



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Evaluación de desempeño sísmico de estanques elevados de hormigón armado en Chile

Memoria de Título presentada por

Álvaro Esteban Jofré Oñate

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Gilberto Hernán Leiva Henríquez

Agosto de 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación de desempeño sísmico de estanques elevados de hormigón armado en Chile

Nombre del candidato(a): Álvaro Esteban Jofré Oñate

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Gilberto Leiva Henríquez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.


El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años


Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: _____ ; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _____ ; **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

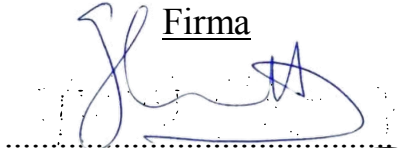
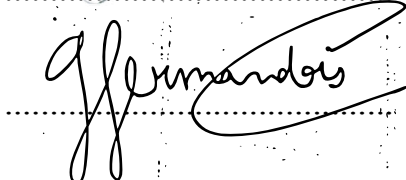
TITULO DE LA MEMORIA:

Evaluación de desempeño sísmico de estanques elevados de hormigón armado en Chile

AUTOR:

Álvaro Esteban Jofré Oñate

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Gilberto Leiva	
Miembro 1 Comisión	Gastón Fermandois	

Valparaíso, Chile, agosto de 2025



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	14
1.1	Presentación del problema.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo general.....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	ALCANCES.....	15
2	ANTECEDENTES.....	16
2.1	Estanques elevados.....	16
2.1.1	Soporte de marco.....	16
2.1.2	Soporte de pedestal.....	16
2.2	Análisis sísmico.....	17
2.3	Análisis de fragilidad.....	19
2.3.1	General.....	19
2.3.2	Estanques elevados.....	20
2.4	Metodología FEMA P695 para evaluar desempeño sísmico.....	22
3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL.....	24
3.1	General.....	24
3.2	Estanque Cartagena.....	24
3.2.1	Dimensiones.....	24
3.2.2	Diseño estructural.....	26
3.3	Estanque Rancagua.....	28
3.3.1	Dimensiones.....	28
3.3.2	Diseño estructural.....	29
4	DESARROLLO DE MODELOS.....	32
4.1	Modelación del pedestal.....	32
4.1.1	Modelo de elementos finitos.....	32
4.1.2	Comportamiento no lineal.....	33
4.2	Modelación de la cuba.....	34
4.2.1	Comportamiento del fluido dentro del estanque.....	34
4.2.2	Modelación en SAP2000.....	36
4.3	Análisis modal.....	38



5	ANÁLISIS DE LOS MODELOS.....	39
5.1	Análisis estático no lineal (Pushover análisis).....	39
5.1.1	Estanque Cartagena.....	39
5.1.2	Estanque Rancagua.....	39
5.1.3	Ductilidad y sobre-resistencia.....	40
5.2	Antecedentes sísmicos.....	41
5.3	Análisis dinámico tiempo-historia no lineal.....	43
5.3.1	Estanque Cartagena.....	44
5.3.2	Estanque Rancagua.....	47
5.4	Análisis dinámico no lineal incremental (IDA).....	51
5.4.1	Normalización de los registros sísmicos.....	52
5.4.2	Estanque Cartagena.....	57
5.4.3	Estanque Rancagua.....	63
6	EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO SÍSMICO.....	71
6.1	Evaluación individual.....	71
6.1.1	Margen de colapso (CMR).....	71
6.1.2	Margen de colapso ajustado (ACMR).....	73
6.1.3	Incertidumbre del sistema (β).....	74
6.1.4	Margen de colapso ajustado (ACMR) mínimo o aceptable.....	77
6.2	Evaluación grupal.....	79
7	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	80
7.1	Modelación estructural.....	80
7.2	Análisis pushover.....	80
7.2.1	Capacidad de deformación.....	80
7.2.2	Resistencia.....	82
7.3	Análisis tiempo-historia no lineal.....	83
7.4	Análisis incremental (IDA).....	88
7.5	Evaluación de desempeño sísmico.....	89
8	CONCLUSIONES.....	91
9	BIBLIOGRAFÍA.....	92
10	ANEXOS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Estanque elevado construido en Rancagua. Fuente: Google imágenes.....	14
Figura 2-1:	Estanque elevado con soporte de marco. Fuente: Google.....	16



Figura 2-2: Estanque elevado con soporte de pedestal. Fuente: Google.	17
Figura 2-3: Representación del modelo de (Housner, 1963). Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 2-4: Espectro de demanda, curva de capacidad y punto de desempeño. Fuente: Adaptado de (Rajkumari, Thakkar, & Goyal, 2022)	19
Figura 2-5: Resultado típico de un análisis dinámico incremental. Fuente: Elaboración propia.	20
Figura 2-6: Esquema de curva de fragilidad. Fuente: (Rajkumari, Thakkar, & Goyal, 2022).....	20
Figura 3-1: Vista en corte estanque Cartagena. Fuente: Plano de forma proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	25
Figura 3-2: Plano de refuerzos de pedestal estanque Cartagena. Fuente: Plano de diseño proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	27
Figura 3-3: Vista en corte estanque Rancagua. Fuente: Plano de forma proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	29
Figura 3-4: Plano de refuerzos de pedestal estanque Rancagua. Fuente: Gilberto Leiva H.....	31
Figura 4-1: Modelación pedestal estanque Cartagena. Fuente: SAP2000.	32
Figura 4-2: Modelación pedestal estanque Rancagua. Fuente: SAP2000.....	33
Figura 4-3: Curva de esfuerzo-deformación del hormigón. Fuente: SAP2000.....	33
Figura 4-4: Curva de esfuerzo-deformación del acero de refuerzo. Fuente: SAP2000.....	34
Figura 4-5: Modelo simplificado de la cuba. Fuente: SAP2000.	36
Figura 4-6: Modelo completo estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 4-7: Modelo completo estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 5-1: Pushover estanque Cartagena. Fuente: SAP2000.....	39
Figura 5-2: Pushover estanque Rancagua. Fuente: SAP2000.....	40
Figura 5-3: Registro de aceleración 27F Concepción en dirección longitudinal. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 5-4: Espectros de respuesta horizontales ($\xi = 0.03$) para cada registro sísmico. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 5-5: Histéresis 27F Viña centro estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 5-6: Histéresis 27F Concepción estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 5-7: Histéresis 27F Constitución estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 5-8: Histéresis 27F UTFSM estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 5-9: Histéresis 85 Lolleo estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 5-10: Histéresis 85 Viña centro estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 5-11: Histéresis 85 UTFSM estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 5-12: Histéresis 27F Viña centro estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 5-13: Histéresis 27F Concepción estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 5-14: Histéresis 27F Constitución estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 5-15: Histéresis 27F UTFSM estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 5-16: Histéresis 85 Lolleo estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 5-17: Histéresis 85 Viña centro estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 5-18: Histéresis 85 UTFSM estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 5-19: Espectro de diseño NCh2369Of.2023 estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	53
Figura 5-20: Espectro de diseño estanque Rancagua NCh2369Of.2023. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 5-21: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 5-22: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 5-23: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	56



Figura 5-24: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 5-25: Gráfico IDA registro 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 5-26: Gráfico IDA registro 27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 5-27: Gráfico IDA registro 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 5-28: Gráfico IDA registro 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 5-29: Gráfico IDA registro 85 Llolleo para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 5-30: Gráfico IDA registro 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 5-31: Gráfico IDA registro 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 5-32: Resumen comparativo de curvas IDA estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 5-33: Gráfico IDA registro 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 5-34: Gráfico IDA registro 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 5-35: Gráfico IDA registro 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 5-36: Gráfico IDA registro 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 5-37: Gráfico IDA registro 85 Llolleo para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	68
Figura 5-38: Gráfico IDA registro 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	69
Figura 5-39: Gráfico IDA registro 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 5-40: Resumen comparativo de curvas IDA estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 6-1: Resumen comparativo curvas IDA con SCT y SMT para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 6-2: Resumen comparativo curvas IDA con SCT y SMT para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 7-1: Estimación de desplazamiento de fluencia estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 7-2: Estimación de desplazamiento de fluencia estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 7-3: Relación entre aceleración espectral y deformación máxima del hormigón para cada registro en estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	83
Figura 7-4: Relación entre aceleración espectral y deformación máxima del hormigón para cada registro en estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 7-5: Relación entre drift y aceleración espectral para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 7-6: Relación entre corte basal y aceleración espectral para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	85



Figura 7-7: Relación entre drift y aceleración espectral para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	85
Figura 7-8: Relación entre corte basal y aceleración espectral para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 7-9: Histéresis caso más desfavorable estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	86
Figura 7-10: Histéresis caso más desfavorable estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 10-1: Registro de aceleración 27F Viña centro. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 10-2: Registro de aceleración 27F Constitución. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 10-3: Registro de aceleración 27F UTFSM. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 10-4: Registro de aceleración 85 Llole. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 10-5: Registro de aceleración 85 Viña centro. Fuente: Elaboración propia.....	96
Figura 10-6: Registro de aceleración 85 UTFSM. Fuente: Elaboración propia.....	96
Figura 10-7: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 10-8: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 10-9: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 10-10: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 10-11: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura 10-12: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura 10-13: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Llole para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	100
Figura 10-14: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Llole para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	100
Figura 10-15: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 10-16: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 10-17: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	102
Figura 10-18: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	102
Figura 10-19: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura 10-20: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura 10-21: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	104
Figura 10-22: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	104
Figura 10-23: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	105
Figura 10-24: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	105
Figura 10-25: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Llole para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	106



Figura 10-26: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Llolleo para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	106
Figura 10-27: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 10-28: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 10-29: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	108
Figura 10-30: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	108
Figura 10-31: Gráfico de histéresis de registro 27F Viña centro en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	109
Figura 10-32: Gráfico de histéresis de registro 27F Concepción en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	109
Figura 10-33: Gráfico de histéresis de registro 27F Constitución en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	110
Figura 10-34: Gráfico de histéresis de registro 27F UTFSM en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	110
Figura 10-35: Gráfico de histéresis de registro 85 Llolleo en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 10-36: Gráfico de histéresis de registro 85 Viña centro en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 10-37: Gráfico de histéresis de registro 85 UTFSM en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 10-38: Gráfico de histéresis de registro 27F Viña centro en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 10-39: Gráfico de histéresis de registro 27F Concepción en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	113
Figura 10-40: Gráfico de histéresis de registro 27F Constitución en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	113
Figura 10-41: Gráfico de histéresis de registro 27F UTFSM en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 10-42: Gráfico de histéresis de registro 85 Llolleo en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	114
Figura 10-43: Gráfico de histéresis de registro 85 Viña centro en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	115
Figura 10-44: Gráfico de histéresis de registro 85 UTFSM en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Dimensiones estanque Cartagena: Fuente: Plano de forma proyecto estructural Gilberto Leiva H.	24
Tabla 3-2: Resultados globales análisis sísmico estanque Cartagena. Fuente: Memoria de cálculo proyecto estructural Gilberto Leiva H.	26
Tabla 3-3: Detalle refuerzo longitudinal estanque Cartagena. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.	26



Tabla 3-4: Detalle refuerzo longitudinal estanque Cartagena. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	26
Tabla 3-5: Dimensiones estanque Rancagua: Fuente: Plano de forma proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	28
Tabla 3-6: : Resultados globales análisis sísmico estanque Cartagena. Fuente: Memoria de cálculo proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	30
Tabla 3-7: Detalle refuerzo longitudinal estanque Rancagua. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	30
Tabla 3-8: : Detalle refuerzo transversal estanque Rancagua. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.....	30
Tabla 4-1: Parámetros de estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 4-2: Parámetros de estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 4-3: Periodos estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 4-4: Periodos estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 5-1: Cálculo de ductilidad estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 5-2: Cálculo de sobre-resistencia estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 5-3: Cálculo de ductilidad estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 5-4: Cálculo de sobre-resistencia estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	41
Tabla 5-5: Selección de registros sísmicos. Fuente: Elaboración propia.....	42
Tabla 5-6: Información de registros sísmicos. Fuente: Elaboración propia.....	43
Tabla 5-7: Parámetros no lineales estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	44
Tabla 5-8: Parámetros no lineales estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 5-9: Características de diseño estanque Cartagena según NCh2369Of.2023. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 5-10: Características de diseño estanque Rancagua según NCh2369Of.2023. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 5-11: Normalización de registros estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	54
Tabla 5-12: Normalización de registros estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	55
Tabla 5-13: Parámetros IDA registro 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 5-14: Parámetros IDA registro 27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 5-15: Parámetros IDA registro 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 5-16: Parámetros IDA registro 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	59
Tabla 5-17: Parámetros IDA registro 85 Lolleo para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 5-18: Parámetros IDA registro 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 5-19: Parámetros IDA registro 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	62
Tabla 5-20: Parámetros IDA registro 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 5-21: Parámetros IDA registro 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 5-22: Parámetros IDA registro 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	65
Tabla 5-23: Parámetros IDA registro 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	66



Tabla 5-24: Parámetros IDA registro 85 Llolleo para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	67
Tabla 5-25: Parámetros IDA registro 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	68
Tabla 5-26: Parámetros IDA registro 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 6-1: Aceleración espectral de cada registro y mediana para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	71
Tabla 6-2: Cálculo de margen de colapso CMR para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	72
Tabla 6-3: Aceleración espectral de cada registro y mediana para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	72
Tabla 6-4: Cálculo de margen de colapso CMR para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 6-5: Factor de forma espectral. Fuente: FEMA P695.	73
Tabla 6-6: Cálculo de ACMR estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	74
Tabla 6-7: Cálculo de ACMR estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	74
Tabla 6-8: Tabla 3-1 FEMA P695: Incertidumbre en los requerimientos de diseño. Fuente: FEMA P695.	75
Tabla 6-9: Tabla 3-2 FEMA P695: Incertidumbre en los datos de prueba. Fuente: FEMA P695	75
Tabla 6-10: Tabla 5-3 FEMA P695: Incertidumbre en los modelos. Fuente: FEMA P695	76
Tabla 6-11: Estimación de incertidumbre y cálculo de incertidumbre total estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 6-12: Estimación de incertidumbre y cálculo de incertidumbre total estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	76
Tabla 6-13: Tabla 7-3 FEMA P695: valores aceptables de margen de colapso ajustado. Fuente: FEMA P695.....	78
Tabla 6-14: ACMR aceptable y evaluación de desempeño sísmico individual para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	78
Tabla 6-15: ACMR aceptable y evaluación de desempeño sísmico individual para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 6-16: ACMR aceptable y evaluación de desempeño sísmico grupal para estanque Cartagena y Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 7-1: Cálculo altura de punto de aplicación de carga lateral resultante en estado último. Fuente: Elaboración propia.	82
Tabla 7-2: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.....	87
Tabla 7-3: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.....	87
Tabla 7-4: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante en instante último estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.	88
Tabla 7-5: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante en instante último estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.	88



AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mis padres, hermanos y familia en general, por siempre acompañarme, confiar y creer en mí, sin ellos no podría haber llegado a esta instancia.

Agradezco a mis amigos, que han sido parte importante de esta etapa universitaria, por todos los buenos momentos, risas e instantes de distracción en momentos abrumantes.

Agradezco a mi novia, por su amor incondicional, siempre estar a mi lado y ayudarme a levantarme en los momentos más difíciles.

Por último, agradezco a mi profesor guía Gilberto Leiva, que me guio en este largo camino hacia la titulación, e inculcó en mí la pasión por el área de ingeniería estructural, gracias a él confirmé que esto es a lo que quiero dedicarme.



EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTANQUES ELEVADOS DE HORMIGÓN ARMADO EN CHILE

Álvaro Jofré Oñate¹, Gilberto Leiva Henríquez²

¹Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Los estanques elevados de hormigón armado son estructuras críticas para la sociedad debido a su función de almacenamiento y distribución de agua. Su desempeño ante eventos sísmicos es fundamental para evitar colapsos que afecten la infraestructura y la comunidad. Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño sísmico de dos estanques típicos del país, Cartagena y Rancagua, ubicados en zonas de alta actividad sísmica en Chile. Para ello, se ha elaborado modelos estructurales de elementos finitos, en los cuales el pedestal se ha modelado con elementos tipo shell, mientras que la copa del estanque ha sido representada mediante un sistema de pilares rígidos y flexibles que simulan las masas impulsiva y convectiva del fluido almacenado.

En primer término se realizó, un análisis estático incremental no lineal (pushover), que permitió identificar los puntos críticos de fluencia y los posibles mecanismos de colapso de las estructuras bajo cargas laterales crecientes. Luego, se llevó a cabo un análisis dinámico tiempo-historia no lineal, utilizando como sollicitación varios registros de sismos chilenos, cuyos resultados mostraron que ambos estanques incursionan levemente en el rango no lineal en el caso más crítico. Utilizando la metodología de análisis dinámico incremental (IDA), se obtuvo los factores de amplificación de los registros para generar el colapso de las estructuras.

Finalmente, se evaluó el desempeño sísmico de los estanques a través del Margen de Colapso (CMR) y el Margen Ajustado de Colapso (ACMR) de la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009), ajustados por la incertidumbre en los parámetros del modelo. Estos resultados permitieron determinar que las estructuras cumplen con los estándares de seguridad sísmica requeridos, asegurando su estabilidad durante eventos sísmicos severos.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación del problema

Los estanques elevados de hormigón armado son fundamentales para el almacenamiento y distribución de agua potable en áreas urbanas. Estos estanques constan de dos partes principales: la cuba, que almacena el agua, y el pedestal, que proporciona la presión necesaria para una distribución óptima gracias a su altura. Debido a su diseño y características específicas, estas estructuras son especialmente vulnerables a las sollicitaciones sísmicas, frecuentes en Chile.

A las características generales de la respuesta sísmica de las estructuras, en este caso es necesario incorporar las particularidades relacionadas con los efectos del fluido, que genera presiones dinámicas y efectos de oleaje que interactúan de manera compleja con la respuesta de la estructura.

En Chile no existe una normativa específica para el diseño sísmico de estos estanques. Habitualmente, los diseños se realizan siguiendo la norma chilena NCh.2369 "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales" (INN, 2023) y métodos de análisis de normativas extranjeras como la ACI 350.3-06 ((ACI), American Concrete Institute, 2006). Las experiencias en sismos recientes han mostrado que las estructuras diseñadas según estas normativas generalmente han mostrado un buen comportamiento.

Sin embargo, es necesario evaluar y ajustar los requisitos de diseño sísmico basándose en el desempeño real de estos estanques durante los sismos en Chile. Esta memoria propone implementar un procedimiento que permita realizar un análisis estadístico para evaluar el desempeño estructural, mediante modelación de elementos finitos y análisis no lineal para registros sísmicos reales. Este procedimiento se aplicará a estanques reales construidos en Chile según las prácticas usuales, con características y ubicaciones geográficas definidas, para determinar si los requisitos de diseño actuales son aceptables bajo una filosofía de diseño por desempeño.

Para evaluar desempeño sísmico se utilizará una filosofía de evaluación de margen de colapso, definido como la razón entre la aceleración que provoca el colapso y la aceleración de diseño del estanque.

En la Figura 1-1 se muestra un diseño típico de estanque elevado en el país.



Figura 1-1: Estanque elevado construido en Chile. Fuente: Google imágenes.



1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta memoria es analizar el desempeño de estanques elevados reales construidos en Chile, sometidos a registros sísmicos locales, utilizando la metodología de diseño sísmico por desempeño.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar modelos que permitan realizar análisis no lineales de tipo estático pushover, tiempo-historia y dinámico incremental.
- Implementar la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009), utilizando registros sísmicos ocurridos en Chile para evaluar desempeño sísmico.
- Evaluar resultados obtenidos con respecto a posibles implicancias en los procedimientos actuales de diseño.

1.3 ALCANCES

- **Tipología estructural:** Se limita el análisis a estanques elevados con soporte de pedestal, dejando fuera del alcance los estanques con soporte de marco u otras configuraciones estructurales.
- **Modelación estructural:** Se desarrollan modelos no lineales tridimensionales en software de elementos finitos para dos estructuras reales, utilizando elementos tipo shell para el pedestal y considerando el efecto del líquido mediante el enfoque de Housner (Housner, 1963). La fundación se modela como un apoyo empotrado, sin considerar interacción suelo-estructura.
- **Comportamiento del material:** Se considera un comportamiento no lineal del hormigón armado basado en el modelo de Mander (Mander, 1988), sin contemplar degradación cíclica, ni pérdida de rigidez o resistencia por efectos acumulativos.
- **Análisis estructural:** Se realizan tres tipos de análisis no lineales: estático (pushover), dinámico tiempo-historia y dinámico incremental (IDA), utilizando registros sísmicos representativos de eventos ocurridos en Chile.
- **Evaluación de desempeño sísmico:** La evaluación del desempeño se lleva a cabo mediante la metodología FEMA P695, considerando la normativa chilena NCh2369Of.2023 (INN, 2023) como referencia para la aceleración de diseño. Se evalúan tanto los márgenes de colapso individuales como grupales.
- **Generalización de resultados:** Si bien el estudio se basa en dos casos particulares, las conclusiones están enfocadas en identificar tendencias estructurales representativas de este tipo de sistemas constructivos en Chile.

2 ANTECEDENTES

2.1 Estanques elevados

Los estanques elevados para almacenar líquidos están conformados por la cuba contenedora y el sistema estructural de apoyo de la cuba. En el caso de estanques de hormigón armado, los sistemas de apoyo típicos son el pedestal de sección hueca, uniforme o variable con la altura y el sistema tipo marco, con vigas horizontales o diagonales. Dada esta configuración geométrica, muestran un comportamiento sísmico típico de péndulo invertido, que se distingue de las estructuras usuales en dos aspectos. El primero corresponde a las fuerzas hidrodinámicas sobre las paredes y la estructura soportante que ejerce el contenido líquido durante la respuesta sísmica. El segundo se refiere a la menor redundancia y capacidad de deformación no lineal de la estructura soportante.

Estas características son consideradas en diseño sísmico mediante la utilización de factores de reducción de la respuesta (factor R) menores. Adicionalmente, al ser consideradas infraestructura crítica por los requerimientos operacionales, se les asigna un factor de importancia alto. Esto significa que las fuerzas de diseño sísmico de los estanques elevados son mayores que las de las estructuras usuales.

Dadas sus diferentes características, la respuesta sísmica de los dos tipos de soporte es diferente.

2.1.1 Soporte de marco

Comúnmente el diseño sísmico de estas estructuras es enfocado de forma similar a edificios, usando la disposición viga débil-columna fuerte para dirigir la aparición de rótulas plásticas a los extremos de las vigas y evitarlas en las columnas. Sin embargo, algunos estudios sugieren que el comportamiento difiere del de los marcos de edificios, lo cual debería ser considerado en diseño (Masoudi, Eshghi, & Ghafory-Ashtiany, 2012). En la Figura 2-1 se muestra un ejemplo de este tipo de estructuras.



Figura 2-1: Estanque elevado con soporte de marco. Fuente: Google.

2.1.2 Soporte de pedestal

Este caso es una estructura estáticamente determinada, sin capacidad de redistribuir esfuerzos, en que el desarrollo de la capacidad en una única sección significa la falla de la estructura. Los modos de agrietamiento bajo la acción sísmica están claramente descritos en el trabajo de Masoudi et.al (Masoudi, Eshghi, & Ghafory-Ashtiany, 2012). El primero corresponde a agrietamiento circunferencial en las secciones bajo el máximo momento flector, grieta que se puede inclinar bajo la acción combinada de flexión y corte. El segundo tipo corresponde a grietas circunferenciales diagonales producidas por el efecto conjunto de torsión, flexión y corte. Un tercer tipo corresponde a agrietamiento vertical

producido por altas compresiones debidas al momento volcante y la componente vertical del movimiento del suelo. En la Figura 2-2 se muestra un ejemplo de este tipo de estructuras.



Figura 2-2: Estanque elevado con soporte de pedestal. Fuente: Google.

2.2 Análisis sísmico

Cuando un estanque elevado es sometido a excitación sísmica, el fluido contenido en su interior responde de manera compleja debido a su inercia y a la interacción con la estructura que lo sostiene. Esta respuesta incluye tanto el movimiento global del líquido como la formación de oleaje en su superficie. Para representar este comportamiento de forma práctica, (Housner, 1963) propuso un modelo simplificado ampliamente utilizado en el diseño sísmico de estanques elevados, que permite separar la respuesta del fluido en componentes impulsivas y convectivas asociadas, respectivamente, al movimiento conjunto del líquido con la estructura y al oleaje interno.

Este modelo, representado en la Figura 2-3, idealiza el sistema como dos osciladores de un grado de libertad desacoplados. La masa impulsiva (m_1) representa la porción del fluido que actúa rígidamente junto con las paredes de la cuba, transmitiendo directamente las fuerzas inerciales a la estructura. Esta masa incluye además la masa de la cuba y dos tercios del peso propio del sistema resistente, según la recomendación del ACI 371R-98 (ACI, 1998). Por su parte, la masa convectiva (m_2) modela el movimiento oscilatorio del fluido libre, acoplada a la cuba mediante resortes de rigidez $k/2$, los cuales representan la acción dinámica del oleaje. El modelo asume que la cuba es completamente rígida, es decir, no presenta deformaciones apreciables durante el evento sísmico.

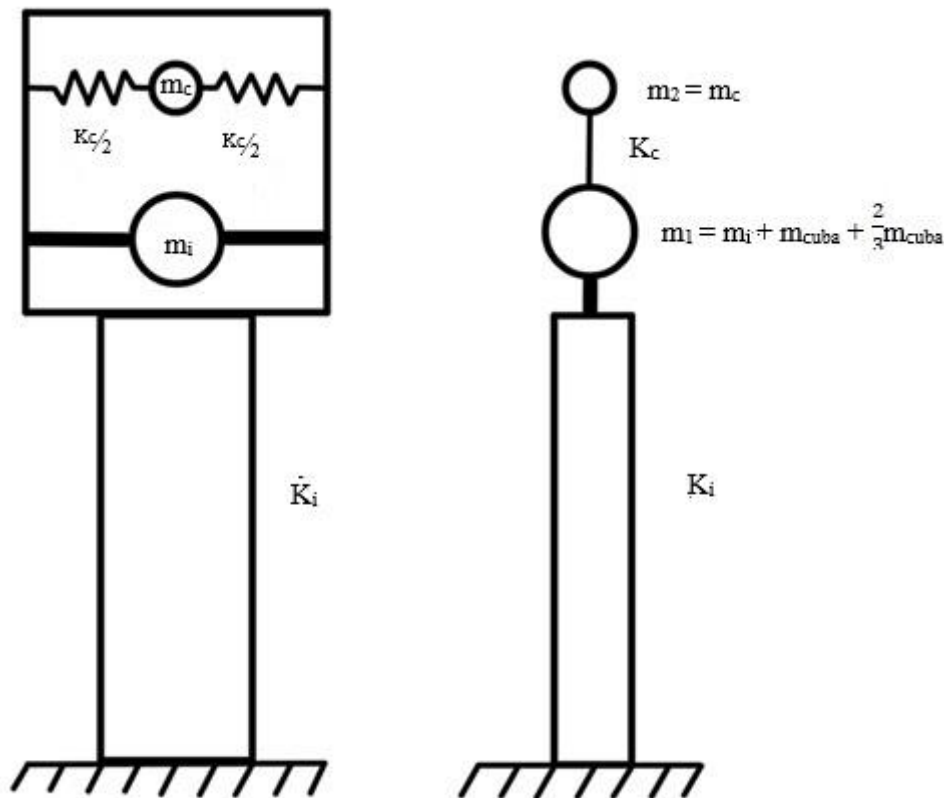


Figura 2-3: Representación del modelo de (Housner, 1963). Fuente: Elaboración propia.

Donde:

m_i : Masa impulsiva

m_c : Masa convectiva

K_i : Rigidez impulsiva

K_c : Rigidez convectiva

Si bien este enfoque ha demostrado ser eficaz para fines de diseño, se han desarrollado modelos más detallados que ofrecen una representación más precisa. Estos modelos incluyen:

- Pedestales modelados mediante elementos finitos que permiten capturar su comportamiento flexo-compresivo a lo largo de la altura.
- Representaciones completas del pedestal y la cuba con elementos finitos, en las que las masas impulsiva y convectiva se conectan directamente a las paredes del pedestal.
- Modelos acoplados que incorporan explícitamente el fluido mediante técnicas de elementos finitos, permitiendo analizar con mayor realismo la interacción fluido-estructura.

Dado el tipo de estructuras analizadas, se espera que la no linealidad estructural se concentre principalmente en el pedestal, ya que este elemento es el que absorbe la mayor parte de la demanda sísmica inducida por las masas del fluido. El comportamiento no lineal estará dominado por flexión, particularmente en la base del pedestal, donde se concentran los momentos y cortes más significativos. Es importante señalar que la zona donde se desarrolla esta no linealidad no necesariamente abarca toda la altura del pedestal, sino que puede estar localizada en una franja inferior, dependiendo de la esbeltez, el refuerzo y la rigidez del elemento. La forma en que este comportamiento es capturado en el análisis depende directamente del modelo estructural utilizado, ya que la precisión de los resultados estará

condicionada por la discretización, el tipo de elementos finitos empleados, y la definición de propiedades materiales.

2.3 Análisis de fragilidad

2.3.1 General

Existen diversos procedimientos para evaluar el desempeño sísmico de una estructura. Uno es la comparación capacidad-demanda a través de las curvas de respuesta monotónica y de demanda espectral (Rajkumari, Thakkar, & Goyal, 2022).

El análisis no lineal de carga monotónicamente creciente (análisis pushover) permite evaluar el comportamiento en el rango no lineal, predecir el máximo de la respuesta e identificar los elementos débiles. La intersección entre ambas curvas permite determinar el punto de desempeño de la estructura, como se muestra en la Figura 2-4.

Una segunda alternativa es el análisis dinámico tiempo-historia no lineal, procedimiento que permite determinar la respuesta en el tiempo para una historia de demanda definida, considerando el comportamiento no lineal geométrico y/o del material, hasta el nivel de colapso. El análisis dinámico incremental (IDA) es un procedimiento que incluye una secuencia de análisis dinámicos no lineales para un conjunto de registros de movimiento del suelo, escalados cada uno hasta alcanzar inestabilidad dinámica, cuyos resultados se presentan en la forma de la Figura 2-5, donde cada curva corresponde a un registro.

Como tercera alternativa, el análisis de fragilidad (FA) es una metodología que permite determinar la vulnerabilidad sísmica de una estructura específica o de un tipo estructural determinado. Es un método probabilístico que permite evaluar la disposición de la estructura a alcanzar un estado límite determinado al estar sometida a diferentes niveles de sollicitación sísmica. Una forma de presentar los resultados del FA es a través de las curvas de fragilidad (FG), que muestran la probabilidad de excedencia del estado límite dado, en términos de la intensidad de la sollicitación sísmica. En la Figura 2-6 se muestra una curva de fragilidad, representado la intensidad mediante el máximo de la aceleración del suelo (PGA).

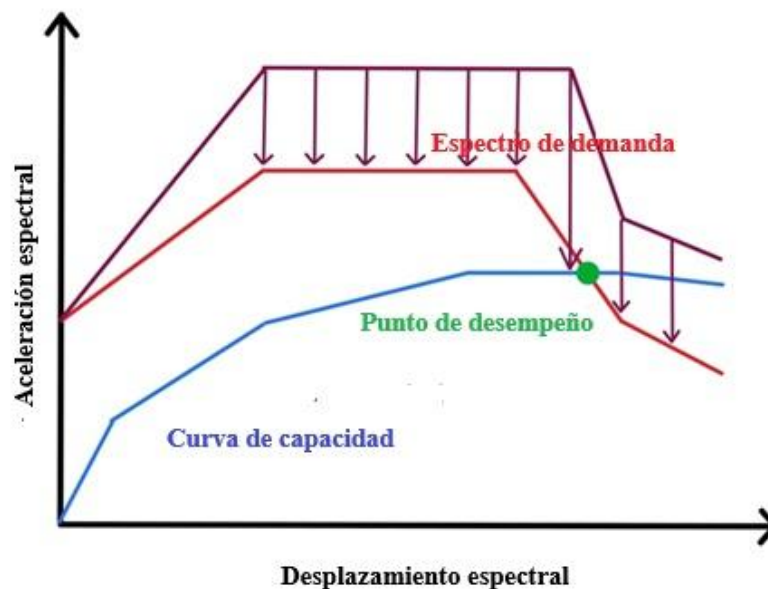


Figura 2-4: Espectro de demanda, curva de capacidad y punto de desempeño. Fuente: Adaptado de (Rajkumari, Thakkar, & Goyal, 2022)

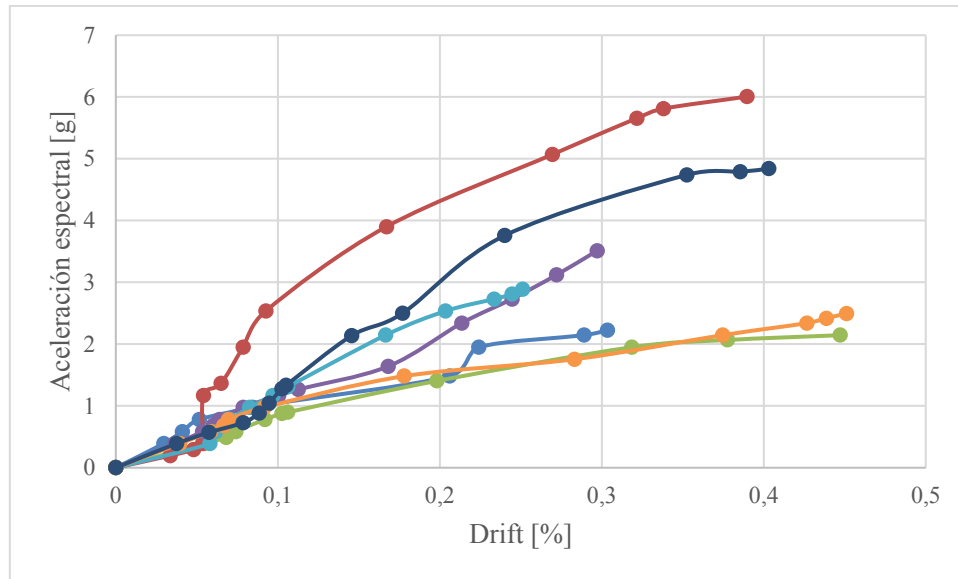


Figura 2-5: Resultado típico de un análisis dinámico incremental. Fuente: Elaboración propia.

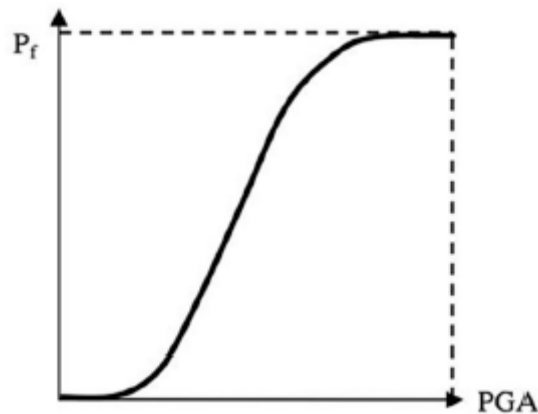


Figura 2-6; Esquema de curva de fragilidad. Fuente: (Rajkumari, Thakkar, & Goyal, 2022)

2.3.2 Estanques elevados

Diversos autores han estudiado el desempeño sísmico de estanques elevados de hormigón armado usando la metodología de análisis de fragilidad.

Bhargava et.al. (Bhargava, Ghoshb, & Ramanujama, 2005) desarrollaron un análisis de fragilidad sísmica de un estanque elevado de agua, de forma esférica soportado en un pedestal cónico. El estanque fue modelado con elementos finitos, con las masas impulsiva y convectiva del líquido concentradas en los niveles correspondientes. La sollicitación sísmica fue representada mediante espectros de respuesta. Mediante un análisis lineal elástico se determinó las máximas sollicitaciones en la estructura, determinándose que el modo de falla queda controlado por los esfuerzos máximos de flexión en el shaft central y la losa de fondo del estanque. SE verifica que la respuesta sísmica es altamente sensible a las características aleatorias de los parámetros considerados en el estudio.

Singh & Ahlawat (Singh & Ahlawat, 2007) desarrollaron una metodología analítica para obtener los parámetros que caracterizan la sollicitación sísmica crítica, definida como aquella que produce la mayor respuesta en términos de los parámetros que definen la falla estructural, como una deformación, un esfuerzo u otro. La excitación es representada en términos de un espectro estacionario de Kanai-



Tazimi. Un modelo de elementos finitos es utilizado para representar la estructura y el fluido, considerando la interacción entre ambos. Los resultados, presentados en términos de las curvas de fragilidad de un estanque esférico de 3864 [m³] de capacidad, 22.07 [m] de diámetro y altura total de 33.4 [m], montado sobre un pedestal cónico, permiten apreciar las variaciones debidas a cambios en las características de la excitación.

Mounir et.al. (Mounir, Safar, El-Arabaty, & Sayed-Ahmed, 2012) presentan una metodología para evaluar los factores de desempeño sísmico de un estanque con estructura de soporte tipo marco. Incluyen el factor de sobrerresistencia Ω_o , el factor de ductilidad C_d y el factor de modificación de la respuesta R. La metodología propuesta se basa en el procedimiento presentado en FEMA P695 (FEMA, 2009)

Amin et.al. (Amin, Gondaliya, & Mulchandani, 2021) presentan un estudio enfocado en la estimación de los factores R y la vulnerabilidad sísmica de estanques elevados soportados en pedestales cilíndricos. Se analiza veintidós estanques de capacidades entre 250 [m³] y 2500 [m³], con pedestales de altura entre 16 [m] y 24 [m], diseñados de acuerdo a la normativa de la India. Un modelo tridimensional no-lineal de elementos finitos se usó para el análisis, con la base fija al suelo y no se consideró la interacción fluido-estructura. Se realiza un análisis “pushover” no lineal, con una distribución de fuerzas laterales comparable con el modo fundamental. Los autores hacen ver que en la literatura y la normativa más relevante no se encuentran valores característicos para los parámetros indicadores de daño de este tipo de estructuras, por lo que proponen cuatro niveles de daño. Los resultados obtenidos permiten comparar las variaciones entre los distintos casos analizados.

Aliche et.al. (Aliche, Hammoum, Bouzelha, & et-al., 2021) presentan el análisis de confiabilidad sísmica de estanques elevados de hormigón armado de agua a través de la generación de curvas de fragilidad. La excitación sísmica fue caracterizada a partir del análisis estadístico de una serie de registros de un sismo en Argelia. La respuesta sísmica fue obtenida usando el modelo de Housner, considerando un sistema de dos grados de libertad, que representan las acciones impulsiva y convectiva. Los estados límite fueron definidos según consideraciones últimas y de servicio del estanque, incluyendo estados últimos de estabilidad global al volcamiento y al deslizamiento y estados de servicio de tensión en el acero de refuerzo, de compresión en el hormigón y oleaje. El análisis de confiabilidad se realizó con una simulación de Monte Carlo, considerando dos tipos de variables, la carga hidráulica del estanque y la intensidad del movimiento del suelo. Los resultados de los análisis para un estanque de hormigón armado de 14.0 [m] de diámetro, soportado por una estructura tipo marco de 24.6 [m] de altura, presentados en términos de curvas de fragilidad, permitieron identificar la compresión en la estructura de soporte como el modo de falla crítico para el estanque con menos del 50% de su capacidad y el oleaje para el estanque lleno.

Dado el gran esfuerzo computacional asociado a los análisis dinámicos incrementales requeridos para obtener las curvas de fragilidad, algunos autores han propuesto metodologías alternativas para este proceso.

Mellati (Mellati, 2018) propone un procedimiento basado en un “pushover análisis” estimar la curva de capacidad dinámica de la estructura de estanques elevados. El pedestal de soporte es modelado con elementos barra, el estanque se considera totalmente rígido y cada masa es representada por una serie de masas concentradas. La interacción fluido-estructura se representa mediante el modelo de Housner modificado. Se incluye la interacción suelo-estructura mediante el modelo de Cone. Las solicitaciones sísmicas son obtenidas de 22 pares de registros de sismos en U.S.A. y otros países. Se considera el análisis de cuatro estanques, entre 150 [m³] y 450 [m³] de capacidad, de pedestal de 20 [m] de altura, ubicados en diferentes tipos de suelo. Se propone un procedimiento para estimar la curva del análisis dinámico incremental partir de los resultados del análisis “pushover”. Los resultados son comparados con los obtenidos de análisis dinámicos incrementales no-lineales.



Al-Ayoubi et.al. (Al-Ayoubi, Thirumurugan, & Satyanarayanan, 2025) presentan una formulación híbrida que combina análisis dinámico incremental con “machine learning” para agilizar la generación de las curvas de fragilidad para estanques elevados de hormigón armado. El análisis se realizó mediante un modelo de elementos finitos no lineal, considerando la formulación de masa agregada de Housner para representar la demanda hidrodinámica. Las sollicitaciones sísmicas, representadas por 22 pares de registros, fueron manejados se acuerdo a la metodología FEMA P-695. Se usó la aceleración espectral al periodo fundamental de la estructura como medida de intensidad. El procedimiento fue aplicado a tres estanques de 75 [m³], 320 [m³] y 1008 [m³], soportados por marcos. Los resultados mostraron la viabilidad de utilizar “machine learning” para obtener un eficiente procedimiento de obtención de las curvas de fragilidad.

2.4 Metodología FEMA P695 para evaluar desempeño sísmico

La metodología FEMA P695 (FEMA, 2009), desarrollada por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) de Estados Unidos, proporciona un procedimiento sistemático para cuantificar los factores de desempeño sísmico de los sistemas estructurales, que son los coeficiente de la respuesta usados en las normas de diseño, a efectos de convertir el complicado comportamiento dinámico no lineal de las estructuras en un problema lineal (FEMA, 2009). Su objetivo principal es garantizar que los sistemas sismorresistentes cumplan con un nivel de seguridad uniforme frente al colapso durante eventos sísmicos extremos .

La metodología propuesta incluye el desarrollo de un detallado sistema de información de diseño y de evaluación probabilística del riesgo de colapso. Utiliza técnicas de análisis no lineal y considera en forma explícita las incertezas del movimiento del suelo, la modelación estructural, el diseño y la información experimental. La metodología se basa en el requerimiento de una aceptablemente baja probabilidad de colapso de la estructura sometida a un movimiento del suelo correspondiente al Máximo Sismo Considerado (MCE).

Los alcances de la metodología se presentan a continuación.

- Es aplicable a nuevos sistemas estructurales.
- Es compatible con los códigos NEHRP, ASCE/SEI-7.
- Es consistente con un objetivo básico de desempeño de seguridad de vida inherente a los códigos y estándares sísmicos actuales internacionales.
- La amenaza sísmica está basada en el sismo más severo.
- Los conceptos son consistentes con los factores actuales establecidos en normas y códigos.
- La seguridad está medida en base a un margen de colapso (Collapse Margin Ratio).
- El desempeño es cuantificado a través de una simulación de colapso no lineal de un grupo de modelos de arquetipo.
- La incertidumbre proveniente de diversas fuentes está explícitamente considerada en la evaluación de desempeño de colapso.

Los conceptos claves para llevar a cabo la evaluación de desempeño sísmico

Aceleración espectral al nivel de colapso en el periodo fundamental T (S_{ct}): Corresponde a la mediana de aceleraciones que provocan el colapso en un análisis IDA, para el periodo fundamental T.

Aceleración espectral del sismo de diseño en el periodo fundamental T (S_{mt}): Corresponde a la aceleración de diseño, proveniente del espectro normativo, para el periodo fundamental T.

Margen de colapso (CMR): Razón entre S_{ct} y S_{mt}, indica una probabilidad de colapso de 50%

Margen de colapso ajustado (ACMR): Ajuste aplicado al CMR, depende de la ductilidad de la estructura.



ACMR mínimo aceptable: Es el valor mínimo que debe tener el ACMR para cumplir con la evaluación de desempeño sísmico, depende de la incertidumbre del sistema.

La metodología sigue una serie de pasos, los cuales se presentan a continuación.

Descripción de sistema estructural: Se debe definir y describir arquetipos estructurales representativos, donde se deben reflejar de forma precisa las características geométricas, mecánicas y constructivas del sistema resistente que se desea evaluar. Estos arquetipos deben ser idealizados para permitir su análisis bajo condiciones controladas y replicables, sirviendo como base para extrapolar los resultados a sistemas reales.

Antecedentes sísmicos: La metodología FEMA P695 (FEMA, 2009) proporciona lineamientos específicos para la selección de registros sísmicos, estableciendo que estos deben ser representativos de movimientos severos de diseño que puedan afectar al sistema estructural evaluado. Se debe seleccionar un conjunto de acelerogramas apropiado para el tipo de amenaza sísmica esperada, procurando una adecuada variabilidad en términos de contenido de frecuencia, duración e intensidad. Posteriormente, los registros seleccionados deben ser normalizados para que su espectro de aceleración coincida con el espectro objetivo de diseño definido en la normativa correspondiente.

Caracterización de comportamiento: Es fundamental definir de forma adecuada el comportamiento lineal y no lineal de los materiales que componen el sistema estructural. Esto incluye propiedades como resistencia última, deformaciones de fluencia y ruptura, entre otros parámetros. Este paso garantiza que la respuesta del modelo ante sollicitaciones extremas sea realista y representativa del comportamiento físico de la estructura.

Desarrollo de modelos: Con los antecedentes anteriores, se procede a desarrollar los modelos numéricos del sistema estructural, generalmente mediante herramientas de análisis por elementos finitos. El modelado debe ser suficientemente detallado para capturar los efectos de no linealidad, así como los modos de falla relevantes. El nivel de idealización dependerá del tipo de estructura, pero debe garantizar la confiabilidad de los resultados.

Análisis de modelos: Se deben realizar dos tipos de análisis principales:

- **Análisis estático no lineal (Push-over):** Permite obtener la curva de capacidad del sistema estructural, desde el comportamiento elástico hasta el colapso, y caracterizar su ductilidad y sobre-resistencia.
- **Análisis dinámico incremental (IDA):** Consiste en aplicar un conjunto de acelerogramas previamente seleccionados y escalarlos progresivamente en intensidad. Este análisis permite evaluar el nivel de demanda para diferentes niveles de intensidad sísmica, hasta identificar el punto de colapso estructural para cada registro.

Evaluación de desempeño sísmico: La evaluación se basa en los resultados del análisis no lineal incremental, determinando la capacidad media de colapso (CMR), margen de colapso ajustado (ACMR) y el valor mínimo de ACMR requerido. Por último, se compara el ACMR y el ACMR mínimo requerido y se evalúa el desempeño sísmico del sistema.

3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

3.1 General

Para realizar la evaluación de desempeño sísmico, se estudiará dos estanques elevados de hormigón armado ya construidos y en servicio en Chile. Ambos son de tipo pedestal cilíndrico, representativos de este tipo de estructuras y abarcan un rango de tamaño usual de entre 500 y 2500 [m³] de capacidad. En este capítulo se describe las características de los estanques considerados en el presente estudio.

Cabe señalar que se ha elegido estos estanques para el estudio ya que considera que son representativos para hacer una evaluación general y cumplen con los requerimientos de arquetipos que define FEMA P-695. (FEMA, 2009)

Ambos estanques fueron diseñados originalmente según el mismo procedimiento. Las solicitaciones sísmicas se determinaron según NCh2369.Of2003 (INN, 2003). Para el modo impulsivo de la respuesta sísmica se consideró el factor R de modificación de la respuesta igual a 3 y el amortiguamiento ξ 0.03. Para el modo convectivo se consideró $R = 1$ y $\xi = 0.005$.

El análisis sísmico se realizó de acuerdo con las disposiciones ACI para estanques de hormigón armado ACI 350.3-06 (ACI, 2006) y para estanques elevados ACI 371R-98 (ACI, 1998).

El diseño de los elementos de hormigón armado en contacto con el agua como es la cuba se realizó según las disposiciones de la norma ACI para estructuras ambientales de hormigón armado ACI 350-06 (ACI, 2006). En el caso de los elementos de hormigón armado que no están en contacto permanente con el agua, como es la fundación, el pedestal y el techo de la cuba, el diseño se realizó según el ACI 318-08 (ACI, 2008).

3.2 Estanque Cartagena

3.2.1 Dimensiones

Estanque de regulación de un sistema de alimentación de agua potable en la ciudad de Cartagena con capacidad de 500 [m³]. Está ubicado en la localidad Altos de Cartagena, V Región, construido para la obra “Proyecto de instalación del sistema de agua potable rural”.

En la Tabla 3-1 se muestran las propiedades geométricas del estanque, y en la Figura 3-1 se muestra un extracto del plano de formas del proyecto de diseño estructural

Tabla 3-1: Dimensiones estanque Cartagena: Fuente: Plano de forma proyecto estructural

Gilberto Leiva H.

Pedestal	
Diámetro de fundación [m]	16.0
Profundidad de fundación [m]	3.0
Altura pedestal [m]	20.0
Diámetro medio [m]	9.0
Espesor de muro [cm]	20
Cuba	
Diámetro medio [m]	13.2
Espesor losa de fondo [cm]	20
Espesor losa de techo [cm]	15
Espesor de manto [cm]	20

Volumen de regulación [m ³]	500
Revancha [m]	0.68

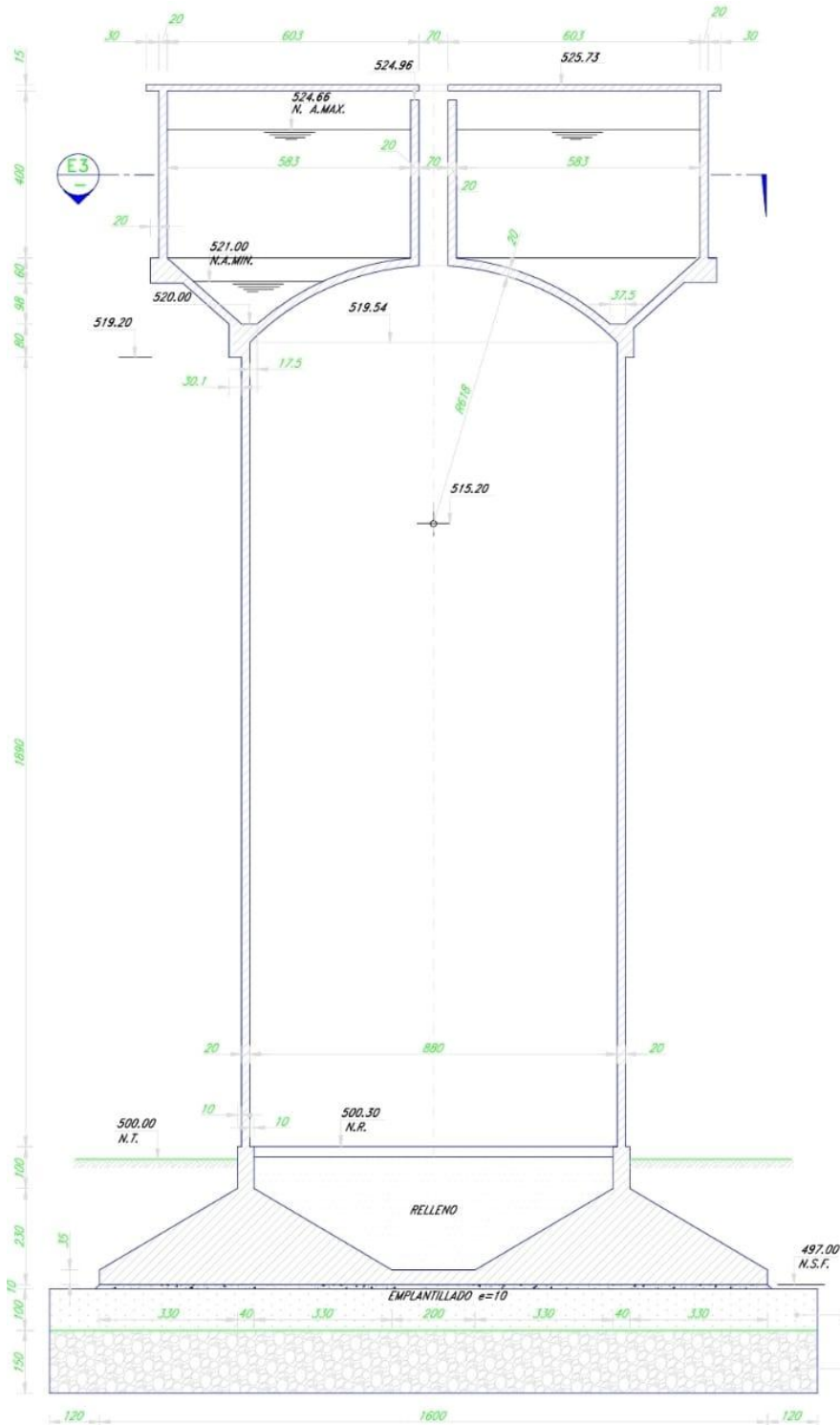


Figura 3-1: Vista en corte estanque Cartagena. Fuente: Plano de forma proyecto estructural
Gilberto Leiva H.

3.2.2 Diseño estructural

De acuerdo con la NCh2369.Of2003 (INN, 2003), el estanque se encuentra ubicado en sobre suelo tipo III y zona sísmica 3.

Se ha considera do las propiedades nominales de los materiales especificados en el diseño original, resistencia cilíndrica característica del $f'c = 250$ [kg/cm²] y tensión de fluencia del acero de refuerzo $f_y = 4200$ [kg/cm²].

En la Tabla 3-2 se muestra los resultados globales del análisis sísmico.

Tabla 3-2: Resultados globales análisis sísmico estanque Cartagena. Fuente: Memoria de cálculo proyecto estructural Gilberto Leiva H.

Peso sísmico [T]	1031.2
Periodo convectivo [s]	3.31
Corte basal [T]	347.1
Momento volcante [T-m]	6489.7
Masa impulsiva [T]	311.5
Masa convectiva [T]	183.4

El detalle de la armadura de refuerzo según la altura del pedestal, en direcciones longitudinal y transversal, se detalla en la Tabla 3-3 Tabla 3-4 respectivamente, y se muestra en la Figura 3-2:

Tabla 3-3: Detalle refuerzo longitudinal estanque Cartagena. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.

Altura del pedestal [m]	Refuerzo longitudinal (ambas caras)
0 a 1.75	Ø16@20
1.75 a 20	Ø12@20

Tabla 3-4: Detalle refuerzo longitudinal estanque Cartagena. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.

Altura del pedestal [m]	Refuerzo transversal (ambas caras)
0 a 2.2	Ø10@10
2.2 a 20	Ø10@16

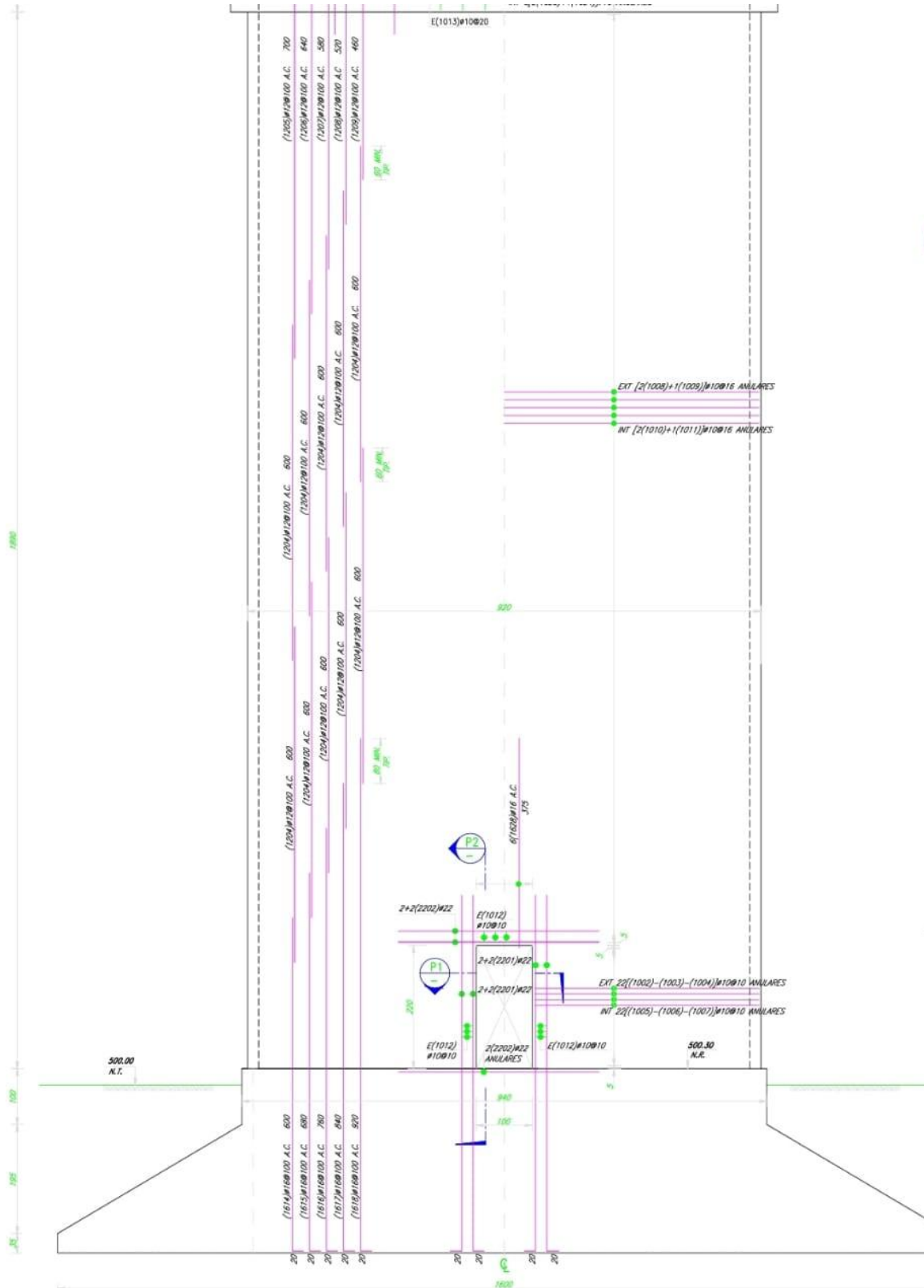


Figura 3-2: Plano de refuerzos de pedestal estanque Cartagena. Fuente: Plano de diseño proyecto estructural Gilberto Leiva H.



3.3 Estanque Rancagua

3.3.1 Dimensiones

Estanque de regulación de un sistema de alimentación de agua potable en la ciudad de Rancagua, VI región con capacidad de 2500 [m³]. Fue construido para la obra “Diseño de ingeniería estanque de regulación y obras sectorización”.

En la Tabla 3-5 se muestran las propiedades geométricas del estanque, y en la Figura 3-3 se muestra un extracto del plano de formas del proyecto de diseño estructural

Tabla 3-5: Dimensiones estanque Rancagua: Fuente: Plano de forma proyecto estructural

Gilberto Leiva H.

Pedestal	
Diámetro de fundación [m]	22.1
Profundidad de fundación [m]	2.2
Altura pedestal [m]	20.0
Diámetro medio [m]	17.0
Espesor de muro [cm]	30
Cuba	
Diámetro medio [m]	23.8
Espesor losa de fondo [cm]	30
Espesor losa de techo [cm]	15
Espesor de manto [cm]	25
Volumen de regulación [m³]	2500
Revancha [m]	0.75



**Figura 3-3: Vista en corte estanque Rancagua. Fuente: Plano de forma proyecto estructural
Gilberto Leiva H.**

3.3.2 Diseño estructural

De acuerdo con la NCh2369.Of2003 (INN, 2003), el estanque se encuentra ubicado en sobre suelo tipo II y zona sísmica 2.



Se ha considerado las propiedades nominales de los materiales especificados en el diseño original, resistencia cilíndrica característica del $f'c = 250$ [kg/cm²] y tensión de fluencia del acero de refuerzo $f_y = 4200$ [kg/cm²].

En la Tabla 3-6 se muestra los resultados globales del análisis sísmico

Tabla 3-6: : Resultados globales análisis sísmico estanque Cartagena. Fuente: Memoria de cálculo proyecto estructural Gilberto Leiva H.

Peso sísmico [T]	4214.1
Periodo convectivo [s]	4.77
Corte basal [T]	916.8
Momento volcante [T-m]	19811.4
Masa impulsiva [T]	1308
Masa convectiva [T]	1234.3

El detalle de la armadura de refuerzo según la altura del pedestal, en direcciones longitudinal y transversal, se detalla en la Tabla 3-7 y Tabla 3-8 respectivamente, y se muestra en la Figura 3-4:

Tabla 3-7: Detalle refuerzo longitudinal estanque Rancagua. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.

Altura del pedestal [m]	Refuerzo longitudinal (ambas caras)
0 a 2.65	Ø16@20
2.65 a 15.6	Ø12@20
15.6 a 20.0	Ø16@20

Tabla 3-8: : Detalle refuerzo transversal estanque Rancagua. Fuente: Plano de refuerzos de pedestal proyecto estructural Gilberto Leiva H.

Altura del pedestal [m]	Refuerzo transversal (ambas caras)
0 a 2.10	Ø10@10
2.10 a 17.90	Ø10@14
17.90 a 18.80	Ø22@10

4 DESARROLLO DE MODELOS

Con el objetivo de evaluar el comportamiento sísmico de los estanques elevados mediante análisis no lineales, se desarrollaron modelos estructurales tridimensionales que representan de forma simplificada pero adecuada la geometría y características fundamentales de estas estructuras. El sistema estructural considerado está compuesto, por el pedestal cilíndrico de hormigón armado que actúa como elemento resistente principal y la cuba superior que contiene el fluido. La fundación se modela como una base rígida con condición de empotramiento total, mientras que el pedestal es discretizado mediante elementos tipo “Shell”, permitiendo capturar su comportamiento flexo-compresivo. En cuanto a la cuba, se asume rígida estructuralmente y se modela utilizando el enfoque de Housner (Housner, 1963). Este esquema permite abordar con eficiencia la interacción fluido-estructura dentro del marco de la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009). Finalmente, se realiza un análisis modal para conocer los periodos de interés de las estructuras.

4.1 Modelación del pedestal

La modelación por elementos finitos del pedestal se realizó en SAP2000 (CSI, 2024) mediante elementos tipo “Shell”, representando su geometría y condiciones de borde. Una vez definido el modelo estructural, se incorporó el comportamiento no lineal del hormigón y el acero de refuerzo mediante la incorporación de sus propiedades de materiales, para capturar adecuadamente la respuesta plástica ante solicitaciones sísmicas.

4.1.1 Modelo de elementos finitos

El pedestal de los estanques elevados fue modelado mediante elementos tipo “Shell”, lo que permite representar adecuadamente su comportamiento estructural tridimensional bajo cargas gravitacionales y sísmicas.

La tapa del pedestal se modela como un elemento rígido, de manera que sus deformaciones no afecten significativamente los desplazamientos en la cuba.

Debido a la condición de la fundación en la base, los apoyos se modelan como empotrados.

La modelación del pedestal para los estanques Cartagena y Rancagua se muestra en la Figura 4-1 y Figura 4-2 respectivamente.

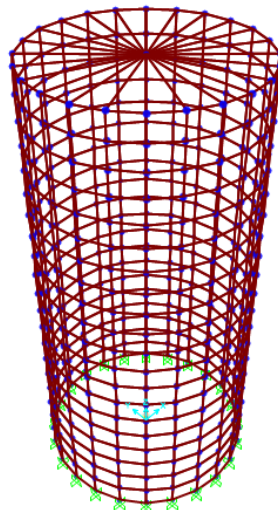


Figura 4-1: Modelación pedestal estanque Cartagena. Fuente: SAP2000.

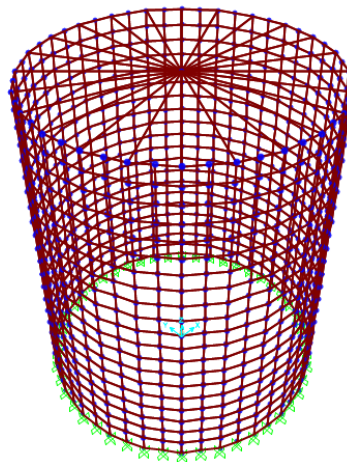


Figura 4-2: Modelación pedestal estanque Rancagua. Fuente: SAP2000.

4.1.2 Comportamiento no lineal

Para capturar el comportamiento no lineal esperado en la base del pedestal bajo solicitaciones sísmicas, se utilizaron elementos “Shell” por capas no lineal, donde en SAP2000 se pueden caracterizar las propiedades de sus materiales.

4.1.2.1 Hormigón

Para ambos estanques se utilizó hormigón de grado G25, con una resistencia $f'_c=250$ [kg/cm²] y densidad de 2.5 [T/m³]. El comportamiento no lineal se define según la curva de Mander (Mander, 1988), incluida en el software SAP2000, considerando una deformación al esfuerzo máximo $\epsilon_0 = 0.002$, una deformación última $\epsilon_{cu} = 0.004$ y un módulo de elasticidad $E = 238752$ [kg/cm²]

La curva esfuerzo-deformación del hormigón obtenida de SAP2000, se muestra en la Figura 4-3.

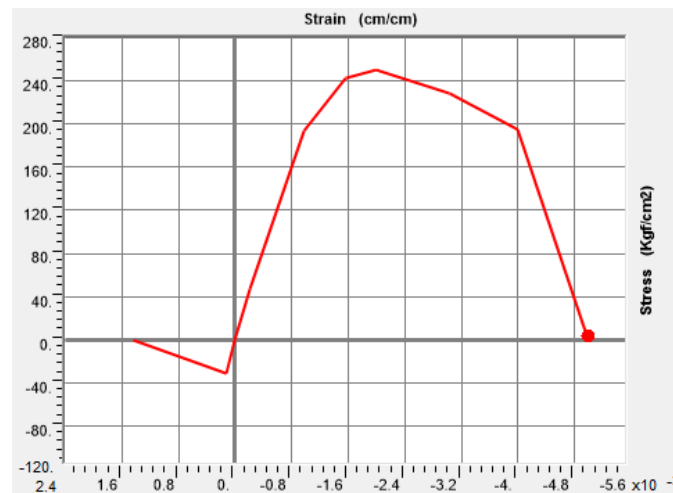


Figura 4-3: Curva de esfuerzo-deformación del hormigón. Fuente: SAP2000.

4.1.2.2 Barras de refuerzo

Para ambos estanques se consideró barras de refuerzo de calidad A630-420H, cuyas propiedades nominales son una tensión de fluencia $f_y = 4200$ [kg/cm²] y módulo de elasticidad $E=2100000$ [kg/cm²]

La curva esfuerzo-deformación del acero de refuerzo obtenida de SAP2000, se muestra en la Figura 4-4.

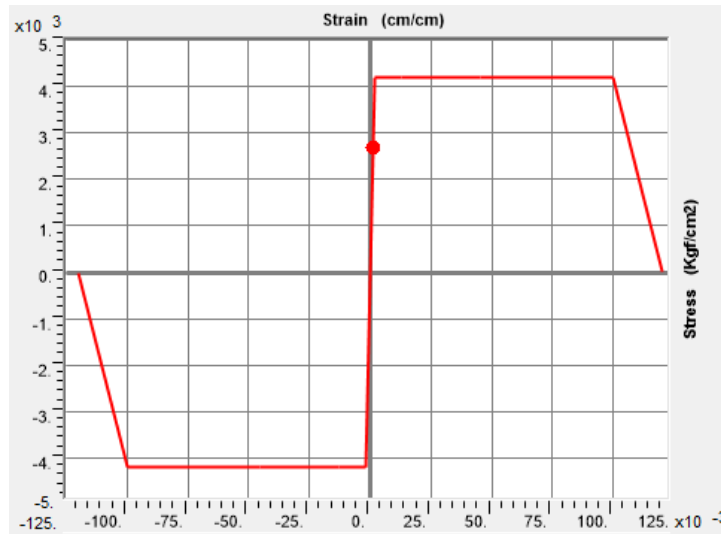


Figura 4-4: Curva de esfuerzo-deformación del acero de refuerzo. Fuente: SAP2000

4.2 Modelación de la cuba

La modelación de la cuba considera tanto el comportamiento dinámico del fluido como su representación estructural. Primero, se determinan las masas impulsiva y convectiva del fluido junto a sus respectivas alturas, además del periodo del modo convectivo, según el modelo de Housner (Housner, 1963). Luego, estos parámetros se incorporan en SAP2000 para representar adecuadamente la interacción fluido-estructura en el modelo estructural.

4.2.1 Comportamiento del fluido dentro del estanque

Para determinar los parámetros antes mencionados, se utilizaron las ecuaciones indicadas en ACI 350-06 (ACI, 2006), basadas en el modelo de (Housner, 1963), donde se considera un estanque de geometría cilíndrica de diámetro D , altura de líquido H_L y masa total M .

La masa impulsiva M_i se obtiene a partir de la ecuación.

$$\frac{M_i}{M} = \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{H_L}\right)}{0.866 \frac{D}{H_L}}$$

Ecuación 4-1

La altura impulsiva h_i se obtiene según.

$$\frac{h_i}{H_L} = \frac{0.866 \frac{D}{H_L}}{2 \tanh\left(0.866 \frac{D}{H_L}\right)} - \frac{1}{8}, \text{ si } \frac{D}{H_L} \geq \frac{3}{4} (*)$$

Ecuación 4-2

(*): Si $\frac{D}{H_L} < \frac{3}{4}$, $\frac{h_i}{H_L} = 0.45$

Para obtener la masa convectiva M_c , se hace según la siguiente ecuación.

$$\frac{M_c}{M} = 0.23 \left(\frac{D}{H_L}\right) \tanh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)$$

Ecuación 4-3

La altura convectiva h_c se obtiene según.

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right) - 2.01}{3.68 \frac{H_L}{D} \sinh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)}$$

Ecuación 4-4

El periodo convectivo T_c , se obtiene mediante.

$$T_c = \frac{2\pi\sqrt{D}}{\sqrt{3.68 g \tanh\left(3.68 \frac{H_L}{D}\right)}}$$

Ecuación 4-5

4.2.1.1 Estanque Cartagena

Utilizando las ecuaciones descritas, se pueden obtener los parámetros calculados para el estanque Cartagena, además de la obtención de la masa de la cuba y su altura. los cuales se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Parámetros de estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Masa impulsiva (M_i) [T]	311.5
Altura impulsiva* (h_i) [m]	4.16
Masa convectiva (M_c) [T]	183.4
Altura convectiva* (h_c) [m]	4.55
Masa cuba [T]	209.9
Altura CM cuba* [m]	2.3
Periodo convectivo (T_c) [s]	3.36

4.2.1.2 Estanque Rancagua

Utilizando las ecuaciones descritas, se pueden obtener los parámetros calculados para el estanque Rancagua, los cuales se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Parámetros de estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Masa impulsiva (M_i) [T]	1308
Altura impulsiva* (h_i) [m]	7.29
Masa convectiva (M_c) [T]	1234.3
Altura convectiva* (h_c) [m]	7.69
Masa cuba [T]	713.1
Altura CM cuba* [m]	3.6
Periodo convectivo (T_c) [s]	4.77

*Nota: Todas las alturas fueron medidas desde la losa de fondo de la cuba.

4.2.2 Modelación en SAP2000

Se ubican los nodos correspondientes al centro de masa de la cuba y la masa impulsiva y convectiva, sobre la tapa del pedestal, cada una con su respectivo peso y altura, según se detalla en la Tabla 4-1 y Tabla 4-2 para los estanques Cartagena y Rancagua respectivamente.

Dado que el modelo supone un estanque totalmente rígido, los nodos del centro de masa de la cuba y la masa impulsiva, se conectan al pedestal mediante un pilar rígido con elemento tipo “Frame”, de geometría circular y diámetro de 10 [cm], con rigidez suficiente para que se muevan monolíticamente con la estructura del pedestal, sin tener problemas de convergencia en las ecuaciones del modelo no lineal ejecutado en SAP2000.

Para conectar la masa conectiva al resto de la estructura, se define un pilar flexible, modelado mediante un elemento tipo “Frame”, al cual se le asigna una geometría circular de 10 [cm] de diámetro, iterando el módulo de elasticidad hasta obtener el periodo convectivo calculado. De esa forma, se verifica que la rigidez del modo convectivo según la Tabla 4-1 y Tabla 4-2 para los estanques Cartagena y Rancagua respectivamente, se asigna correctamente en el modelo.

La modelación simplificada de la cuba se muestra en la Figura 4-5.

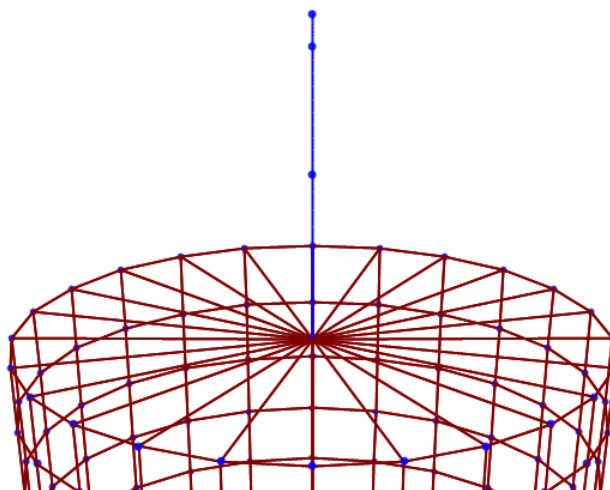


Figura 4-5: Modelo simplificado de la cuba. Fuente: SAP2000.

En la Figura 4-6 y Figura 4-7, se muestran los modelos completos de los estanques Cartagena y Rancagua respectivamente.

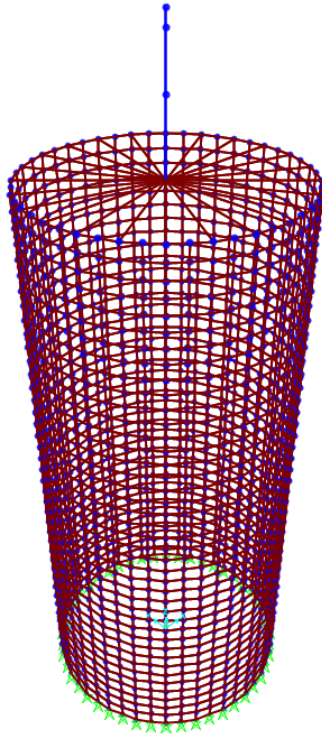


Figura 4-6: Modelo completo estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

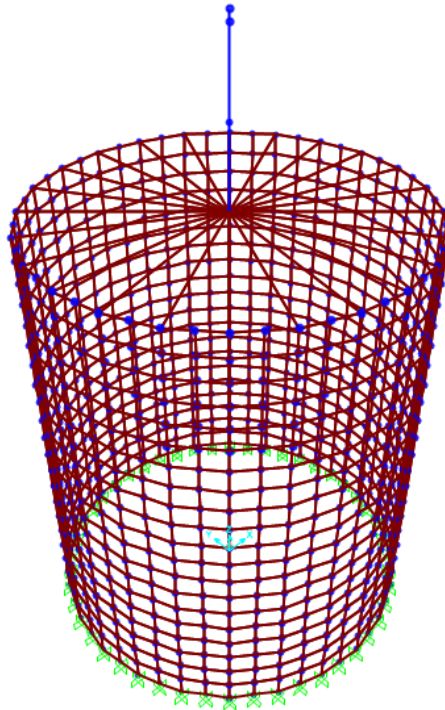


Figura 4-7: Modelo completo estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.



4.3 Análisis modal

El análisis modal se realizó con el objetivo de identificar los modos principales de vibración de los estanques, y determinar los periodos asociados a las masas impulsivas y convectivas del sistema fluido-estructura. Este análisis se ejecutó directamente en SAP2000, a partir del modelo tridimensional de cada estanque, considerando la masa total del sistema, características de los materiales, geometría de la estructura y sus condiciones de apoyo.

Entre los resultados obtenidos se encuentran los periodos fundamentales de vibración, las formas modales asociadas y los factores de participación modal en dirección horizontal, los cuales permiten verificar la correspondencia entre el modo convectivo y su periodo teórico estimado.

Los resultados del análisis modal para ambos estanques se presentan en la Tabla 4-3 y Tabla 4-4.

Tabla 4-3: Periodos estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Estanque	Cartagena
Periodo impulsivo [s]	0.35
Periodo convectivo [s]	3.31

Tabla 4-4: Periodos estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Estanque	Rancagua
Periodo impulsivo [s]	0.25
Periodo convectivo [s]	4.77

5 ANÁLISIS DE LOS MODELOS

En este capítulo se presenta los resultados del análisis del comportamiento sísmico de los modelos estructurales de los estanques Cartagena y Rancagua, utilizando dos enfoques complementarios.

En primer lugar, se aplica un análisis estático no lineal tipo “pushover”, que permite estimar la capacidad de la estructura ante cargas laterales monotónicamente crecientes.

En segundo término, se realiza un análisis dinámico no lineal, que incluye tanto el análisis tiempo-historia como el análisis dinámico incremental (IDA), permitiendo capturar el comportamiento inelástico del sistema, incluidas las no linealidades de material y la interacción fluido-estructura. Para todos los análisis no lineales, se considera que la estructura alcanza su colapso cuando el hormigón llega a una deformación en compresión de 0.004.

Se presentan los antecedentes sísmicos considerados en el estudio, detallando el proceso de selección y normalización de los registros utilizados, los cuales son requeridos para el desarrollo del análisis dinámico.

5.1 Análisis estático no lineal (Pushover análisis)

Para realizar el análisis estático no lineal, se considera una carga lateral equivalente una fracción del peso propio de la estructura, incluidos los nodos del centro de masa de la cuba, y la masa inductiva y convectiva, la cual se aumenta progresivamente hasta alcanzar el colapso.

5.1.1 Estanque Cartagena

La curva de respuesta se muestra en la Figura 5-1. Para este modelo, para el punto último se observa un drift de 0.88 [%] (desplazamiento de techo de 17.55 [cm]) asociado a un corte basal de 828 [T].

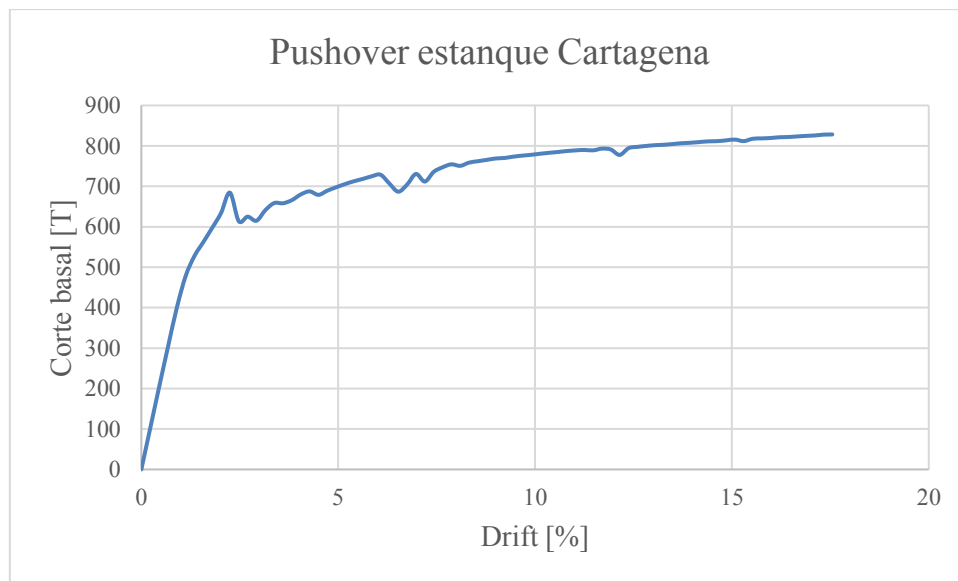


Figura 5-1: Pushover estanque Cartagena. Fuente: SAP2000.

5.1.2 Estanque Rancagua

La curva de respuesta se muestra en la Figura 5-2. Para este modelo, para el punto último se observa un drift de 0.53 [%] (desplazamiento de techo de 10.64 [cm]) asociado a un corte basal de 4924 [T].

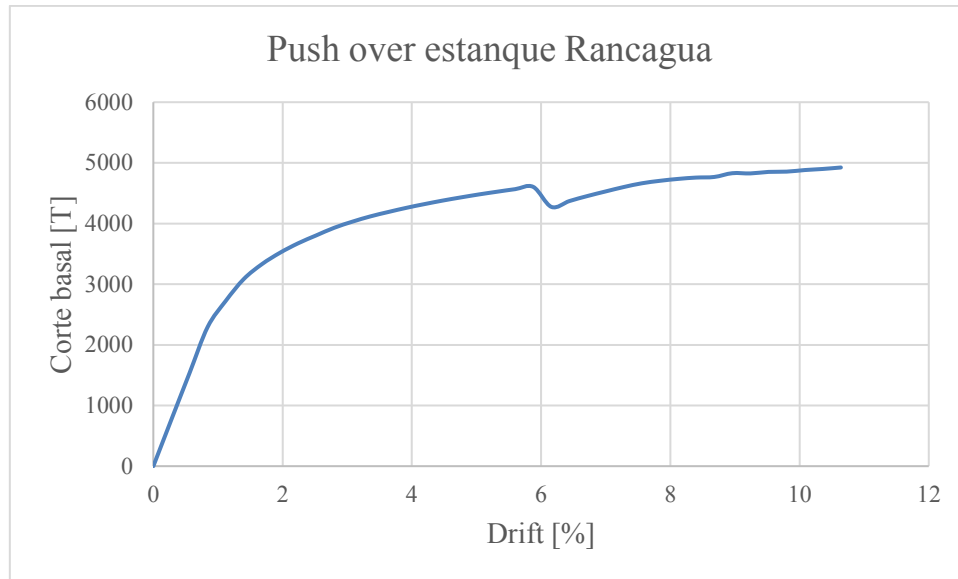


Figura 5-2: Pushover estanque Rancagua. Fuente: SAP2000.

5.1.3 Ductilidad y sobre-resistencia

Ductilidad (μ_T): Establece la relación entre el máximo desplazamiento alcanzado δ_u obtenido del análisis estático no lineal y el desplazamiento de fluencia $\delta_{y\text{ eff}}$.

$$\mu_T = \frac{\delta_u}{\delta_{y\text{ eff}}}$$

Ecuación 5-1

$\delta_{y\text{ eff}}$ se define según FEMA P695 (FEMA, 2009) como:

$$\delta_{y\text{ eff}} = C_0 \frac{V_{m\acute{a}x}}{W} \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) T^2$$

Ecuación 5-2

Donde:

C_0 : Coeficiente de participación modal del modo fundamental, el cual mide la contribución de este modo al movimiento total de la estructura.

$V_{m\acute{a}x}$: Corte basal máximo obtenido del análisis estático no lineal (pushover)

W : Peso de la estructura.

T : Periodo fundamental de la estructura.

Sobre-resistencia (Ω_0): Es la relación entre el máximo corte basal alcanzado y el corte basal de diseño.

$$\Omega_0 = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V}$$

Ecuación 5-3

Donde V corresponde al corte basal de diseño establecido por NCh 2369Of.2023 (INN, 2023).



En la Tabla 5-1 y Tabla 5-2 se muestran los resultados para la ductilidad y sobre-resistencia, respectivamente para el estanque Cartagena.

Tabla 5-1: Cálculo de ductilidad estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

C_0	0.63
$V_{m\acute{a}x}$ [T]	828
W [T]	1031.2
T [s]	0.35
$\delta_{y\ eff}$ [cm]	1.54
δ_u [cm]	17.55
μ_T	11.4

Tabla 5-2: Cálculo de sobre-resistencia estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

$V_{m\acute{a}x}$ [T]	828
V [T]	670
Ω_0	1.24

En la Tabla 5-3 y Tabla 5-4 se muestran los resultados para la ductilidad y sobre-resistencia, respectivamente para el estanque Rancagua.

Tabla 5-3: Cálculo de ductilidad estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

C_0	0.6
$V_{m\acute{a}x}$ [T]	4924
W [T]	4214
T [s]	0.25
$\delta_{y\ eff}$ [cm]	1.11
δ_u [cm]	10.64
μ_T	9.6

Tabla 5-4: Cálculo de sobre-resistencia estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

$V_{m\acute{a}x}$ [T]	4924
V [T]	1695
Ω_0	3.00

5.2 Antecedentes sísmicos

El procedimiento de análisis dinámico no lineal propuesto en el documento FEMA P695 (FEMA, 2009) utiliza un conjunto de registros sísmicos de diferentes lugares del mundo para desarrollar su metodología. Se considera solo las componentes horizontales del sismo.

Con el fin de realizar una evaluación de desempeño que permita evaluar los requerimientos de diseño de la NCh 2369Of.2023 (INN, 2023) para los estanques elevados de hormigón armado con los eventos sísmicos registrados en Chile, se opta por una selección y normalización de registros sísmicos distinta a

la indicada en FEMA P695 (FEMA, 2009), debido a que ninguno de los registros propuestos en dicha metodología corresponde a sismos ocurridos en Chile.

En esta sección se seleccionaron algunos de los eventos sísmicos más significativos registrados en Chile, los cuales fueron obtenidos del sitio web del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Chile (Uchile, s.f.) y NCEI (NCEI, s.f.) . Los registros seleccionados se indican en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5: Selección de registros sísmicos. Fuente: Elaboración propia.

Id. del registro	Nombre
1	27F Viña Centro
2	27F Concepción
3	27F Constitución
4	27F UTFSM
5	85 Lolleo
6	85 Viña Centro
7	85 UTFSM

Para seleccionar la componente a utilizar, se compararon los acelerogramas horizontales de cada registro, utilizando para el estudio el que tenga mayor PGA. La componente vertical no se considera por recomendación de FEMA P695 (FEMA, 2009), como se menciona anteriormente.

En la Figura 5-3, a modo de ejemplo, se observa el acelerograma del registro 27F Concepción en su dirección longitudinal. Los acelerogramas de los demás registros se encuentran en anexos.

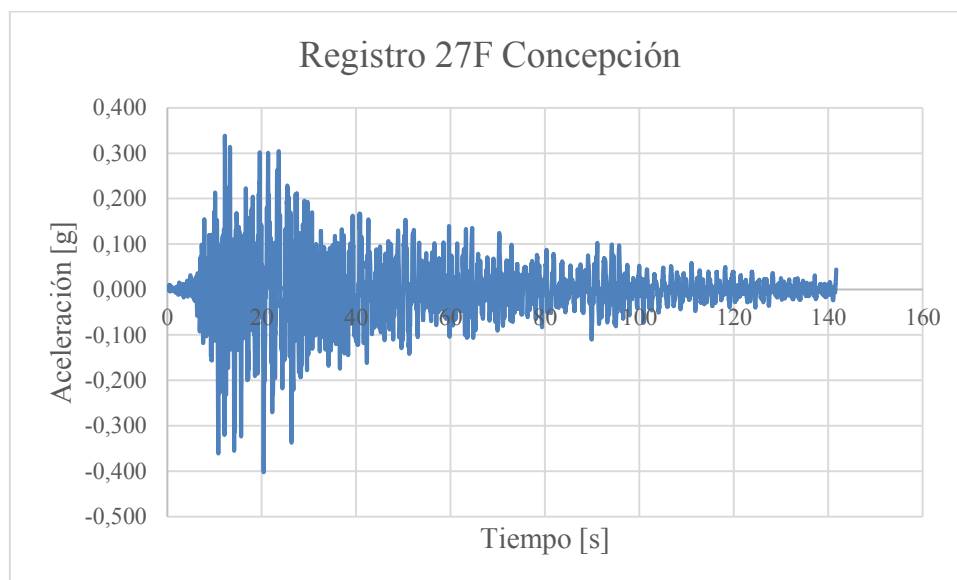


Figura 5-3: Registro de aceleración 27F Concepción en dirección longitudinal. Fuente: Elaboración propia.

Los espectros de respuesta elásticos para cada registro, para una razón de amortiguamiento $\xi = 0.03$ se muestran en la Figura 5-4.

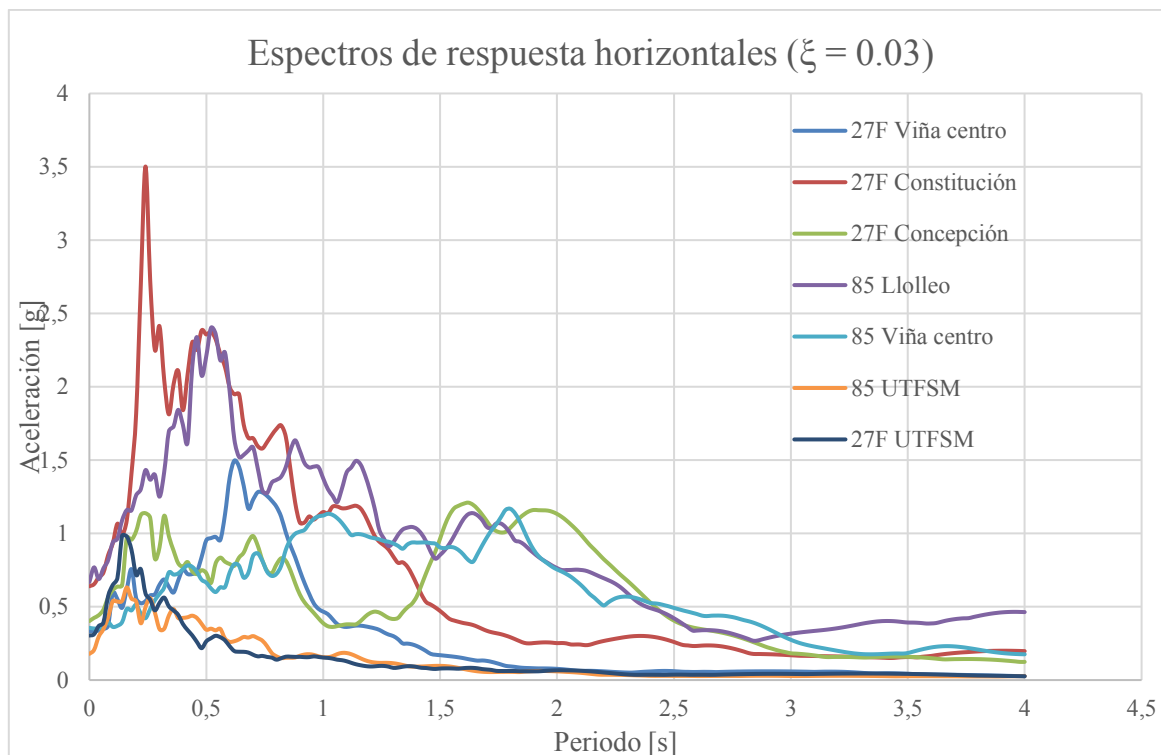


Figura 5-4: Espectros de respuesta horizontales ($\xi = 0.03$) para cada registro sísmico. Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo mencionado, se puede resumir la información de cada registro en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6: Información de registros sísmicos. Fuente: Elaboración propia.

Id. Del registro	Nombre	Duración total del registro [s]	PGA [g]	Orientación a evaluar
1	27F Viña centro	135	0.36	E-W
2	27F Concepción	142	0.40	Longitudinal
3	27F Constitución	143	0.64	Transversal
4	27F UTFSM	72	0.30	Transversal
5	85 Llole	116	0.67	10°
6	85 Viña centro	113	0.36	200°
7	85 UTFSM	79	0.18	70°

5.3 Análisis dinámico tiempo-historia no lineal

Previo a el análisis dinámico incremental (IDA) para evaluar desempeño sísmico, se llevó a cabo un análisis tiempo-historia no lineal utilizando los registros sísmicos originales sin normalizar, con el objetivo de observar el comportamiento estructural de los modelos ante eventos reales, representativos de posibles escenarios sísmicos. Para reducir la demanda computacional, en cada caso se empleó únicamente la duración representativa del registro, correspondiente al intervalo en que se concentra la mayor parte de la energía del sismo.

Para cada evento sísmico, se registró la aceleración espectral del modo fundamental, desplazamiento de techo del pedestal, drift, corte basal, momento basal y deformación del hormigón, además de sus gráficos de histéresis para observar su comportamiento no lineal.

5.3.1 Estanque Cartagena

En la Tabla 5-7, se observan los parámetros no lineales más importantes en función de la aceleración espectral del espectro de respuesta elástico para el estanque Cartagena.

Tabla 5-7: Parámetros no lineales estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. Hormigón
27F Viña centro	0.61	1.71	0.09	546	10618	0.00050
27F Concepción	0.94	2.14	0.11	574	11166	0.00057
27F Constitución	1.90	5.32	0.27	789	14693	0.00082
27F UTFSM	0.49	1.06	0.05	311	8046	0.00037
85 Lolloo	1.70	2.44	0.12	627	12037	0.00061
85 Viña centro	0.72	1.93	0.10	539	10496	0.00054
85 UTFSM	0.46	1.14	0.06	410	8513	0.00039

Se muestran además los gráficos de histéresis indicando la relación entre la proporción de corte basal sobre peso de la estructura (V/W), y la deriva de piso (drift) en la Figura 5-5, Figura 5-6, Figura 5-7, Figura 5-8, Figura 5-9, Figura 5-10 y Figura 5-11.

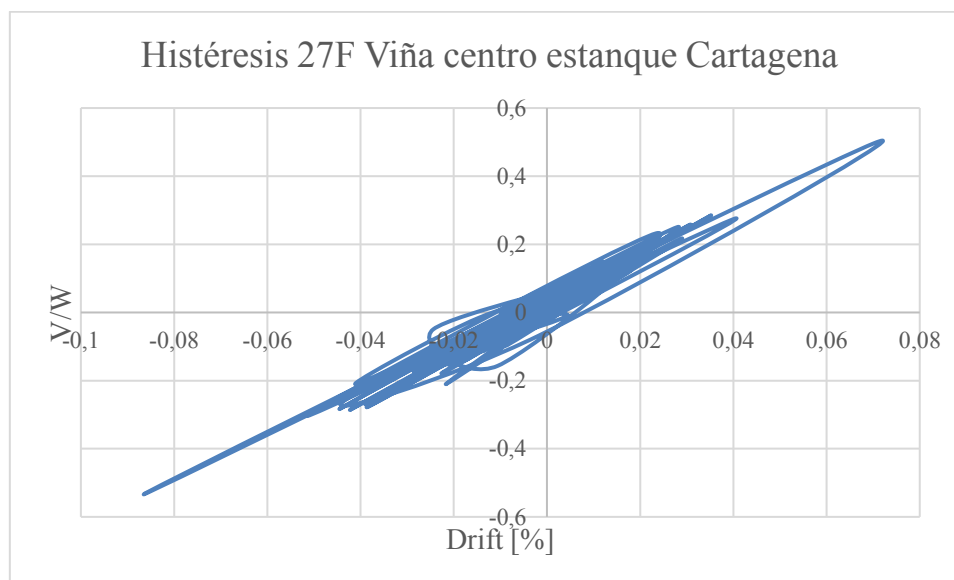


Figura 5-5: Histéresis 27F Viña centro estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

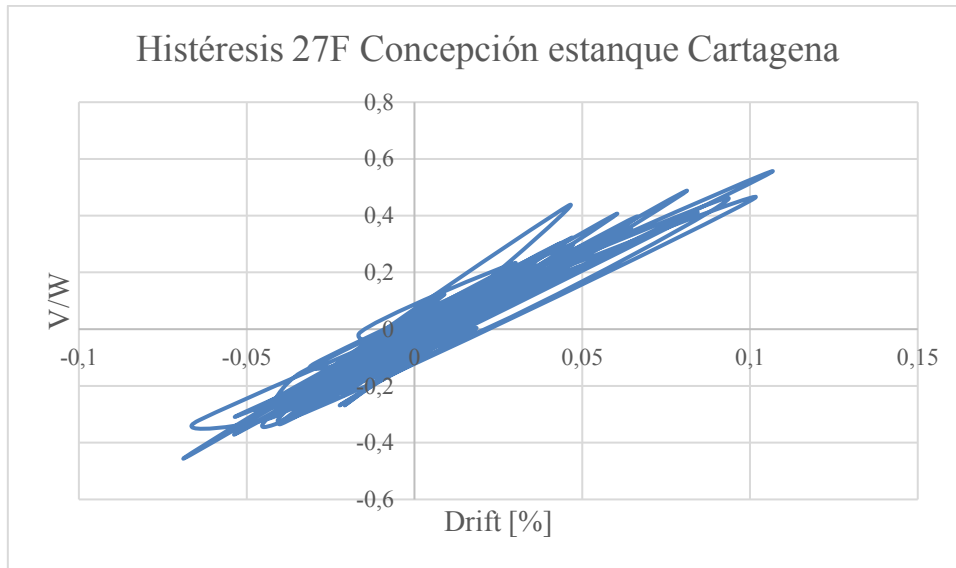


Figura 5-6: Histéresis 27F Concepción estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

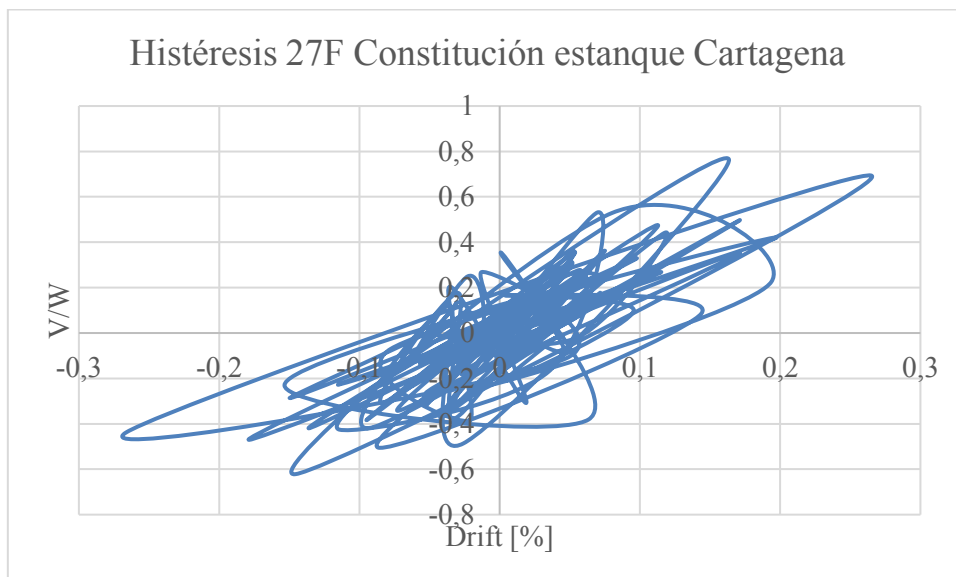


Figura 5-7: Histéresis 27F Constitución estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

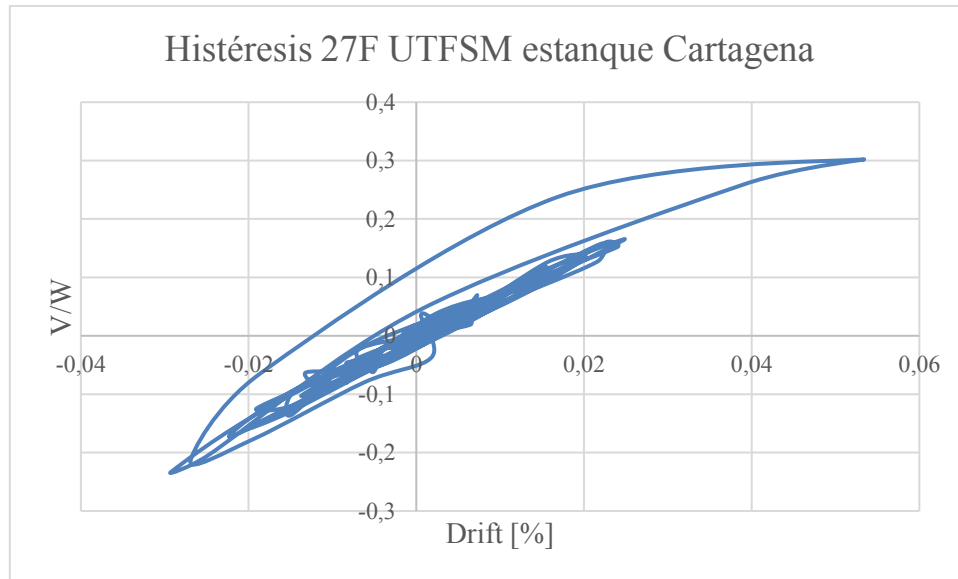


Figura 5-8: Histéresis 27F UTFSM estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

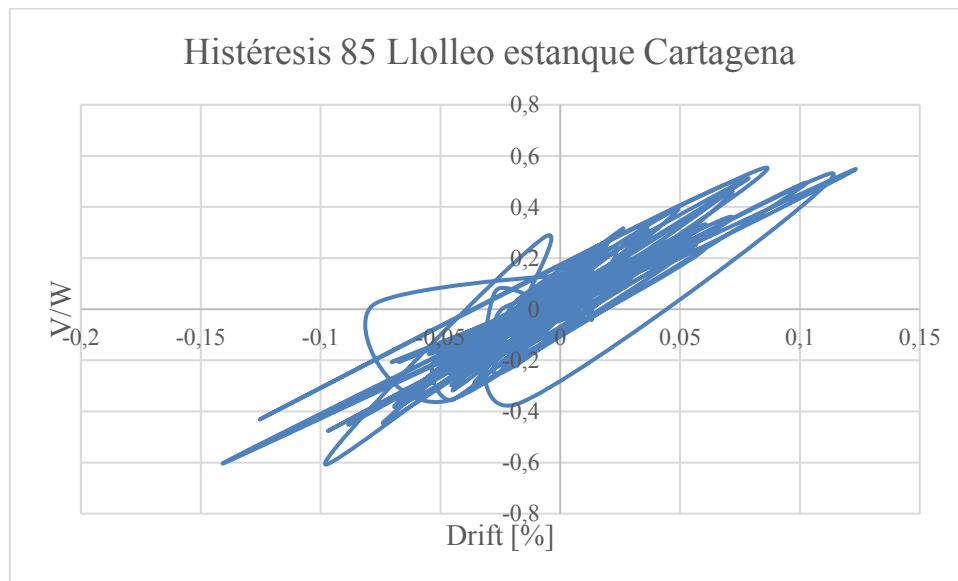


Figura 5-9: Histéresis 85 Llolleo estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

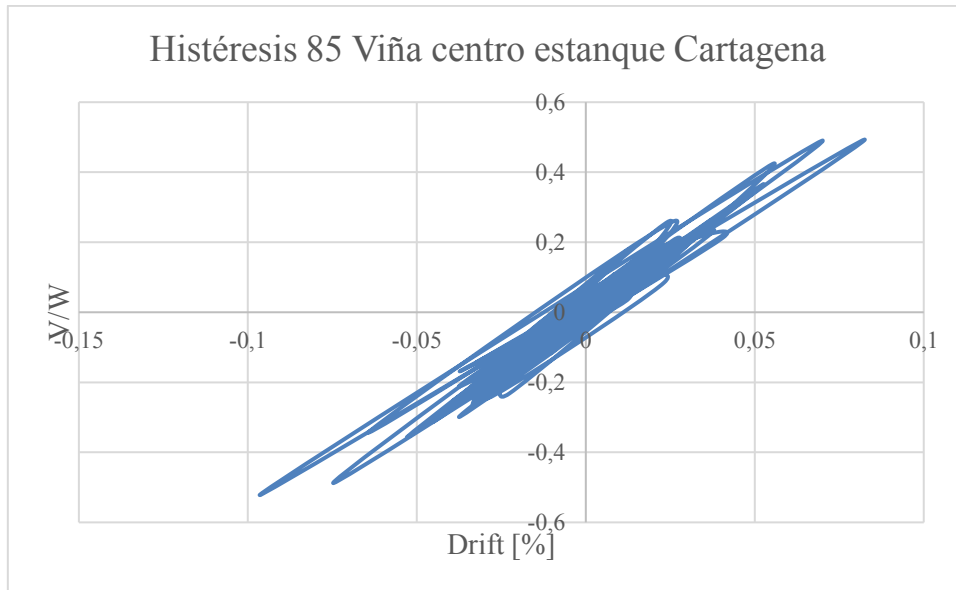


Figura 5-10: Histéresis 85 Viña centro estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

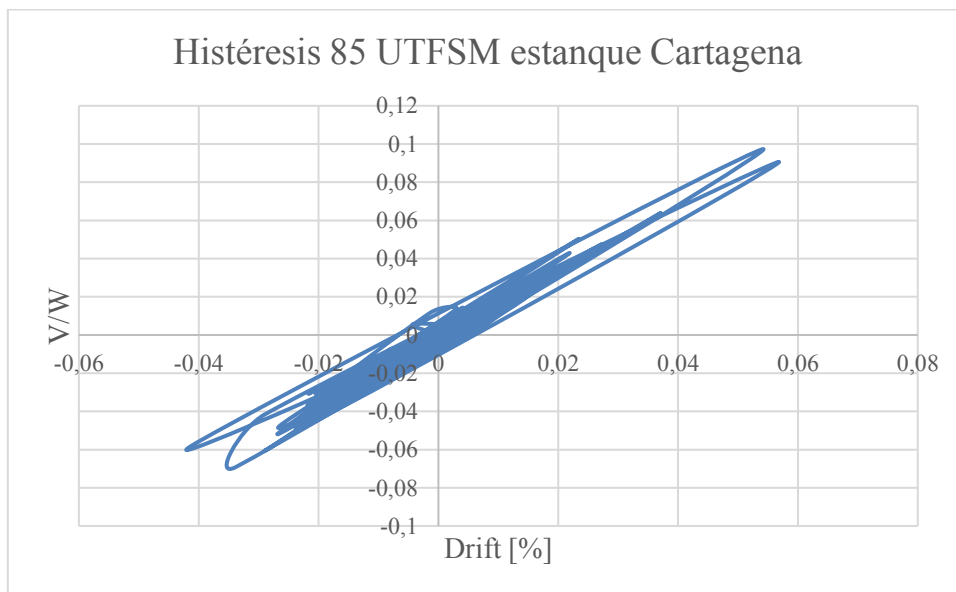


Figura 5-11: Histéresis 85 UTFSM estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Estanque Rancagua

En la Tabla 5-8, se observan los parámetros no lineales más importantes en función de la aceleración espectral del espectro de respuesta elástico para el estanque Rancagua.

Tabla 5-8: Parámetros no lineales estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento [T-m]	Def. Hormigón [-]
27F Viña centro	0.56	0.63	0.032	1254	31332	0.00036
27F Concepción	1.12	2.00	0.10	2653	62145	0.00052

27F Constitución	3.10	1.84	0.092	2541	63533	0.00071
27F UTFSM	0.57	0.82	0.041	1612	40445	0.00043
85 Lolloo	1.40	1.42	0.071	1965	48429	0.00022
85 Viña centro	0.45	0.84	0.042	1767	46665	0.00045
85 UTFSM	0.53	0.77	0.039	1630	39245	0.00041

Se muestran además los gráficos de histéresis indicando la relación entre la proporción de corte basal sobre peso de la estructura (V/W), y la deriva de piso (drift) en la Figura 5-12, Figura 5-13, Figura 5-14, Figura 5-15, Figura 5-16, Figura 5-17 y Figura 5-18.

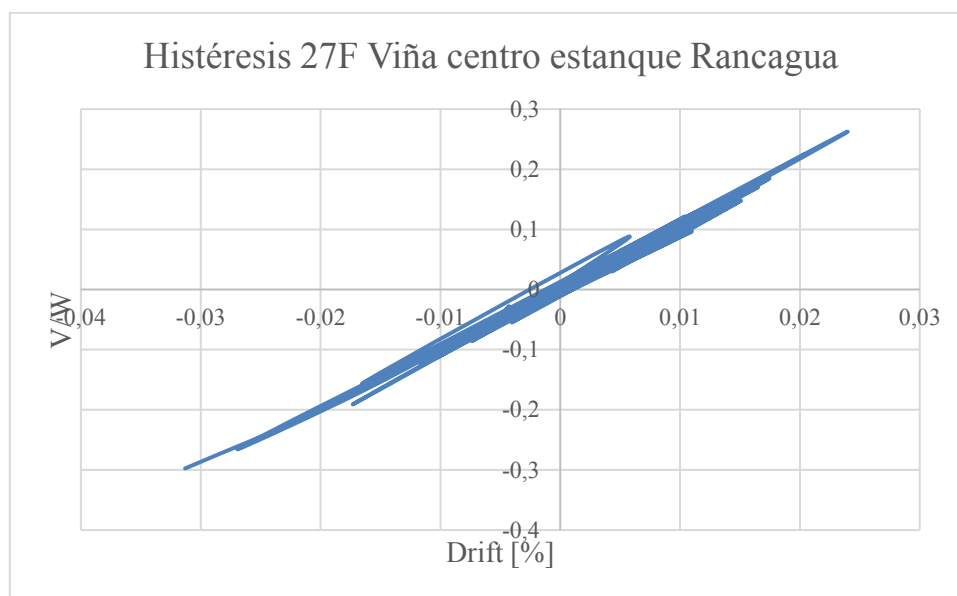


Figura 5-12: Histéresis 27F Viña centro estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

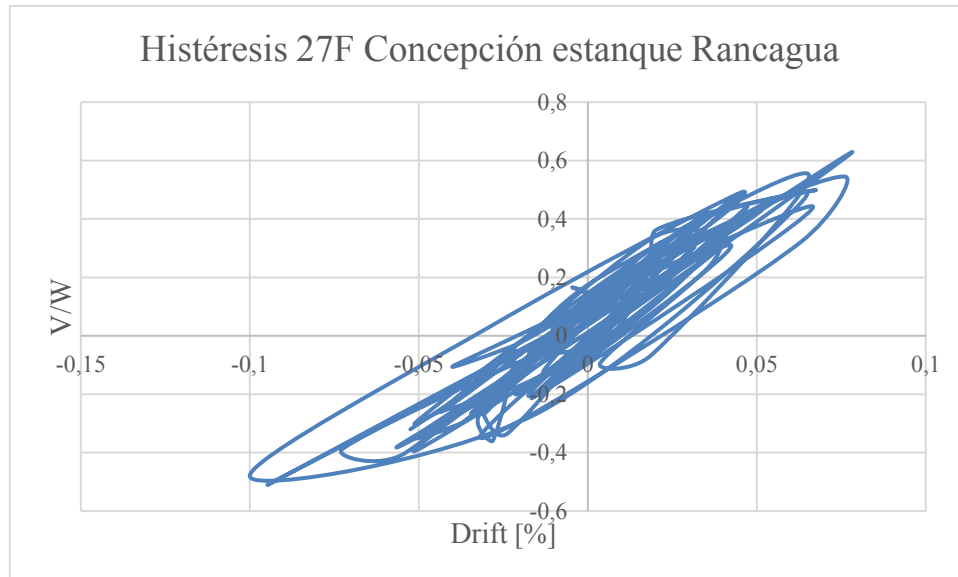


Figura 5-13: Histéresis 27F Concepción estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

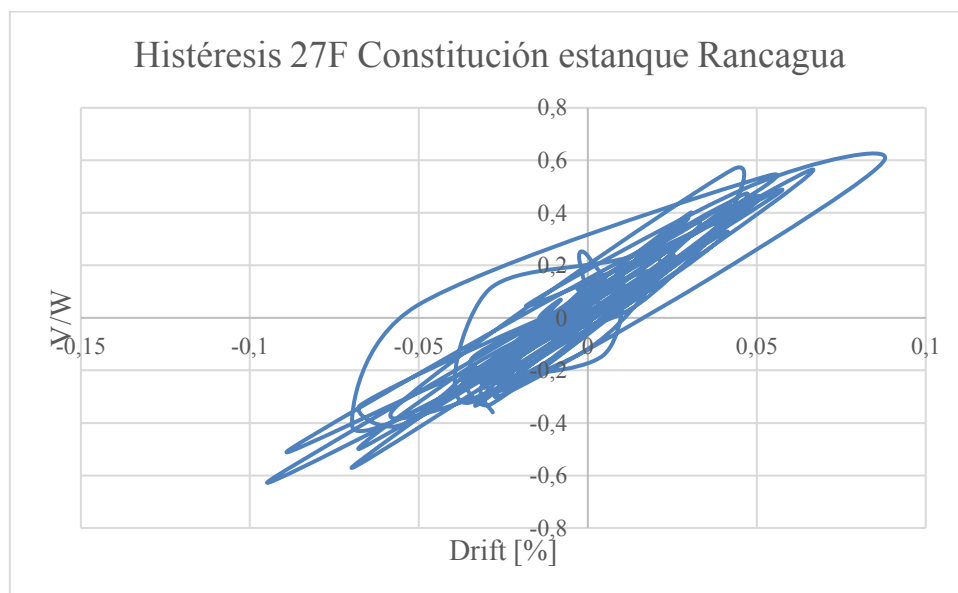


Figura 5-14: Histéresis 27F Constitución estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

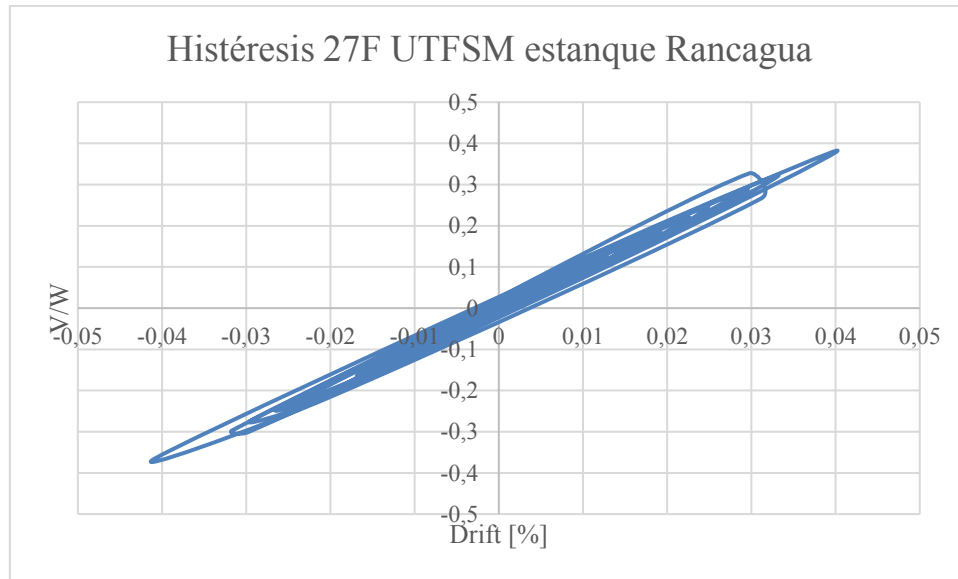


Figura 5-15: Histéresis 27F UTFSM estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

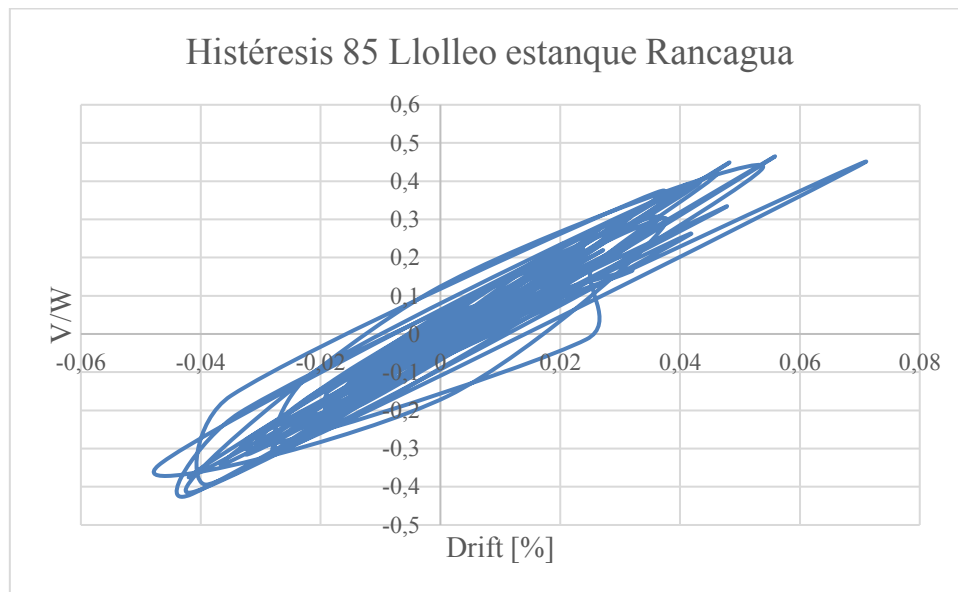


Figura 5-16: Histéresis 85 Llolleo estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

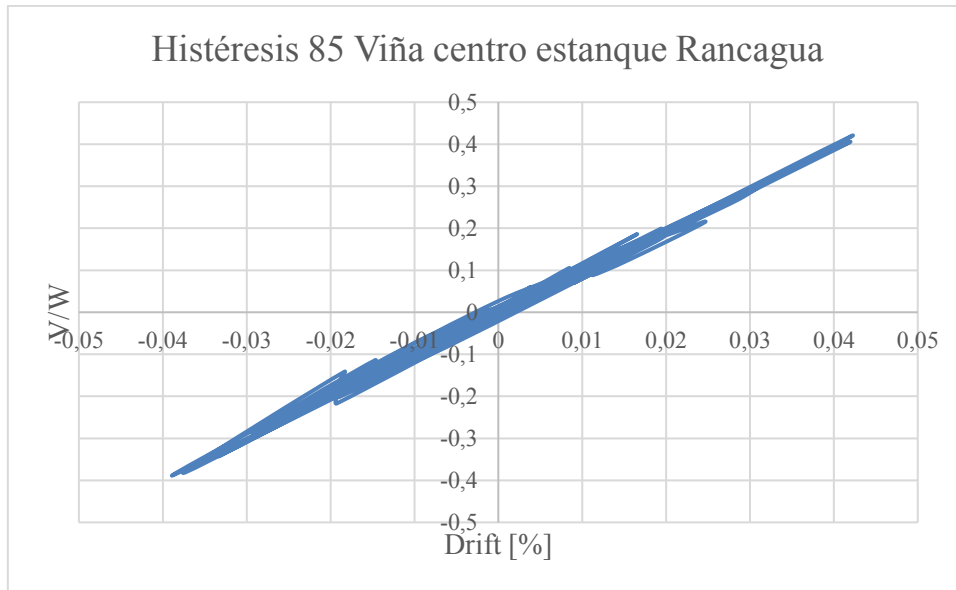


Figura 5-17: Histéresis 85 Viña centro estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

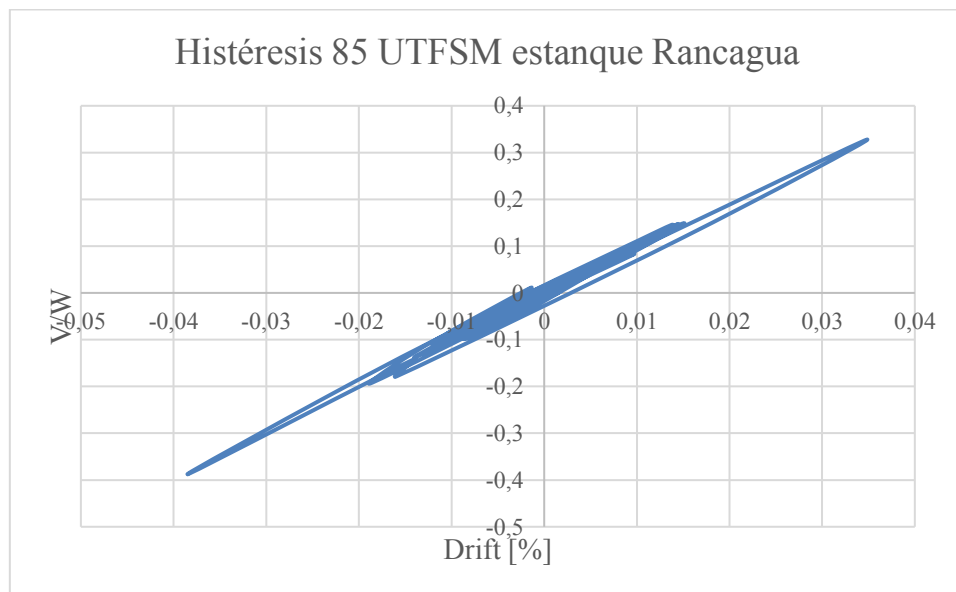


Figura 5-18: Histéresis 85 UTFSM estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

5.4 Análisis dinámico no lineal incremental (IDA)

El análisis dinámico incremental (IDA) permite evaluar la respuesta estructural ante niveles crecientes de demanda sísmica. Para ello, se utilizan los registros sísmicos normalizados, escalándolos progresivamente en intensidad hasta que la estructura alcance el criterio de colapso. En cada análisis se grafica la aceleración espectral (S_a) en el periodo fundamental de la estructura frente al desplazamiento de techo del pedestal, generando las curvas IDA que permiten estimar la capacidad de colapso.

Para reducir la demanda computacional, se utilizó, en cada registro, únicamente la duración representativa del sismo, definida como el intervalo de tiempo en que se concentra la mayor parte de la energía del sismo.



Para cada estanque y evento sísmico, se registró la aceleración espectral, desplazamiento de techo del pedestal, drift, corte y momento basal, y deformación del hormigón. Además, se obtienen los gráficos de histéresis para el paso donde se alcanza la deformación asociada al colapso estructural, los cuales se encuentran en anexos.

5.4.1 Normalización de los registros sísmicos

La metodología FEMA P695 (FEMA, 2009) establece la necesidad de normalizar los registros respecto a un espectro de diseño para garantizar una evaluación adecuada del desempeño estructural. Este proceso consiste en escalar los registros sísmicos de forma que su aceleración espectral coincida con la del espectro objetivo para el periodo fundamental de la estructura, permitiendo así evaluar su respuesta dinámica en condiciones representativas de diseño.

En este caso, la normalización se llevó a cabo tomando como referencia el espectro de diseño definido en NCh2369Of.2023 (INN, 2023)

Procedimiento de normalización

El proceso de normalización se llevó a cabo en los siguientes pasos:

1. **Cálculo del valor de intensidad del registro:** Se obtiene el valor representativo de la demanda espectral del registro sísmico en un periodo de interés relevante para la estructura analizada.
2. **Determinación del factor de normalización:** Se calcula el factor de normalización como la razón entre el valor objetivo del espectro de diseño y el valor obtenido en el paso anterior.
3. **Ajuste del registro:** Cada registro se escala mediante el factor obtenido, ajustando su intensidad para que su respuesta espectral sea coherente con la demanda establecida en la normativa.
4. **Verificación de la condición de normalización:** Si el factor de normalización obtenido es menor a 1.3, se procede a aplicar directamente el factor. Sin embargo, si el factor es mayor, el registro debe ser multiplicado por un factor adicional de escala para mantener la representatividad de la demanda sísmica en niveles adecuados.

Este procedimiento no solo permite que los resultados del análisis sean representativos de las condiciones de diseño establecidas, sino que también garantiza que los registros sean comparables entre sí, eliminando posibles sesgos debido a diferencias en la intensidad original de cada sismo. De esta manera, se logra una evaluación más uniforme y confiable del desempeño estructural bajo distintos escenarios de carga sísmica.

Para obtener la demanda establecida según normativa, es necesario determinar el espectro de diseño para cada estanque según sus características estructurales, zona sísmica y tipo de suelo. En el capítulo 3, se describen estas características según NCh2369Of.2003 (INN, 2003), por lo tanto, es necesario ajustarlas para que sean consistentes según NCh2369Of.2023 (INN, 2023).

En la Tabla 5-9 se presentan las características de zona sísmica, tipo de suelo, importancia y de la estructura para definir el espectro de diseño para el estanque Cartagena, el cual es muestra en la Figura 5-19.

Tabla 5-9: Características de diseño estanque Cartagena según NCh2369Of.2023. Fuente:

Elaboración propia.

Zona sísmica	III
Tipo de suelo	D
I	1.2
ξ	0.03
R	3

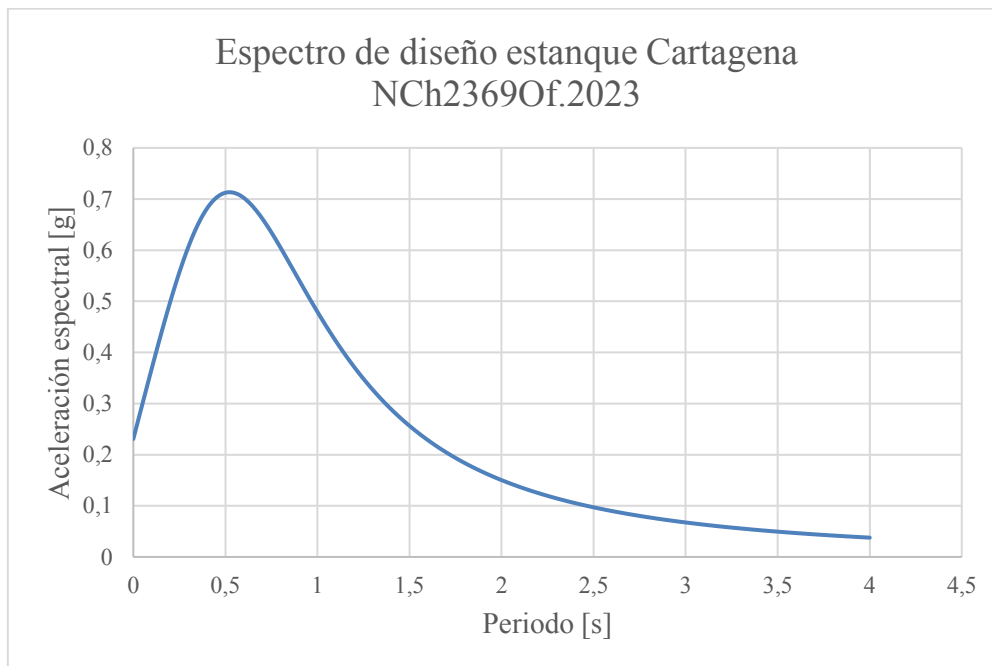


Figura 5-19: Espectro de diseño NCh2369Of.2023 estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera, en la Tabla 5-10 se presentan las características de zona sísmica, tipo de suelo, importancia y de la estructura para definir el espectro de diseño para el estanque Rancagua, el cual es muestra en la Figura 5-20.

Tabla 5-10: Características de diseño estanque Rancagua según NCh2369Of.2023. Fuente: Elaboración propia.

Zona sísmica	II
Tipo de suelo	C
I	1.2
ξ	0.03
R	3

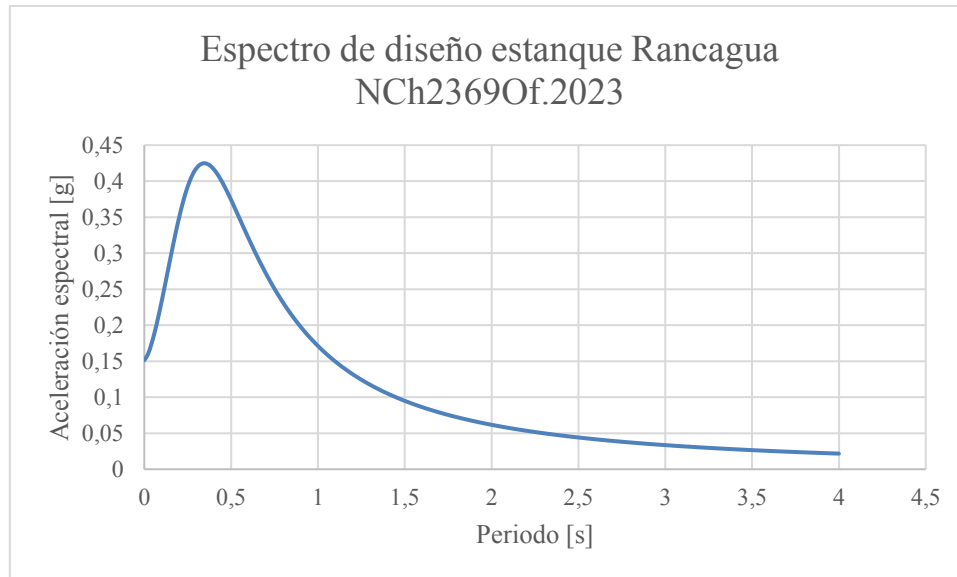


Figura 5-20: Espectro de diseño estanque Rancagua NCh2369Of.2023. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, la Tabla 5-11 y Tabla 5-12 muestran el resumen con el procedimiento de normalización, la Figura 5-21 y muestran Figura 5-23 los espectros de respuesta normalizados, mientras que la Figura 5-22 y Figura 5-24, muestran los registros normalizados, para estanque Cartagena y Rancagua respectivamente. Los gráficos para los demás registros se encuentran en anexos.

Tabla 5-11: Normalización de registros estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Aceleración espectral (T=0.35 s) [g]	Aceleración espectral NCh2369Of.2023 (T=0.35 s) [g]	FN
27F Viña Centro	0.61	0.65	1.05
27F Concepción	0.94	0.65	0.69
27F Constitución	1.90	0.65	0.34
27F UTFSM	0.49	0.65	1.33
85 Lolloo	1.70	0.65	0.38
85 Viña Centro	0.72	0.65	0.90
85 UTFSM	0.46	0.65	1.41

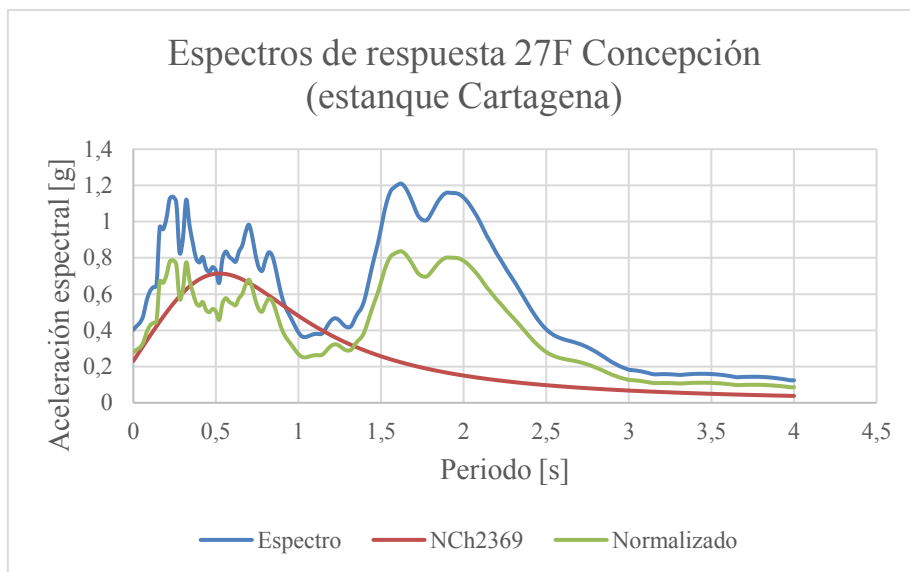


Figura 5-21: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

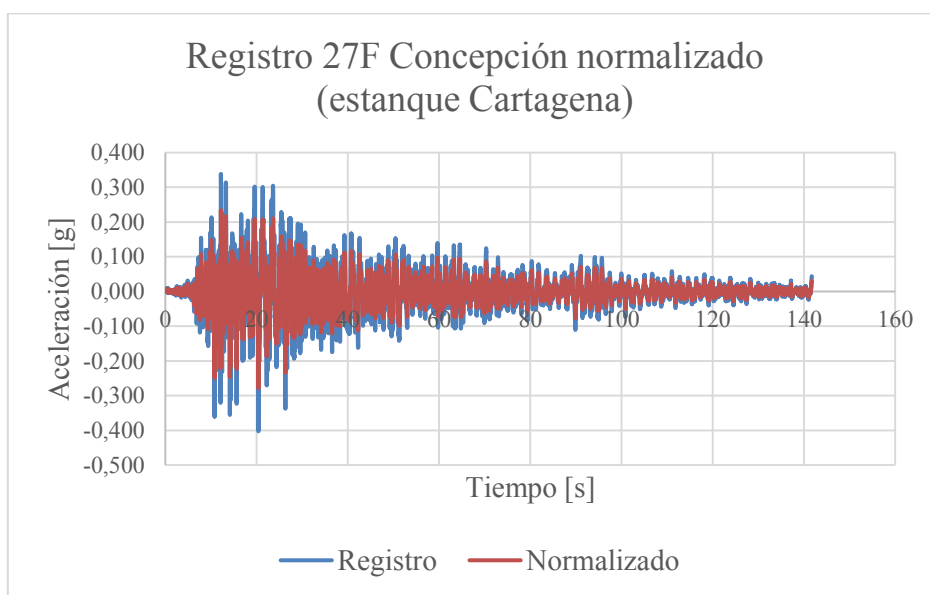


Figura 5-22: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-12: Normalización de registros estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Aceleración espectral (T=0.25 s) [g]	Aceleración espectral NCh2369Of.2023 (T=0.25 s) [g]	FN
27F Viña Centro	0.56	0.39	0.72
27F Concepción	1.12	0.39	0.35
27F Constitución	3.10	0.39	0.12

27F UTFSM	0.57	0.39	0.68
85 Llole	1.40	0.39	0.28
85 Viña Centro	0.45	0.39	0.85
85 UTFSM	0.53	0.39	0.75

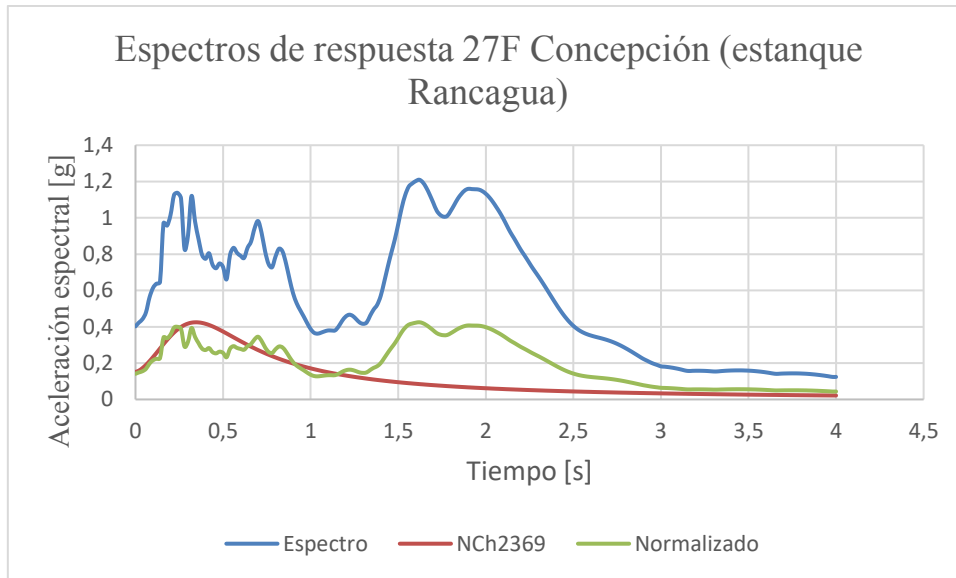


Figura 5-23: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

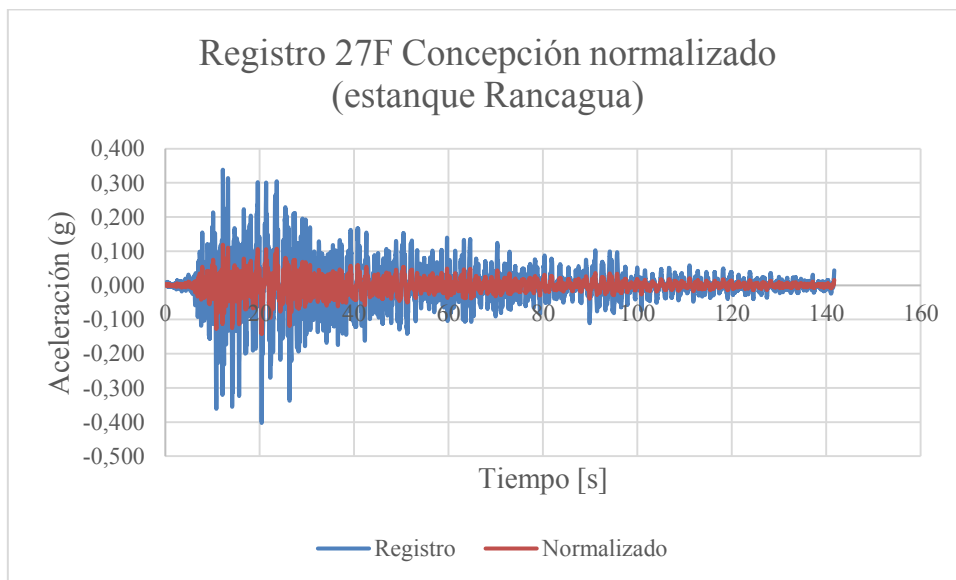


Figura 5-24: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2 Estanque Cartagena

5.4.2.1 27F Viña centro

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F Viña centro, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-13 y la Figura 5-25 respectivamente.

Tabla 5-13: Parámetros IDA registro 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.33	0.83	0.04	325	6345	0.00004
0.75	0.49	1.78	0.09	558	10851	0.00018
1	0.65	1.99	0.10	621	11516	0.00025
1.15	0.75	2.42	0.12	631	11092	0.00042
1.25	0.81	3.64	0.18	687	12701	0.00052
1.72	1.12	7.15	0.36	752	14230	0.001
2.19	1.42	10.66	0.53	817	15760	0.0013
3.13	2.03	17.67	0.88	947	18820	0.002
4.1	2.67	24.7	1.24	1077	21880	0.0028
4.53	2.96	28.21	1.41	1142	23409	0.003
5	3.25	31.73	1.59	1206	24939	0.0035
5.4	3.51	36.26	1.81	1379	28502	0.004

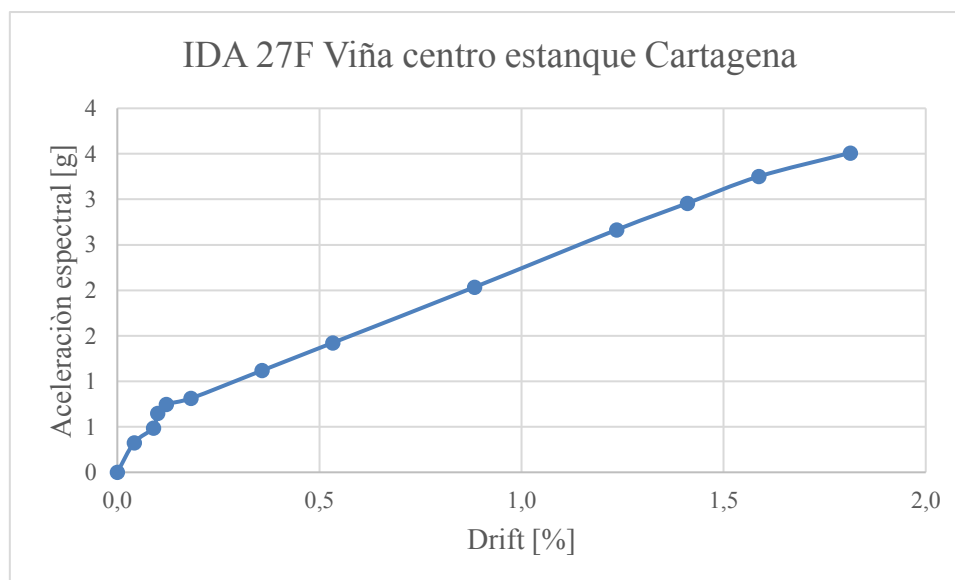


Figura 5-25: Gráfico IDA registro 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.2 27F Concepción

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F Concepción, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-14 y la Figura 5-26 respectivamente.

Tabla 5-14: Parámetros IDA registro 27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
0.75	0.34	1.14	0.06	403	7787	0.00009
1	0.65	1.85	0.09	484	10724	0.00021
1.5	0.98	2.99	0.15	522	10942	0.00038
1.63	1.06	3.34	0.17	564	11090	0.00045
1.75	1.14	3.69	0.18	605	11238	0.00052
2.18	1.41	8.56	0.43	777	14440	0.00076
2.6	1.69	13.43	0.67	948	17642	0.001
3.9	2.54	19.98	0.99	1090	20278	0.003
4.3	2.80	22.18	1.1	1112	20738	0.004

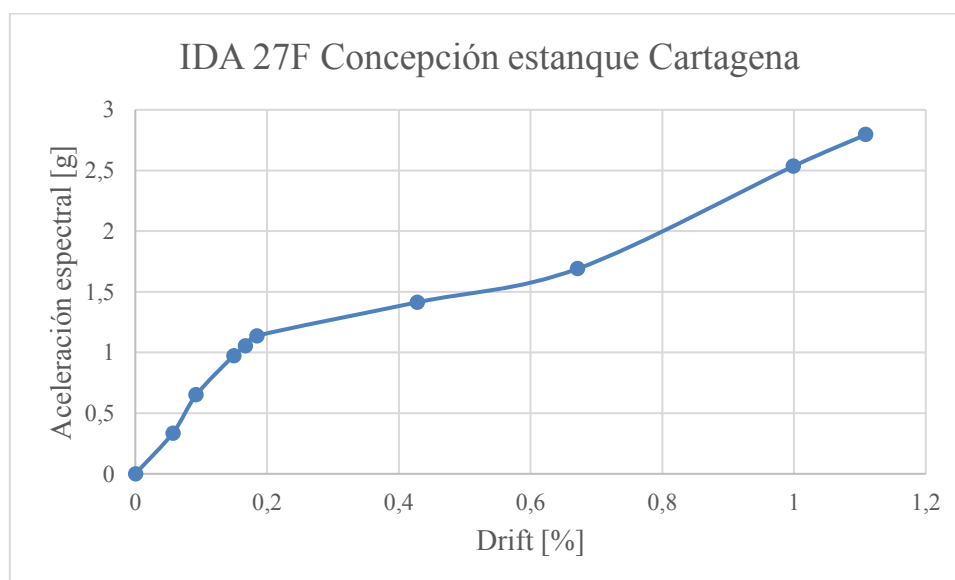


Figura 5-26: Gráfico IDA registro27F Concepción para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.3 27F Constitución

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F Constitución, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-15 y la Figura 5-27 respectivamente.

Tabla 5-15: Parámetros IDA registro 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
0.75	0.49	1.2	0.06	431	9082	0.00008
1	0.65	1.43	0.07	474	9485	0.0002

1.25	0.81	2.33	0.12	506	10414	0.00027
1.5	0.98	3.17	0.16	596	11286	0.0004
1.75	1.14	3.82	0.19	674	12044	0.00048
2.88	1.89	10.74	0.54	702	12465	0.001
4	2.60	14.91	0.75	884	17312	0.0014
5.5	3.58	23.63	1.18	1126	22990	0.0022
5.7	3.71	24.46	1.22	1165	23794	0.003
5.9	3.84	25.28	1.26	1205	24599	0.004

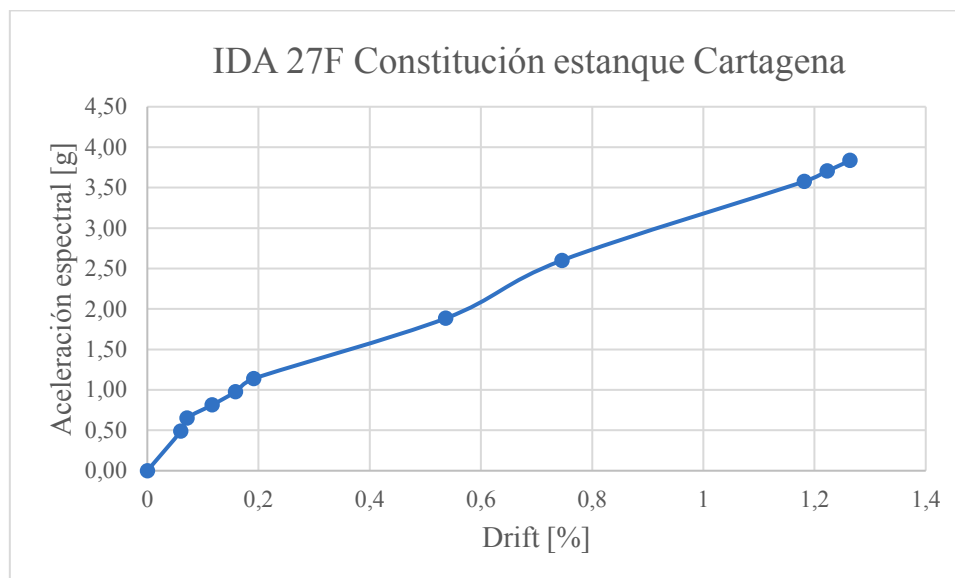


Figura 5-27: Gráfico IDA registro 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.4 27F UTFSM

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F UTFSM, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-16 y la Figura 5-28 respectivamente.

Tabla 5-16: Parámetros IDA registro 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón [-]
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.33	1.02	0.05	308	7761	0.00005
1	0.65	2.03	0.10	452	8913	0.00017
1.25	0.81	2.51	0.13	530	10360	0.00022
1.5	0.98	2.94	0.15	594	11465	0.00025
2	1.30	3.43	0.17	698	13152	0.00029
2.5	1.63	3.88	0.19	831	14719	0.00042
2.75	1.79	4.51	0.23	913	13241	0.00048
3	1.95	5.16	0.26	970	16248	0.00052
4.75	3.09	7.03	0.35	1109	19126	0.001

9	5.85	10.27	0.51	1248	22003	0.0018
11	7.15	12.81	0.64	1400	24335	0.003
11.5	7.48	13.41	0.67	1415	24212	0.004

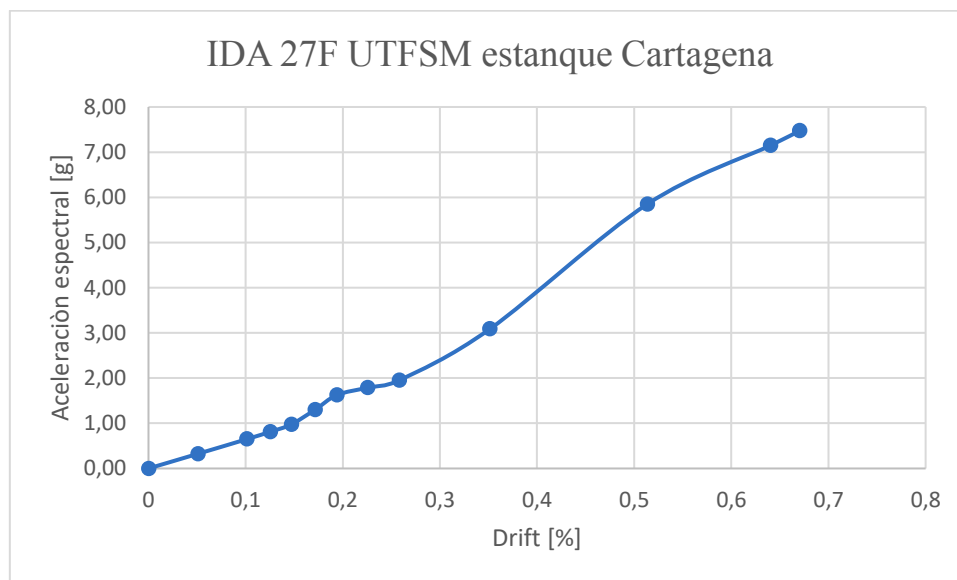


Figura 5-28: Gráfico IDA registro 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.5 85 Llolleo

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 85 Llolleo, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-17 y la Figura 5-29 respectivamente.

Tabla 5-17: Parámetros IDA registro 85 Llolleo para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
0.75	0.49	1.14	0.06	414	8471	0.00006
1	0.65	1.54	0.08	492	10203	0.00011
1.5	0.98	1.81	0.09	544	11108	0.00025
2	1.30	2.44	0.12	596	11385	0.00031
2.5	1.63	2.89	0.14	632	11147	0.00035
3	1.95	3.14	0.16	665	12405	0.00040
3.5	2.28	3.73	0.19	698	14504	0.00042
4	2.60	4.49	0.22	736	15727	0.00048
4.25	2.76	4.96	0.25	772	16470	0.00052
5.5	3.58	6.33	0.32	846	17620	0.001
6.6	4.29	8.49	0.42	977	20823	0.0013
9	5.85	14.15	0.71	1048	22461	0.0015
10.5	6.83	17.15	0.86	1105	23627	0.0016
12	7.80	21.67	1.08	1185	24713	0.0018

13.5	8.78	26.47	1.32	1285	25823	0.0021
15	9.75	31.3	1.57	1416	26809	0.003
15.8	10.27	33.18	1.66	1501	28418	0.004

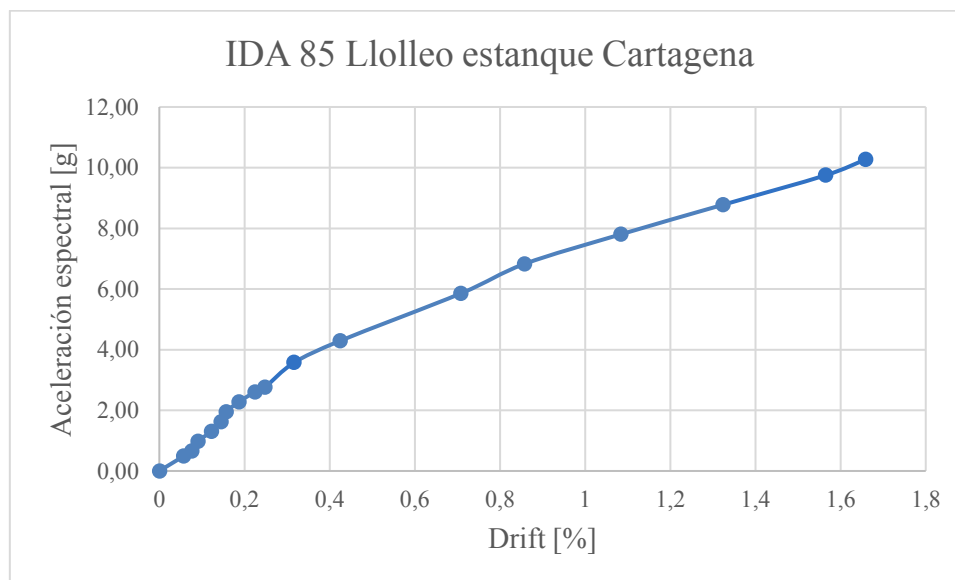


Figura 5-29: Gráfico IDA registro 85 Llolleo para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.6 85 Viña centro

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 85 Viña centro, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-18 y la Figura 5-30 respectivamente.

Tabla 5-18: Parámetros IDA registro 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
0.75	0.49	1.73	0.09	477	9971	0.00022
0.85	0.55	2.24	0.11	537	10664	0.00027
1	0.65	2.83	0.14	619	12417	0.00035
1.25	0.81	3.43	0.17	693	13818	0.00040
1.5	0.98	3.8	0.19	740	14596	0.00052
5	3.25	21.31	1.07	1396	21633	0.001
6.5	4.23	35.16	1.76	1644	23340	0.0015
9	5.85	54.6	2.73	2080	26175	0.002
9.4	6.11	56.9	2.85	2101	26950	0.003
10	6.50	59.5	2.98	2191	27730	0.004

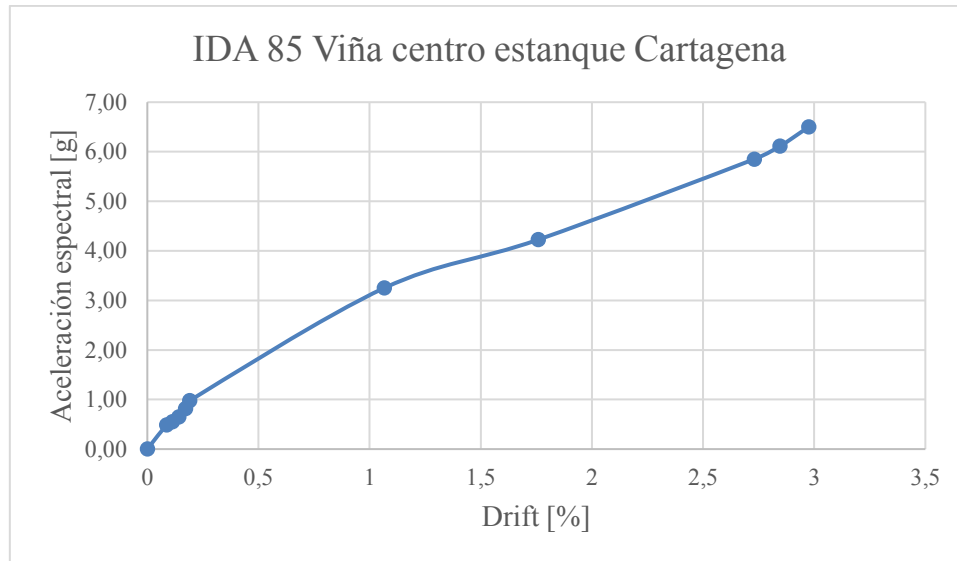


Figura 5-30: Gráfico IDA registro 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.4.2.7 85 UTFSM

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 85 UTFSM, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-19 y la Figura 5-31 respectivamente.

Tabla 5-19: Parámetros IDA registro 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.35 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
0.75	0.49	1.38	0.07	469	9313	0.00014
1	0.65	1.76	0.09	534	10689	0.00023
1.5	0.98	2.36	0.12	607	12158	0.00045
1.75	1.14	3.66	0.18	681	13815	0.00067
2.19	1.42	5.33	0.27	699	14483	0.0009
2.63	1.71	7.00	0.35	717	15151	0.0010
3.06	1.99	8.67	0.43	735	15819	0.0012
3.50	2.28	10.34	0.52	753	16487	0.0014
5.50	3.58	16.11	0.81	1079	21037	0.0017
7.00	4.55	19.15	0.96	1179	22187	0.0021
7.70	5.01	22.24	1.11	1217	22716	0.0022
8.30	5.40	24.48	1.22	1250	23211	0.0022
8.5	5.53	25.10	1.26	1281	23791	0.003
8.70	5.66	25.7	1.29	1313	24372	0.004

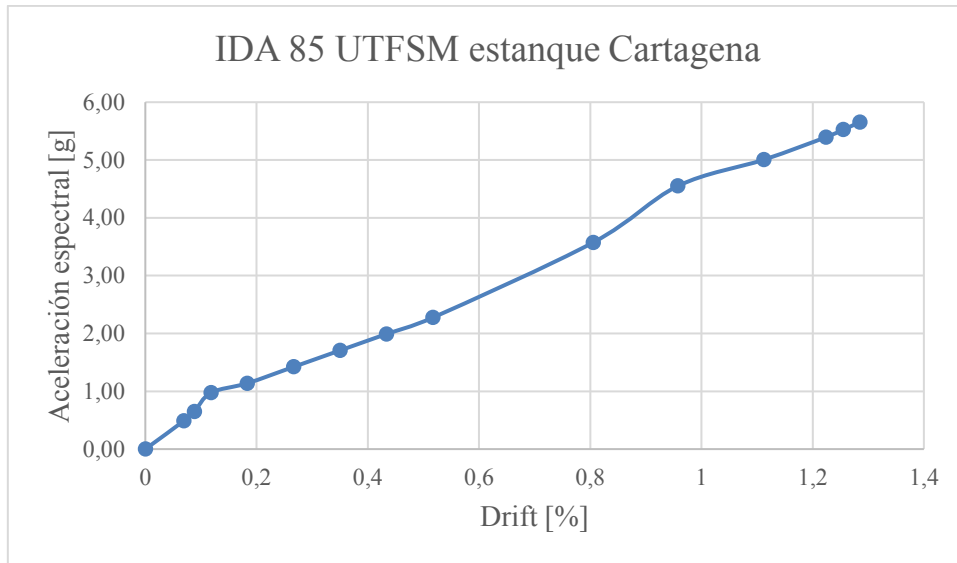


Figura 5-31: Gráfico IDA registro 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra un gráfico resumen y comparativo de todas las curvas IDA para el estanque Cartagena registradas en la Figura 5-32.

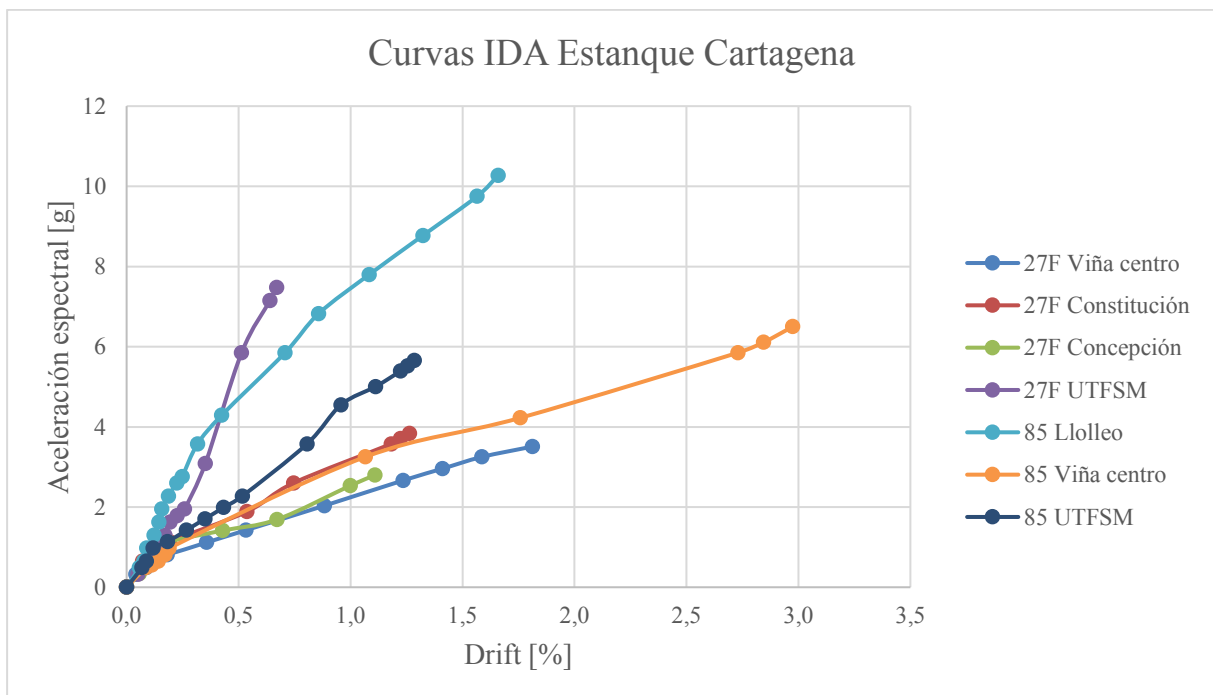


Figura 5-32: Resumen comparativo de curvas IDA estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 Estanque Rancagua

5.4.3.1 27F Viña centro

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F Viña centro, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-20 y la Figura 5-33 respectivamente.

Tabla 5-20: Parámetros IDA registro 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
1	0.39	0.59	0.03	1181	29482	0.000046
1.5	0.59	0.82	0.04	1547	38742	0.000078
2	0.78	1.03	0.05	1768	41414	0.00023
2.5	0.98	1.69	0.08	2133	49154	0.00047
2.62	1.02	1.87	0.09	2293	53003	0.00052
3.8	1.48	4.12	0.21	4360	101112	0.001
5	1.95	4.48	0.22	4739	109904	0.0015
5.5	2.15	5.78	0.29	4979	115131	0.003
5.7	2.22	6.07	0.30	5228	120887	0.004

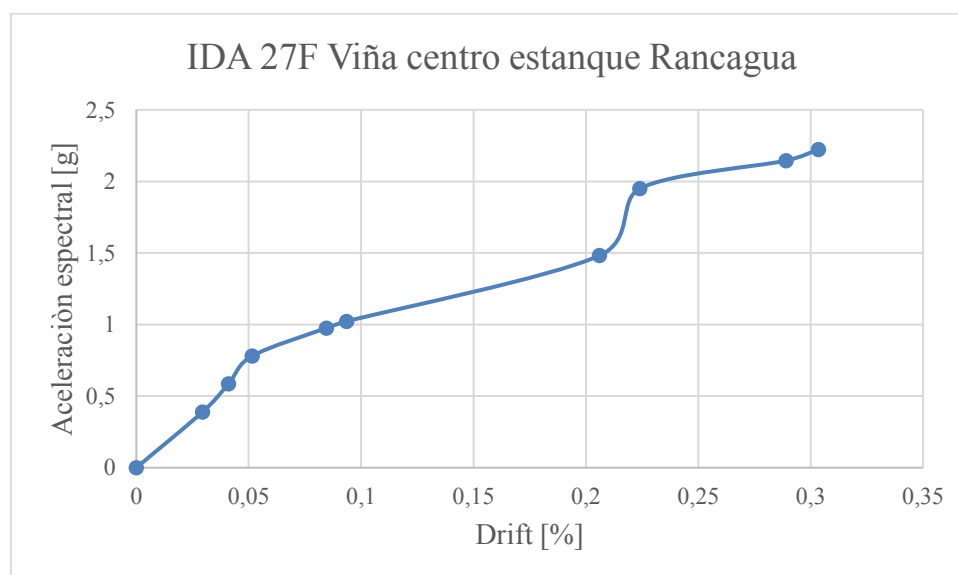


Figura 5-33: Gráfico IDA registro 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.2 27F Concepción

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F Concepción, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-21 y la Figura 5-34 respectivamente.

Tabla 5-21: Parámetros IDA registro 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
1	0.39	1.09	0.05	2137	52325	0.00013
1.25	0.49	1.36	0.07	2403	61054	0.00019
1.5	0.59	1.48	0.07	2543	64815	0.00027

2	0.78	1.84	0.09	2748	62677	0.00044
2.25	0.88	2.05	0.10	2996	67914	0.00049
2.3	0.90	2.12	0.11	3100	70198	0.00052
3.6	1.40	3.96	0.20	3907	98446	0.001
5	1.95	6.37	0.32	4770	115251	0.0023
5.3	2.07	7.55	0.38	4772	118386	0.003
5.5	2.15	8.94	0.45	4778	122475	0.004

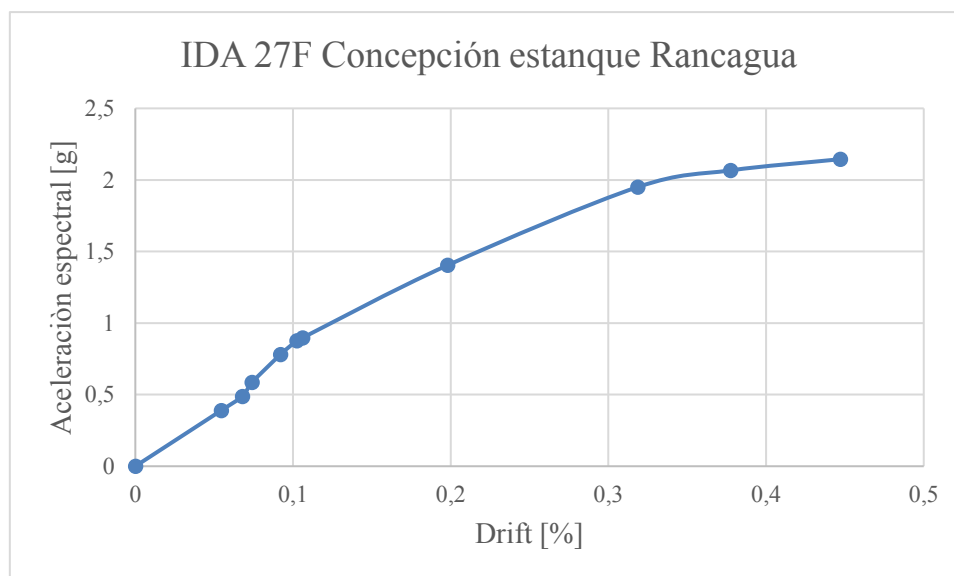


Figura 5-34: Gráfico IDA registro 27F Concepción para estanque Rancagua. Fuente:
Elaboración propia.

5.4.3.3 27F Constitución

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F Constitución, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-22 y la Figura 5-35 respectivamente.

Tabla 5-22: Parámetros IDA registro 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente:
Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.20	0.67	0.03	1360	33318	0.000014
0.75	0.29	0.96	0.05	1908	46809	0.000052
1	0.39	1.07	0.05	2099	51391	0.00010
3	1.17	1.08	0.05	2099	51366	0.00022
3.5	1.37	1.3	0.07	2095	53700	0.00026
5	1.95	1.57	0.08	2422	57191	0.00039
6.5	2.54	1.85	0.09	2910	68436	0.00052
10	3.90	3.34	0.17	3557	82585	0.001
13	5.07	5.39	0.27	4315	98393	0.0015
14.5	5.66	6.43	0.32	4716	107311	0.002

14.9	5.81	6.76	0.34	4797	111646	0.003
15.4	6.01	7.79	0.39	4810	115735	0.004

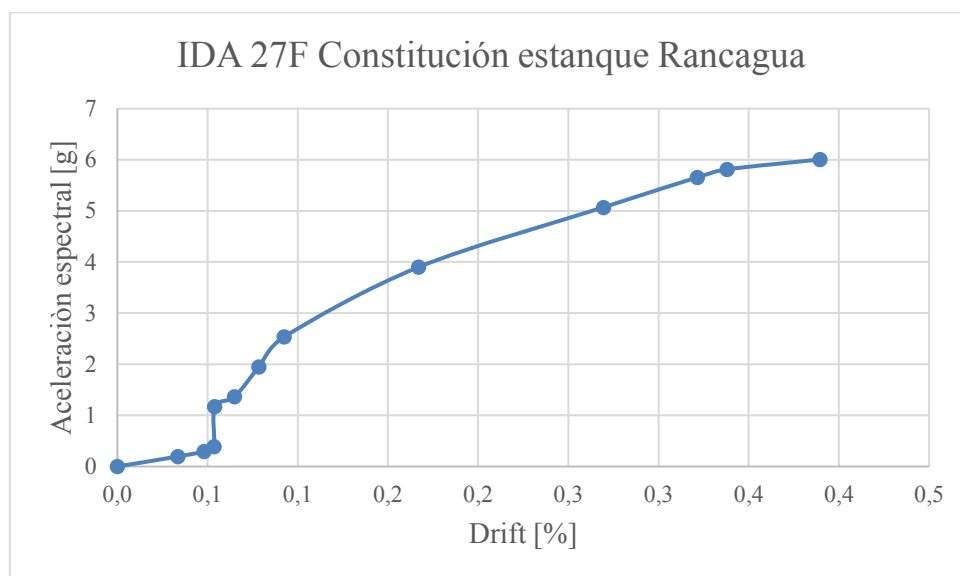


Figura 5-35: Gráfico IDA registro 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.4 27F UTFSM

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 27F UTFSM, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-23 y la Figura 5-36 respectivamente.

Tabla 5-23: Parámetros IDA registro 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
1	0.39	0.73	0.04	1446	36275	0.000017
1.5	0.59	1.07	0.05	1894	49436	0.000086
1.75	0.68	1.2	0.06	2129	53273	0.00012
2	0.78	1.28	0.06	2409	56145	0.00018
2.5	0.98	1.57	0.08	2896	64138	0.0003
3	1.17	2.01	0.10	3290	72165	0.00044
3.25	1.27	2.25	0.11	3434	75221	0.00048
4.2	1.64	3.36	0.17	3946	86254	0.001
6	2.34	4.27	0.21	4522	120942	0.0018
7	2.73	4.89	0.24	4969	136221	0.0024
8	3.12	5.44	0.27	5416	149061	0.003
9	3.51	5.94	0.30	5635	154937	0.004

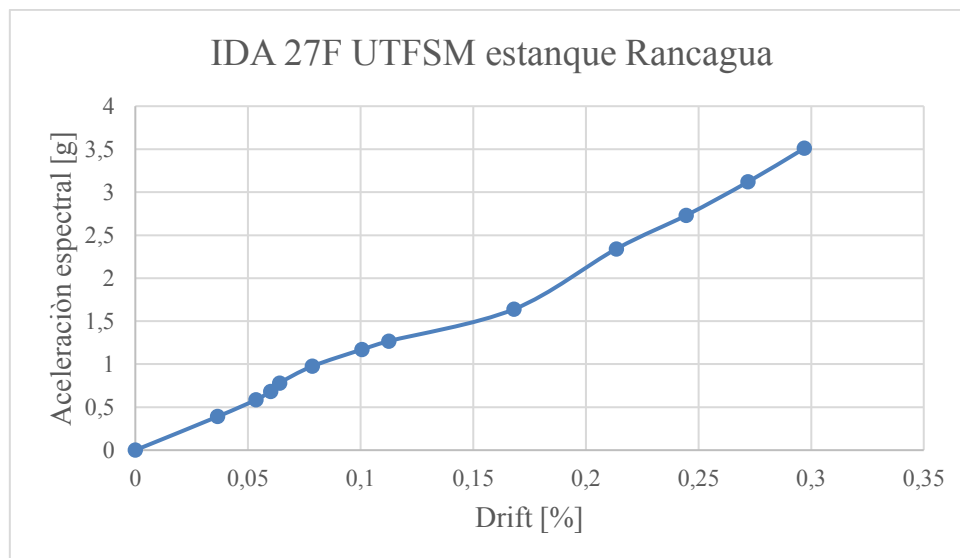


Figura 5-36: Gráfico IDA registro 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.5 85 Llolleo

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 85 UTFSM, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-24 y la Figura 5-37 respectivamente.

Tabla 5-24: Parámetros IDA registro 85 Llolleo para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
1	0.39	1.16	0.06	2342	56482	0.00014
1.5	0.59	1.23	0.06	2437	58398	0.00020
2	0.78	1.41	0.07	2719	64931	0.00029
2.5	0.98	1.65	0.08	3034	72351	0.00039
3	1.17	1.94	0.10	3421	81619	0.00049
3.35	1.31	2.12	0.11	3612	86217	0.00056
5.5	2.15	3.33	0.17	4856	114152	0.001
6.5	2.54	4.07	0.20	5520	129630	0.0014
7	2.73	4.67	0.23	5858	137491	0.0016
7.2	2.81	4.89	0.24	5974	130552	0.003
7.4	2.89	5.02	0.25	6090	142646	0.004

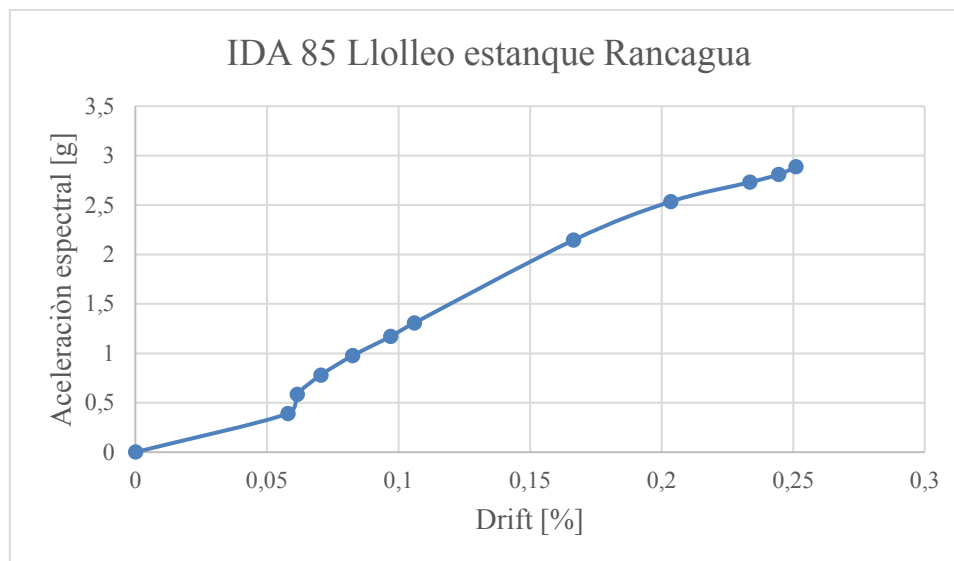


Figura 5-37: Gráfico IDA registro 85 Llolleo para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.6 85 Viña centro

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 85 Viña centro, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-25 y la Figura 5-38 respectivamente.

Tabla 5-25: Parámetros IDA registro 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
1	0.39	0.79	0.04	1575	38630	0.000044
1.5	0.59	1.17	0.06	2202	52196	0.00012
1.75	0.68	1.33	0.07	2407	57042	0.00014
2	0.78	1.39	0.07	2504	59051	0.00020
2.5	0.98	1.83	0.09	2873	69570	0.00036
3.8	1.48	3.56	0.18	3045	77386	0.001
4.5	1.76	5.66	0.28	3973	94808	0.0016
5.5	2.15	7.49	0.37	5182	119079	0.019
6	2.34	8.53	0.43	5560	127117	0.0022
6.2	2.42	8.77	0.44	5623	129045	0.003
6.4	2.50	9.02	0.45	5712	131267	0.004

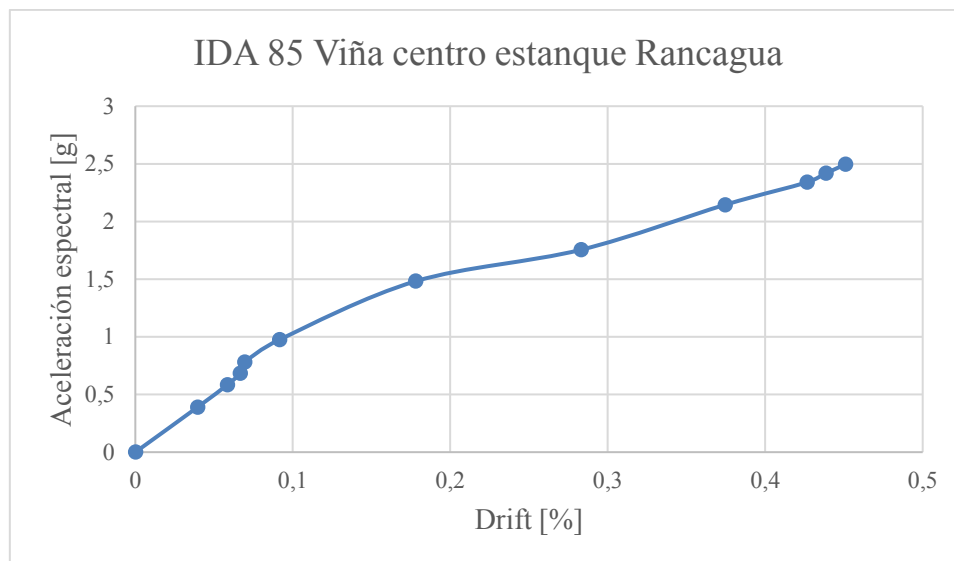


Figura 5-38: Gráfico IDA registro 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

5.4.3.7 85 UTFSM

Se presentan los resultados del análisis incremental para el registro 85 UTFSM, junto con el gráfico IDA correspondiente, en la Tabla 5-26 y la Figura 5-39 respectivamente.

Tabla 5-26: Parámetros IDA registro 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Ac. espectral (T=0.25 s) [g]	Desp. de techo [cm]	Drift [%]	Corte basal [T]	Momento basal [T-m]	Def. hormigón
0	0	0	0	0	0	0
1	0.39	0.75	0.04	1474	37032	0.000017
1.5	0.57	1.15	0.06	2011	49587	0.00011
2	0.73	1.57	0.08	2364	58327	0.00023
2.5	0.88	1.77	0.09	2652	65306	0.00027
3	1.04	1.89	0.09	2776	68225	0.00028
3.5	1.28	2.05	0.10	2898	71256	0.00036
3.75	1.33	2.1	0.11	2913	71500	0.0004
5.5	2.14	2.91	0.15	3366	81090	0.0008
7	2.50	3.54	0.18	3948	95579	0.001
10	3.76	4.8	0.24	4817	116151	0.0013
13	4.74	7.05	0.35	6165	151157	0.002
13.4	4.79	7.71	0.39	6296	153754	0.003
13.7	4.84	8.06	0.40	6398	155638	0.004

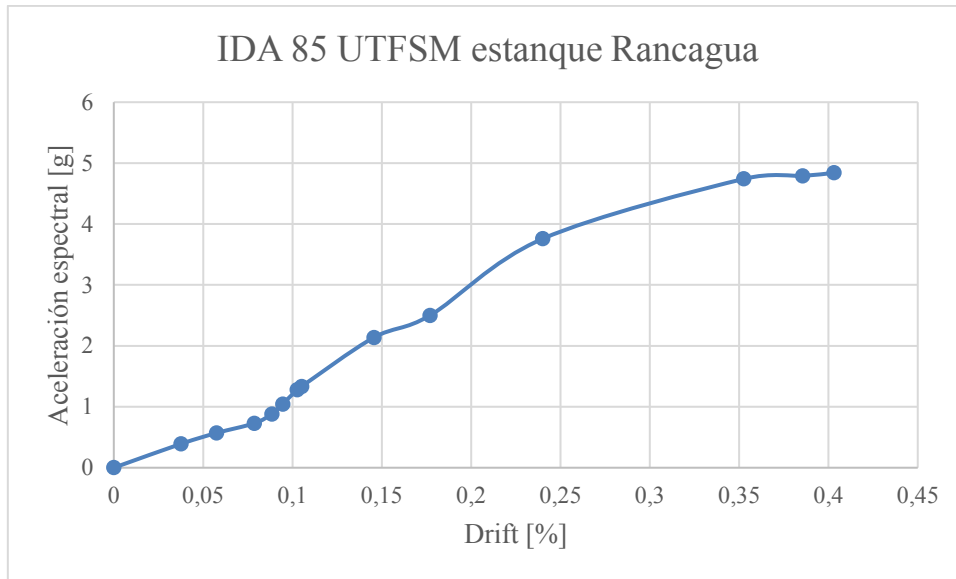


Figura 5-39: Gráfico IDA registro 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra un gráfico resumen y comparativo de todas las curvas IDA para el estanque Rancagua registradas en la Figura 5-40.

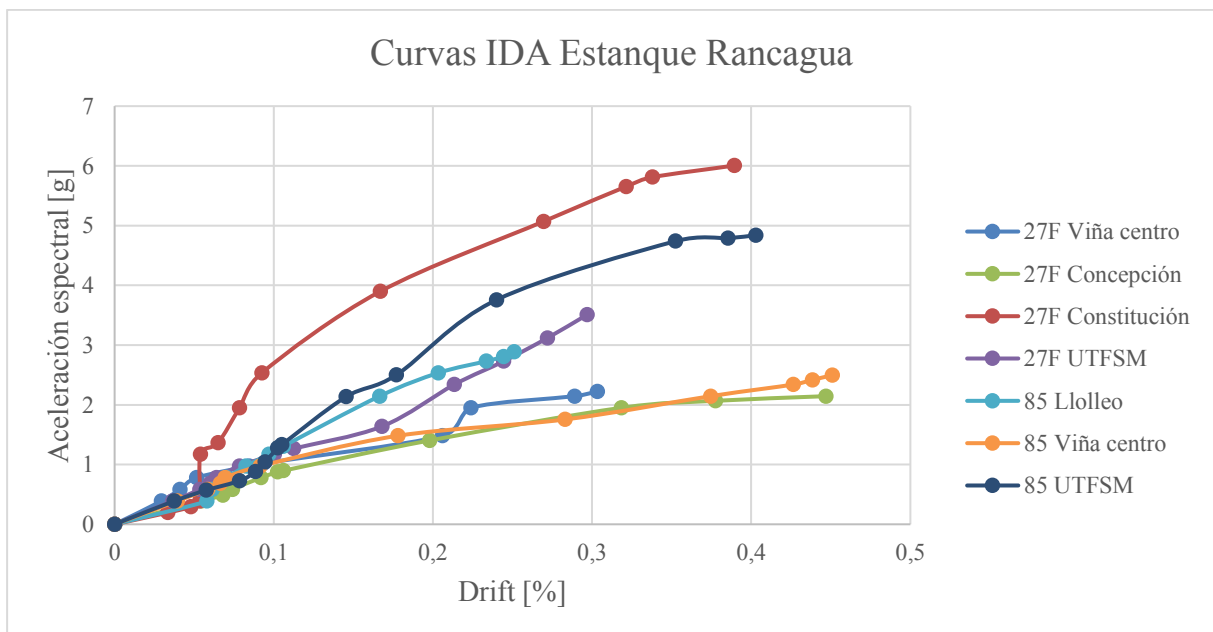


Figura 5-40: Resumen comparativo de curvas IDA estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.



6 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO SÍSMICO

En este capítulo se presenta los resultados de la evaluación del desempeño sísmico de los estanques Cartagena y Rancagua, de acuerdo a la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009). Para cada caso, a partir de los resultados del análisis estático no lineal (pushover), se determina los parámetros de sobre resistencia y ductilidad del sistema. En complemento, utilizando los resultados del análisis dinámico incremental (IDA), se calcula el margen de colapso, o CMR por su sigla en inglés (Collapse Margin Ratio) y se realiza la evaluación de desempeño sísmico individual para cada estanque, y grupal para el conjunto de arquetipos. La evaluación del desempeño sísmico de los estanques se realiza respecto a las demandas establecidas en NCh2369Of.2023 (INN, 2023), dado que corresponde a la normativa vigente al momento de este estudio. Si bien los estanques analizados fueron diseñados bajo los lineamientos de la versión anterior, NCh2369Of.2003 (INN, 2003), se opta por aplicar la edición más reciente para asegurar que la evaluación esté alineada con los estándares actuales de seguridad sísmica y desempeño estructural.

6.1 Evaluación individual

En esta sección se presenta la evaluación individual del desempeño sísmico para cada uno de los estanques analizados. Con base en el análisis IDA, se calcula el margen de colapso (CMR) para cada estructura, el cual es ajustado según la ductilidad obtenida para obtener el margen de colapso ajustado (ACMR). Finalmente, este valor se compara con el ACMR mínimo aceptable, determinado en función de la incertidumbre total del sistema, con el fin de verificar si el arquetipo cumple con los requisitos de desempeño establecidos.

6.1.1 Margen de colapso (CMR)

Es la relación entre aceleración espectral mediana al colapso S_{CT} y el sismo máximo considerado S_{MT}

$$CMR = \frac{S_{CT}}{S_{MT}}$$

Ecuación 6-1

Donde S_{CT} se obtiene al determinar la mediana de las aceleraciones espectrales de colapso para cada registro analizado, mientras que S_{MT} es la aceleración de diseño establecida por NCh 2369Of.2023 (INN, 2023).

En la Tabla 6-1 se observa la aceleración espectral para cada registro escalado a nivel de colapso para el estanque Cartagena, destacando el término correspondiente a la mediana, que finalmente es S_{CT} y en la Tabla 6-2 se muestra el cálculo de CMR.

Tabla 6-1: Aceleración espectral de cada registro y mediana para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Sa [g]
27F Viña centro	3.51
27F Concepción	2.80
27F Constitución	3.84
27F UTFSM	7.48
85 Lolleo	10.27
85 Viña centro	6.50
85 UTFSM	5.66

Tabla 6-2: Cálculo de margen de colapso CMR para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

S_{CT} [g]	5.66
S_{MT} [g]	0.65
CMR	8.71

Además, se incluye resumen comparativo de las curvas IDA, señalando S_{CT} y S_{MT} en la Figura 6-1

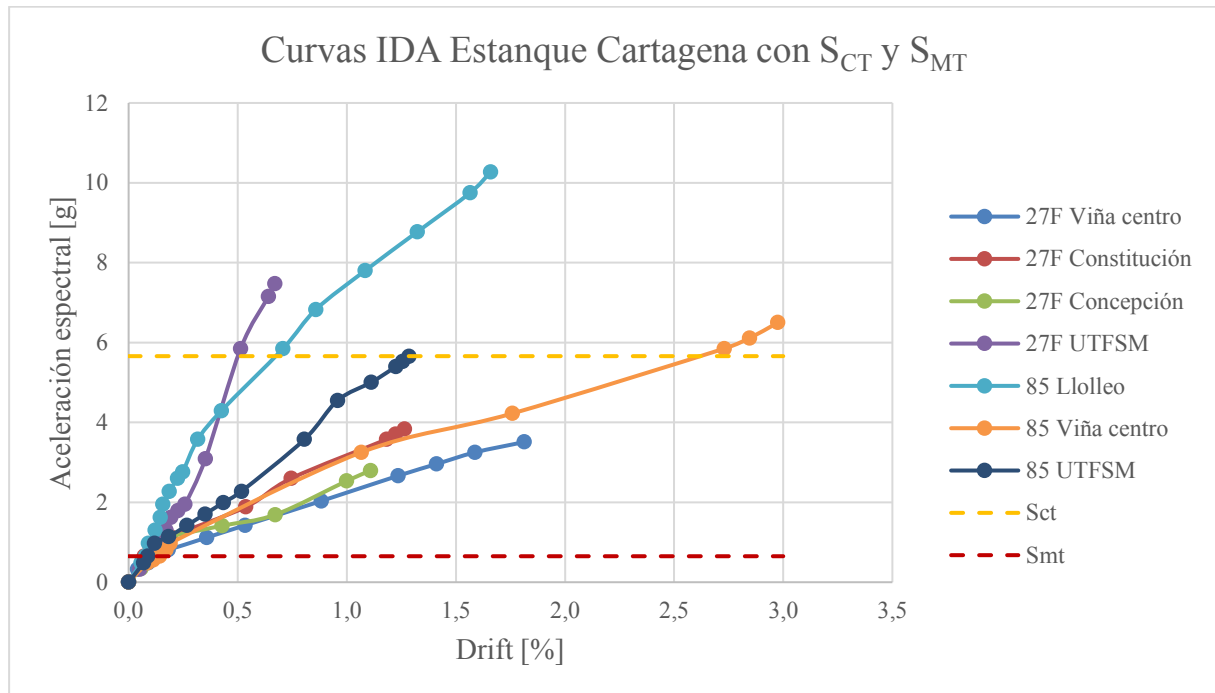


Figura 6-1: Resumen comparativo curvas IDA con S_{CT} y S_{MT} para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6-3 se observan la aceleración espectral al colapso para cada registro escalado a nivel de colapso para el estanque Rancagua, destacando el término correspondiente a la mediana, que finalmente es S_{CT} y en la Tabla 6-4 se muestra el cálculo de CMR.

Tabla 6-3: Aceleración espectral de cada registro y mediana para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Sa [g]
27F Viña centro	2.22
27F Concepción	2.15
27F Constitución	6.01
27F UTFSM	3.51
85 Lollole	2.89
85 Viña centro	2.50
85 UTFSM	4.84

Tabla 6-4: Cálculo de margen de colapso CMR para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

S_{CT} [g]	2.89
S_{MT} [g]	0.39
CMR	7.41

Además, se incluye resumen comparativo de las curvas IDA, señalando S_{CT} y S_{MT} en la Figura 6-2.

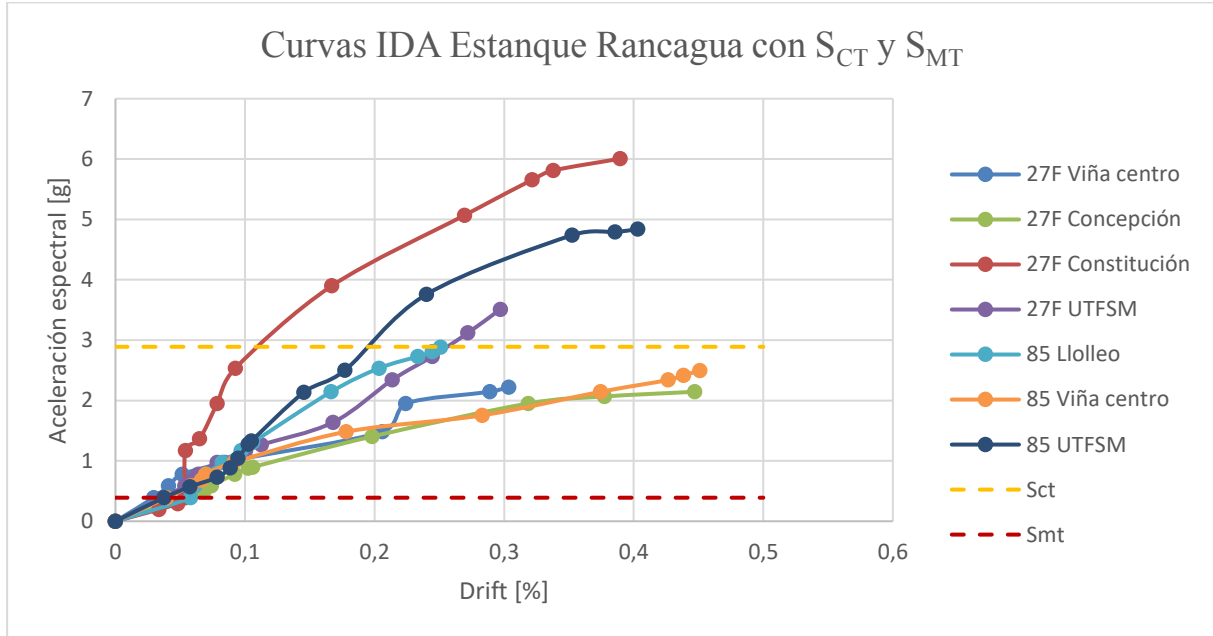


Figura 6-2: Resumen comparativo curvas IDA con S_{CT} y S_{MT} para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Margen de colapso ajustado (ACMR)

Se define el factor de forma espectral SSF para ajustar el margen de colapso. Corresponde a un factor dependiente de la sismicidad de la zona de diseño del periodo de vibración del modo principal de la estructura y la ductilidad. El factor de forma espectral se encuentra señalado en la tabla 7-1 b de la sección 7.2.2 del documento FEMA P695 (FEMA, 2009), la que se reproduce en la Tabla 6-5

Tabla 6-5: Factor de forma espectral. Fuente: FEMA P695.

Periodo T [s]	Ductilidad μ_T							
	1	1.1	1.5	2	3	4	6	>8
<0.5	1	1.05	1.1	1.13	1.18	1.22	1.28	1.33
0.6	1	1.05	1.11	1.14	1.2	1.14	1.3	1.36
0.7	1	1.06	1.11	1.15	1.21	1.25	1.32	1.38
0.8	1	1.06	1.12	1.16	1.22	1.27	1.35	1.41
0.9	1	1.06	1.13	1.17	1.24	1.29	1.37	1.44



Se calcula el ACMR multiplicando el CMR calculado previamente por el SSF obtenido de la tabla.

$$ACMR = SSF * CMR$$

Ecuación 6-2

En la Tabla 6-6 se muestran los cálculos de ACMR para estanque Cartagena.

Tabla 6-6: Cálculo de ACMR estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

T [s]	0.35
μ_T	11.39
SSF	1.33
CMR	8.71
ACMR	11.58

En la Tabla 6-7 se muestran los cálculos de ACMR para estanque Rancagua.

Tabla 6-7: Cálculo de ACMR estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

T [s]	0.25
μ_T	9.62
SSF	1.33
CMR	7.41
ACMR	9.86

6.1.3 Incertidumbre del sistema (β)

En esta sección se estima la incertidumbre total del sistema estructural, considerando cuatro fuentes principales: la incertidumbre de registro, asociada a la variabilidad en la respuesta frente a diferentes registros sísmicos; la incertidumbre en los requerimientos de diseño, relacionada con la solidez y confiabilidad de las normas aplicadas; la incertidumbre en los datos de prueba, que refleja el nivel de respaldo experimental del comportamiento estructural; y la incertidumbre del modelo, derivada de las simplificaciones y aproximaciones incorporadas en la modelación numérica. Estas componentes se combinan para obtener el valor de la incertidumbre total, la cual se requiere para determinar el ACMR mínimo aceptable según FEMA P695 (FEMA, 2009).

Incertidumbre de registro (β_{RTR}): Se identifica debido a la variabilidad en la respuesta de cada estructura ante distintos eventos sísmicos. Su estimación depende de la ductilidad del sistema.

$$\beta_{RTR} = 0.1 + 0.1\mu_T \leq 0.4$$

Ecuación 6-3

Incertidumbre en los requerimientos de diseño (β_{DR}): Se relaciona con la completitud y robustez de los requerimientos de diseño, y las consideraciones ante modos de falla no anticipados. Su estimación se hace de acuerdo con la tabla 3-1 de la sección 3.4 del documento FEMA P695 (FEMA, 2009), la cual se muestra en la Tabla 6-8.

Tabla 6-8: Tabla 3-1 FEMA P695: Incertidumbre en los requerimientos de diseño. Fuente: FEMA P695

Completeness and Robustness	Confidence in Basis of Design Requirements		
	High	Medium	Low
High. Extensive safeguards against unanticipated failure modes. All important design and quality assurance issues are addressed.	(A) Superior $\beta_{DR} = 0.10$	(B) Good $\beta_{DR} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{DR} = 0.35$
Medium. Reasonable safeguards against unanticipated failure modes. Most of the important design and quality assurance issues are addressed.	(B) Good $\beta_{DR} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{DR} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{DR} = 0.50$
Low. Questionable safeguards against unanticipated failure modes. Many important design and quality assurance issues are not addressed.	(C) Fair $\beta_{DR} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{DR} = 0.50$	--

Incertidumbre en los datos de prueba (β_{TD}): Evalúa el grado de respaldo experimental disponible sobre el comportamiento del sistema, considerando cuán completos y confiables son los ensayos utilizados para validar materiales, componentes y mecanismos de colapso. Su estimación se hace de acuerdo con la tabla 3-2 de la sección 3.6 del documento FEMA P695 (FEMA, 2009), la cual se muestra en la Tabla 6-9.

Tabla 6-9: Tabla 3-2 FEMA P695: Incertidumbre en los datos de prueba. Fuente: FEMA P695

Completeness and Robustness	Confidence in Test Results		
	High	Medium	Low
High. Material, component, connection, assembly, and system behavior well understood and accounted for. All, or nearly all, important testing issues addressed.	(A) Superior $\beta_{TD} = 0.10$	(B) Good $\beta_{TD} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{TD} = 0.35$
Medium. Material, component, connection, assembly, and system behavior generally understood and accounted for. Most important testing issues addressed.	(B) Good $\beta_{TD} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{TD} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{TD} = 0.50$
Low. Material, component, connection, assembly, and system behavior fairly understood and accounted for. Several important testing issues not addressed.	(C) Fair $\beta_{TD} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{TD} = 0.50$	--

Incertidumbre en el modelo (β_{MDL}): Establece la calidad de los modelos para capturar la respuesta estructural completa. Su estimación se hace de acuerdo con la tabla 5-3 de la sección 5.7 del documento FEMA P695 (FEMA, 2009), la cual es muestra en la Tabla 6-10.

Tabla 6-10: Tabla 5-3 FEMA P695: Incertidumbre en los modelos. Fuente: FEMA P695

Representation of Collapse Characteristics	Accuracy and Robustness of Models		
	High	Medium	Low
High. Index models capture the full range of the archetype design space and structural behavioral effects that contribute to collapse.	(A) Superior $\beta_{MDL} = 0.10$	(B) Good $\beta_{MDL} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{MDL} = 0.35$
Medium. Index models are generally comprehensive and representative of the design space and behavioral effects that contribute to collapse.	(B) Good $\beta_{MDL} = 0.20$	(C) Fair $\beta_{MDL} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{MDL} = 0.50$
Low. Significant aspects of the design space and/or collapse behavior are not captured in the index models.	(C) Fair $\beta_{MDL} = 0.35$	(D) Poor $\beta_{MDL} = 0.50$	--

Incertidumbre total del sistema (β_{TOT}): Se define como la combinación SRSS de las fuentes de incertidumbre definidas.

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{MDL}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{DR}^2}$$

Ecuación 6-4

En la Tabla 6-11 se muestra la estimación de cada fuente de incertidumbre y el cálculo de la incertidumbre total para estanque Cartagena.

Tabla 6-11: Estimación de incertidumbre y cálculo de incertidumbre total estanque Cartagena.

Fuente: Elaboración propia.

β_{RTR}	0.4
β_{DR}	0.35
β_{TD}	0.35
β_{MDL}	0.35
β_{TOT}	0.726

En la Tabla 6-12 se muestra la estimación de cada fuente de incertidumbre y el cálculo de la incertidumbre total para estanque Rancagua.

Tabla 6-12: Estimación de incertidumbre y cálculo de incertidumbre total estanque Rancagua.

Fuente: Elaboración propia.

β_{RTR}	0.4
---------------	-----



β_{DR}	0.35
β_{TD}	0.35
β_{MDL}	0.35
β_{TOT}	0.726

6.1.4 Margen de colapso ajustado (ACMR) mínimo o aceptable

En esta sección se determina el ACMR mínimo aceptable para la evaluación individual del desempeño sísmico, en función de la incertidumbre total del sistema estructural β_{TOT} .

Según los criterios de FEMA P695 (FEMA, 2009), el valor de ACMR obtenido para cada arquetipo debe ser igual o superior al $ACMR_{20\%}$ el cual indica una probabilidad de colapso del 20% o menor.

$$ACMR \geq ACMR_{20\%}$$

Ecuación 6-5

Si se cumple la condición anterior, el arquetipo cumple individualmente las exigencias de la evaluación de desempeño sísmico del documento FEMA P695.

El ACMR mínimo aceptable se obtiene de la tabla 7-3 de la sección 7.4 del documento FEMA P695 (FEMA, 2009), el cual se muestra en la Tabla 6-13.

Tabla 6-13: Tabla 7-3 FEMA P695: valores aceptables de margen de colapso ajustado. Fuente: FEMA P695

Table 7-3 Acceptable Values of Adjusted Collapse Margin Ratio ($ACMR_{10\%}$ and $ACMR_{20\%}$)

Total System Collapse Uncertainty	Collapse Probability				
	5%	10% ($ACMR_{10\%}$)	15%	20% ($ACMR_{20\%}$)	25%
0.275	1.57	1.42	1.33	1.26	1.20
0.300	1.64	1.47	1.36	1.29	1.22
0.325	1.71	1.52	1.40	1.31	1.25
0.350	1.78	1.57	1.44	1.34	1.27
0.375	1.85	1.62	1.48	1.37	1.29
0.400	1.93	1.67	1.51	1.40	1.31
0.425	2.01	1.72	1.55	1.43	1.33
0.450	2.10	1.78	1.59	1.46	1.35
0.475	2.18	1.84	1.64	1.49	1.38
0.500	2.28	1.90	1.68	1.52	1.40
0.525	2.37	1.96	1.72	1.56	1.42
0.550	2.47	2.02	1.77	1.59	1.45
0.575	2.57	2.09	1.81	1.62	1.47
0.600	2.68	2.16	1.86	1.66	1.50
0.625	2.80	2.23	1.91	1.69	1.52
0.650	2.91	2.30	1.96	1.73	1.55
0.675	3.04	2.38	2.01	1.76	1.58
0.700	3.16	2.45	2.07	1.80	1.60
0.725	3.30	2.53	2.12	1.84	1.63
0.750	3.43	2.61	2.18	1.88	1.66
0.775	3.58	2.70	2.23	1.92	1.69
0.800	3.73	2.79	2.29	1.96	1.72
0.825	3.88	2.88	2.35	2.00	1.74
0.850	4.05	2.97	2.41	2.04	1.77
0.875	4.22	3.07	2.48	2.09	1.80
0.900	4.39	3.17	2.54	2.13	1.83
0.925	4.58	3.27	2.61	2.18	1.87
0.950	4.77	3.38	2.68	2.22	1.90

En la Tabla 6-14 se muestra la incertidumbre total del sistema, $ACMR_{20\%}$, $ACMR$ obtenido para cada nivel de desempeño sísmico y el cumplimiento de la evaluación individual para el estanque Cartagena.

Tabla 6-14: $ACMR$ aceptable y evaluación de desempeño sísmico individual para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

β_{TOT}	0.726
$ACMR_{20\%}$	1.84
$ACMR$	11.58
Margen de seguridad	6.29
¿Cumple?	SI

En la Tabla 6-15 se muestra la incertidumbre total del sistema, $ACMR_{20\%}$, $ACMR$ obtenido para cada nivel de desempeño sísmico y el cumplimiento de la evaluación individual para el estanque Rancagua.

Tabla 6-15: ACMR aceptable y evaluación de desempeño sísmico individual para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

β_{TOT}	0.726
$ACMR_{20\%}$	1.84
ACMR	9.86
Margen de seguridad	5.36
¿Cumple?	SI

6.2 Evaluación grupal

La evaluación grupal tiene como objetivo verificar que el sistema estructural, en su conjunto, cumple con los requisitos de desempeño establecidos por FEMA P695 (FEMA, 2009). Para ello, se compara el promedio de los valores de ACMR obtenidos para los distintos arquetipos analizados con el $ACMR_{10\%}$, que indica una probabilidad de colapso de 10%.

$$ACMR_{promedio} \geq ACMR_{10\%}$$

Ecuación 6-6

Si se cumple esta condición, se considera que el sistema presenta un margen de seguridad sísmica adecuado a nivel global y cumple las exigencias de evaluación de desempeño sísmico de FEMA P695.

En la Tabla 6-16 se muestra el valor de incertidumbre total promedio, $ACMR_{10\%}$, ACMR promedio y el cumplimiento de la evaluación grupal para los arquetipos.

Tabla 6-16: ACMR aceptable y evaluación de desempeño sísmico grupal para estanque Cartagena y Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

β_{TOT}	0.726
$ACMR_{10\%}$	2.53
$ACMR_{promedio}$	10.72
Margen de seguridad	4.24
¿Cumple?	SI



7 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos de los estudios realizados para los estanques Cartagena y Rancagua. Se abordan tanto los resultados del análisis estático tipo pushover como aquellos de los análisis dinámicos no lineales (tiempo-historia e incremental), con el objetivo de evaluar el comportamiento estructural ante distintos niveles de demanda sísmica. A partir de estos resultados, se identifican las principales diferencias en la respuesta de ambos modelos, se discuten los efectos asociados a la rigidez, ductilidad y configuración geométrica. Finalmente, se examina la influencia de la incertidumbre en la evaluación del margen de seguridad, y se contrasta el desempeño observado con los requerimientos normativos vigentes.

7.1 Modelación estructural

El desarrollo de los modelos estructurales se llevó a cabo con el objetivo de representar de forma adecuada el comportamiento sísmico no lineal de los estanques elevados Cartagena y Rancagua. Para ello, se implementó una modelación detallada de sus principales componentes estructurales: pedestal, cuba y fundación.

Para el caso del pedestal, se consideró que la zona crítica para el desarrollo de inelasticidad se concentraría en la base del pedestal, por lo que esta parte de la estructura fue representada mediante elementos tipo “shell” por capas, con comportamiento no lineal tanto en el hormigón como en el acero de refuerzo. Este enfoque permitió simular la formación de zonas plásticas y evaluar directamente el daño acumulado en términos de deformaciones. Se consideró que los pedestales tienen la capacidad de corte suficiente para evitar fallas de este tipo.

La cuba fue modelada aplicando el modelo simplificado propuesto por Housner (Housner, 1963), en el que se considera la descomposición del fluido en dos componentes dinámicamente independientes: una masa impulsiva, que representa el efecto del fluido que se mueve monóticamente con la estructura; y una masa convectiva, asociada al oleaje generado por el movimiento sísmico. Este enfoque, ampliamente utilizado por su simplicidad y efectividad, permitió incorporar de manera práctica la interacción fluido-estructura en el modelo estructural general.

La fundación de los estanques fue modelada de forma simplificada mediante apoyos empotrados en la base del pedestal. Esta aproximación asume que no existen desplazamientos ni rotaciones en la conexión con el suelo, por lo que no se considera explícitamente la interacción suelo-estructura. Si bien esta simplificación puede omitir ciertos efectos dinámicos del terreno, resulta adecuada para una primera aproximación del comportamiento estructural, especialmente cuando se busca concentrar el análisis en la respuesta no lineal del pedestal y la cuba.

El criterio de colapso adoptado se basó en una deformación unitaria máxima de compresión del hormigón igual a 0.004, lo que permitió establecer un umbral objetivo claro para los análisis no lineales, en línea con el estado límite de prevención de colapso. Esta elección fue coherente con los objetivos del estudio y con la definición de desempeño extremo utilizada en la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009).

7.2 Análisis pushover

7.2.1 Capacidad de deformación

En el análisis pushover se pudo observar el ingreso de ambos modelos al rango no lineal, reflejado en una pérdida progresiva de rigidez tras el tramo elástico inicial, causada por la fluencia secuencial del refuerzo longitudinal distribuido a lo largo del perímetro de las paredes.

Al comparar los resultados, el modelo Cartagena presentó mayores desplazamientos de techo y menores valores de corte basal en comparación al modelo Rancagua, lo que indica una respuesta estructural más flexible y dúctil. Esta diferencia de comportamiento se explica por las distintas características geométricas de ambas estructuras. Si bien ambos pedestales tienen igual altura, el estanque Cartagena

posee un diámetro menor, lo que lo hace más esbelto y, por tanto, menos resistente, pero con mayor capacidad de deformación. Esto se refleja en los valores de deriva alcanzados al colapso, donde Cartagena llega a un drift máximo de 0.88 [%], mientras que Rancagua alcanza un 0.53 [%], evidenciando una configuración estructural más rígida en este último.

En cuanto a la ductilidad μ_T calculada, se obtuvo valores de 11.39 para el estanque Cartagena y 9.62 para el estanque Rancagua, según el desplazamiento de fluencia calculado según la Ecuación 5-2, con valores de 1.54 [cm] y 1.11 [cm] para estanque Cartagena y Rancagua respectivamente, lo que indica que ambos sistemas presentan una alta capacidad de deformación inelástica antes de alcanzar la condición de colapso. Si bien el valor de Cartagena es levemente superior, la diferencia entre ambos es relativamente acotada, sugiriendo que, en términos generales, las estructuras comparten un buen desempeño dúctil frente a solicitaciones sísmicas severas.

Para contrastar el resultado anterior, se estima el desplazamiento de fluencia a partir de las curvas pushover, proyectando el rango lineal elástico hasta alcanzar la línea que indica el corte basal máximo, la intersección de ambas indica el desplazamiento de fluencia. Las Figura 7-1 y Figura 7-2 detallan el cálculo del desplazamiento de fluencia para estanque Cartagena y Rancagua respectivamente. De las gráficas se obtiene que el desplazamiento de fluencia para los estanques Cartagena y Rancagua es de 1.86 [cm] y 1.80 [cm] respectivamente.

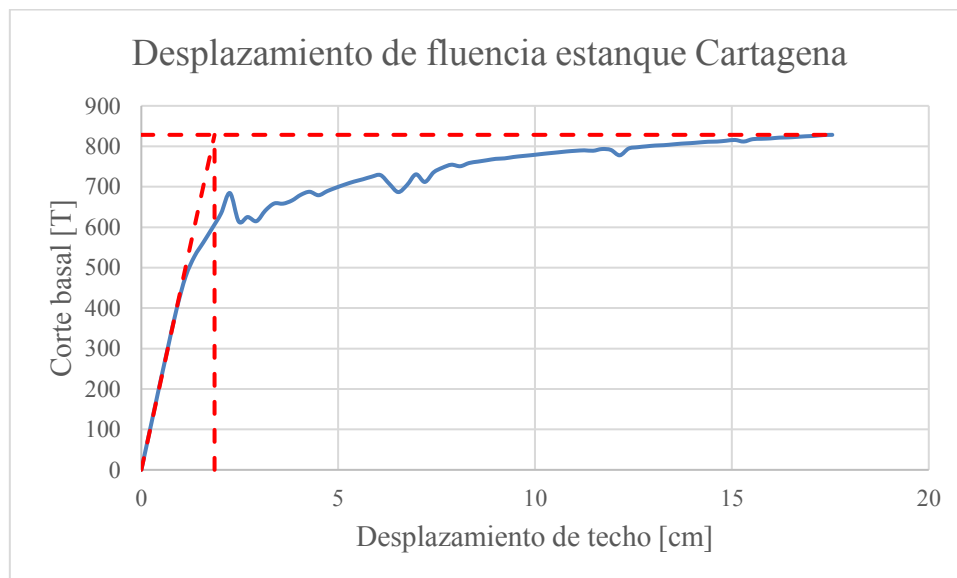


Figura 7-1: Estimación de desplazamiento de fluencia estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

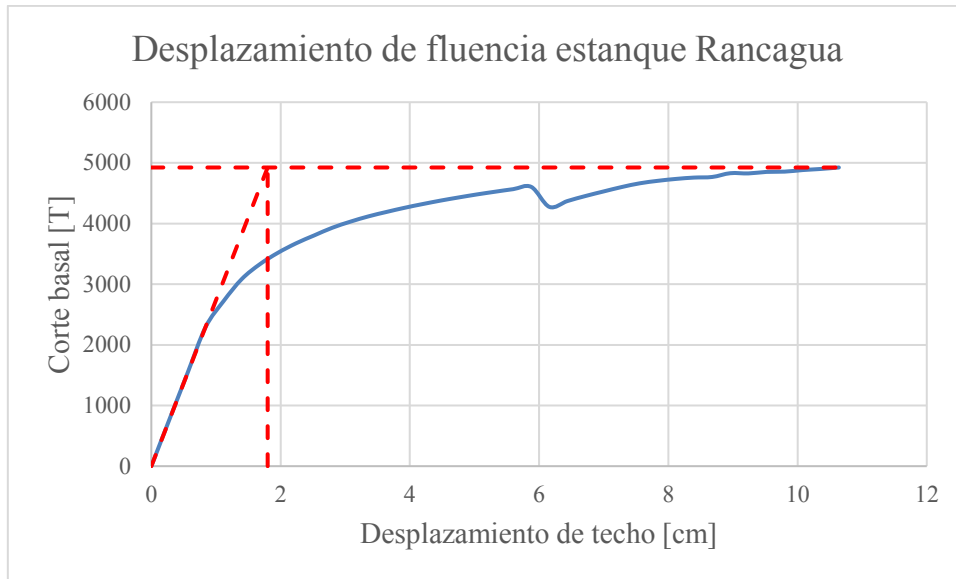


Figura 7-2: Estimación de desplazamiento de fluencia estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Se determina además el valor del desplazamiento en la primera fluencia para cada caso, que para el estanque Cartagena es de 1.13 [cm] y para Rancagua es de 0.95 [cm]. Lo cual indica que la relación entre el desplazamiento de fluencia efectivo y el desplazamiento en la primera fluencia es 1.65 y 1.89 respectivamente. Este resultado muestra que Rancagua presenta una transición más gradual hacia el comportamiento inelástico, mientras que Cartagena alcanza la fluencia efectiva con una menor diferencia relativa respecto a su primera fluencia, lo que se refleja en su mayor ductilidad.

Calculando la ductilidad según la Ecuación 6-1, utilizando el desplazamiento de fluencia obtenido directamente del gráfico, se obtienen valores de 9.44 para el estanque Cartagena y 5.91 para el estanque Rancagua. Al compararlos con los valores previamente calculados, se observa una reducción en la ductilidad estimada. El valor gráfico tiende a ser más representativo del inicio real del comportamiento plástico, por lo que los resultados gráficos pueden considerarse como una estimación más precisa de la ductilidad, además de mostrar resultados más conservadores respecto a los teóricos. No obstante, ambos enfoques coinciden en mostrar una mayor ductilidad en el estanque Cartagena respecto a Rancagua.

7.2.2 Resistencia

El estanque Cartagena alcanza un valor de corte basal de 828 [T], equivalente a un 80% de su peso de 1031 [T]. El estanque Rancagua presenta un corte basal último de 4924 [T], equivalente a un 117% de su peso 4214 [T]. Esta relación entrega una visión relativa de la capacidad cortante que enfrenta cada estructura en su punto de colapso.

Para cada estanque obtiene la relación M_u/V_u , que indica la altura del punto de aplicación de la carga lateral resultante en el instante último, cuyos valores se indica en la Tabla 7-1 y Tabla 7-2.

Tabla 7-1: Cálculo altura de punto de aplicación de carga lateral resultante en estado último.

Fuente: Elaboración propia.

Estanque	Cartagena	Rancagua
M_u [T-m]	14319	82019
V_u [T]	828	4924

M_u/V_u [m]	17.3	16.7
---------------	------	------

Respecto a la sobre-resistencia Ω_0 , se calcularon los valores tomando como referencia el corte basal de diseño según la norma vigente NCh2369Of.2023 (INN, 2023), obteniéndose un valor de sobre-resistencia de 1.24 para Cartagena y 3.00 para Rancagua. Estos valores pueden parecer reducidos, especialmente en el caso de Cartagena, si se considera la alta demanda sísmica impuesta por la nueva normativa. Para contextualizar estos resultados, se realizó un cálculo adicional de la sobre-resistencia considerando los valores de corte basal de diseño definidos en la NCh2369Of.2003 (INN, 2003), normativa bajo la cual fueron originalmente diseñadas ambas estructuras. En este caso, los valores aumentan a 2.39 para Cartagena y 5.37 para Rancagua, evidenciando que los resultados del estudio están fuertemente condicionados por el marco normativo actual. Esta comparación sugiere que parte de la aparente baja sobre-resistencia podría explicarse por el endurecimiento de los criterios de diseño en la versión más reciente de la norma, y no necesariamente por una deficiencia en la capacidad estructural de los estanques.

7.3 Análisis tiempo-historia no lineal

Respecto al análisis tiempo-historia no lineal utilizando los registros sísmicos originales, sus resultados permitieron observar la respuesta estructural ante eventos reales, revelando que en algunos casos las estructuras ingresaron en el rango inelástico, manteniéndose, sin embargo, lejos del colapso en todo instante.

Se presenta en la Figura 7-3 y en la Figura 7-4 la relación entre la aceleración de respuesta lineal elástica para cada registro y la deformación lateral máxima alcanzada como indicador de nivel de desempeño para el estanque Cartagena y Rancagua respectivamente.

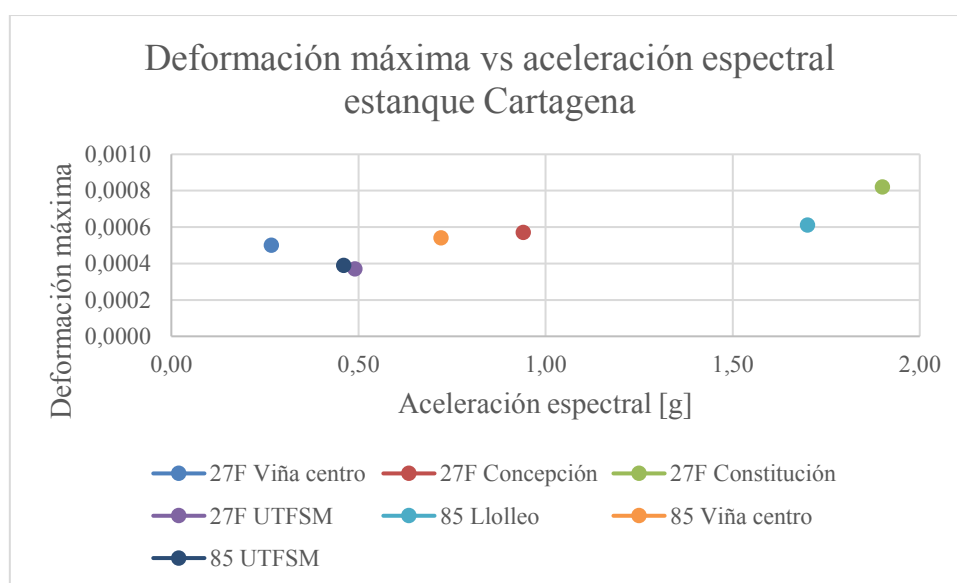


Figura 7-3: Relación entre aceleración espectral y deformación máxima del hormigón para cada registro en estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

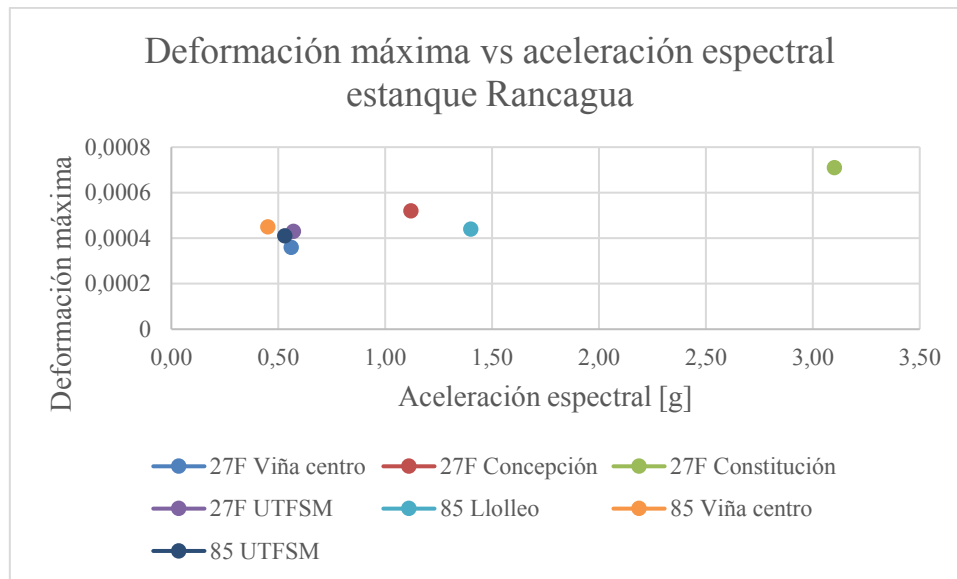


Figura 7-4: Relación entre aceleración espectral y deformación máxima del hormigón para cada registro en estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo anterior se ve que hay una correlación entre la aceleración espectral y la deformación máxima del hormigón, además de reafirmar gráficamente lo lejos que se encuentran los estanques de alcanzar el colapso estructural ante las diferentes demandas sísmicas.

Además, se incluyen las relaciones entre la aceleración espectral, drift y corte basal para cada registro aplicado a cada estanque en la Figura 7-5, Figura 7-6, Figura 7-7 y Figura 7-8.

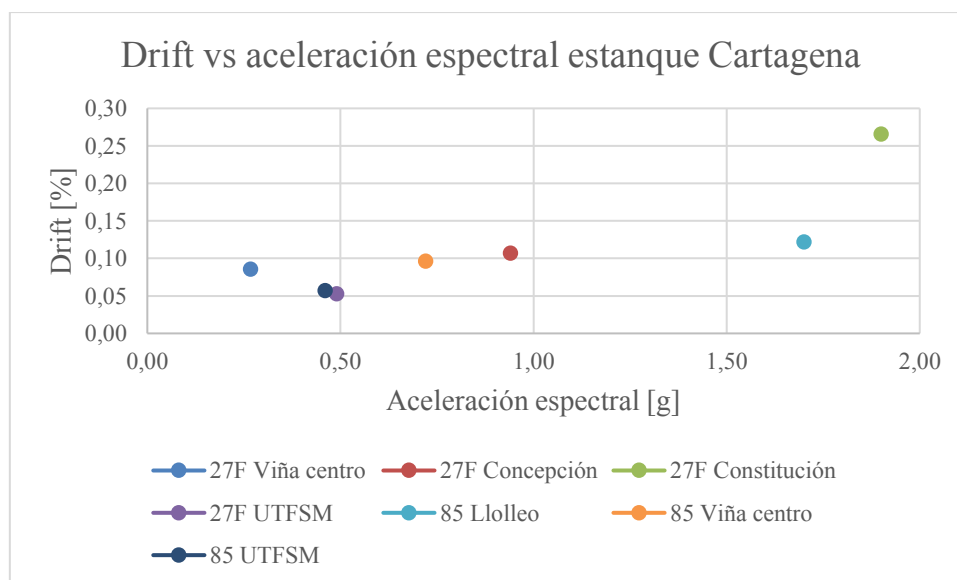


Figura 7-5: Relación entre drift y aceleración espectral para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

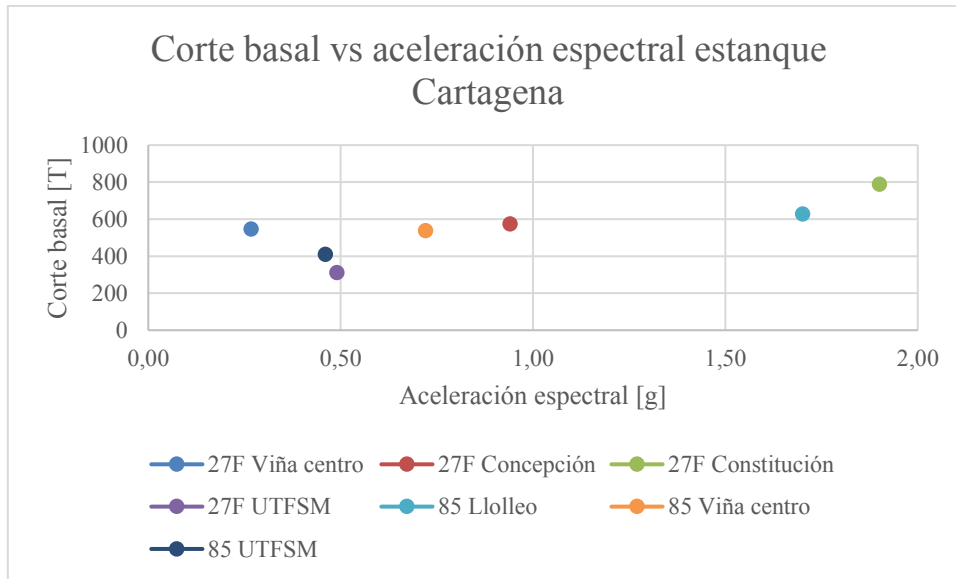


Figura 7-6: Relación entre corte basal y aceleración espectral para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

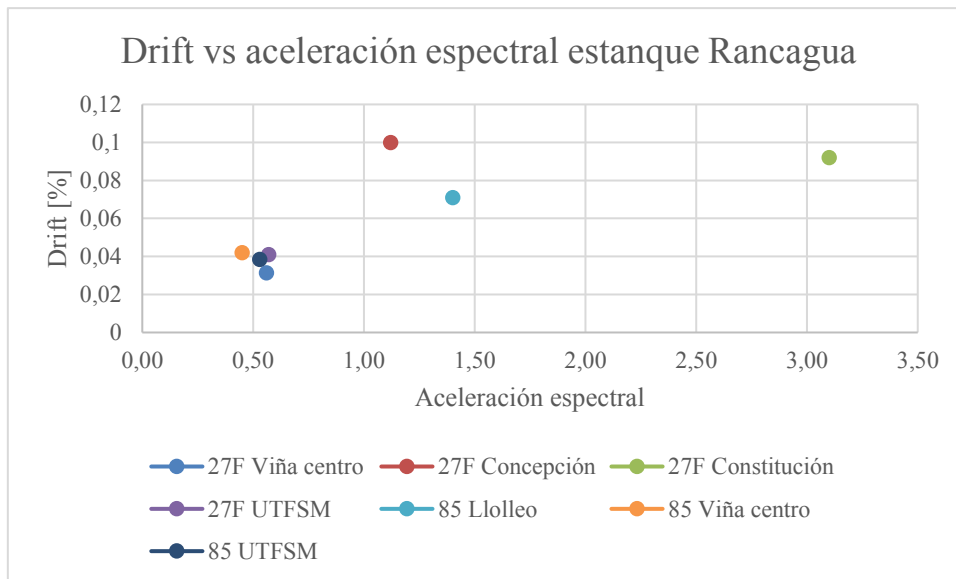


Figura 7-7: Relación entre drift y aceleración espectral para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

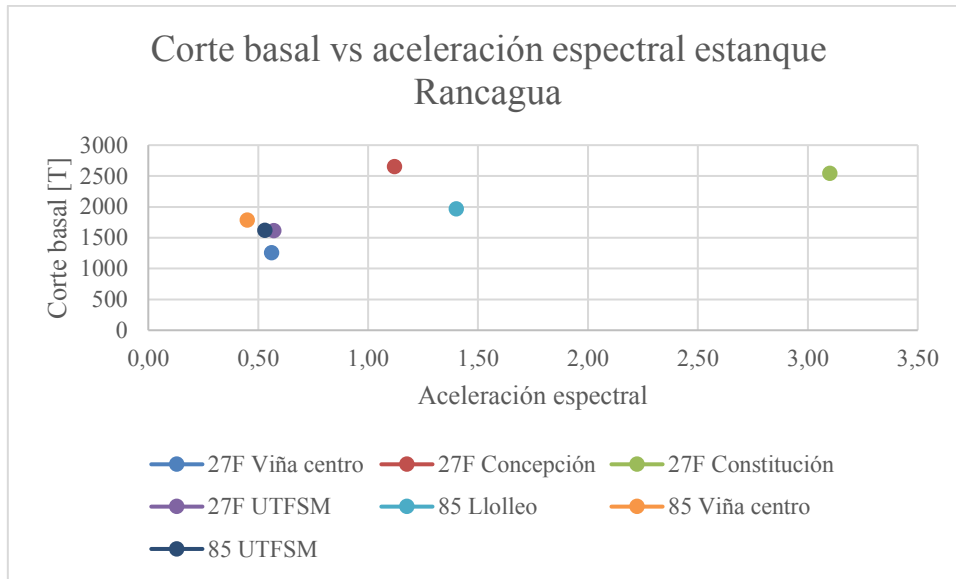


Figura 7-8: Relación entre corte basal y aceleración espectral para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo anterior se observa que, por lo general, hay una correlación entre la aceleración espectral, corte basal y drift obtenido, donde a medida que aumenta la aceleración espectral, aumentan también los demás parámetros.

Finalmente, en la Figura 7-9 y Figura 7-10, se muestran los gráficos de histéresis para el caso más desfavorable de cada estanque, el cual corresponde al registro 27F Constitución, y se compara respecto al valor de V/W de diseño respecto a NCh2369Of.2003 (INN, 2003) y NCh2369Of.2023 (INN, 2023), además del obtenido a partir del análisis pushover.

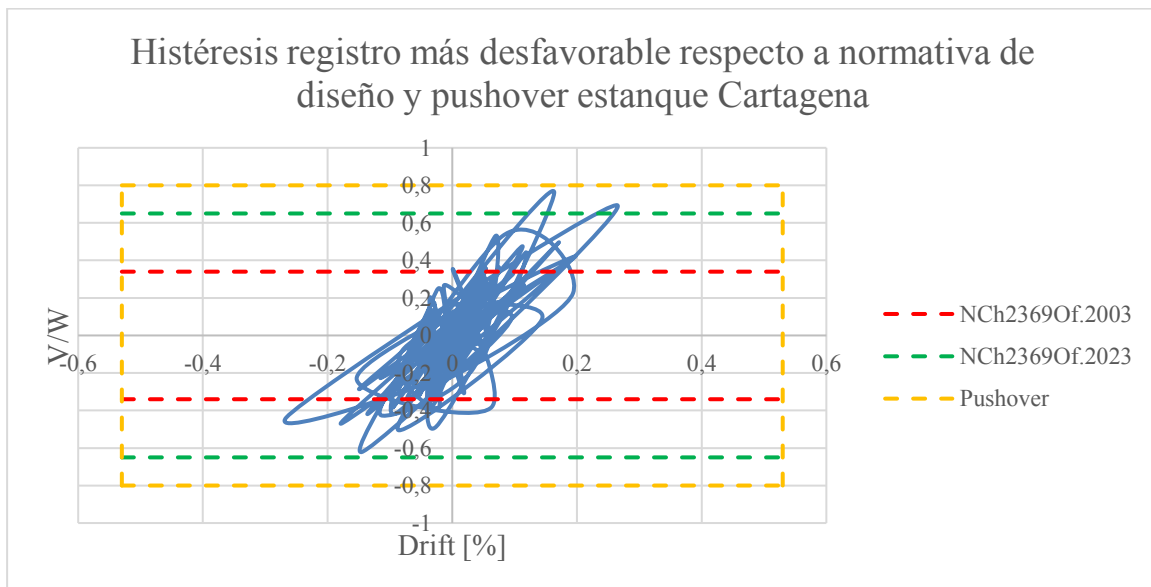


Figura 7-9: Histéresis caso más desfavorable estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

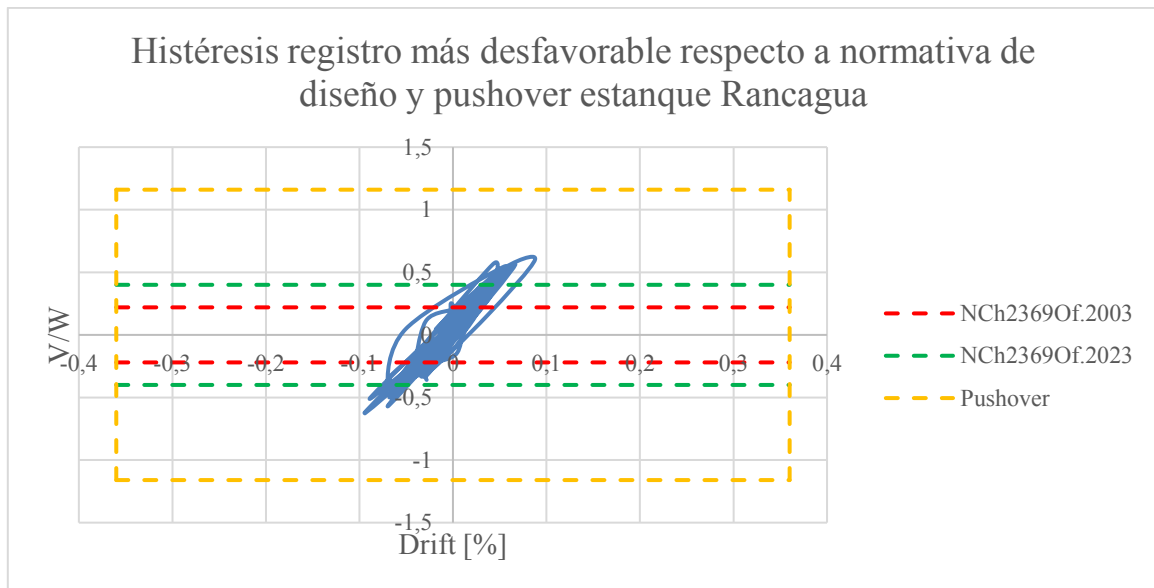


Figura 7-10: Histéresis caso más desfavorable estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que, en ambos casos, el corte basal registrado supera el corte de diseño según ambas normativas. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se supera el del pushover y no se aprecia un comportamiento lineal elevado.

Al igual que para el pushover, se puede obtener la relación M_u/V_u para el instante de mayor demanda del registro para cada estanque, como se indica en la Tabla 7-2 y Tabla 7-3.

Tabla 7-2: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Momento [T-m]	Corte basal [T]	M_u/V_u [m]
27F Viña centro	10618	546	19.45
27F Concepción	11166	574	19.44
27F Constitución	14693	789	18.63
27F UTFSM	8046	311	25.85
85 Lollole	12037	627	19.20
85 Viña centro	10496	539	19.49
85 UTFSM	8513	410	20.76

Tabla 7-3: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Momento [T-m]	Corte basal [T]	M_u/V_u [m]
27F Viña centro	313312	1254	24.98
27F Concepción	62145	2653	23.42

27F Constitución	63533	2541	25.00
27F UTFSM	40445	1612	25.09
85 Llolleo	48429	1965	24.65
85 Viña centro	46665	1787	26.11
85 UTFSM	39246	1621	24.22

En comparación al análisis pushover, la fuerza resultante en el análisis tiempo-historia se ubica más arriba de la altura máxima del pedestal, esto debido a que este análisis considera la acción de modos superiores, en particular modos convectivos, asociados a fuerzas inerciales aplicadas en la cuba.

7.4 Análisis incremental (IDA)

El análisis incremental IDA permitió evaluar de forma más completa la evolución del comportamiento ante distintos niveles de intensidad sísmica. Se aplicaron registros escalados progresivamente hasta alcanzar el criterio de colapso adoptado, lo que permitió identificar las aceleraciones espectrales asociadas a la falla estructural y el desplazamiento de techo correspondiente. Se observó que el estanque Cartagena requirió mayores desplazamientos para alcanzar la falla, con un drift promedio de 1.54 [%] (desplazamiento de techo promedio de 30.79 [cm]) y una aceleración espectral promedio de 5.72 [g]. En contraste, el modelo Rancagua alcanzó el colapso con un drift promedio de 0.36% (desplazamiento de techo promedio de 7.26 [cm]) y una aceleración espectral promedio de 3.45 [g]. Estos resultados sugieren que el estanque Cartagena presenta una mayor capacidad de deformación antes del colapso, mientras que Rancagua mostró una respuesta más rígida, con menor demanda de desplazamiento y aceleración para alcanzar la condición de falla.

Respecto a la dispersión de los resultados, se observó que el estanque Cartagena presentó una mayor variabilidad tanto en los desplazamientos de techo como en las aceleraciones espectrales al alcanzar el colapso, en comparación con el modelo Rancagua. Esta dispersión refleja una respuesta estructural más influida por las particularidades de cada registro sísmico, lo que puede atribuirse a su configuración más flexible y a una interacción más dinámica entre el pedestal y la cuba. Por el contrario, el modelo Rancagua mostró una respuesta más uniforme, asociada a su comportamiento estructural más rígido.

En la tabla se indica el cálculo de la relación M_u/V_u para el instante último de cada estanque.

Tabla 7-4: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante en instante último estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Momento [T-m]	Corte basal [T]	M_u/V_u [m]
27F Viña centro	28502	1379	20.67
27F Concepción	20738	1112	18.65
27F Constitución	24599	1205	20.41
27F UTFSM	19126	1109	17.25
85 Llolleo	24713	1185	20.85
85 Viña centro	27730	2191	12.66
85 UTFSM	24372	1313	18.56

Tabla 7-5: Cálculo altura de fuerza sísmica lateral resultante en instante último estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

Registro	Momento [T-m]	Corte basal [T]	M_u/V_u [m]
27F Viña centro	120887	5228	23.12



27F Concepción	122475	4778	25.63
27F Constitución	115735	4810	24.06
27F UTFSM	154937	5635	27.50
85 Lolleo	142646	6090	23.42
85 Viña centro	131267	5712	22.98
85 UTFSM	155638	6398	24.33

De la información anterior se obtiene que la fuerza lateral resultante resulta más alta en estanque Rancagua que en Cartagena, con resultados similares al análisis-tiempo historia, coherente debido a la naturaleza dinámica de ambos estudios.

7.5 Evaluación de desempeño sísmico

El cálculo del Margen de Colapso (CMR) se realizó de acuerdo con los lineamientos de la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009), utilizando como referencia la aceleración de diseño establecida en la normativa NCh2369Of.2023 (INN, 2023), vigente al momento del estudio. Los resultados obtenidos muestran un CMR de 8.71 para el estanque Cartagena y 7.41 para el estanque Rancagua, lo que refleja una holgura sísmica considerable respecto a la aceleración de diseño impuesta la norma. Estos valores indican que ambas estructuras requieren una aceleración espectral varias veces mayor a la establecida por el diseño actual para alcanzar la condición de colapso, lo que evidencia un comportamiento estructural robusto ante eventos severos. Asimismo, la diferencia entre ambos modelos sugiere una mayor capacidad de reserva de capacidad en el estanque Cartagena, coherente con su respuesta más dúctil observada en los análisis anteriores.

A partir de los valores de CMR obtenidos previamente, se procede a calcular el Margen de Colapso Ajustado (ACMR), el cual incorpora el factor de forma espectral (SSF) que corrige el espectro de diseño considerando la ductilidad y el período fundamental de la estructura. Para ambos modelos, la elevada ductilidad y el período asociado permitieron asignar un SSF de 1.33, valor sugerido por FEMA P695 (FEMA, 2009) para este tipo de condiciones. Aplicando dicho factor, se obtiene un ACMR de 11.58 para el estanque Cartagena y 9.86 para el estanque Rancagua, lo que refuerza el alto nivel de desempeño sísmico mostrado por ambas estructuras y confirma que, los márgenes de seguridad ante colapso siguen siendo considerablemente superiores a los umbrales exigidos por la metodología.

Para la evaluación del desempeño sísmico, se consideró la incertidumbre total del sistema (β_{TOT}) como un parámetro clave en la determinación del ACMR mínimo aceptable. En cuanto a la incertidumbre de registro (β_{RTR}), se utilizó un valor de 0.4, correspondiente al valor máximo permitido por la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009), el cual está limitado superiormente en función de la ductilidad estructural. Para las otras fuentes de incertidumbre, requerimientos de diseño (β_{DR}), datos de prueba (β_{TD}) y modelo estructural (β_{MDL}), se adoptó un valor de 0.35 en cada caso, como una medida conservadora ante la falta de verificación experimental. Con estos valores, se obtiene una incertidumbre total (β_{TOT}) de 0.726 para ambos modelos estructurales analizados.

Para la evaluación individual de las estructuras, según la incertidumbre total estimada de 0.726 el valor mínimo requerido de margen de colapso ajustado $ACMR_{20\%}$ para la evaluación individual es 1.84 para ambos estanques. Al comparar este umbral con los resultados obtenidos, se observa que el estanque Cartagena alcanza un ACMR de 11.58, mientras que el estanque Rancagua alcanza un ACMR de 9.86. Esto implica márgenes de seguridad de 6.29 y 5.36, respectivamente, lo que indica que ambos modelos estructurales cumplen holgadamente con los requisitos de la evaluación individual, mostrando una alta confiabilidad estructural frente a eventos sísmicos severos.

Para la evaluación grupal, el criterio de aceptación es más estricto, requiriendo que el promedio de los valores de ACMR supere el valor mínimo $ACMR_{10\%}$, que para este caso corresponde a 2.53. El promedio de los ACMR obtenidos para los estanques Cartagena y Rancagua es 6.90, lo que se traduce en un



margen de seguridad grupal de 4.24. Esto demuestra que el sistema estructural conformado por ambos estanques es robusto y confiable.

De esta forma, los estanques Cartagena y Rancagua cumplen con holgura tanto con la evaluación individual como con la evaluación grupal, según los criterios establecidos por la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009). Este cumplimiento se observa incluso al aplicar la evaluación respecto a una aceleración espectral de diseño definida por la norma NCh2369Of.2023 (INN, 2023), la cual es más estricta que la normativa vigente al momento del diseño original de los estanques. Esto refuerza la confiabilidad estructural de ambas estructuras frente a escenarios sísmicos severos, y sugiere que los diseños existentes poseen márgenes de seguridad conservadores, incluso bajo criterios de evaluación más exigentes.



8 CONCLUSIONES

Se logró desarrollar modelos estructurales detallados de los estanques elevados Cartagena y Rancagua, representando fielmente su geometría y características materiales. La modelación incluyó la implementación de elementos tipo “Shell” con comportamiento no lineal en el pedestal, así como la consideración de las masas impulsiva y convectiva del contenido fluido mediante el modelo simplificado de Housner (Housner, 1963). Estos modelos permitieron aplicar con éxito los tres tipos de análisis no lineales propuestos: estático pushover, tiempo-historia con registros originales, y análisis incremental (IDA). La simulación alcanzó el colapso estructural definido por la deformación unitaria límite del hormigón, validando su capacidad para capturar el comportamiento no lineal progresivo de estas estructuras ante demanda sísmica creciente.

La implementación de la metodología FEMA P695 (FEMA, 2009) fue realizada en forma completa, incluyendo la determinación de ductilidad y sobre-resistencia a partir del análisis pushover, el cálculo de márgenes de colapso (CMR y ACMR), y la incorporación de la incertidumbre total del sistema. Los análisis se llevaron a cabo utilizando registros sísmicos reales ocurridos en Chile, lo que permitió evaluar el desempeño sísmico bajo condiciones locales representativas. Ambos estanques cumplieron con holgura los requisitos de desempeño individual ($ACMR_{20\%}$) y grupal ($ACMR_{10\%}$), realizando la evaluación respecto a la aceleración espectral de diseño definida en NCh2369Of.2023 (INN, 2023), la cual es más exigente que la definida en NCh2369Of.2003 (INN, 2003), norma bajo la cual fueron diseñados originalmente.

Los resultados obtenidos sugieren que, pese a la alta exigencia de la normativa chilena vigente, los estanques evaluados presentan un desempeño estructural robusto frente a sismos severos, con márgenes de seguridad significativamente superiores a los mínimos requeridos por FEMA P695 (FEMA, 2009). No obstante, la sobre-resistencia evaluada con la norma NCh2369Of.2023 (INN, 2023) fue baja en comparación con lo esperado, lo que podría interpretarse como un efecto del aumento en la demanda sísmica normativa más que una deficiencia estructural. Esta observación sugiere que los métodos actuales de diseño podrían estar siendo excesivamente conservadores en ciertos aspectos, abriendo la posibilidad de futuras revisiones técnicas para una modificación en los parámetros de diseño estructural.

La aplicación del enfoque de diseño sísmico por desempeño permitió caracterizar en profundidad el comportamiento estructural de dos estanques elevados típicos en Chile, utilizando registros sísmicos locales y análisis no lineales detallados. Los resultados demuestran que ambas estructuras mantienen un margen considerable frente a la falla estructural, incluso bajo escenarios de alta demanda sísmica. Esto evidencia que los estanques estudiados poseen una capacidad sísmica significativa y que el uso de FEMA P695 (FEMA, 2009) como herramienta de evaluación de desempeño sísmico entrega una metodología rigurosa y aplicable al contexto chileno. En consecuencia, se valida la factibilidad de aplicar esta metodología tanto en la evaluación de estructuras existentes como en el eventual perfeccionamiento de los procedimientos de diseño sísmico nacional.



9 BIBLIOGRAFÍA

- (ACI) American Concrete Institute. (1998). *ACI 371R-98: Guide for the Analysis, Design, and Construction of Elevated Concrete and Composite Steel-Concrete Water Storage Tanks*. Farmington Hills, MI, USA: ACI.
- (ACI) American Concrete Institute. (2008). *ACI 318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI, USA: ACI.
- (ACI), American Concrete Institute. (2006). *ACI 350.3-06: Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures*. Farmington Hills, MI, USA: ACI.
- (FEMA), Federal Emergency Management Agency. (2009). *FEMA-P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- (INN), Instituto Nacional de Normalización. (2003). *NCh2369.Of2003: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. Santiago, Chile: INN.
- ACI. (1998). *ACI 371R-98: Guide for the Analysis, Design, and Construction of Elevated Concrete and Composite Steel-Concrete Water Storage Tanks*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- ACI. (2006). *ACI 350.3-06: Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- ACI. (2008). *ACI 318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- Al-Ayoubi, A. A., Thirumurugan, V., & Satyanarayanan, K. (June de 2025). Seismic fragility analysis of elevated RC tanks based on IDA and machine learning. doi:<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6690906/v1>
- Aliche, A., Hammoum, H., Bouzelha, K., & et-al. (07 de 2021). Fragility analysis of concrete elevated water tanks under seismic loads. (F. e. Strutturale, Ed.) 57, 93-113.
- Amin, J., Gondaliya, K., & Mulchandani, C. (June de 2021). Assessment of seismic collapse probability of RC shaft supported tank. *Structures*, 33, 2639-2658. doi:<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.002>
- Bhargava, K., Ghoshb, A., & Ramanujama, S. (2005). Seismic response and fragility analysis of a water storage structure. *Nuclear Engineering and Design*, 235, 1481-1501.
- CSI. (2024). *SAP2000 Integrate software for Structural Analysis And Design*. Berkeley, California: Computers & Structures, Inc.
- FEMA. (2009). *FEMA-P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 381-387.
- INN. (2003). *NCh2369.Of2003: Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- INN. (2023). *NCh2369Of.2023: Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales*. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.
- Mander, P. &. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 1804-1826.
- Masoudi, M., Eshghi, S., & Ghafory-Ashtiany, M. (2012). Evaluation of response modification factor (R) of elevated concrete tanks. *Engineering Structures*, 39, 199-209. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.015>



- Mellati, A. (November de 2018). Predicting Dynamic Capacity Curve of Elevated Water Tanks: A Pushover Procedure. *Civil Engineering Journal*, 4, 2513-2528. doi:<http://dx.doi.org/10.28991/cej-03091177>
- Mounir, M., Safar, S., El-Arabaty, H., & Sayed-Ahmed, E. (2012). Evaluation of Seismic Performance Factors for Elevated Reinforced Concrete Tanks. *IABSE Conference*. Sharm El Sheik.
- NCEI. (s.f.). *Significant Earthquake Database*.
- Rajkumari, S., Thakkar, K., & Goyal, H. (2022). Fragility analysis of structures subjected to seismic excitation: A state-of-the art review. *Structures*, 40, 303-316.
- Singh, D., & Ahlawat, A. (2007). Seismic Fragility Analysis of Liquid Storage Tanks. *SMiRT 19*. Toronto.
- Uchile. (s.f.). *Terremotos de Chile*. Obtenido de <https://terremotos.ing.uchile.cl/>

10 ANEXOS

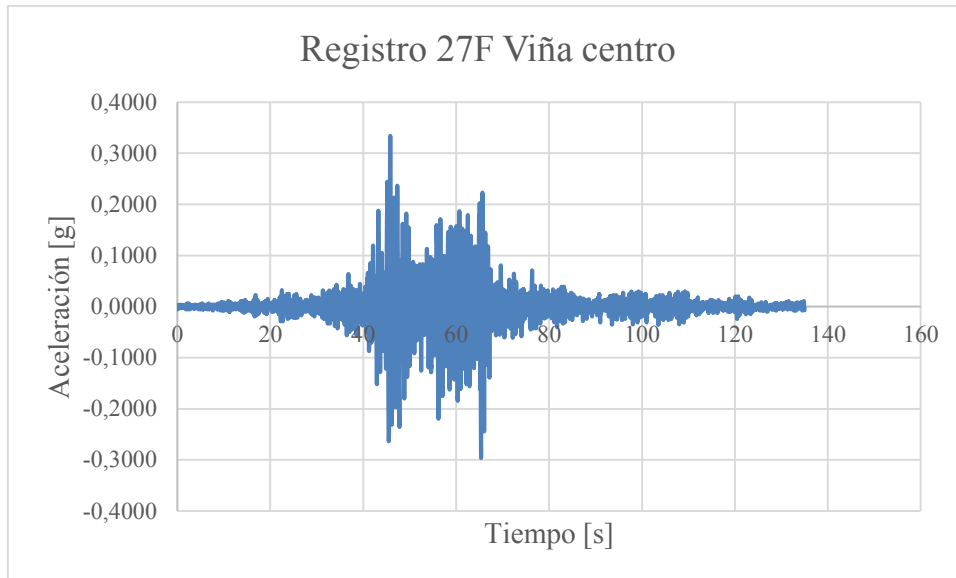


Figura 10-1: Registro de aceleración 27F Viña centro. Fuente: Elaboración propia.

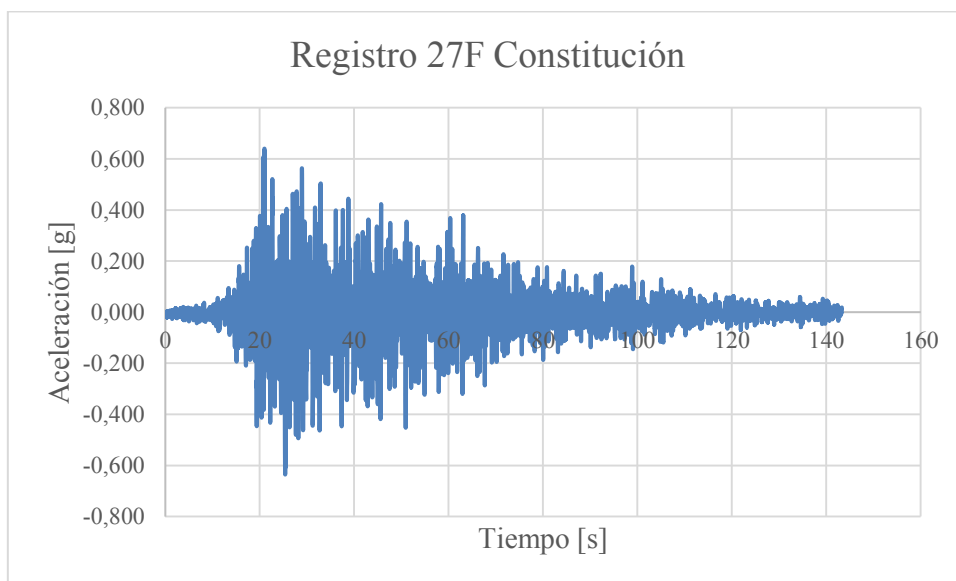


Figura 10-2: Registro de aceleración 27F Constitución. Fuente: Elaboración propia.

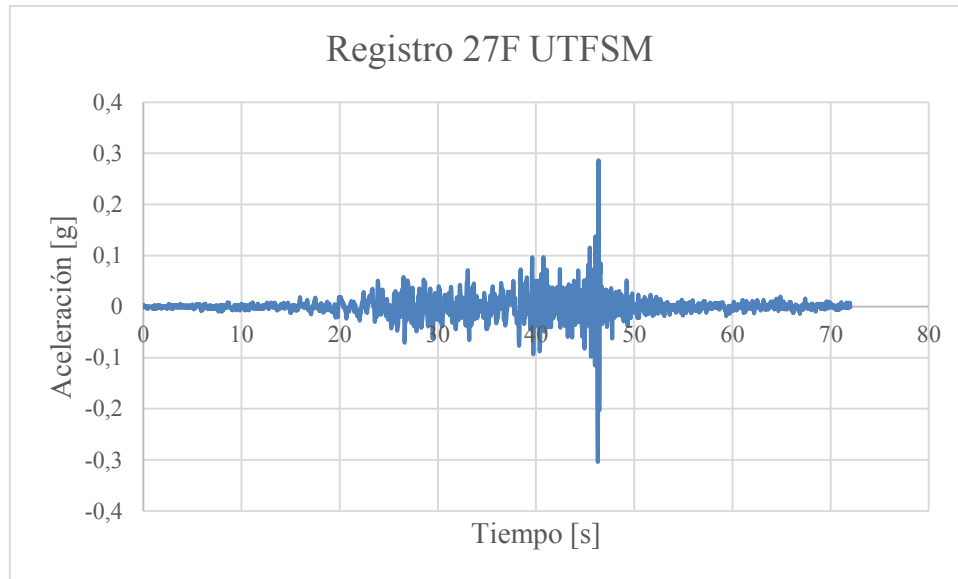


Figura 10-3: Registro de aceleración 27F UTFSM. Fuente: Elaboración propia.

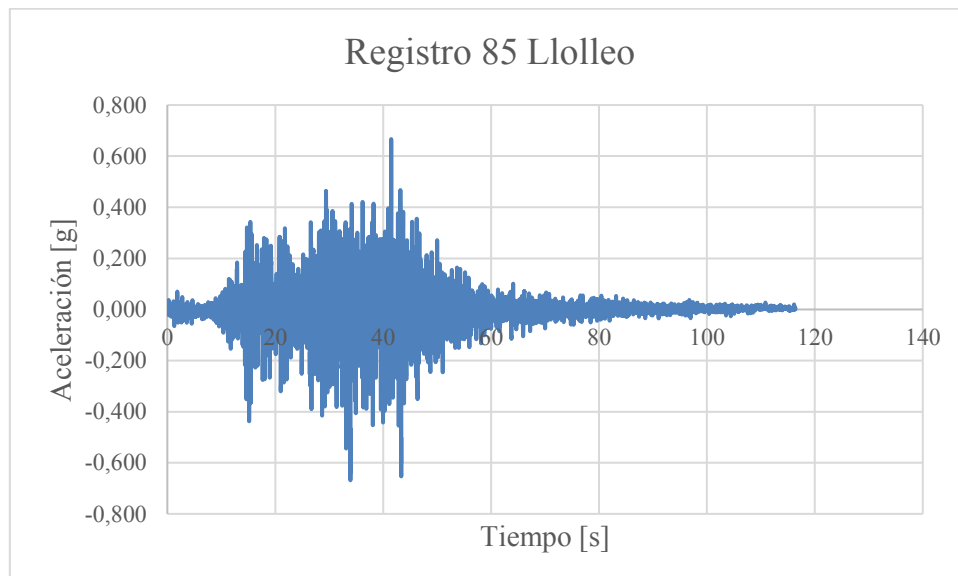


Figura 10-4: Registro de aceleración 85 Lollole. Fuente: Elaboración propia.

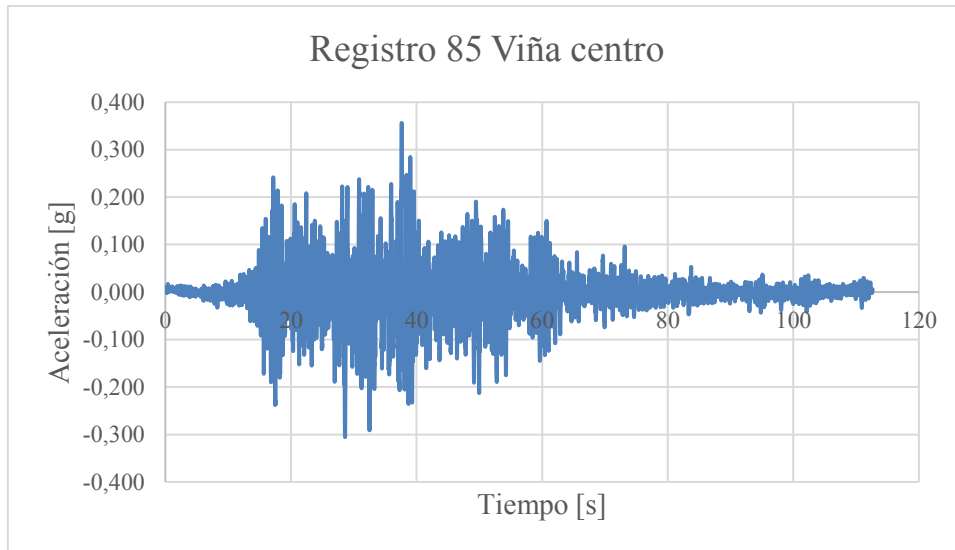


Figura 10-5: Registro de aceleración 85 Viña centro. Fuente: Elaboración propia.

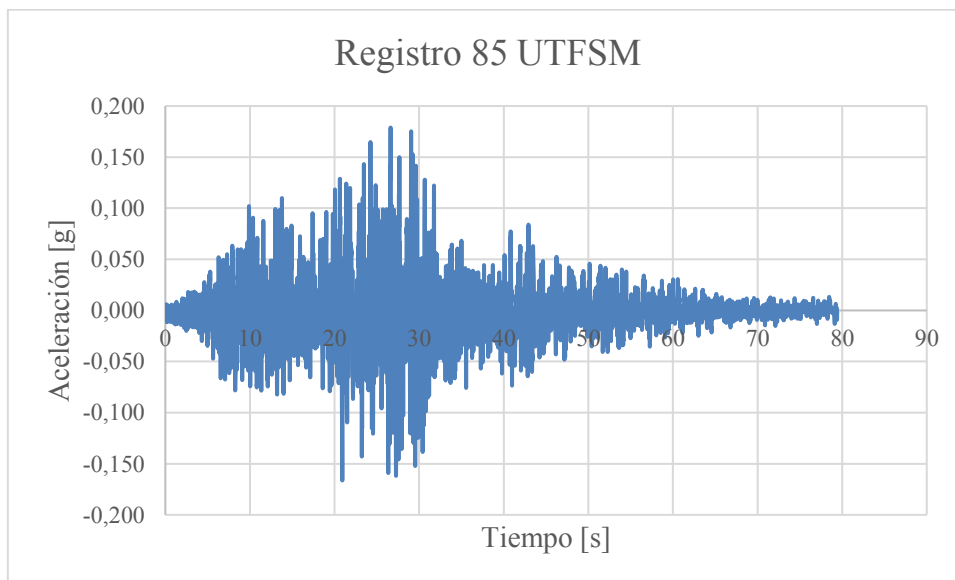


Figura 10-6: Registro de aceleración 85 UTFSM. Fuente: Elaboración propia.

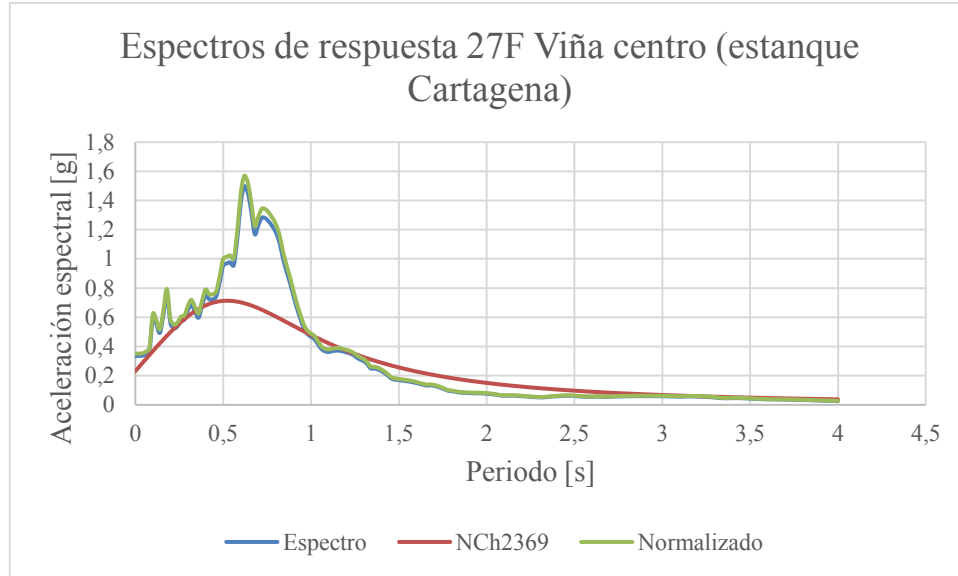


Figura 10-7: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

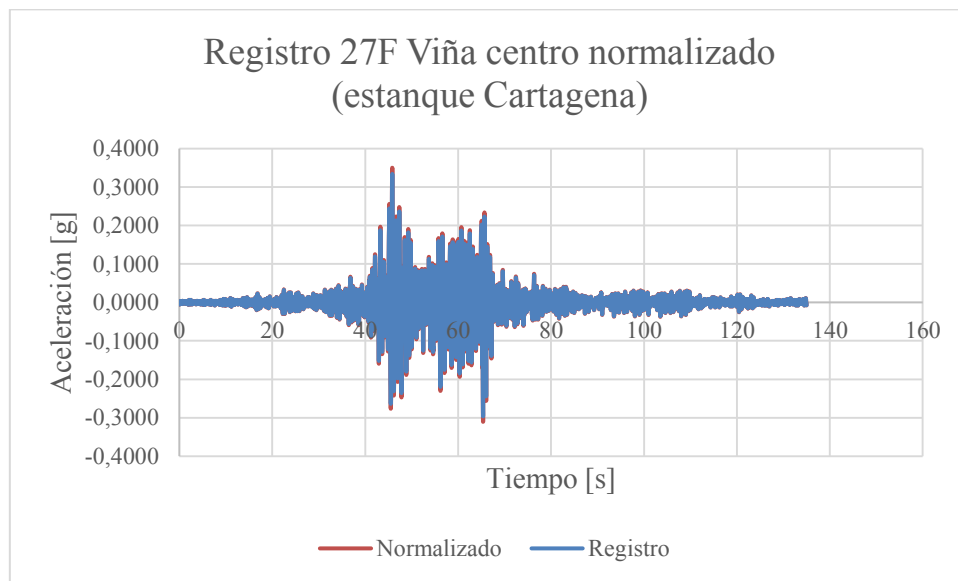


Figura 10-8: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

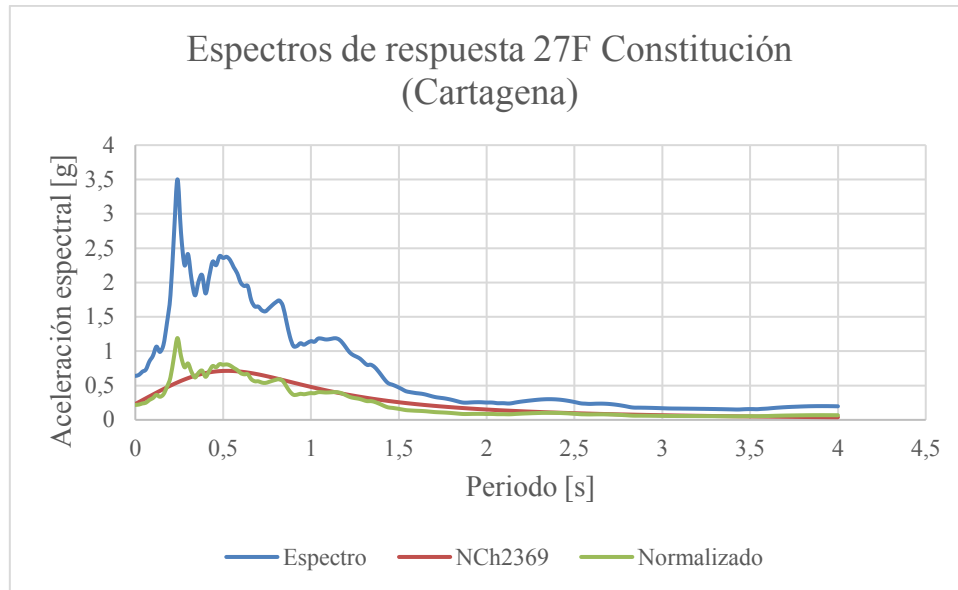


Figura 10-9: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

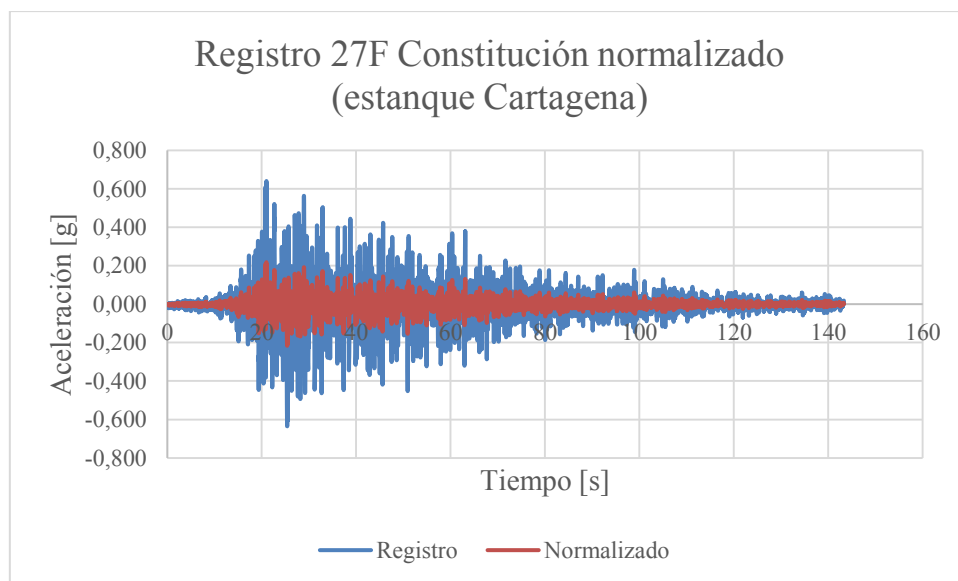


Figura 10-10: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Constitución para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

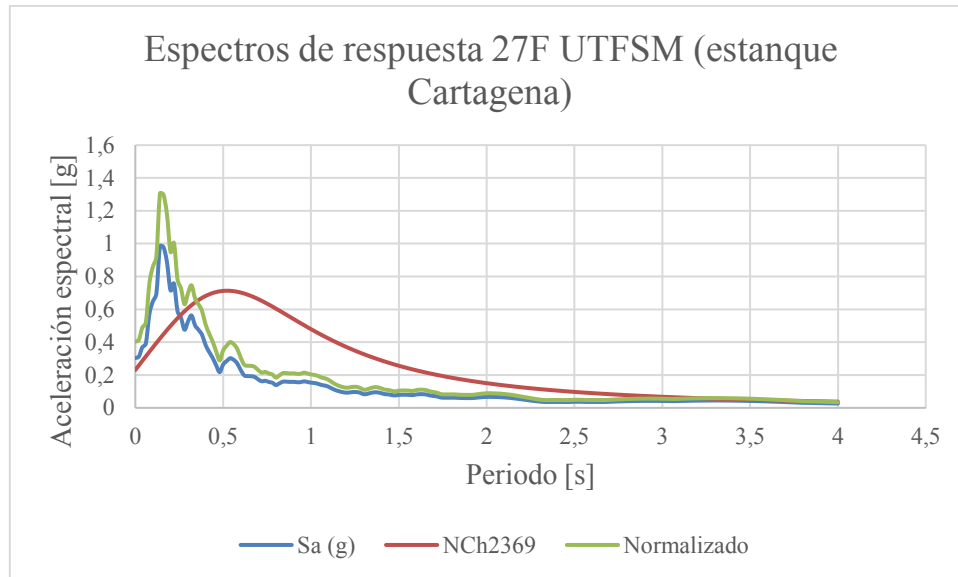


Figura 10-11: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

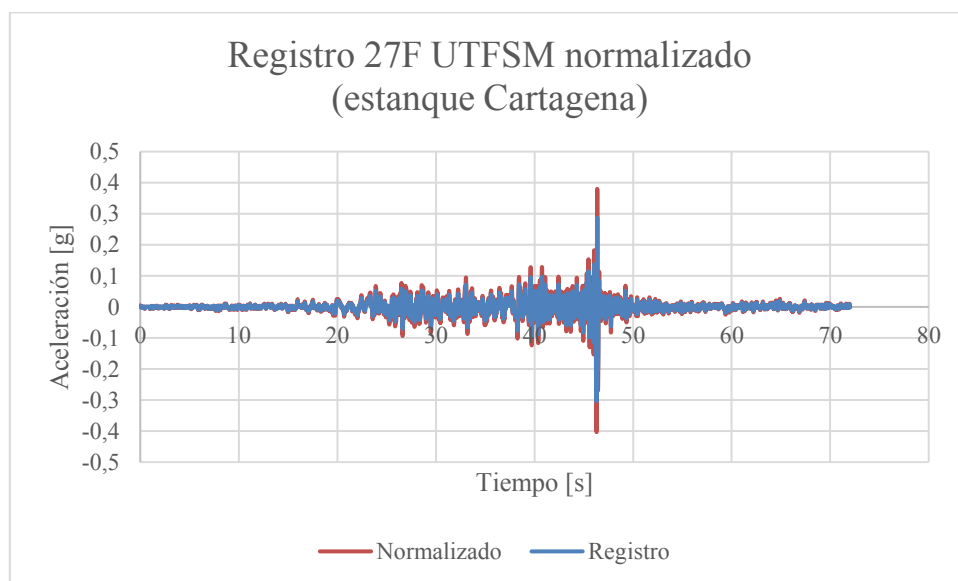


Figura 10-12: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

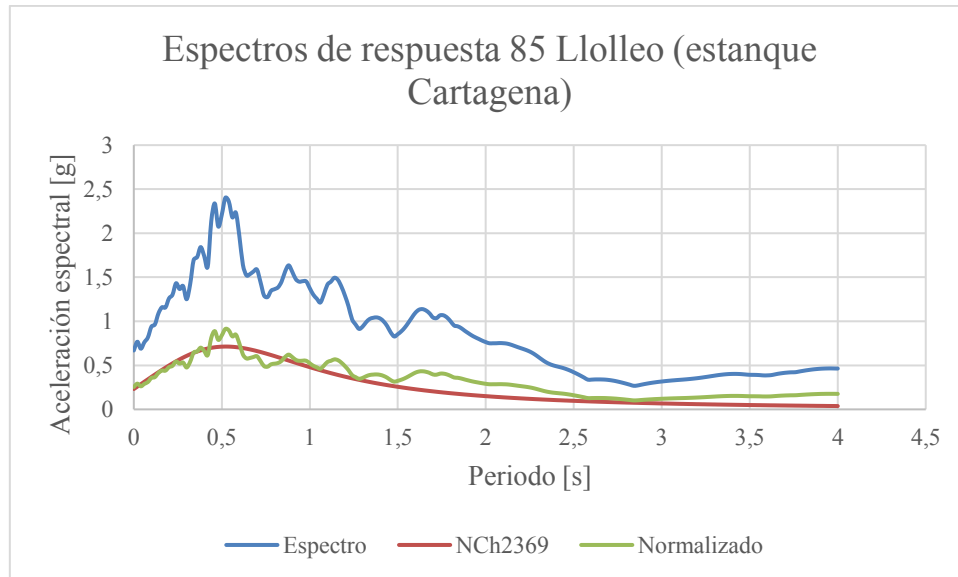


Figura 10-13: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Llolleo para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

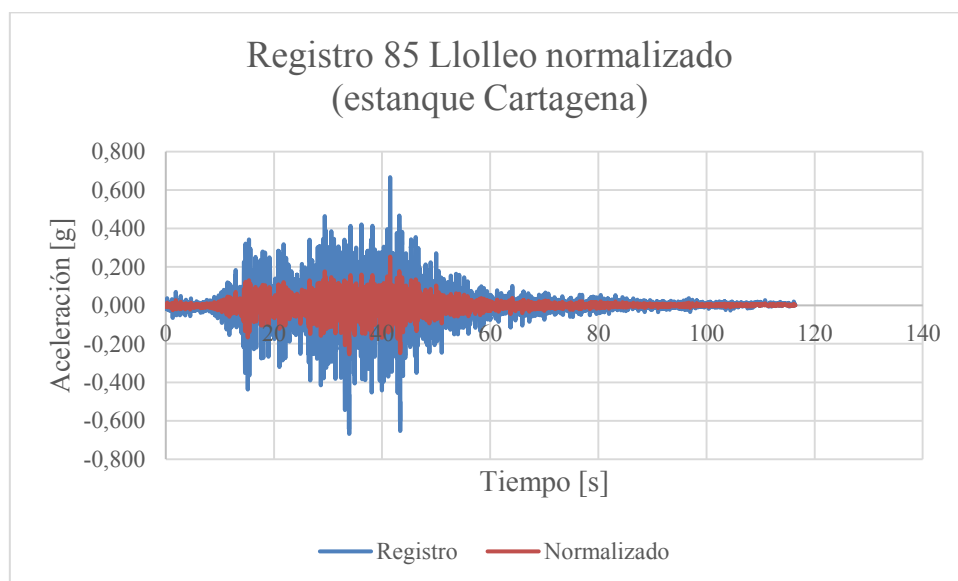


Figura 10-14: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Llolleo para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

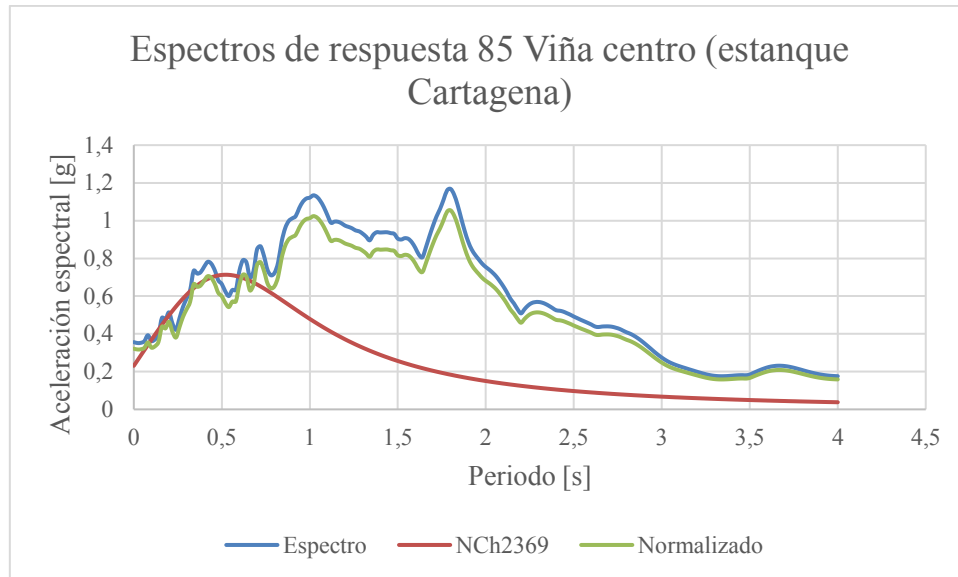


Figura 10-15: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

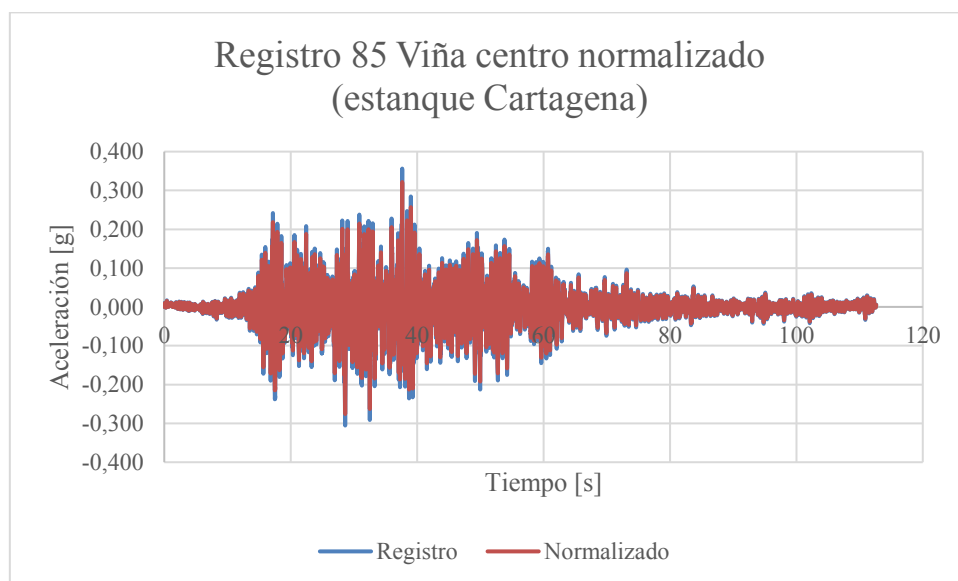


Figura 10-16: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Viña centro para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

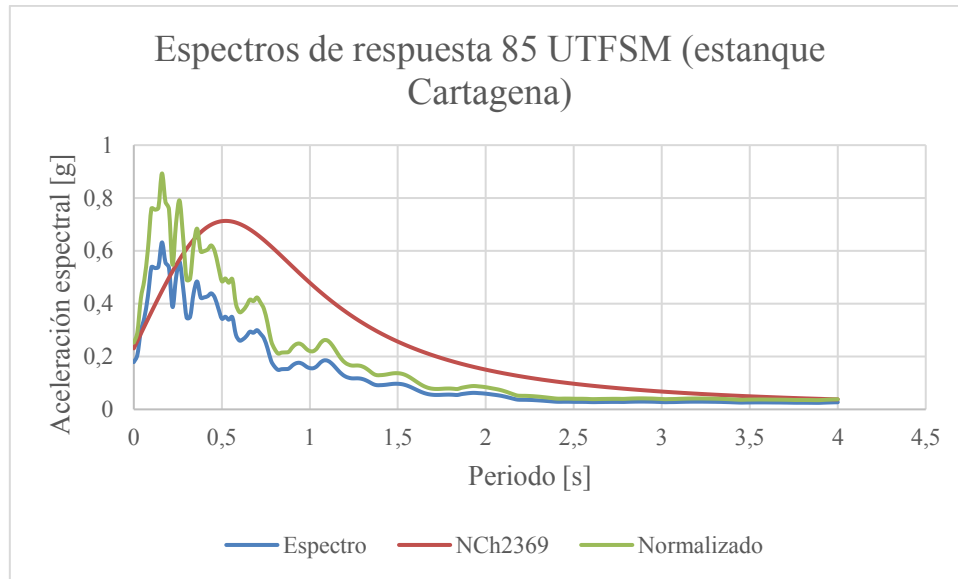


Figura 10-17: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

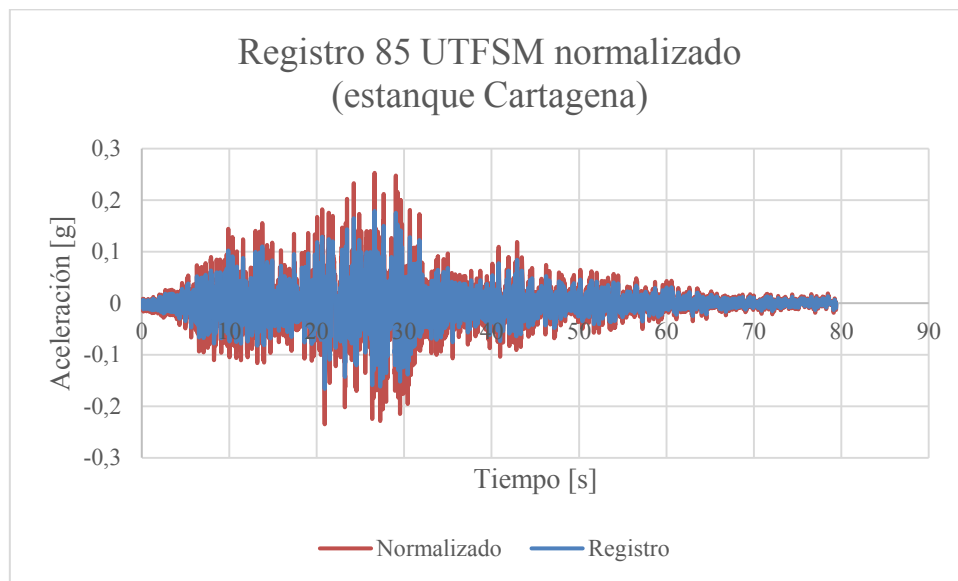


Figura 10-18: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 UTFSM para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

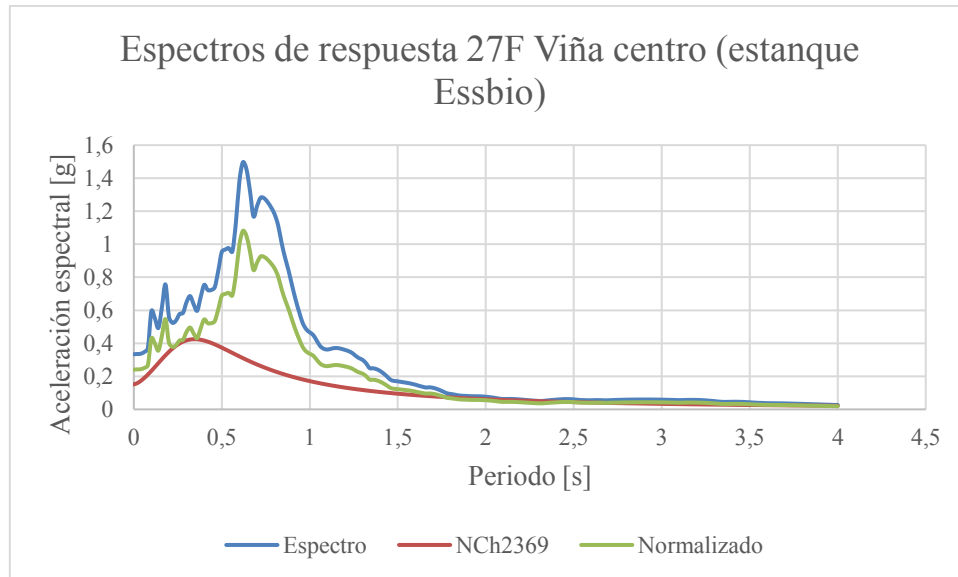


Figura 10-19: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

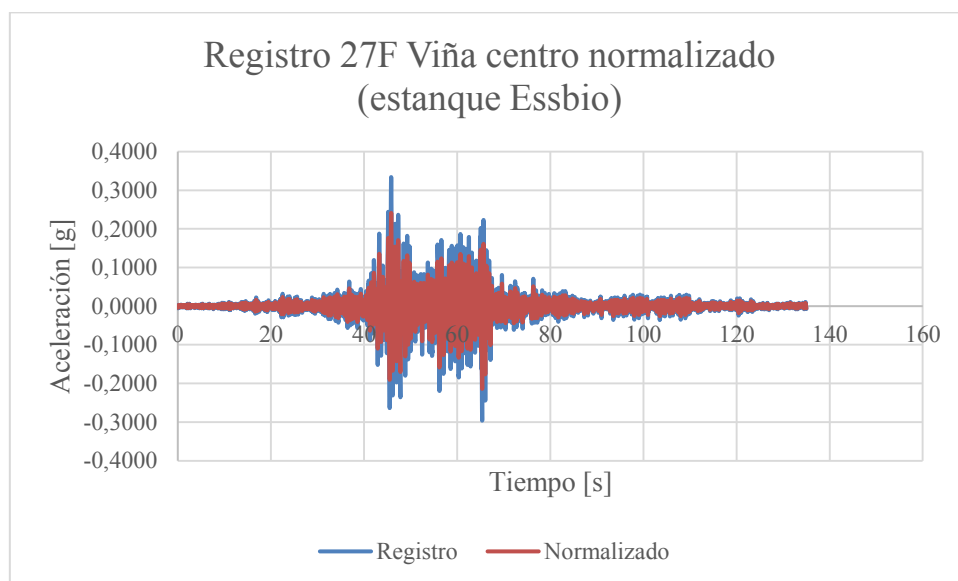


Figura 10-20: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

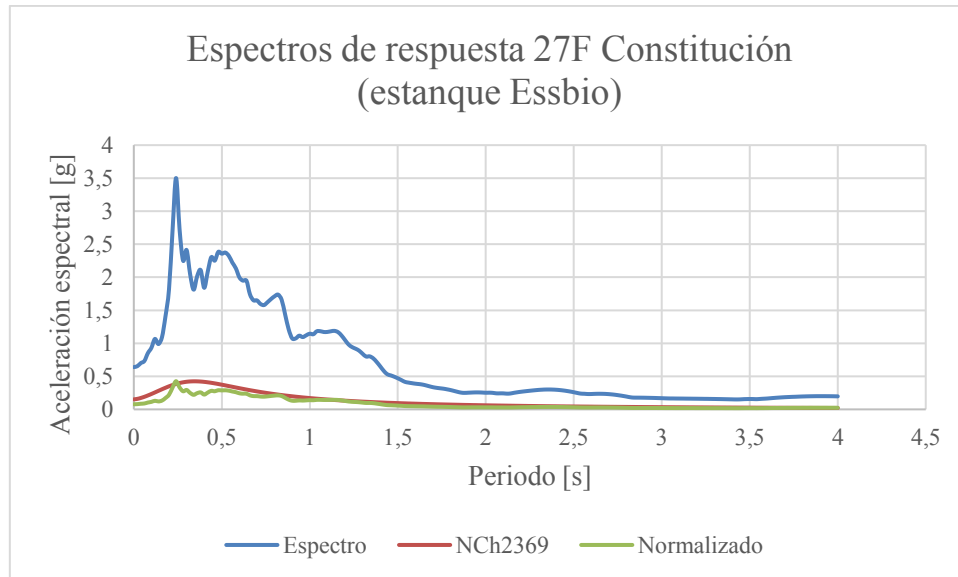


Figura 10-21: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

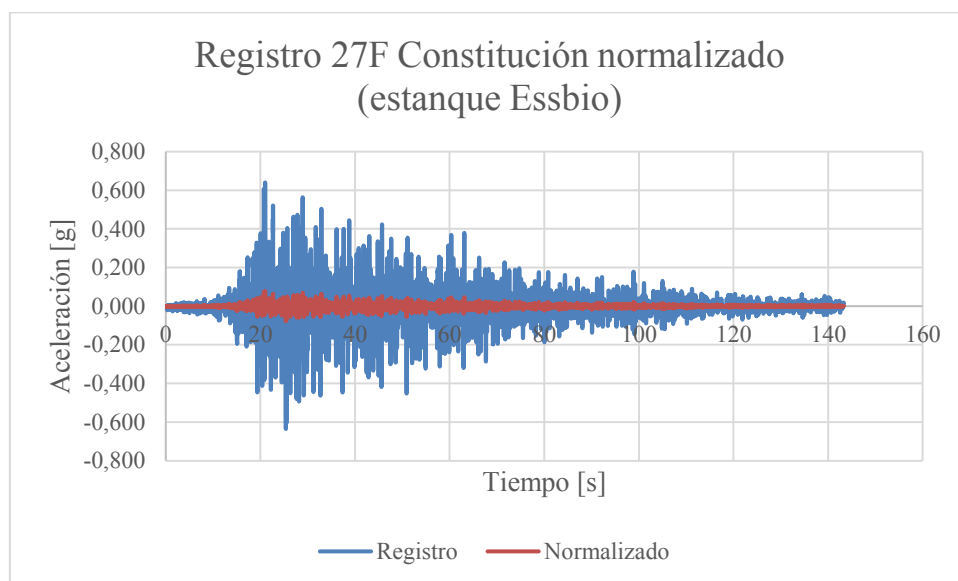


Figura 10-22: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F Constitución para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

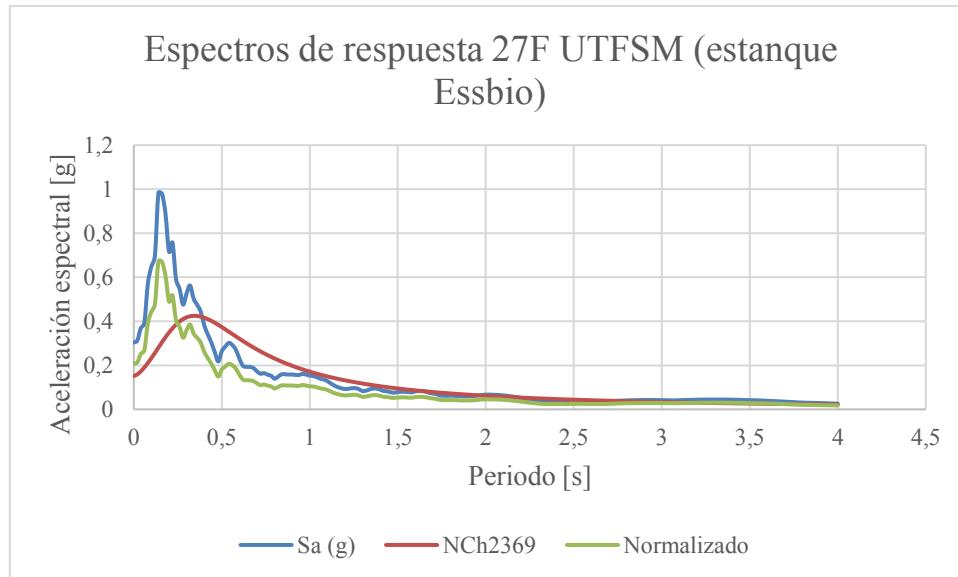


Figura 10-23: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

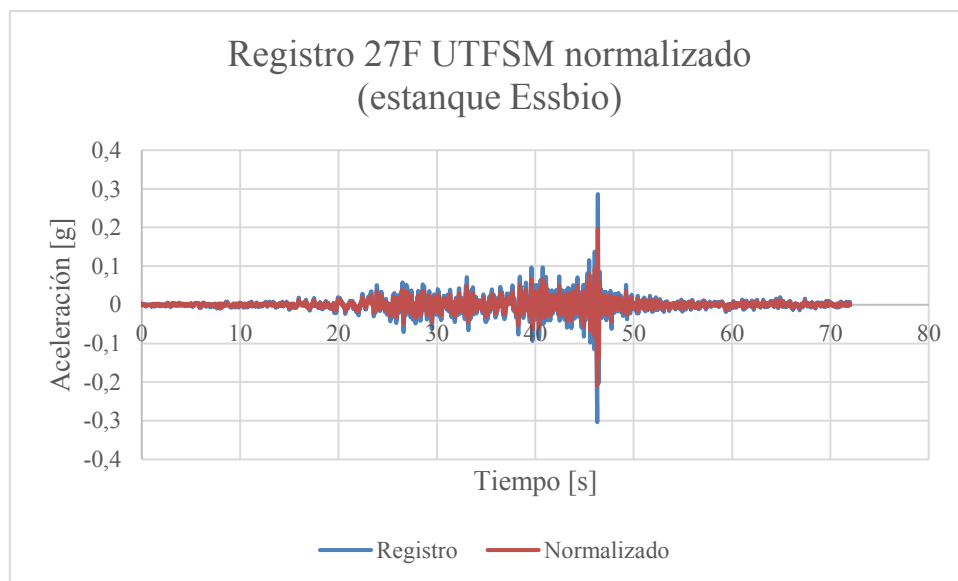


Figura 10-24: Registros sísmicos (original y normalizado) 27F UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

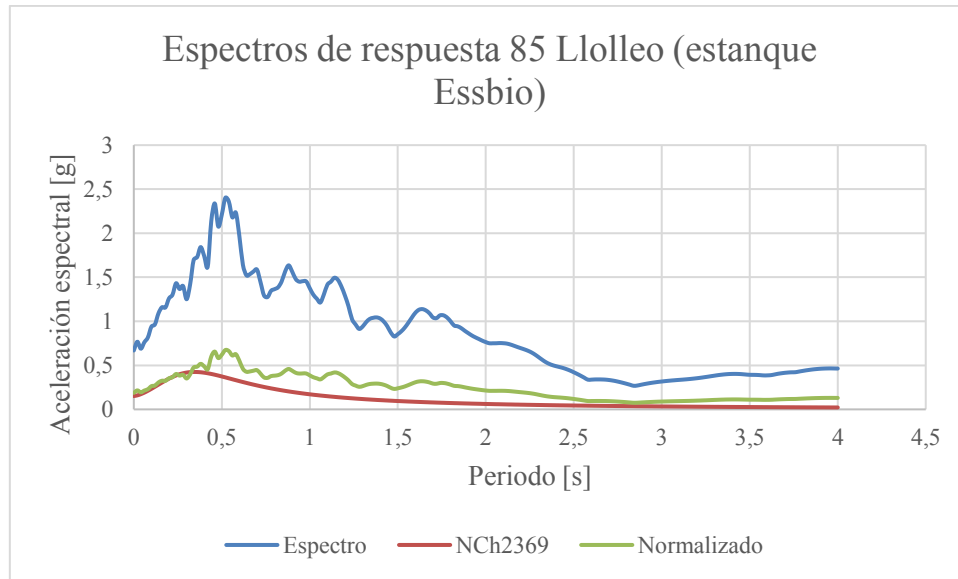


Figura 10-25: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Lollole para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

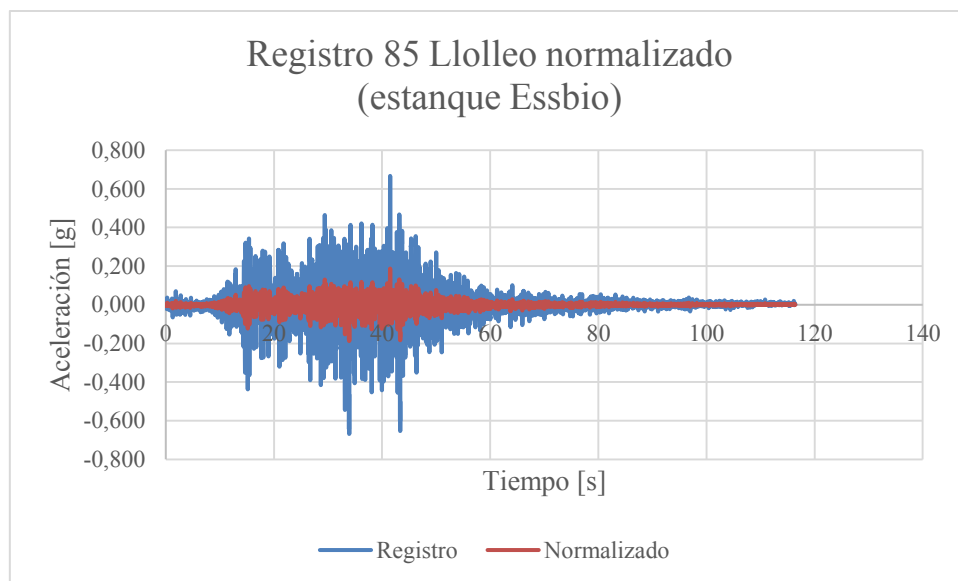


Figura 10-26: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Lollole para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

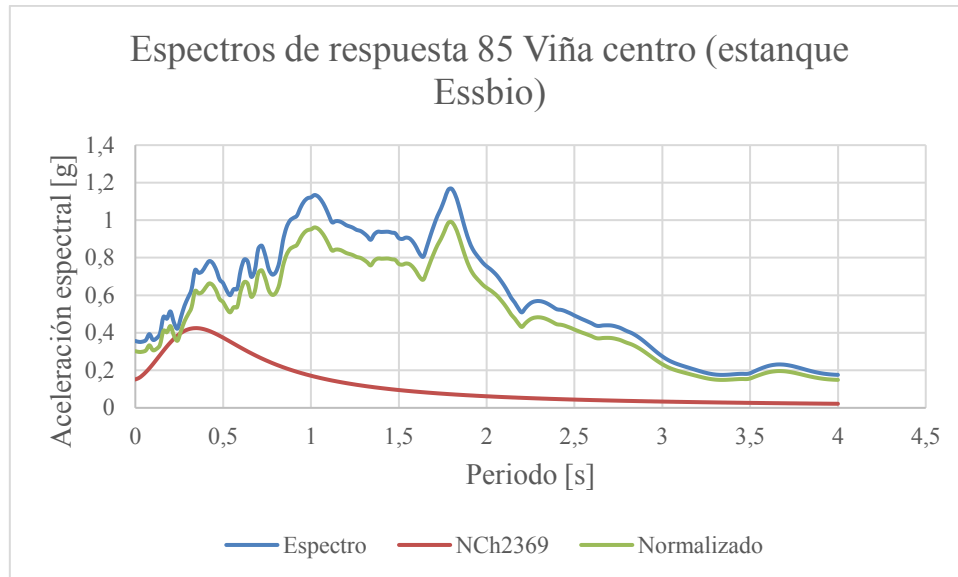


Figura 10-27: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

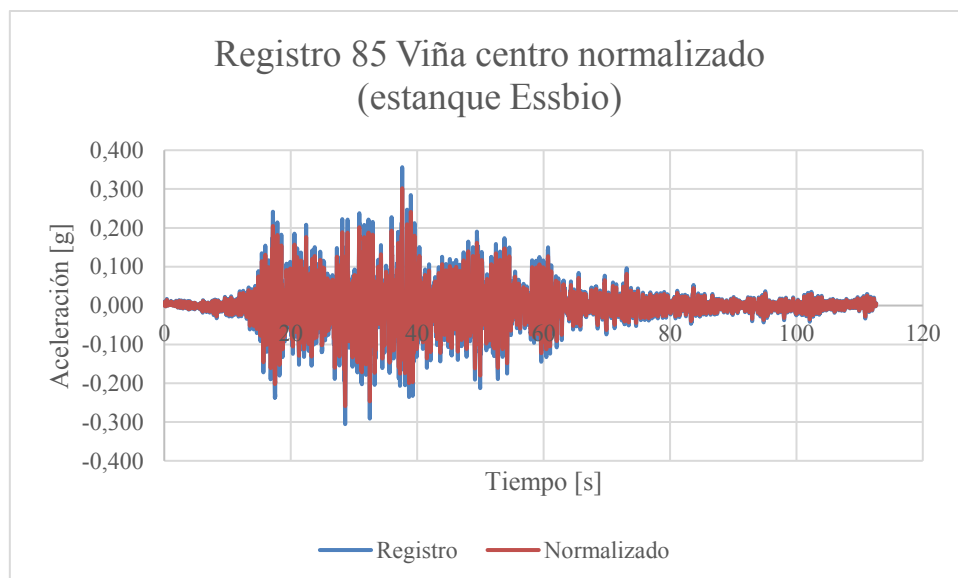


Figura 10-28: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 Viña centro para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

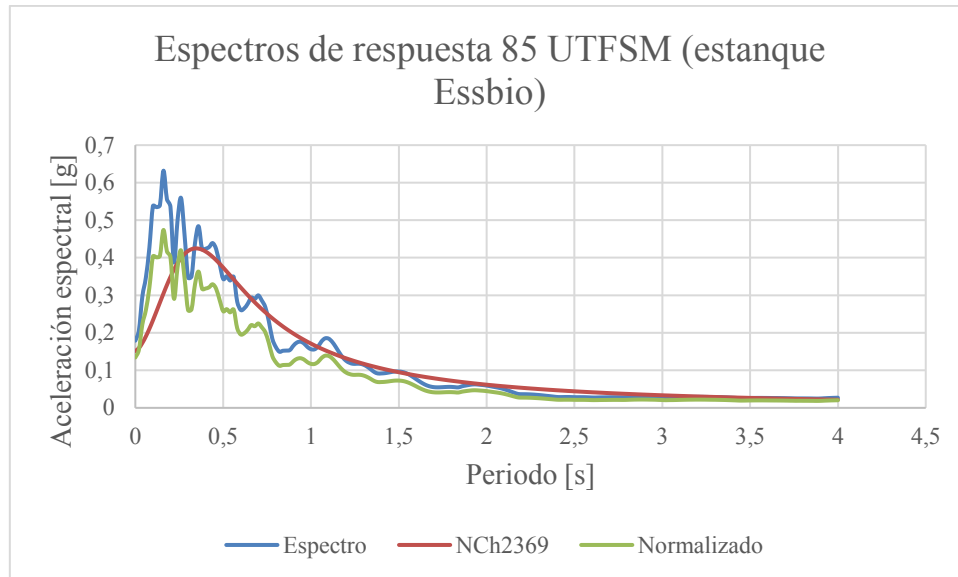


Figura 10-29: Espectros de respuesta (original, NCh2369 y normalizado) 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

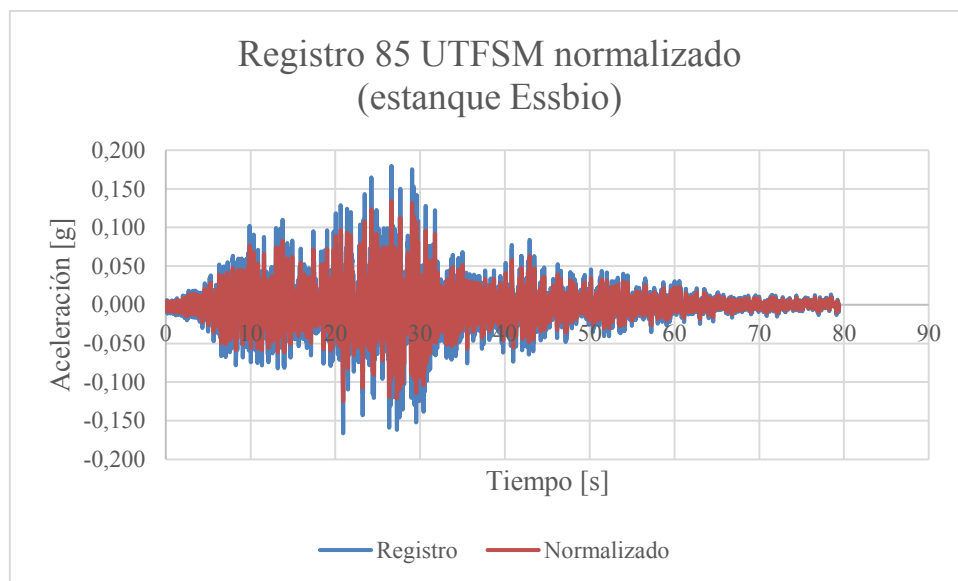


Figura 10-30: Registros sísmicos (original y normalizado) 85 UTFSM para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

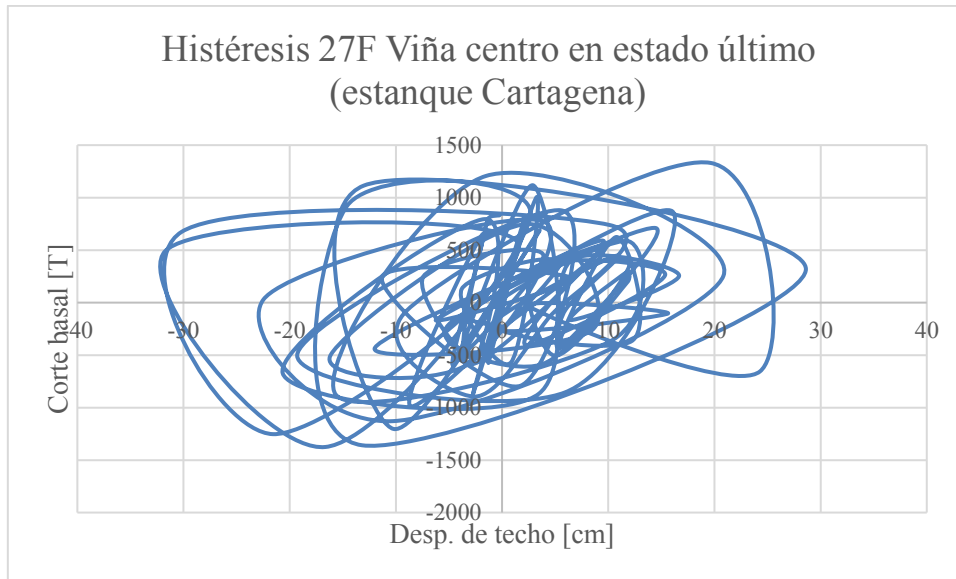


Figura 10-31: Gráfico de histéresis de registro 27F Viña centro en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

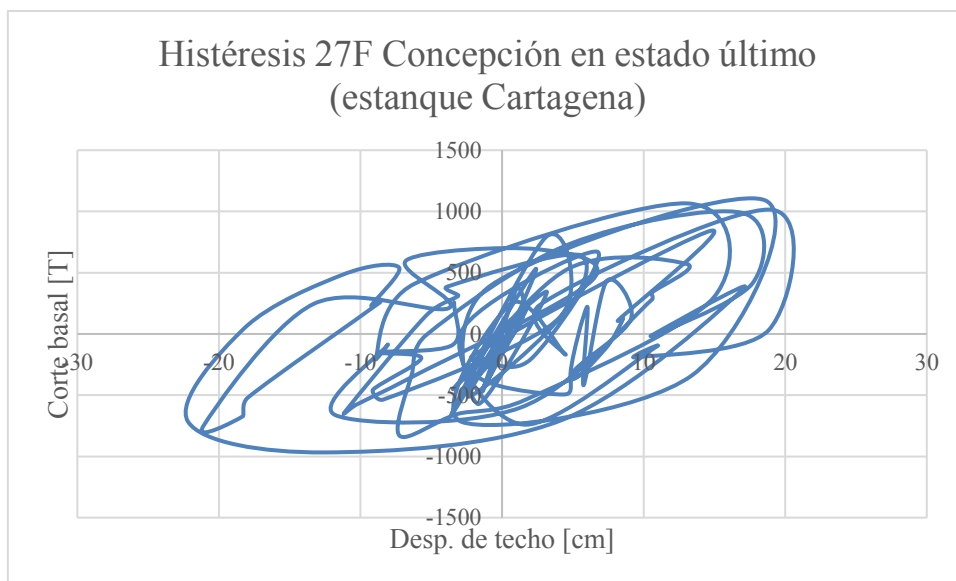


Figura 10-32: Gráfico de histéresis de registro 27F Concepción en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

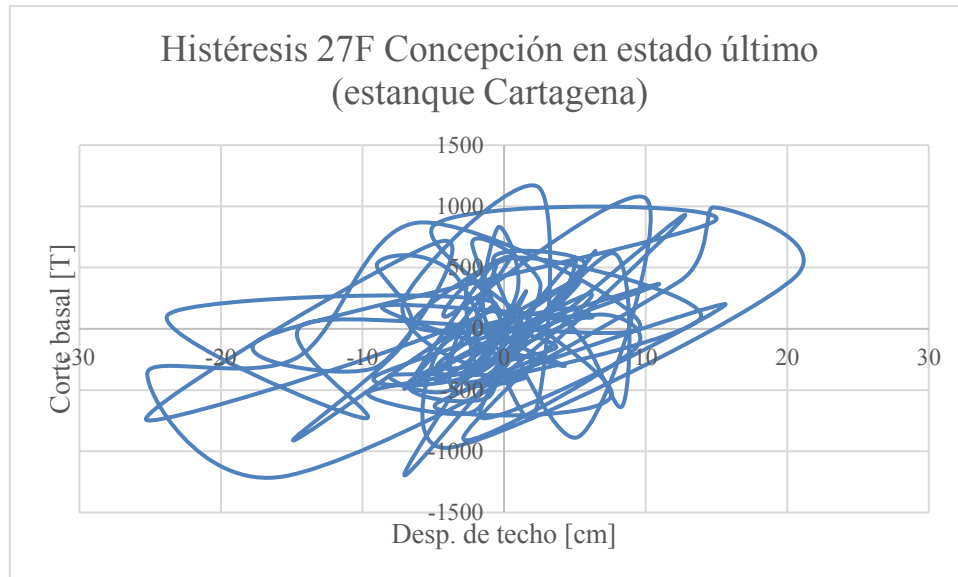


Figura 10-33: Gráfico de histéresis de registro 27F Constitución en estado último para estaque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

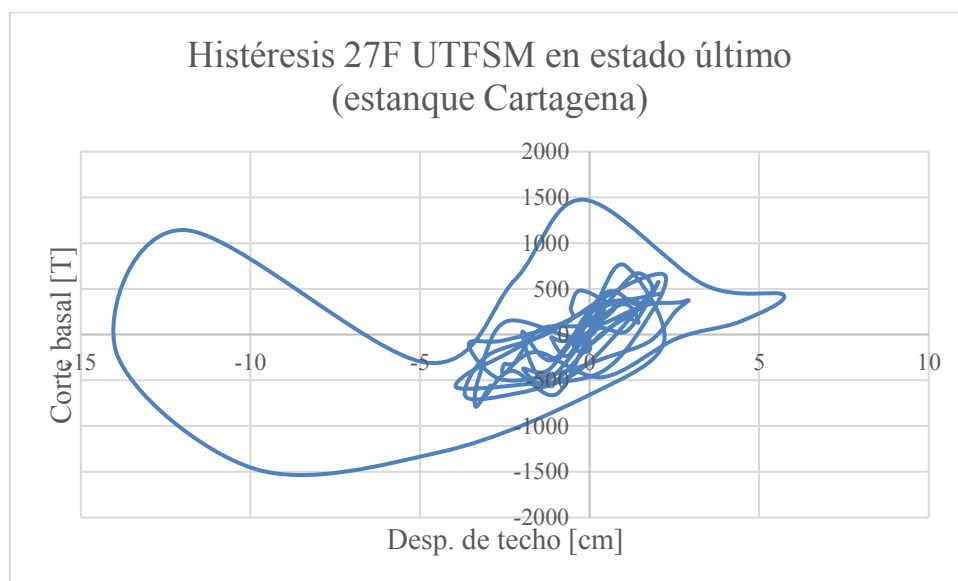


Figura 10-34: Gráfico de histéresis de registro 27F UTFSM en estado último para estaque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

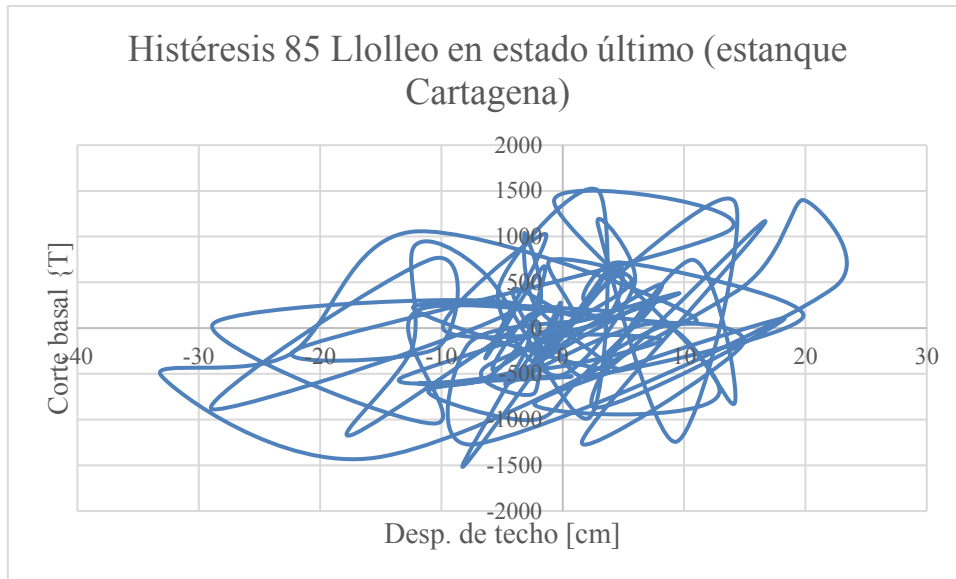


Figura 10-35: Gráfico de histéresis de registro 85 Lollo en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

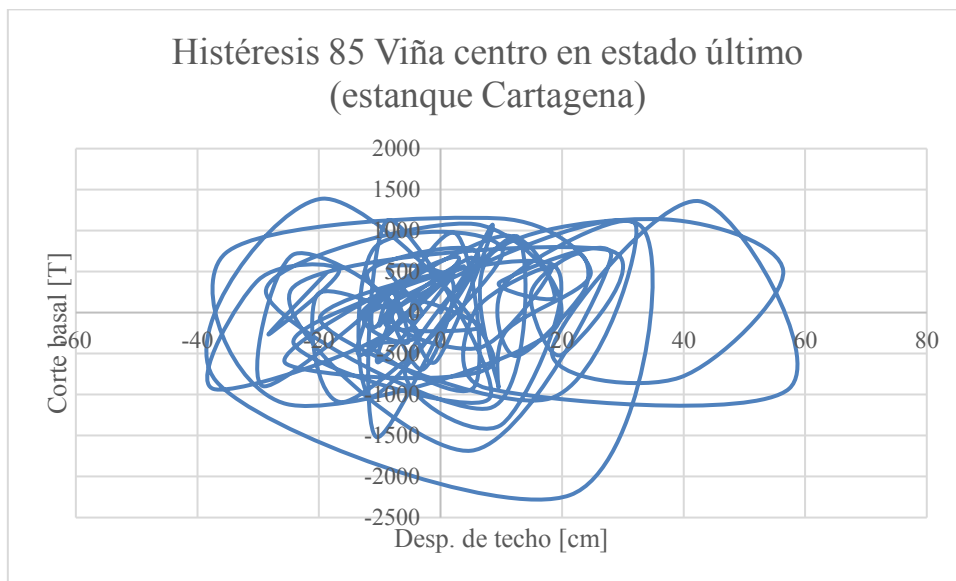


Figura 10-36: Gráfico de histéresis de registro 85 Viña centro en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

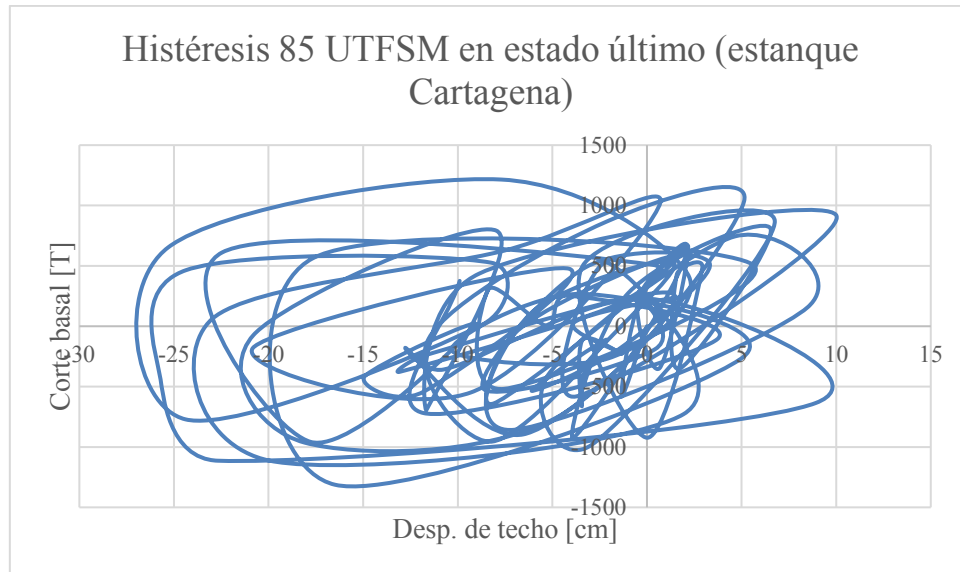


Figura 10-37: Gráfico de histéresis de registro 85 UTFSM en estado último para estanque Cartagena. Fuente: Elaboración propia.

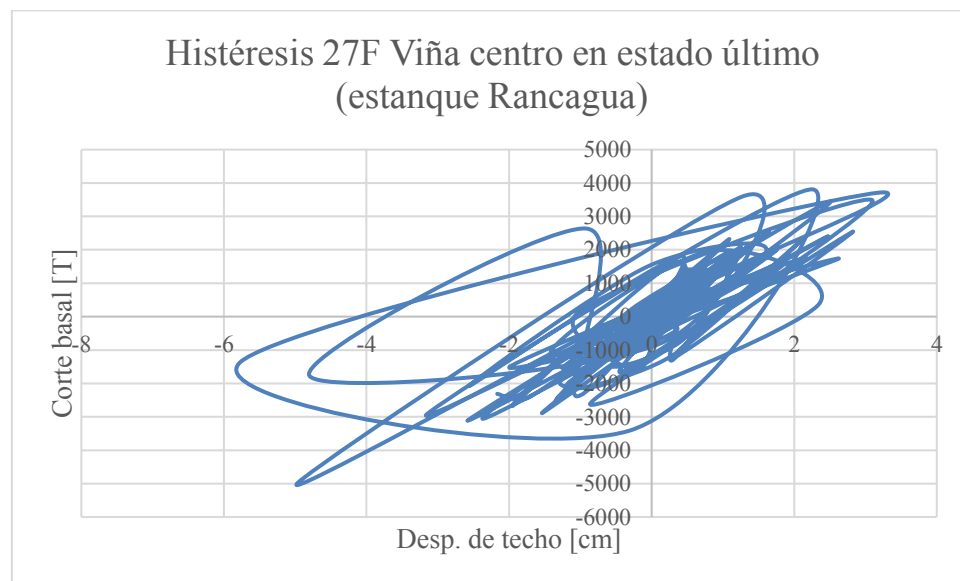


Figura 10-38: Gráfico de histéresis de registro 27F Viña centro en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

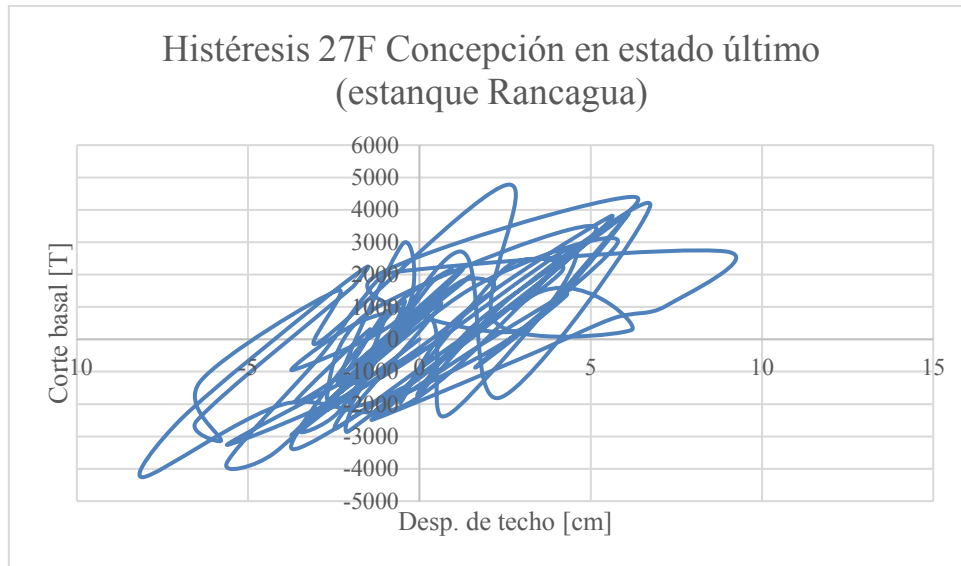


Figura 10-39: Gráfico de histéresis de registro 27F Concepción en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

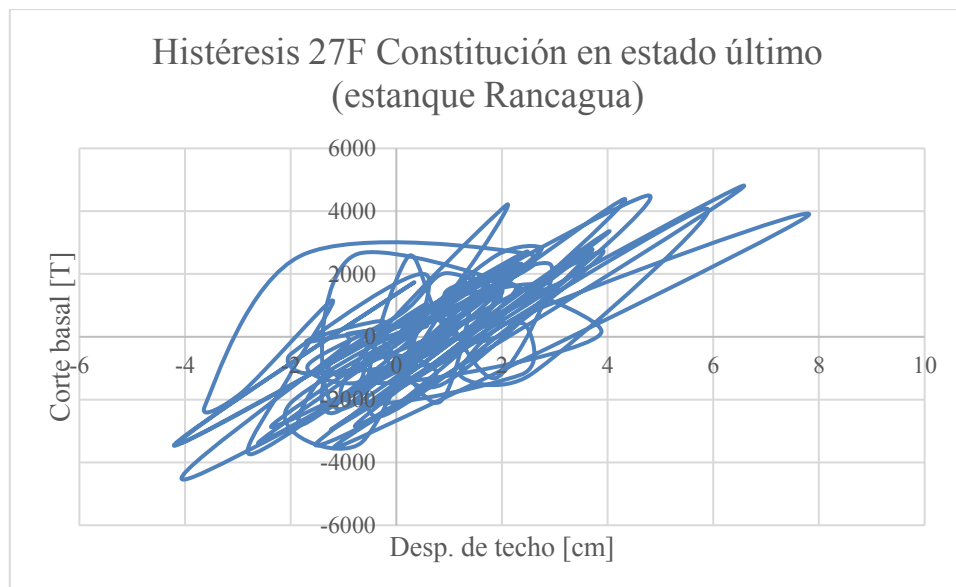


Figura 10-40: Gráfico de histéresis de registro 27F Constitución en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

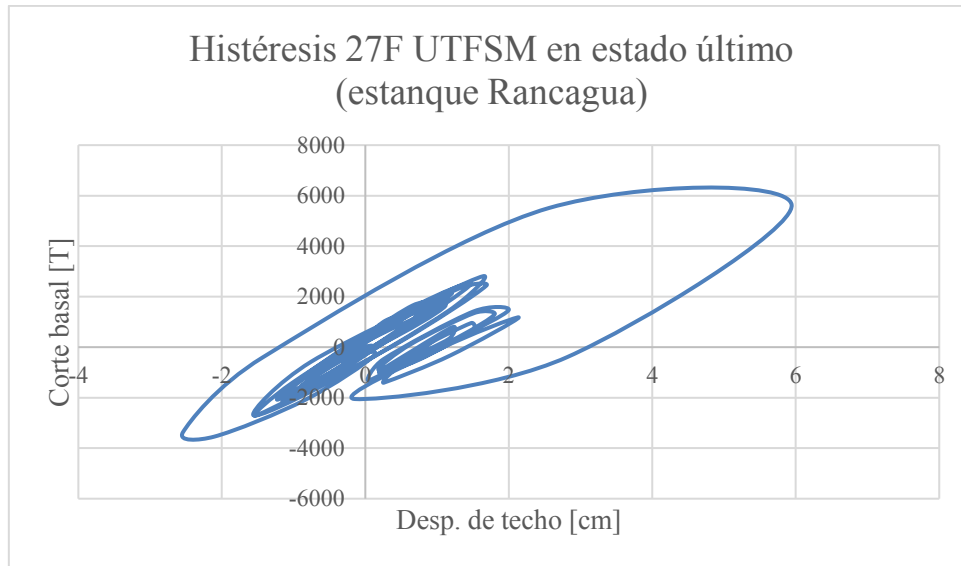


Figura 10-41: Gráfico de histéresis de registro 27F UTFSM en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

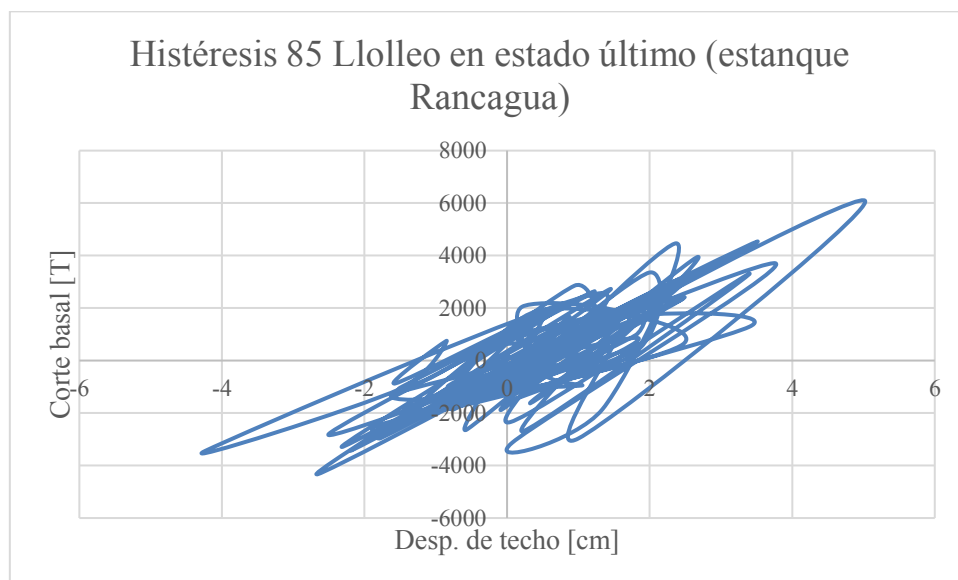


Figura 10-42: Gráfico de histéresis de registro 85 Lollole en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

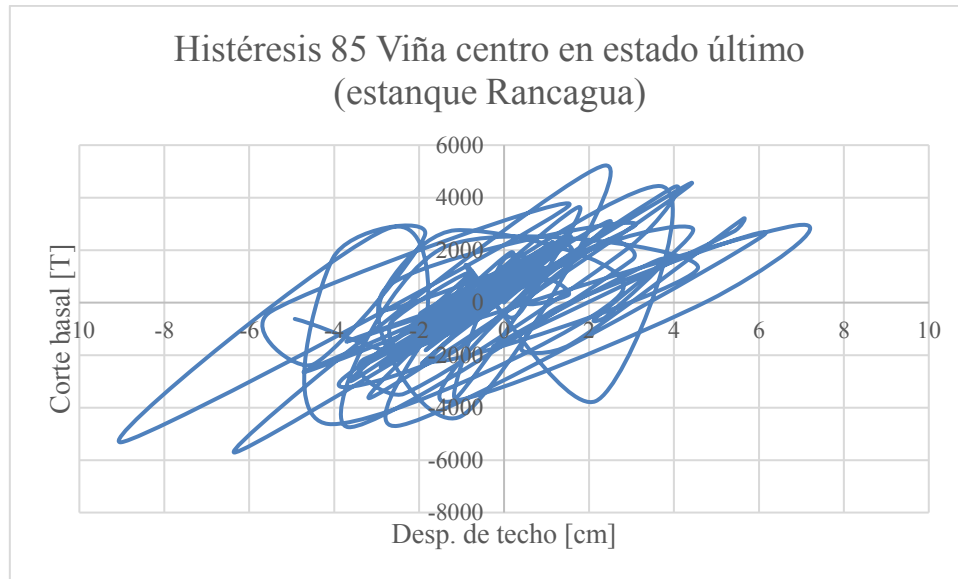


Figura 10-43: Gráfico de histéresis de registro 85 Viña centro en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.

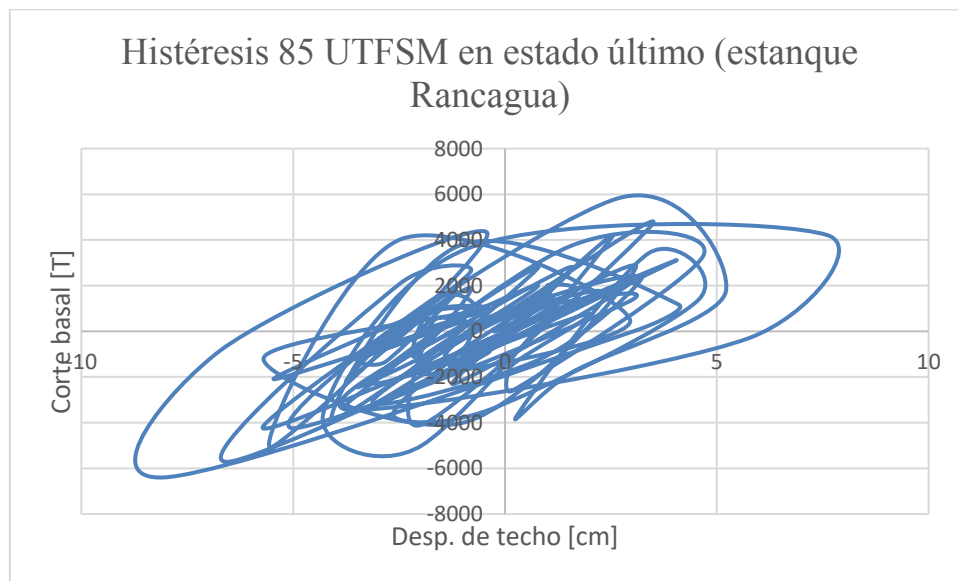


Figura 10-44: Gráfico de histéresis de registro 85 UTFSM en estado último para estanque Rancagua. Fuente: Elaboración propia.