/SEI 7-22

5.1.5.6.1 Parámetros de rediseño

Tabla 64

Resultados de parámetros básicos según la Norma Técnica E.030 y E.060 versus ASCE/SEI 7-22

zona 4

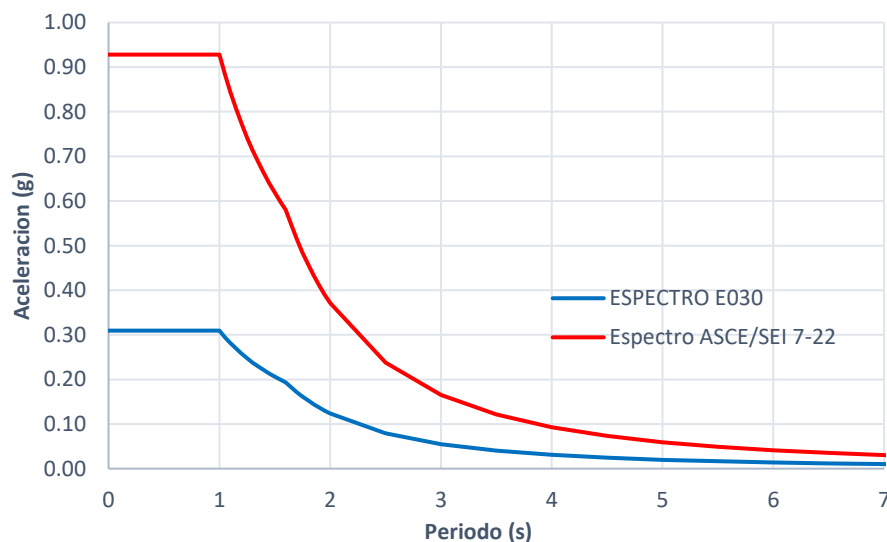
Parámetros	E.030	ASCE/SEI 7-22
Factor de reducción sísmica R	7	2
Periodo fundamental, T (s)	0.250356	0.250356
Cortante estático, V_s (kg.f)	32314.8	96944.4
Cortante dinámico, V_d (kg.f)	26193.77	78574.95
Momento (kgf * m)	284015.08	104111.81
Cuantía (%)	1.10	1.10

Nota. En la tabla se observa que el uso de un factor de reducción sísmica menor en ASCE/SEI 7-22

($R = 2$) genera mayores fuerzas internas, incrementando los valores de cortante y momento.

Figura 64

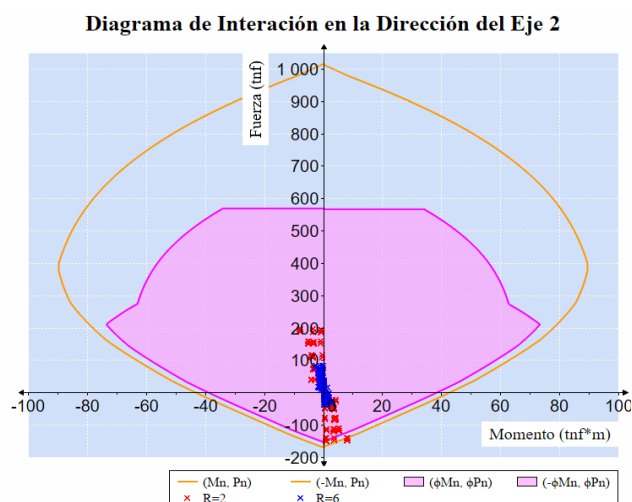
Espectro de diseño Norma Técnica E.030 $R=8$ y ASCE/SEI 7-22 $R=2$ zona 4



Nota. El gráfico muestra el espectro de diseño sísmico generado conforme a la Norma Técnica E.030 para la zona sísmica correspondiente, se observa que la aceleración espectral es mayor para periodos cortos.

Figura 65

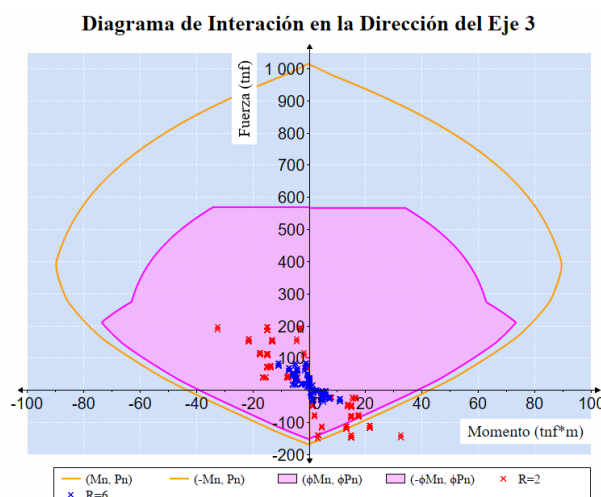
Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 4 eje 2



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Figura 66

Diagrama de interacción de la columna Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 4 eje 3



Nota. La figura muestra el diagrama de interacción muestra la capacidad resistente de la columna en ambas direcciones, destacando específicamente su comportamiento en la dirección del eje 2, este análisis es esencial y está dada para cada una de las combinaciones de carga en zona sísmica 3.

Tabla 65

Verificación de cortante en columnas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 4

Cortante	Componente	Norma Técnica E.030 (kgf)	ASCE/SEI 7-22 (kgf)
Cortante última más crítica.	V2	6674.57	19769.87
	V3	1754.03	4993.02
Cortante resistente (Vc+Vs)	V2	27935.31	27935.31
	V3	27935.31	27935.31

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante último más crítico y de cortante resistente (Vc + Vs) para las columnas del tanque elevado en la zona sísmica Z4. Los resultados corresponden a los componentes estructurales V2 y V3, obtenidos a partir del análisis estructural realizado.

Tabla 66

Verificación de diseño de vigas Norma Técnica E.030 y ASCE/SEI 7-22 zona 4

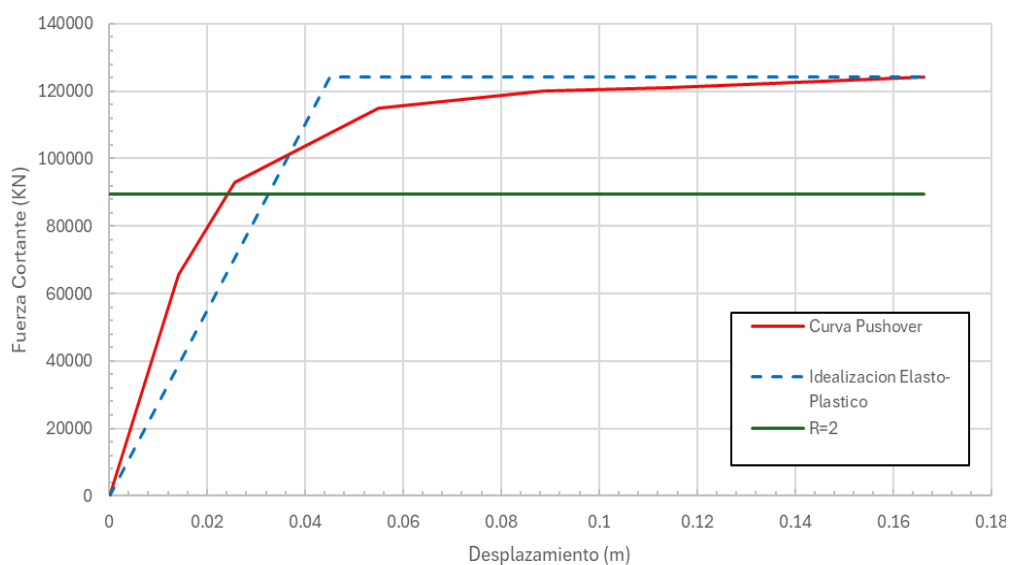
Elemento	Cortante y Momentos	Norma Técnica E.030	ASCE/SEI 7-22
VIGA 001	Cortante último más crítico (kgf)	11121.06	31884.67
	Cortante Resistente (kgf)	44566.40	44566.40
	Momento último más crítico (kgf.m)	10817.67	32100.41
	Momento resistente (kgf.m)	33005.27	33005.27
VIGA 002	Cortante último más crítico (kgf)	10050.94	29671.18
	Cortante Resistente (kgf)	44566.40	44566.40
	Momento último más crítico (kgf.m)	10383.17	29821.48
	Momento resistente (kgf.m)	27840.67	27840.67
VIGA 003	Cortante último más crítico (kgf)	11001.95	28458.39
	Cortante Resistente (kgf)	44566.40	44566.40
	Momento último más crítico (kgf.m)	8204.09	24169.58
	Momento resistente (kgf.m)	22049.56	22049.56

Nota. En esta tabla se presentan una comparación de la Norma E.030 respecto a la ASCE/SEI 7-22 en cuanto a los valores de cortante y momento último más críticos, así como las resistencias correspondientes de las vigas del tanque elevado en la zona sísmica Z4.

5.1.5.6.2 Curva Pushover. En la Figura 67 vemos la curva Pushover obtenida a partir del análisis no lineal estático, junto con su idealización elasto-plástica y la curva horizontal calculado con ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22.

Figura 67

Curva Pushover calculado con el ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 en la zona 4



Nota. La figura presenta la curva Pushover del tanque elevado en la zona sísmica Z4, considerando un factor de reducción sísmica $R = 2$ según el ASCE/SEI 7-22, se observa que la demanda sigue por debajo.

Tabla 67

Resultados del factor R calculado con ATC-19 para el modelo con $R=2$ según ASCE/SEI 7-22 para la zona sísmica 4

Tanques	Factor de reducción			
	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z4	2.66	1.39	0.71	2.62

Nota. La tabla muestra el valor del factor de modificación de la respuesta sísmica R obtenido mediante la metodología ATC-19 (1995) para el tanque elevado de la zona sísmica Z4, considerando un rediseño con $R = 2$ según el ASCE/SEI 7-22.

5.1.5.7 Resultados del diseño y rediseño par la zona 4. En la siguiente Tabla 68 se podrá observar el factor de modificación de respuesta sísmica obtenido mediante el ATC-19 tanto para el diseño original y el modificado con el ASCE/SEI 7-22.

Tabla 68

Comparación del factor R obtenida por el ATC-19 del diseño original y de ASCE/SEI 7-22 para el tanque Z4

Modelos	R_{μ}	R_s	R_R	R
Z4 de diseño	2.39	2.23	0.71	3.79
Z4 de rediseño	2.66	1.39	0.71	2.62

Nota. La tabla presenta la comparación del factor de modificación de la respuesta sísmica (R) obtenido mediante la metodología ATC-19 para el diseño original y el rediseño según ASCE/SEI 7-22 del tanque Z4. Se muestran los valores de ductilidad (R_{μ}), sobrerresistencia (R_s), redundancia (R_R) y el factor R global. Los resultados evidencian diferencias significativas entre ambos enfoques de diseño.

5.2 Discusiones

Del objetivo general

El objetivo general de la investigación fue evaluar el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado considerando la demanda sísmica de la Norma Técnica E.030 del Perú-2023. Los resultados obtenidos mediante la metodología ATC-19 evidencian que los valores reales del factor R , calculados a partir de los diseños originales realizados con $R = 8$, se reducen significativamente, obteniéndose valores de $R = 2.86$ para la zona Z1, 2.54 para Z2, 2.43 para Z3 y 3.79 para Z4. Estos resultados confirman que los tanques elevados evaluados no desarrollan la ductilidad, sobrerresistencia y redundancias implícitamente asumidas por el valor normativo $R = 8$.

Desde un punto de vista conceptual, estos resultados son coherentes con lo planteado por Miranda y Bertero (1994), quienes establecieron que el factor R no constituye un valor constante, sino que depende del comportamiento inelástico real de la estructura. Asimismo, Husain y Tsopelas (2004) demostraron que la redundancia estructural influye de manera significativa en el valor del factor R , aspecto que resulta limitado en sistemas estructurales tipo pórtico esbeltos, como los tanques elevados analizados.

Desde un punto de vista cuantitativo, los valores de R obtenidos se encuentran dentro de los rangos reportados por El-Far et al. (2022), quienes obtuvieron valores de R comprendidos entre 2 y 5 para tanques elevados de concreto armado analizados mediante Pushover. De manera similar, Pandian et al. (2024) señalaron que el factor R puede variar entre 2 y 9 en función del nivel de ductilidad alcanzado, siendo los valores bajos representativos de sistemas con ductilidad moderada. Por su parte, Soroushnia et al. (2011) evidenciaron que los tanques elevados presentan mecanismos de falla particulares que restringen su capacidad de disipación de energía, lo cual explica la obtención de valores de

R inferiores a los considerados para edificaciones convencionales. En consecuencia, los resultados de la presente investigación confirman que el valor $R = 8$ adoptado por la Norma Técnica E.030 resulta conservador para tanques elevados rectangulares de concreto armado.

Objetivo específico 1 – Analizar el factor R en zona sísmica 1 ($Z1 = 0.10g$)

Para la zona sísmica Z1, el valor obtenido de $R = 2.86$ mediante la aplicación del ATC-19 a los diseños originales con $R = 8$ evidencia que, aun bajo una demanda sísmica reducida, el sistema estructural del tanque no desarrolla una capacidad inelástica elevada. Este comportamiento concuerda con lo indicado por Pandian et al. (2024), quienes demostraron que el factor R está gobernado principalmente por la ductilidad estructural y no por la intensidad sísmica del sitio.

Asimismo, El-Far et al. (2022) reportaron valores de R entre 2 y 4 para tanques de baja altura y menor demanda sísmica, lo cual resulta consistente con el valor obtenido en esta zona. Desde un enfoque conceptual, Miranda y Bertero (1994) señalan que la adopción de valores elevados de R en estructuras con ductilidad limitada conduce a diseños conservadores, lo cual explica la discrepancia observada entre el valor normativo $R = 8$ y el valor real obtenido en esta investigación.

Objetivo específico 2 – Analizar el factor R en zona sísmica 2 ($Z2 = 0.25g$)

En la zona sísmica Z2, el valor de $R = 2.54$ obtenido a partir del diseño original refleja una ligera variación respecto a la zona Z1, atribuida al incremento de la demanda sísmica. No obstante, dicho incremento no se traduce en un aumento proporcional del factor R, lo que evidencia que la estructura no logra desarrollar mayores niveles de ductilidad ni sobrerresistencia.

Este comportamiento es conceptualmente consistente con lo señalado por Husain y Tsopelas (2004), quienes indicaron que la contribución de la sobrerresistencia y la redundancia al factor R depende de la configuración estructural, y no únicamente de la

demanda sísmica. Asimismo, Miranda y Bertero (1994) establecieron que el aumento de la demanda sísmica no garantiza un incremento del factor R si el sistema estructural presenta limitaciones inelásticas. Desde el punto de vista cuantitativo, el valor obtenido se mantiene dentro del rango reportado por El-Far et al. (2022) para tanques elevados analizados mediante Pushover.

Objetivo específico 3 – Analizar el factor R en zona sísmica 3 ($Z3 = 0.35g$)

Para la zona sísmica Z3, el valor de $R = 2.43$ obtenido mediante ATC-19 evidencia una reducción del factor R respecto a las zonas de menor demanda sísmica. Este comportamiento indica que, a medida que aumenta la peligrosidad sísmica, la estructura alcanza más rápidamente su rango inelástico, limitando su capacidad de disipación de energía.

Este resultado es cuantitativamente coherente con los valores reportados por El-Far et al. (2022) para escenarios de mayor demanda sísmica, donde se obtuvieron valores de R cercanos a 2. Desde un enfoque conceptual, Soroushnia et al. (2011) señalaron que los tanques elevados presentan mecanismos de falla que restringen su ductilidad global, mientras que Pandian et al. (2024) indicaron que, en sistemas con ductilidad moderada, el factor R tiende a adoptar valores bajos. En consecuencia, los resultados obtenidos en la zona Z3 refuerzan la necesidad de adoptar valores de R más realistas para tanques elevados en zonas de peligrosidad sísmica intermedia a alta.

Objetivo específico 4 – Analizar el factor R en zona sísmica 4 ($Z4 = 0.45g$)

En la zona sísmica Z4, correspondiente a la mayor demanda sísmica considerada, el valor de $R = 3.79$ obtenido a partir del diseño original con $R = 8$ evidencia que, aun cuando el factor R aumenta respecto a las zonas Z2 y Z3, la capacidad inelástica del sistema estructural continúa siendo significativamente inferior a la asumida por la Norma Técnica

E.030. Este comportamiento puede atribuirse a la activación temprana de mecanismos de falla que limitan la ductilidad global del sistema.

Desde un enfoque conceptual, Miranda y Bertero (1994) establecieron que, bajo demandas sísmicas elevadas, el factor R debe adoptarse con criterios conservadores si la estructura no desarrolla una adecuada capacidad inelástica. Asimismo, Soroushnia et al. (2011) identificaron que los tanques elevados presentan patrones de daño que restringen su desempeño sísmico en zonas de alta peligrosidad. Desde el punto de vista cuantitativo, el valor obtenido se encuentra dentro del rango reportado por El-Far et al. (2022) y es coherente con los resultados de Pandian et al. (2024) para estructuras con ductilidad limitada sometidas a altas demandas sísmicas.

Adicionalmente, el rediseño estructural realizado conforme al ASCE/SEI 7-22, empleando un valor $R = 2$, permitió obtener un valor de $R = 2.62$ mediante ATC-19, confirmando que el uso de un factor R reducido conduce a un diseño más coherente con el comportamiento real del tanque elevado en zonas de alta peligrosidad sísmica. En consecuencia, los resultados obtenidos en la zona Z4 evidencian que el valor normativo $R = 8$ resulta inadecuado para tanques elevados rectangulares de concreto armado en zonas sísmicas de alta intensidad.

5.3 Prueba de hipótesis

5.3.1 Validación de hipótesis general

5.3.1.1 Hipótesis general. El factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado, estimado mediante la demanda sísmica establecida en la Norma Técnica E.030 del Perú, presentará valores diferentes a los reportados por referencias internacionales debido a las condiciones sísmicas locales.

5.3.1.1.1 Método de validación. Se empleó un método comparativo–determinístico con criterio de aceptación técnica, en el que:

1. Se modelaron los tanques elevados en SAP2000 según planos originales.
2. Se aplicó el análisis Pushover para obtener las curvas capacidad–demanda.
3. Se calculó el factor R usando la metodología del ATC-19, que descompone R en sus componentes de ductilidad, sobrerresistencia y redundancia.
4. Se contrastaron los valores obtenidos con:
 - El R de diseño original (planos).
 - El R recomendado por la ASCE/SEI 7-22 para reservorios elevados.
 - Los valores obtenidos en iteraciones del espectro de diseño hasta la capacidad límite sin colapso.

5.3.1.1.2 Resultado de validación. Los valores del factor de modificación de la respuesta sísmica obtenidos mediante la metodología ATC-19 difieren de los valores reportados por referencias internacionales y de los valores utilizados en los diseños originales. Asimismo, se observó que los valores iterados del espectro representan estados límite teóricos, mientras que el valor de R obtenido por ATC-19 refleja de manera más realista el comportamiento estructural no lineal. En consecuencia, la hipótesis general se acepta.

5.3.2 Validación de hipótesis específicas

5.3.2.1 Hipótesis específica 1. Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z1=0.10g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.

5.3.2.1.1 Validación. En la zona sísmica Z1, el factor R obtenido mediante ATC-19 fue significativamente menor que los valores de referencia internacionales y del diseño original, evidenciando un comportamiento estructural conservador. Los valores elevados obtenidos en las iteraciones del espectro corresponden a estados límite teóricos y no al comportamiento real de diseño. Por lo tanto, la hipótesis se acepta.

5.3.2.2 Hipótesis específica 2. Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z2=0.25g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.

5.3.2.2.1 Validación. En la zona sísmica Z2, el valor de R obtenido mediante ATC-19 fue inferior a los valores normativos y de referencia internacional, confirmando que el comportamiento estructural real difiere de los supuestos iniciales de diseño. En consecuencia, la hipótesis se acepta.

5.3.2.3 Hipótesis específica 3. Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z3=0.35g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.

5.3.2.3.1 Validación. En la zona sísmica Z3, el análisis no lineal mostró que el factor R real obtenido mediante ATC-19 es menor que los valores adoptados convencionalmente, lo que evidencia la necesidad de evaluar el comportamiento estructural real. Por lo tanto, la hipótesis se acepta.

5.3.2.4 Hipótesis específica 4. Si se considera una aceleración máxima horizontal $Z4=0.45g$ en suelo rígido del territorio peruano, entonces el factor de modificación de la respuesta sísmica de tanques elevados rectangulares de concreto armado será significativamente diferente al estimado por valores de referencia internacionales.

5.3.2.4.1 Validación. En la zona sísmica Z4, el valor de R obtenido mediante ATC-19 fue del mismo orden de magnitud que los valores de referencia, indicando que en zonas de mayor demanda sísmica el diseño original resulta menos conservador. En consecuencia, la hipótesis se acepta.

VI. Conclusiones

Conclusión del objetivo general

De la evaluación se determinó que los factores R obtenidos para tanques elevados rectangulares de concreto armado, considerando la demanda sísmica de la Norma Técnica E.030 del Perú, son: 2.86 (Z1), 2.54 (Z2), 2.43 (Z3) y 3.79 (Z4). Estos valores son entre 52.1 % y 69.6 % menores que el valor único $R = 8$ que establece la norma peruana. La diferencia porcentual evidencia que el uso de $R = 8$ resulta deficiente para este tipo de estructuras, ya que sobreestima la capacidad de disipación de energía y reduce de forma excesiva las fuerzas sísmicas de diseño, lo que podría comprometer la seguridad estructural. Este hallazgo concuerda con las recomendaciones de normas internacionales como ASCE 7-22, y IS 1893, que asignan valores de R significativamente menores (entre 2.0 y 4.0) para tanques elevados de concreto armado.

Conclusión del objetivo específico 1 ($Z1 = 0.10g$)

Para la zona sísmica $Z1 = 0,10 g$ en suelo rígido, el diseño inicial se desarrolló según la Norma Técnica E.030, que establece un valor único de $R = 8$ para tanques elevados de concreto armado. Sin embargo, al aplicar el procedimiento de la ATC-19 a este diseño, se obtuvo un factor real $R = 2,86$, lo que representa una reducción del 64,25 % respecto al valor normativo, evidenciando que la norma peruana sobrestima la capacidad de disipación de energía de este tipo de estructuras en esta zona. Posteriormente, se realizó un rediseño considerando $R = 2$, siguiendo la recomendación de la ASCE/SEI 7-22 para tanques elevados de concreto armado. Aplicando nuevamente la ATC-19 a este rediseño, se obtuvo $R = 5,21$, lo que representa un aumento del 160,5 % respecto al valor adoptado en el rediseño, pero aún 34,88 % menor que el valor normativo peruano.

Estos resultados confirman que mantener el valor único de $R = 8$ en la Norma Técnica E.030 conduce a diseños potencialmente inseguros para la zona Z1 y que la adopción de

valores más realistas, como los recomendados por normas internacionales, mejora la coherencia entre el diseño teórico y el comportamiento esperado.

Conclusión del objetivo específico 2 ($Z_2 = 0.25g$)

Para la zona sísmica $Z_2 = 0,25 g$ en suelo rígido, el diseño inicial se desarrolló siguiendo la Norma Técnica E.030, que establece un valor único de $R = 8$. Sin embargo, al evaluar este diseño mediante la ATC-19, se obtuvo un factor real $R = 2,54$, lo que representa una reducción del 68,25 % respecto al valor normativo, evidenciando nuevamente una sobrestimación de la capacidad de disipación sísmica. Posteriormente, se efectuó un rediseño con $R = 2$, de acuerdo con las recomendaciones de la ASCE/SEI 7-22 para tanques elevados de concreto armado. La aplicación de la ATC-19 al rediseño arrojó un valor $R = 3,16$, lo que representa un incremento del 58,0 % respecto al valor adoptado en el rediseño, pero todavía 60,5 % menor que el valor normativo peruano.

Estos resultados ratifican que el uso de $R=8$ en la Norma Técnica E.030 genera diseños no representativos del desempeño real de la estructura para la zona Z_2 , y que la implementación de valores más conservadores, como los de normas internacionales, contribuye a obtener diseños más seguros y coherentes con la realidad sísmica local.

Conclusión del objetivo específico 3 ($Z_3 = 0.35g$)

Para la zona sísmica $Z_3 = 0,35 g$ en suelo rígido, el diseño inicial siguiendo la Norma Técnica E.030 con $R = 8$ fue evaluado mediante la ATC-19, obteniéndose un valor real $R = 2,43$, lo que implica una reducción del 69,63 % respecto al valor normativo. Esto evidencia que la capacidad real de disipación de energía es considerablemente menor a la asumida por la norma, lo que podría traducirse en un riesgo estructural mayor en caso de sismo. En el rediseño adoptando $R = 2$ según recomendaciones de la ASCE/SEI 7-22 y normas internacionales para tanques elevados de concreto armado, la evaluación mediante la ATC-

19 arrojó $R = 2,99$, lo que representa un incremento del 49,5 % respecto al valor de diseño del rediseño, pero todavía 62,63 % menor que el valor normativo peruano.

Estos resultados confirman que para zonas de alta sismicidad como Z3, el uso de $R = 8$ en la Norma Técnica E.030 sobrestima de forma significativa el desempeño sísmico real, mientras que valores ajustados a estándares internacionales permiten diseños más coherentes con la demanda sísmica real y con mayor seguridad estructural.

Conclusión del objetivo específico 4 ($Z4 = 0.45g$)

Para la zona sísmica $Z4 = 0,45$ g en suelo rígido, el diseño inicial según la Norma Técnica E.030 con $R = 6$, evaluado mediante la ATC-19, arrojó un valor real de $R = 3,79$, equivalente a una reducción del 52,63 % respecto al valor normativo. Aunque esta diferencia es menor que en zonas de menor aceleración, sigue evidenciando que el R normativo sobrestima la capacidad de disipación de energía del sistema estructural. En el rediseño adoptando $R = 2$, siguiendo la ASCE/SEI 7-22 y otras referencias internacionales, el valor evaluado mediante la ATC-19 fue $R = 2,62$, representando un incremento del 31 % respecto al valor de diseño del rediseño, pero aún 67,25 % menor que el valor normativo peruano.

Estos resultados confirman que incluso en zonas de máxima aceleración sísmica, el uso del valor único $R = 8$ en la Norma Técnica E.030 no refleja la capacidad real de disipación de energía de tanques elevados de concreto armado. Adoptar valores ajustados, alineados con normas internacionales, contribuiría a diseños más seguros y realistas para este tipo de estructuras críticas.

VII. Recomendaciones

Para el objetivo general

De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda no utilizar el valor único de $R=8$ establecido por la Norma Técnica E.030 para tanques elevados rectangulares de concreto armado, ya que este valor sobreestima de manera significativa la capacidad de disipación de energía de este tipo de estructuras. En su lugar, se propone adoptar valores diferenciados por zona sísmica, de acuerdo con las condiciones de peligro y las características estructurales evaluadas. Así, para la zona sísmica Z1 (0,10 g) se sugiere un valor de $R=3$ aproximadamente, para Z2 (0,15 g) y Z3 (0,35 g) valores de $R=2,5$ aproximadamente, y para Z4 (0,45 g) un valor de $R=3,8$ aproximadamente. Estos valores coinciden estrechamente con los obtenidos mediante el procedimiento ATC-19 y se alinean con los rangos de 2,5 a 3,5 establecidos en normas internacionales como la ASCE/SEI 7-22, la AWWA D115-20 y la IS 1893 (Parte 2) – 2016. En caso de que no se disponga de un análisis específico, se recomienda adoptar como referencia conservadora un R mínimo de 2,5 en Z1–Z3 y un máximo de 3,8 en Z4.

Asimismo, se sugiere que el valor de R sea siempre verificado para cada proyecto mediante procedimientos como el ATC-19 o análisis basados en desempeño (PBSD), modelando de forma adecuada la interacción fluido–estructura, considerando la masa impulsiva y convectiva del fluido, la rigidez real del soporte y el amortiguamiento estructural e hidrodinámico. Este análisis debe incluir un Pushover con formación de rótulas plásticas y un tiempo historia con registros compatibles con el espectro de la Norma Técnica E.030, evaluando criterios como derivas, rotación plástica, resistencia a cortante por capacidad y prevención del colapso.

En el diseño estructural se debe priorizar la aplicación del diseño por capacidad, de forma que las fallas ocurran de manera dúctil por flexión y se evite la falla frágil a cortante.

Esto implica dimensionar el cortante por capacidad en vigas y columnas del soporte, verificar anclajes y conexiones para fuerzas máximas post-fluencia y garantizar detalles dúctiles mediante confinamiento, estribado cerrado y longitudes de anclaje adecuadas. También se recomienda considerar la torsión accidental que pueda generarse por asimetrías en la masa o la rigidez del sistema.

Desde el punto de vista del comportamiento hidrodinámico, es indispensable modelar la interacción fluido–estructura verificando la altura de oleaje y el francobordo suficiente para evitar el desborde, así como las presiones hidrodinámicas en la cuba y las paredes. Se debe incluir la flexibilidad real de la fundación en el modelo y verificar el efecto de la aceleración vertical en elementos sensibles.

Para condiciones de servicio, se recomienda controlar la fisuración en elementos en contacto con agua para garantizar durabilidad e impermeabilidad, limitar las vibraciones y desplazamientos para proteger la integridad de tuberías y accesorios, y asegurar la continuidad operativa del tanque tras sismos de servicio frecuente.

Finalmente, se recomienda a nivel normativo que la Norma Técnica E.030 incluya valores específicos de R para tanques elevados de concreto armado y exija la modelación fluido–estructura, así como la verificación por análisis basado en desempeño para tanques de importancia crítica. En el caso de tanques existentes diseñados con $R=8$, se sugiere una evaluación estructural mediante ATC-19 y, de ser necesario, el refuerzo estructural. Para proyectos nuevos, el flujo recomendado consiste en redimensionar con un R guía según la zona sísmica, modelar y obtener el R específico del proyecto, adoptar el menor de ambos para el diseño final y documentar las diferencias porcentuales respecto al valor normativo.

Para el objetivo específico 1

Dado que el valor obtenido de $R=2,86$ para la zona sísmica $Z1$ en suelo rígido representa una reducción del 64,25 % respecto al valor normativo peruano de $R=8$, se

recomienda no emplear el valor único de la Norma Técnica E.030 para este tipo de estructuras. En su lugar, se sugiere adoptar un valor de diseño más conservador, cercano a los resultados experimentales y analíticos, de modo que se garantice un nivel de seguridad estructural adecuado.

Asimismo, se recomienda seguir el criterio de normas internacionales como la ASCE/SEI 7-22 y bibliografías internacionales, que proponen valores de R entre 2,5 y 3,5 para tanques elevados de concreto armado, coincidiendo con el rango de comportamiento real identificado en esta investigación. Esto permitiría reducir el riesgo de sobredimensionar la capacidad de disipación de energía y, en consecuencia, evitar la subestimación de las fuerzas sísmicas de diseño.

En proyectos nuevos, se sugiere realizar un análisis no lineal con el procedimiento ATC-19 para determinar el R específico del tanque y, en caso de no contar con este análisis, adoptar como valor base $R=3$ para $Z1$. Para proyectos existentes diseñados con $R=8$, se recomienda efectuar una reevaluación estructural y, de ser necesario, aplicar medidas de refuerzo que mejoren la ductilidad y la capacidad de disipación de energía.

Finalmente, se recomienda que la normativa peruana considere la diferenciación de valores de R según la zona sísmica y el tipo estructural del tanque, incorporando además la exigencia de modelar la interacción fluido–estructura y de justificar el valor adoptado mediante métodos reconocidos internacionalmente.

Para el objetivo específico 2

Para la zona sísmica $Z2=0,25g$, el valor obtenido en el diseño inicial fue $R=2$, lo que representa una reducción del 68,25 % respecto al valor normativo peruano de $R=8$. Tras el rediseño adoptando un valor de $R=2$ según las recomendaciones de la ASCE/SEI 7-22, el cálculo mediante la metodología de la ATC-19 arrojó $R=3,16$, valor que aún se encuentra un 60,5 % por debajo del establecido por la Norma Técnica E.030.

En base a estos resultados, se recomienda que para la zona Z2 no se adopte el valor normativo único de $R=8$, ya que sobrestima significativamente la capacidad de disipación de energía de los tanques elevados de concreto armado. En su lugar, es aconsejable emplear un valor de R cercano a 3, en concordancia con los valores reportados por normas internacionales como la ASCE/SEI 7-22 y la IS 1893 (Parte 2) – 2016 y bibliografías internacionales.

Se sugiere, además, que los diseños incluyan análisis no lineales que consideren la interacción fluido–estructura para determinar el R específico del tanque. En caso de no contar con estos estudios, se debería adoptar un valor conservador que limite la reducción de fuerzas sísmicas y garantice una reserva suficiente de capacidad ante sollicitaciones extremas.

Finalmente, se recomienda a los organismos normativos peruanos la revisión del valor de R propuesto para este tipo de estructuras, diferenciándolo según el nivel de amenaza sísmica.

Para el objetivo específico 3

Para la zona sísmica Z3, el valor obtenido en el diseño inicial fue $R=2,43$, equivalente a un 69,63 % menos que el valor normativo peruano $R=8$. Tras el rediseño adoptando $R=2$ en concordancia con la ASCE/SEI 7-22 para tanques elevados de concreto armado, la evaluación con ATC-19 arrojó $R=2,99$, es decir, un 49,5 % más que el valor de rediseño, pero todavía 62,63 % menor que el valor normativo. Estos resultados confirman que la adopción de $R=8$ sobrestima de manera importante la capacidad de disipación de energía para Z3 y puede conducir a una subestimación de las fuerzas sísmicas de diseño.

En consecuencia, se recomienda no utilizar $R=8$ para tanques elevados rectangulares de concreto armado en Z3 y, en su lugar, adoptar valores de partida en el rango $R \approx 2$ a 3, coherentes con los resultados locales de $R 2,43-2,99$ y con referencias internacionales como

ASCE/SEI 7-22 y IS 1893 (Parte 2). Además, se debe verificar proyecto a proyecto el valor de R mediante ATC-19 (y, de ser posible, un enfoque PBSD y análisis dinámico con registros compatibles con la Norma Técnica E.030), modelando explícitamente la interacción fluido-estructura. Complementariamente, es indispensable aplicar diseño por capacidad para forzar mecanismos dúctiles a flexión y evitar fallas frágiles a cortante, reforzando detalles de confinamiento, estribado y anclajes en zonas críticas, y controlar estados de servicio (fisuración, derivas y vibraciones), así como altura de oleaje y francobordo.

Cuando no sea posible realizar análisis avanzados, se sugiere usar como criterio operativo el menor entre el R guía (2,5-3,0) y el R obtenido por evaluación simplificada, dejando constancia del porcentaje de diferencia respecto a $R=8$ y su justificación técnica en la memoria de cálculo. Esto asegura diseños más seguros y realistas para Z3, alineados con la evidencia numérica del estudio y con las prácticas.

Para el objetivo específico 4

Para la zona sísmica $Z4 = 0,45$ g en suelo rígido, el diseño inicial basado en la Norma Técnica E.030 tomaron como $R = 6$, y este diseño fue evaluado mediante ATC-19, arrojando un factor real $R = 3,79$, lo que representa una reducción de 36,83 % respecto al valor normativo. Este hallazgo muestra que, aunque en Z4 la capacidad de disipación estimada es mayor que en otras zonas analizadas, el valor prescriptivo de $R = 6$ continúa sobrestimando de forma notable la reducción sísmica aplicable a tanques elevados rectangulares de concreto armado.

En el rediseño adoptando $R = 2$ (criterio conservador recomendado por la ASCE/SEI 7-22), la verificación mediante ATC-19 produjo $R = 2,62$, es decir, un 31,00 % mayor que el valor asumido en el rediseño ($R = 2$), pero aún 56,33 % inferior al valor normativo ($R = 6$). Esto indica que, si bien ajustar R a valores recomendados internacionalmente mejora la

coherencia entre el supuesto de diseño y la respuesta evaluada, el uso de $R = 6$ sigue siendo inadecuado para esta tipología estructural en Z4.

Finalmente, se recomienda que para Z4 se tome como valor guía $R \approx 3,8$ (coincidente con el R evaluado mediante ATC-19 para el diseño inicial), adoptando dicho valor solo como punto de partida para predimensionamiento. Adicionalmente, es imprescindible exigir la verificación proyecto a proyecto del factor R mediante ATC-19 o mediante un enfoque de diseño basado en desempeño (PBSD) y análisis dinámico con registros compatibles con la Norma Técnica E.030.

VIII. Referencias

- Aguiar Falconí, R. (2007). *Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de hormigón armado sin muros de corte*. CIMNE. <https://hdl.handle.net/2117/28502>
- American Concrete Institute. (2006). *ACI 360.3-06: Seismic design of liquid-containing concrete structures and commentary*.
- American Concrete Institute. (2020). *ACI 350.3-20: Seismic design of liquid-containing concrete structures and commentary*.
- American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22)*. ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>
- Applied Technology Council. (1995). *ATC-19: Structural response modification factors*.
- Bertero, V. V. (1992). *Lessons learned from recent catastrophic earthquakes and associated research* (Monografía No. 410–411). Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Bureau of Indian Standards. (2014). *IS 1893 (Part 2): Criteria for earthquake resistant design of structures – Liquid retaining tanks*.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures* (5th ed.). Pearson Education.
- Chopra, A. K., y Goel, R. K. (1999). *Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures: SDF Systems* (PEER Report 1999-02). Pacific Earthquake Engineering Research Center, Universidad de California, Berkeley, CA. <https://peer.berkeley.edu/publications/1999-02>
- Daza-Duarte, L. G. (2003). *Nuevo enfoque para determinar el factor de modificación de respuesta sísmica*. Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil (Trabajo académico).

- El-Far, M. E., Nasr, N., Fayed, M. N., y Hussien, G. (2022). Evaluation of response reduction factor for reinforced concrete elevated water tanks and codes, comparative study. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 17(62), 39–53. <https://doi.org/10.21608/aej.2022.216577>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2022). *Metodología de la investigación* (7.a ed.). McGraw-Hill.
- Husain, M., y Tsopelas, P. (2004). Measures of structural redundancy in reinforced concrete buildings. II: Redundancy response modification factor (RR). *Journal of Structural Engineering*, 130(11), 1659–1666. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:11\(1659\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1659))
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: NEC-SE-DS*. Diseño sismorresistente.
- Ministerio de Obras Públicas. (1996). *Norma técnica para diseño por sismo de la República de El Salvador*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma Técnica E.060: Concreto armado (RNE)*. <https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619713-e-060-concreto-armado-ds-n-010-2009>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2012). *Norma Técnica IS.010: Instalaciones sanitarias para edificaciones*. <https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619716-is-010-instalaciones-sanitarias-para-edificaciones-ds-n-017-2012>

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Norma Técnica E.030: Diseño sismorresistente* (RNE).
<https://drive.google.com/file/d/1W14N6JldWPN8wUZSqWZnUphg6C559bi-/view>
- Ministerio de Vivienda, Servicios Públicos y Urbanismo. (2012). ECP-201: *Egyptian code for calculating loads and forces in structural work and masonry*.
- Miranda, E., y Bertero, V. V. (1994). Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design. *Earthquake Spectra*, 10(2), 357–379.
<https://doi.org/10.1193/1.1585778>
- Newmark, N. M., y Hall, W. J. (1982). *Earthquake spectra and design*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Ñaupas, H., Mejía, E., Novoa, E., & Villagómez, A. (2021). *Metodología de la investigación cuantitativa–cualitativa y redacción de la tesis* (5.ª ed.). Ediciones de la U.
- Pandian, A. V. P., Arunachalam, K. P., Avudaiappan, S., Jasmin, S. S., Romero, L. M. B., y Awoyera, P. O. (2024). Modification of response reduction factors of overhead water tanks based on ductility factor. *Discover Applied Sciences*, 6, Article 192.
<https://doi.org/10.1007/s42452-024-05762-z>
- Priestley, M. N., Calvi, G. M., y Kowalsky, M. J. (2007). Displacement-based seismic design of structures. *IUSS Press*. <https://ostad.nit.ac.ir/payaidea/ospic/file9891.pdf>
- Razmyar, G. (2014). *Nonlinear seismic response of reinforced concrete pedestals in elevated water tanks* [Doctoral dissertation, Ryerson University].
<https://doi.org/10.32920/ryerson.14657049>
- Sequera, J., y Vita, J. (2016). *Evaluación del factor de reducción de respuesta en sistemas estructurales de secciones rectangulares y líneas resistentes con 5 y 6 grados de inclinación no ortogonales entre sí*.

https://www.researchgate.net/publication/246112767_Evaluation_of_Strength_Reduction_Factors_for_Earthquake-Resistant_Design

Soroushnia, S., et al. (2011). Seismic performance of RC elevated water tanks with frame staging and exhibition damage pattern. *Procedia Engineering*, 14, 3076–3087.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.387>

Universidad Tecnológica de los Andes. (2020). *Reglamento del Comité de Ética de Investigación* (V0.4).

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes