



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA CLASIFICAR Y ESTANDARIZAR  
DAÑO SÍSMICO EN EDIFICIOS HABITACIONALES DE HORMIGÓN  
ARMADO CON SISTEMA DE MUROS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

YANKO ANDRÉS MORALES ALARCÓN

PROFESOR GUÍA

FABIÁN ROJAS BARRALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

LEONARDO MASSONE SANCHEZ

AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil

**POR:** Yanko Morales Alarcón

**FECHA:** 21/09/2020

**PROFESOR GUÍA:** Fabián Rojas Barrales

## MÉTODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA CLASIFICAR Y ESTANDARIZAR DAÑO SÍSMICO EN EDIFICIOS HABITACIONALES DE HORMIGÓN ARMADO CON SISTEMA DE MUROS

En el presente trabajo de título se estudian y analizan los procedimientos para la inspección del estado de edificios habitacionales de hormigón armado después de eventos sísmicos encontrados en la literatura internacional, para luego proponer una metodología de clasificación de daños y evaluación de daños en edificios de hormigón armado que se puedan adoptar en Chile.

Si bien el proceso de inspección de edificios después de un sismo se divide, generalmente, en tres etapas: la inspección visual inmediata de daños, la evaluación detallada de las edificaciones dañadas mediante modelos estructurales y finalmente el proyecto de rehabilitación estructural de la edificación. El presente trabajo está enfocado en la primera de ellas, ya que es en esa etapa donde se encuentra una oportunidad para proponer una estandarización. El objetivo de esta etapa consiste en proteger las vidas humanas y prevenir accidentes.

El alcance de este trabajo es enfocado principalmente a los edificios habitacionales de hormigón armado con un sistema resistente de muros, el cual es el más utilizado en Chile. Este sistema estructural en base a muros, se utilizan en general por la gran rigidez que estas presentan. Sin embargo, esto no significa que con un sismo de media o alta intensidad no puedan ser afectados. Adicionalmente, es importante enfatizar que solo se toman en consideración los daños en elementos estructurales de la edificación.

Para realizar la metodología propuesta se analizan siete metodologías de inspección encontradas en la bibliografía internacional, donde una de estas es la creada por el Ministerio de Obras Públicas de Chile. Adicionalmente se estudia un documento de los Estados Unidos de América (FEMA P154) para analizar las condiciones preexistentes de la edificación.

Finalmente se verifica la metodología aplicando los procedimientos propuestos con edificaciones dañadas en el terremoto del Maule 2010, el cual es uno de los sismos de mayor magnitud que han sufrido estructuras de hormigón armado diseñadas con normas actuales en Chile. Las edificaciones estudiadas corresponden al Edificio Antígona (Viña del mar) y Edificio Torre Bosquemar (San Pedro de la Paz). Para realizar el estudio de los edificios seleccionados se utilizan informes de daños, imágenes y planos de los edificios, con el fin de determinar cuál hubiese sido su evaluación si se procedía con la metodología propuesta.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia. A mis hermanas, a mi madre y padre quienes siempre han sido un ejemplo para mí, tanto como personas y por la pasión, dedicación y esfuerzo con el que trabajan día a día. Gracias a mis padres nunca tuve mayores problemas y pude dedicarme a estudiar sin mayores contratiempos.

Un especial agradecimiento para mi profesor guía, Fabian Rojas, quien ha mostrado una gran motivación al ayudarme con este trabajo de título, siempre dispuesto a resolver mis dudas y tener las reuniones que sean necesarias para que el trabajo resulte lo mejor posible. Adicionalmente debo agradecer al profesor Adolfo Ochoa quien también siempre estuvo dispuesto a asesorarme con las tareas necesarias para titularme.

No puedo dejar de agradecer a mis amigos quienes siempre me han ayudado a distraerme, a alegrarme y desahogarme en mi vida universitaria. En especial quiero destacar a mi amigo Matías Fuentealba, quien pasó por el proceso de titulación un semestre antes que yo y siempre me aconsejó de la mejor manera para llevar a cabo este proceso de manera óptima.

# Tabla de Contenido

1. Introducción .....	1
1.1. Introducción – Motivación.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos .....	2
1.3. Metodología .....	3
1.3. Resultados Esperados .....	3
2. Marco Teórico .....	4
2.1. Sismos .....	4
2.2. Patologías de la construcción.....	5
2.3. Sistema de muros en H.A.....	8
2.3.1. Definiciones generales .....	8
2.3.2. Edificio habitacional común en Chile .....	11
2.3.3. Daños y fallas comunes debido a la acción sísmica.....	13
3. Clasificación metodologías y protocolos disponibles en la literatura internacional para la evaluación de daños en estructuras.....	20
3.1. Evaluación utilizando teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales. [2].	20
3.2. Guía técnica Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta. [7].....	26
3.3. Norma para evaluación del nivel de daño por sismo en estructuras y guía técnica de rehabilitación. - Ministerio de Construcción del Japón, 2001 [8] .....	30
3.4. Revisión de la Guía de Evaluación de Daño Post-Sismo de edificaciones de hormigón armado en Japón. [14] .....	36
3.5. Evaluación de Daño Estructural Post-Sismo en Edificaciones: Estado del Arte [5] .....	43
3.6. Guía Técnica para Inspección de Edificaciones Después de un Sismo [15] .....	46
3.7. Ficha de Evaluación de Daños para Inspección Rápida de Edificios Públicos – Chile, 2015 [16].....	50
3.8. Resumen metodologías analizadas .....	55
4. Metodología de inspección propuesta para estandarizar el daño en edificaciones de muros de H.A. ....	56
4.1. Catalogo y caracterización de los daños según tipología .....	56
4.1.1. Niveles de daño .....	56
4.1.2. Respuesta dúctil de muros a flexión.....	58
4.1.3. Muros sometidos a flexión y corte .....	59
4.1.4. Muros sometidos a flexo – compresión.....	61

4.1.5. Muros sometidos a corte .....	63
4.1.6. Vigas sometidas a flexión .....	66
4.2. Clasificación de habitabilidad del edificio.....	67
4.3. Incorporación de factores de regularidad estructural.....	70
4.4. Metodología recomendada.....	77
5. Ejemplificación de la metodología propuesta mediante casos reales después del Terremoto del Maule 2010.....	80
5.1. Edificio Antígona.....	81
5.1.1. Características generales Edificio Antígona .....	81
5.1.2. Análisis regularidad estructural del edificio.....	83
5.1.3. Análisis de daños en el edificio.....	87
5.1.4. Resumen daños y evaluación habitabilidad Edificio Antígona.....	102
5.2. Edificio Torre Bosquemar .....	106
5.2.1. Características generales Torre Bosquemar .....	106
5.2.2. Análisis regularidad estructural Torre Bosquemar.....	109
5.2.3. Análisis de daños Torre Bosquemar .....	114
5.2.4. Resumen de daños y evaluación Torre Bosquemar .....	125
6. Conclusiones y Comentarios .....	128
Bibliografía.....	130
Anexo A – Manual de inspección después de un sismo.....	132
Anexo B – Planos Edificio Antígona .....	140
Anexo C – Planos Torre Bosquemar .....	149

## Índice de Tablas

Tabla 1: Esfuerzos comunes presentes en elementos estructurales. [9] .....	10
Tabla 2: Irregularidades en elevación no recomendadas [12] .....	18
Tabla 3: Evaluación daños y determinación de cómo proceder. ....	32
Tabla 4: Criterios evaluación desplome y asentamiento estructural .....	33
Tabla 5: Clasificación de cuantía de daños en la estructura. ....	34
Tabla 6: niveles de daños para elemento estructurales.....	35
Tabla 7: Valores $D_i$ en base a los valores de A y $B_i$ .....	35
Tabla 8: Definición de clases de daños en elementos estructurales .....	39
Tabla 9: Capacidad sísmica de reducción original .....	41
Tabla 10: Capacidad sísmica de reducción actualizada.....	42
Tabla 11: Clasificación del edificio según sus valores de R-index .....	42
Tabla 12: Parámetros para clasificar las metodologías .....	44
Tabla 13: Comparación entre métodos cuantitativos presentes en el documento .....	45
Tabla 14: Variables estructurales a evaluar según el sistema.....	48
Tabla 15: Porcentaje de daño en la edificación .....	49
Tabla 16: Criterios para evaluar regularidad en planta.....	50
Tabla 17: Inspección 1, inspección general desde el exterior .....	51
Tabla 18: Contabilización del daño por rango y tipo de elemento estructural .....	52
Tabla 19: Inspección 2, daño estructural .....	52
Tabla 20: Inspección 3, daños no estructurales .....	53
Tabla 21: Resumen metodologías analizadas y comentarios .....	55
Tabla 22: Descripción niveles de daño [8] .....	57
Tabla 23: Habitabilidad de la estructura.....	68
Tabla 24: Habitabilidad de la estructura según porcentaje de nivel de daño .....	68
Tabla 25: Habitabilidad según la cuantía de daño D.....	69
Tabla 26: Calculo valor $D_i$ en base a los valores A y $B_i$ .....	70
Tabla 27: Criterios para evaluar regularidad en altura o vertical. ....	74
Tabla 28: Criterios para evaluar regularidad en planta.....	76
Tabla 29: Recomendaciones generales para terreno.....	77
Tabla 30: Resumen daños de mayor magnitud primer piso y primer subterráneo .....	104
Tabla 31: Estimación porcentaje de daños Edificio Antígona .....	105
Tabla 32: Cálculo cuantía de daño Edificio Antígona.....	105
Tabla 33: Clasificación habitabilidad Edificio Antígona .....	106
Tabla 34: Dimensiones elementos estructurales [20].....	109
Tabla 35: Resumen muros dañados primer piso.....	127
Tabla 36: Resultado porcentaje de daños .....	127
Tabla 37: Resultados método de cuantía de daño.....	127
Tabla 38: Clasificación habitabilidad edificio Torre Bosquemar.....	128
Tabla 39: Niveles de daño en elementos estructurales .....	133
Tabla 40: Habitabilidad para el método de porcentajes de daño .....	134
Tabla 41: Habitabilidad para el método de cuantía de daño.....	134
Tabla 42: Ecuaciones para el cálculo del valor D de cuantía de daño.....	135

Tabla 43: Factor de regularidad vertical.....	135
Tabla 44: Factor de regularidad en planta .....	136
Tabla 45: Planilla resumen edificio y datos del inspector .....	137
Tabla 46: Planilla inspección exterior del edificio .....	137
Tabla 47: Planilla inspección y clasificación de daños y habitabilidad en el edificio.....	138
Tabla 48: Habitabilidad incluyendo los factores de modificación por regularidad estructural...	138
Tabla 49: Planilla riesgos presentes en elementos no estructurales .....	139

## Índice de Figuras

Figura 1: Esquema zona subducción y tipos de sismos. fuente: GF4001 – Sismología, 2018, FCFM .....	4
Figura 2: Causas y efectos de las principales manifestaciones patológicas estructurales [7] .....	7
Figura 3: Gráfico tensión vs deformación estándar Fuente: CI3202 Mecánica de Sólidos, 2016, FCFM .....	9
Figura 4: Esquema falla por cortante en edificios en base a muros Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM .....	12
Figura 5: Posibles modos de fallas en muros [7].....	12
Figura 6: Fuerza de corte por piso en un sismo Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM .....	13
Figura 7: Configuración estructural primer piso y primer subterráneo [10] .....	13
Figura 8: Circulo de Mohr, diagrama de esfuerzos internos con corte fuente: CI3202 – Mecánica de Sólidos 2016, FCFM.....	14
Figura 9: Fallas en muros debido al corte [11].....	14
Figura 10: Fallas en muro debido a flexo-compresión [11] .....	15
Figura 11: Efecto de muros transversales. Edificio Sol oriente, Santiago [11] .....	15
Figura 12: Falla en muro T [10] .....	16
Figura 13: Falla por deslizamiento en la junta de construcción. Edificio obispo Salas, Concepción [11] .....	16
Figura 14: Posibles modos de falla por pandeo Fuente: <a href="http://cadsolutions.pe/articulos/la-falla-pandeo-analisis-solidworks-simulation">cadsolutions.pe/articulos/la-falla-pandeo-analisis-solidworks-simulation</a> .....	17
Figura 15: Ejemplos modelo de cálculo para irregularidades verticales Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM .....	19
Figura 16: Áreas de mayor tensión con irregularidades verticales Fuente: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings, ATC-20.....	19
Figura 17: Estructura de la red neuronal [2].....	22
Figura 18: Estructura de la red neuronal artificial propuesta. [2].....	23
Figura 19: Diagrama de flujo del proceso de evaluación del daño [2].....	25
Figura 20: Estado general de la edificación [7].....	28
Figura 21: Daños en elementos estructurales [7].....	28
Figura 22: Daños en elementos no estructurales [7].....	29
Figura 23: Problemas Geotécnicos [7] .....	29

Figura 24 Diagrama de evaluación de daños y rehabilitación [14] .....	38
Figura 25: Relación fuerza-desplazamiento lateral y clases de daños para elementos dúctiles [14] .....	39
Figura 26: Relación fuerza-desplazamiento lateral y clases de daños para elementos frágiles [14] .....	40
Figura 27: Factor de reducción sísmico [14] .....	41
Figura 28: Recopilación de estudios realizados [5].....	44
Figura 29: Parámetros para clasificar las metodologías. [5] .....	45
Figura 30: Diagrama muro sometido a flexión dúctil con daño nivel II [7].....	58
Figura 31: Diagrama muro sometido a flexión con respuesta dúctil y daño nivel III [7] .....	59
Figura 32: Esquema de daño típico ocasionado por flexión con tracción diagonal, nivel I [7] ....	60
Figura 33: Esquema de daño nivel IV ocasionado por flexión con tracción diagonal [7] .....	60
Figura 34: Esquema muro daño nivel IV por flexo-compresión con aplastamiento del alma en el centro [7].....	61
Figura 35: Esquema muro con daño nivel IV con aplastamiento del alma en la base [7].....	62
Figura 36: Esquema muro daño nivel IV con aplastamiento en los bordes [7].....	62
Figura 37: daño nivel 5 en muros ocasionado por flexo-compresión [10].....	63
Figura 38: Daño nivel V en muro producido flexo-compresión [11].....	63
Figura 39: Daño nivel II en muro por corte Fuente: Foto tomada en terreno, Edificio Av. Del Valle 534, Huechuraba .....	64
Figura 40: Daño nivel III en muro por corte [14].....	64
Figura 41: Daño nivel IV por corte en muro Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM .....	65
Figura 42: Daño nivel V por corte en columna [11].....	65
Figura 43: Fisura vertical en viga sometida a flexión [7].....	66
Figura 44: Daño nivel III en viga producido por flexión Ensayo viga a flexión UCLA, 2005 .....	66
Figura 45: Edificio en terreno inclinado (1) [15] .....	72
Figura 46: Edificio en terreno inclinado (2) [4] .....	72
Figura 47: Ejemplos piso débil [15] .....	72
Figura 48: Variación ubicación de sistema sismo resistente (piso inferior con más área) [4] .....	72
Figura 49: Variación ubicación sistema sismo resistente (Piso inferior con menor área) [4] .....	72
Figura 50: Ejemplo columna corta (1) [4].....	73
Figura 51: Ejemplo columna corta (2) [4] .....	73
Figura 52: Discontinuidad en nivel de piso [4] .....	73
Figura 53: Discontinuidad en muros de rigidez [15].....	73
Figura 54: Ejemplo de torsión. Fuente: Fundamentos para la mitigación de Desastres en Establecimientos de Salud (OPS; 2004).....	74
Figura 55: Ejemplo sistema estructural no paralelo [4].....	75
Figura 56: Edificaciones con retrocesos excesivos de las esquinas [4].....	75
Figura 57: Edificación con diafragma abierto. [4] .....	76
Figura 58: Diagrama de pasos recomendados a seguir .....	79
Figura 59: Ubicación general del edificio. Fuente: maps.google.cl .....	82
Figura 60: Vista en planta del Edificio Antígona [18] .....	82
Figura 61: Vista general del edificio [18].....	83
Figura 62: Planta 1° Piso eje N.....	85

Figura 63: Planta 2° piso eje N.....	85
Figura 64: Planta 1° piso eje A.....	86
Figura 65: Planta 2° piso eje A.....	86
Figura 66: Planta 1° piso eje B y eje H .....	86
Figura 67: Planta 2° piso eje B y eje H .....	86
Figura 68: Corte Eje E, discontinuidad de machones [18] .....	87
Figura 69: Daños en el eje E vistos desde el exterior (1) Fuente: Fotos inspección en terreno ....	88
Figura 70: Daños en el eje E vistos desde el exterior (2) Fuente: Fotos inspección en terreno ....	88
Figura 71: Fachada nororiental (1) Fuente: Fotos inspección en terreno .....	89
Figura 72: Fachada nororiental (2) Fuente: Fotos inspección en terreno .....	90
Figura 73: Ubicación muro dañado primer piso eje 16 [18] .....	91
Figura 74: Vista lejana muro dañado eje 16 Fuente: Fotos inspección en terreno.....	91
Figura 75: Vista cercana muro dañado eje 16 Fuente: Fotos inspección en terreno .....	91
Figura 76: Refuerzos en muro dañado eje 16 [17].....	92
Figura 77: Fisuras en estacionamiento primer piso (1) fuente: Fotos inspección en terreno .....	93
Figura 78: Fisuras estacionamiento primer piso (2) Fuente: Fotos inspección en terreno .....	93
Figura 79: Desprendimiento de hormigón en muros estacionamiento primer piso. Fuente: Fotos inspección en terreno .....	93
Figura 80: Ubicación muro dañado eje 14, primer subterráneo [18].....	94
Figura 81: Vista general muro dañado eje 14, primer subterráneo [17] .....	95
Figura 82: Zona más dañada muro eje 14, primer subterráneo [17].....	95
Figura 83: Daño muro eje 14, primer piso [18] .....	96
Figura 84: Ubicación muro sección L eje 16/B, primer subterráneo [18].....	96
Figura 85: Daño muro eje 16/B primer subterráneo [18] .....	97
Figura 86: Daño muro eje 16/B primer subterráneo. [17] .....	97
Figura 87: Daño eje E fachada norte, falla por corte [18] .....	98
Figura 88: Plano conexión viga-machón [18] .....	99
Figura 89: Daño eje K (1) [18] .....	99
Figura 90: Daño eje K (2) [17] .....	100
Figura 91: Ubicación losas con efecto dintel [18].....	101
Figura 92: Daño en losas eje H Fuente: Fotos inspección en terreno .....	102
Figura 93: Plano primer subterráneo con muros dañados .....	103
Figura 94: Plano primer piso con muros dañados .....	104
Figura 95: Ubicación Torre Bosquemar [21] .....	107
Figura 96: Vista Torre Bosquemar desde el este [21] .....	108
Figura 97: Vista Torre Bosquemar desde el oeste [21] .....	108
Figura 98: Vista planta segundo piso y vista modelo 3D ETABS [20].....	109
Figura 99: Esquema losa fundación [20] .....	110
Figura 100: Sección de la elevación eje L.....	111
Figura 101: Sección de la elevación eje K .....	111
Figura 102: Sección superior elevación eje K.....	111
Figura 103: Sección elevación eje 15 .....	112
Figura 104: Sección elevación eje 19 .....	113
Figura 105: Sección elevación eje 22 .....	113
Figura 106: Imagen satelital que muestra los dos edificios [22] .....	114

Figura 107: Asentamiento del suelo en la cara mirando al océano [22].....	115
Figura 108: Asentamiento del suelo [22] .....	115
Figura 109: Daños generales apreciados desde el exterior [21] .....	116
Figura 110: Daño eje 15 [21].....	118
Figura 111: Daños en el eje 22 [21] .....	118
Figura 112: Daño eje 22 en el primer piso Fuente: (a) [21]; (b) fotos inspección en terreno ....	118
Figura 113: Daño eje 22 en el subterráneo Fuente: Fotos inspección en terreno .....	119
Figura 114: Muro dañado eje 19 [21].....	120
Figura 115: Ubicación muro dañado eje O. Fuente: Planos estructurales Torre Bosquemar.....	121
Figura 116: Muro dañado eje O [22] .....	121
Figura 117: Ubicación daños en eje L [21] .....	122
Figura 118: Daños eje L en el primer piso Fuente: (a) [22]; (b) y (c) [21]; (d) fotos inspección en terreno .....	123
Figura 119: Ejemplo de daños eje L en segundo piso [21] .....	123
Figura 120: Daño en losas debido a puertas o aberturas .....	124
Figura 121: Daño en losas de forma paralela al pasillo.....	125
Figura 122: Daños en el gimnasio .....	125
Figura 123: Plano en planta primer piso con muros dañados marcados .....	126
Figura 124: Planta fundaciones .....	140
Figura 125: Planta subterráneo 2 .....	141
Figura 126: Planta subterráneo 1 .....	142
Figura 127: Planta estructura 1° piso.....	143
Figura 128: Planta estructura 2° piso.....	144
Figura 129: Planta estructura 3° al 5° piso .....	145
Figura 130: Planta estructura 6° piso.....	146
Figura 131: Planta estructura 7° al 15° piso .....	147
Figura 132: Planta estructura 16° piso.....	148
Figura 133: Planta losa fundaciones .....	149
Figura 134: Planta estructura subterráneo .....	150
Figura 135: Planta estructura primer piso .....	151
Figura 136: Planta estructura piso 2 al 15 .....	151
Figura 137: Planta estructura piso 16 .....	152
Figura 138: Planta estructura piso 17 y 18 .....	153
Figura 139: Planta estructura piso 19 .....	154
Figura 140: Elevación eje K.....	155
Figura 141: Elevación eje L.....	156

# 1. Introducción

## 1.1. Introducción – Motivación

Chile es un país que presenta una alta sismicidad, tanto en magnitud como en periodicidad. Se estima que cada 50 años existe un megaterremoto en Chile, los cuales rompen grandes zonas de contacto inter placas y tienen intensidades alrededor de 8.5 Mw, además de estos megaterremotos existen terremotos importantes de aproximadamente Mw 8.0, que rompen solo una parte de dicha zona y ocurren con una mayor frecuencia. Algunos ejemplos de megaterremotos son los de Valdivia 1960 o El Maule 2010, ejemplos de terremotos que rompen parcialmente la zona de contacto son los sucedidos en Iquique 2014, Illapel 2015 o Chiloé 2016. [1]

Cuando estructuras son sometidas a sismos de gran o mediana intensidad estas pueden desarrollar desde fisuras, grietas, daños imperceptibles hasta daños que pueden producir un posible colapso de la estructura. Los procedimientos de diseño estructural toma en cuenta el trabajo de las estructuras en el intervalo inelástico de sus materiales, lo cual significa que se disipará energía mediante deformación y, por lo tanto, con daños. Comúnmente, estos daños son analizados por especialistas los cuales determinan y clasifican el daño visible de la estructura en base a su experiencia y conocimientos, sin uso de protocolos estandarizados.

El daño de una estructura no está normalizado en Chile y esto puede generar que se tomen distintas decisiones con respecto a qué hacer con una estructura dañada. Por lo cual, se busca realizar metodología y protocolo que ayuden a facilitar este trabajo. Estandarizar los procesos de inspección sísmica también aumenta el espectro de profesionales capacitados para poder evaluar un edificio después de un sismo, lo cual puede ser de mucha utilidad en caso de tener un gran sismo que genere daño en varias edificaciones y estructuras.

El proceso completo de inspección después de un sismo se divide, generalmente, en tres etapas: La inspección inmediata de daños (tarda días), la inspección visual detallada de las edificaciones dañadas (tarda semanas o meses) y el proyecto de rehabilitación estructural de la edificación (tarda meses o años). El presente trabajo está enfocado en la primera de ellas, donde se tiene como objetivo la seguridad de las personas.

En la bibliografía internacional se pueden encontrar distintas metodologías detalladas para describir el nivel de daño estructural y su clasificación. El objetivo de estas evaluaciones varía de país en país. Para ejemplificar, en Japón se hace con el fin de definir el uso a largo plazo de los edificios, para así con el resultado sugerirle al propietario si reparar, reforzar o demoler el edificio. En Italia el propósito es evaluar globalmente las pérdidas económicas directas y calcular funciones

de vulnerabilidad de edificios, ya que la decisión del uso a largo plazo del edificio se realiza mediante una evaluación de ingeniería, al igual que en Estados Unidos y México. [2]

En este trabajo se analizan seis metodologías distintas, una de España, dos de Japón y tres de Colombia, las cuales son resumidas en el Capítulo 3, junto a una Toma de Datos Después del Terremoto del Maule 2010 en Chile [3]. Adicionalmente, se utiliza el documento de los Estados Unidos de América FEMA P-154 [4] para complementar la metodología propuesta y agregarle un análisis de las condiciones preexistentes en la estructura y así poder realizar un diagnóstico con mayor seguridad.

De estos estudios se toma distinta información y se utilizan los que se consideran más aptos para aplicar en Chile. Los valores y datos son levemente modificados para que se apliquen de mejor manera al contexto chileno

Para ejemplificar la importancia del estudio, luego del terremoto del Maule 2010, aproximadamente el 2% de las edificaciones con sistema de muros de hormigón armado con más de 9 pisos sufrieron daño severo [3]

Se prueba la metodología propuesta en dos edificios dañados por el terremoto del Maule 2010, el edificio Antígona, ubicado en Viña del Mar y el edificio Torre Bosquemar, ubicado en San Pedro de la Paz. Esto se realiza con el fin de ejemplificar como se utiliza la metodología.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

El objetivo de este trabajo de título es generar una metodología y protocolo para la evaluación del estado de edificios habitacionales en base a muros de hormigón armado (H.A.) después de eventos sísmicos en Chile.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Se presentan los objetivos específicos del tema a tratar:

- Estudiar y clasificar las diferentes metodologías y protocolos disponibles en la literatura internacional para la evaluación de daños en estructuras

- Catalogar y caracterizar los daños según tipología en estructuras o edificaciones de muros de H.A.
- Analizar las causas de los diferentes tipos de daños en estructuras o edificaciones de muros de H.A.
- Definir el nivel de importancia de cada tipología de daños analizada durante el trabajo
- Generar una metodología que logre estandarizar los tipos de daños en estructuras o edificaciones de muros de H.A y evaluar la importancia de cada uno de estos daños en una primera instancia.
- Producir un documento de apoyo para los profesionales, que permita diagnosticar patologías en la estructura o edificaciones de muros de H.A. en Chile

### 1.3. Metodología

1. Estudio bibliográfico de las diferentes metodologías y protocolos disponibles: Tanto a nivel nacional, como internacional que han propuesto distintas formas de realizar una evaluación de daño sísmico en edificios.
2. Estudiar los tipos de daños observados en estructuras, así como la evaluación de su importancia según su ubicación en la estructura y componente.
3. Generar un catálogo de los daños según tipología y nivel de importancia: Realizar una caracterización de los tipos de daños y la importancia que tienen estos daños en la edificación de muros de H.A. en sus muros, vigas y machones. Para así proponer una codificación o índice que indique la importancia.
4. Proponer una metodología para aplicar en Chile en edificaciones de muros de H.A.
5. Ejemplificar la metodología propuesta con casos reales después del terremoto del Maule 2010.

### 1.3. Resultados Esperados

Una propuesta de un protocolo para estandarizar una metodología de evaluación de los daños sísmicos producidos en un edificio de hormigón armado habitacional en base a muros en Chile

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Sismos

La Real Academia Española lo define como “*terremoto o sacudida de la tierra producida por causas internas*”, la palabra sismo proviene del griego “*Seísmo*” lo cual significa temblor de la tierra. Es un movimiento brusco y pasajero de la corteza terrestre debido a la liberación de energía en forma de ondas.

Fuerza Sísmica: Fuerzas usadas en el diseño de una estructura debido a los efectos inerciales causados por la aceleración de un sismo [5]

Estos pueden ocurrir debido a rupturas de fallas geológicas, fricción en el borde de placas tectónicas y procesos volcánicos. En Chile los más comunes son los ocurridos debido a la subducción de placas tectónicas, entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. La zona de subducción puede ocasionar cuatro tipos de sismos ilustrados en la Figura 1.

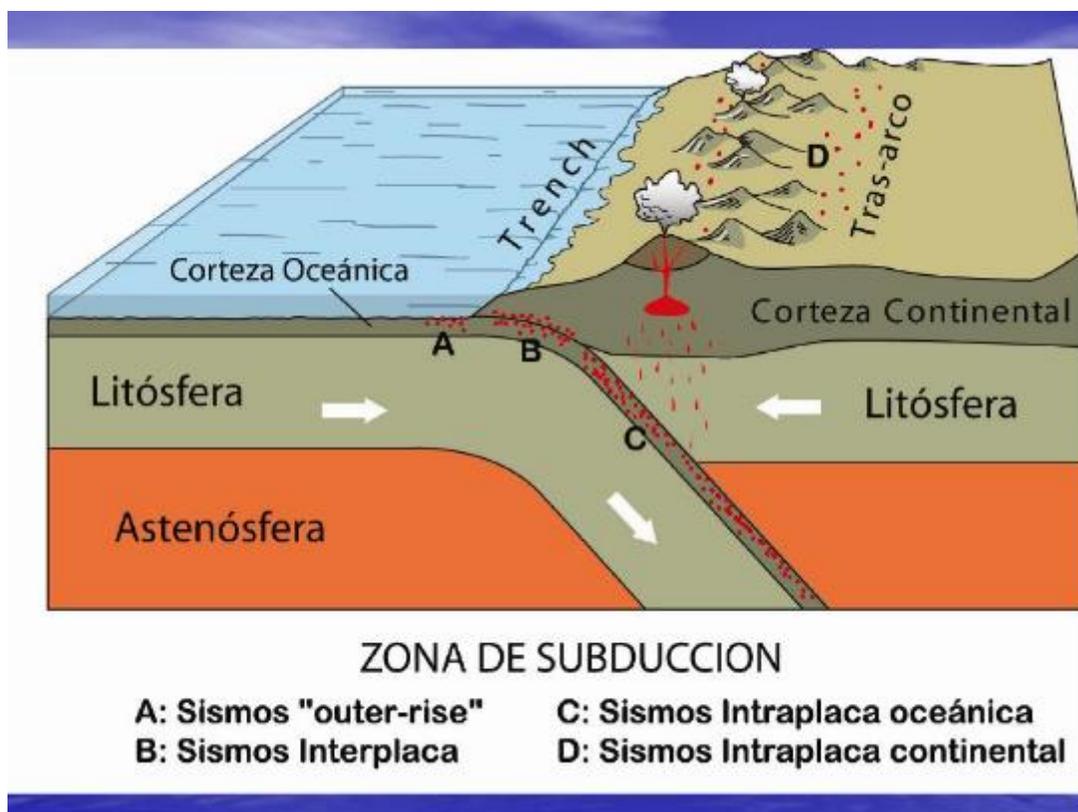


Figura 1: Esquema zona subducción y tipos de sismos.  
fuente: GF4001 – Sismología, 2018, FCFM

Las siguientes definiciones son dadas por el centro sismológico nacional CSN.

Sismos Outer-Rise: *“Ocurren costa afuera de la fosa oceánica. Se deben a la deformación de la placa de Nazca y a los esfuerzos de flexión sobre ella antes de subductar, ubicándose en la zona de outer-rise o de máxima curvatura. Son sismos de baja profundidad y en general poseen magnitudes inferiores a 7.0, razón por la cual generalmente no generan tsunamis.”*

Sismos Interplaca: *“En Chile se producen cuando el esfuerzo compresivo horizontal neto en la zona de contacto, también llamada zona de acoplamiento, entre la placa de Nazca y la Sudamericana supera al acoplamiento mecánico que traba el movimiento de éstas, produciéndose el movimiento relativo de las placas. También se conocen como terremotos de subducción. Corresponden a sismos compresionales con mecanismos de falla inversa y su magnitud es proporcional al desplazamiento y al área de la zona de desplazamiento. La profundidad de los terremotos en zona de acoplamiento se limita a una zona de profundidad máxima de 60 km (Delouis et al., 1994; Comte & Suárez, 1994; Araujo & Suárez, 1994). Cuando ocurren eventos de este tipo de gran magnitud y hay desplazamiento vertical del fondo oceánico, hay altas probabilidades de ocurrencia de tsunami.”*

Sismos Interplaca oceánica: *“Ocurren al interior de la placa oceánica a profundidades superiores a los 50 km hasta profundidades a las cuales se cree la placa pierde su comportamiento frágil (~700 km); sin embargo, en Chile las profundidades de estos sismos van entre los 50 km y los 250 km. Se ha observado que el potencial de daños de estos sismos es mayor que el de los sismos interplaca de similar magnitud.”*

Sismos Intraplaca Continental: *“Ocurren dentro de la placa continental en la corteza a profundidades inferiores a los 60 km. Se deben principalmente a las deformaciones generadas por la convergencia entre la placa de Nazca y la placa continental. Estas deformaciones son las que dieron origen al alzamiento de la Cordillera de los Andes y en general, son máximas en torno a ésta, tanto en Chile como en Argentina.”*

## 2.2. Patologías de la construcción.

Patología de la construcción se define como *“el tratamiento sistemático de los defectos de las construcciones, sus causas, sus consecuencias y sus remedios”* [6]. Al ser este trabajo enfocado en los daños presentes en edificaciones por la acción de sismos es necesario definir ciertos conceptos con respecto a las patologías

Usualmente la palabra patología se utiliza en el área de la salud como el estudio de los trastornos anatómicos y fisiológicos de las personas. Igualmente se puede aplicar este término para el área de

la ingeniería estructural. La patología estructural se define como la ciencia dedicada al estudio sistemático y ordenado de los daños y fallas que se presentan en las edificaciones, analizando el origen o las causas y consecuencias de ellos para que mediante la formulación de procesos, se generen las medidas correctivas para lograr recuperar las condiciones de desempeño de la estructura [7]

Es importante definir ciertos conceptos básicos de las patologías estructurales, en algunos casos estos conceptos son similares, pero no son sinónimos.

- Defecto: *“Una situación en la que uno o más elementos de una construcción no cumplen la función para lo que han sido previstos.”* [6]
- Fallo: *“La finalización de la capacidad de un elemento para desempeñar la función requerida.”* [6]
- Anomalía: *“Una indicación de un posible fallo.”* [6]
- Fisuras y grietas: La definición de ambas es similar en un principio, son roturas en forma de abertura lineal incontrolada que parte desde un origen y marca una dirección en la cual se desarrolla. En general se utiliza la palabra fisura para referirse a daño superficial y una abertura de relativamente poco grosor y grieta la abertura es más profunda y de mayor dimensión.
- Reparación: Proceso mediante el cual se restituye las características estructurales originales de un edificio, o de sus elementos constitutivos, que han sufrido daño durante el evento sísmico. [8]
- Refuerzo: La readquisición por los elementos de obras dañados, de la capacidad que dichos elementos tenían antes de producirse el daño, para cumplir su función. [6]
- Nivel de riesgo: Parámetro utilizado para definir el nivel de peligro a la vida humana por la falla de un sistema estructural, los elementos estructurales o de los elementos no-estructurales. [8]

El diseño estructural tradicionalmente considera el comportamiento más allá del rango elástico frente a sismos de gran magnitud. En estos casos el daño está concebido como un medio de disipación de energía en la medida que el daño sea controlado.

Las patologías pueden producirse por distintas causas:

- Estudios preliminares inadecuados/insuficientes
- Errores de diseño (estructuración cálculo, detallamiento, etc.)
- Arquitectura vulnerable
- Errores Constructivos
- Deficiencias en los materiales
- Regulación interpretativa

- Limitaciones de la regulación
- Falta de Mantenimiento
- Sabotajes
- Otros

El actual documento se centra en metodologías para evaluar y catalogar los daños producidos por sismos, sean o no esperables. No se enfoca en las deformaciones previas en las estructuras, ya sean debido a acciones químicas, como estar expuesta a ciclos de humedad, o bien, acciones físicas como asentamientos diferenciales al momento de construir la estructura.

Son muchos los posibles factores que pueden generar patologías en materiales, elementos y estructuras. Es posible que distintos mecanismos den origen a las mismas manifestaciones patológicas. En la Figura 2 se muestra un diagrama de las causas de las patologías en estructuras y su efecto en ellas, en términos generales.



Figura 2: Causas y efectos de las principales manifestaciones patológicas estructurales [7]

## 2.3. Sistema de muros en H.A.

### 2.3.1. Definiciones generales

Para poder comprender de mejor manera el trabajo de título es necesario definir ciertos conceptos del sistema de muros de hormigón armado, el sistema estructural donde se aplicará la metodología diseñada.

En primer lugar, un sistema de hormigón armado se define como el sistema en que sus elementos estructurales están constituidos por hormigón reforzado por barras de acero. El hormigón como material tiene una buena resistencia a la compresión y el acero le otorga mayor resistencia a la tracción. En edificios, estos sistemas de hormigón armado pueden ser en base a muros, a marcos o mixtos, el trabajo de título está enfocado en las edificaciones en base a muros.

Los muros son elementos estructurales que poseen una gran rigidez, exhiben un comportamiento adecuado ante sismos y tienen una buena capacidad de deformación. Su desempeño ante cargas horizontales es similar al de una viga en voladizo, con los máximos momentos y las máximas cortantes en su base. Se considera que es un sistema de muros cuando son estos los responsables de transmitir todas las cargas, incluyendo las verticales y las horizontales.

Si bien el elemento estructural que se repite con mayor frecuencia en estos sistemas estructurales son los muros, existen otros elementos estructurales como las vigas y machones. Los machones son pilares adosados a la parte exterior del muro de un edificio, con el fin de reforzar una zona que recibirá una mayor carga. Además, se definen los elementos que se colocan horizontalmente sobre los espacios que se utilizan para puertas y ventanas como dinteles. Los dinteles pueden absorber esfuerzos superiores.

Al ser Chile un país sísmico, todo diseño estructural debe tener un diseño sismo resistente, que son todos los elementos y características que definen una estructura como antisísmica. Es importante destacar que todo el inmueble debe ser capaz de resistir empujes horizontales bajo cargas dinámicas.

Con el fin de explicar la resistencia de los materiales al ser sometidos a sismos se definen ciertos conceptos físicos de la mecánica de sólidos. Adicionalmente en la Figura 3 se muestra el gráfico tensión vs deformación del acero típico, en el cual se puede apreciar su zona elástica cuando tiene

el comportamiento de una línea recta y zona inelástica cuando el comportamiento es más curvo entre su tensión y deformación. A continuación se definen los conceptos:

- Zona elástica: Es la zona donde al retirar la carga el material regresa a su forma y tamaño inicial, en casi toda la zona se presenta una relación lineal entre la tensión y la deformación y tiene aplicación la ley de Hooke
- Zona inelástica: Cuando un elemento es deformado debido a una carga y al retirar la carga este seguirá deformándose, sin volver a su condición original, como en la zona elástica.
- Anelástico: “*La anelasticidad es un desvío de la elasticidad perfecta. Un sólido es considerado anelástico cuando el valor del equilibrio de la respuesta no es obtenido instantáneamente, es decir, la deformación continuará luego de la aplicación de la tensión y con la liberación de carga será necesario un tiempo finito para que se dé la recuperación completa.*” Definición dada por: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/anelasticidad>.
- Ductilidad: Capacidad de los elementos estructurales para disipar energía mediante deformaciones cíclicas en el dominio anelástico.
- Estados límite: Determina cuando la estructura ha fallado de acuerdo con los criterios de resistencia, rigidez y desempeño. Los estados límites pueden ser de servicio, últimos o estados límites particulares, establecidos para algún proyecto en especial. [7]
- Estado límite de servicio: Son los estados que a partir de los cuales, a pesar de que no exista amenaza para la integridad estructural, se deteriora lo suficiente para que no pueda cumplir su desempeño o funcionalidad. Estas pueden ser: deflexiones excesivas, vibraciones indeseables, ancho excesivo de grietas, etc. [7]
- Estado límite último: Es el nivel máximo a partir del cual se pone en riesgo la integridad de la estructura. [7]

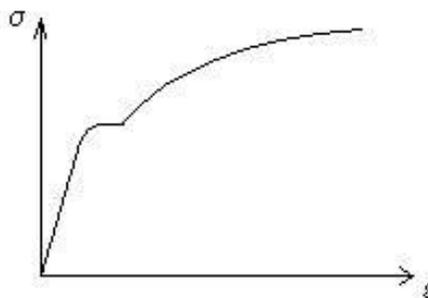
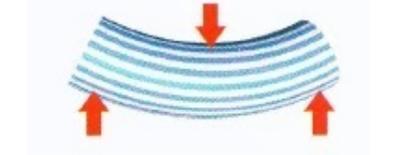
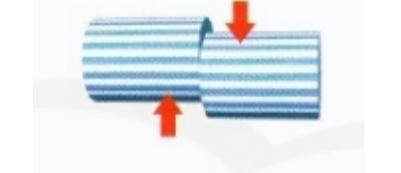


Figura 3: Gráfico tensión vs deformación estándar  
Fuente: CI3202 Mecánica de Sólidos, 2016, FCFM

En la Tabla 1 se definen los distintos esfuerzos que afectan a los elementos estructurales. Los esfuerzos son el conjunto de fuerzas internas a las que está sometido un cuerpo a consecuencia de las solicitaciones o acciones que actúan sobre él. Estas fuerzas internas son el resultado de las interacciones de unas partículas del cuerpo sobre otras. [9]

Tabla 1: Esfuerzos comunes presentes en elementos estructurales. [9]

Esfuerzo	Definición	Esquema
Tracción	Un elemento trabaja a tracción, o está sometida a un esfuerzo de tracción cuando fuerzas con la misma dirección y de sentidos contrarios tienden a estirarlo	
Compresión	Se produce compresión cuando sobre el elemento actúan fuerzas de la misma dirección y sentido contrario que intentan contraerlo	
Flexión	Es el esfuerzo resultante de aplicar fuerzas perpendicularmente al eje principal del elemento que tienden a doblarlo. La flexión produce compresión en la parte cóncava del elemento y tracción en la opuesta, la convexa	
Torsión	Las fuerzas que actúan sobre un objeto sometido a torsión tratan de retorcerlo, de girarlo en dos direcciones contrarias	
Corte	Es un esfuerzo que provocan fuerzas perpendiculares al eje longitudinal del elemento; aplicadas en sentidos contrarios casi en la misma vertical que tienden a cortarlo.	

### 2.3.2. Edificio habitacional común en Chile

El sistema de muros de hormigón armado es el más utilizado para los edificios habitacionales en Chile, esto debido a la alta rigidez que genera. La norma chilena NCh433 Of1996 modDS61 2011 indica que para proporciones de áreas de muros relativas al área de la planta del orden del 2% al 3% en cada dirección se mantienen los desplazamientos máximos entre pisos y así lograr que las tensiones por esfuerzo de corte y flexo compresión de los muros tengan valores moderadamente bajos.

Características del edificio habitacional chileno:

- Peso promedio  $q=1$  [ton/m<sup>2</sup>] (peso sísmico piso / área piso)
- Concepciones estructurales sanas, en base a una alta densidad de muros de rigidez
- Simetría resistente y reducida respuesta torsional
- Núcleo central en torno a escaleras y ascensores
- Espesor mínimo de muros  $e \geq H/16$  (Donde H es la altura del piso)
- Alta densidad de muros, que hace a la estructura ser menos sensible a una eventual falla de algunos de sus elementos y da una mayor facilidad para reforzar estos.
- Al momento de diseñar se utiliza un corte mínimo y control de deformaciones de la norma chilena que entrega una mayor resistencia a carga laterales.
- Poseen un índice de densidad de muros 2%-3% (área relativa muros / área en planta) en cada dirección, para cada piso.

Para mostrar el caso más común de daño en un edificio con base a muros, se muestra el esquema presente en la Figura 4, donde puede ver un edificio en base a muros sometido a una fuerza horizontal (corte), la cual genera que se produzcan grietas diagonales en la estructura y desplazamiento. En la Figura 5 se muestran más modos de falla comunes en un edificio con sistema estructural de muros, donde se señalan daños por flexión, corte, tracción, compresión y por pandeo.

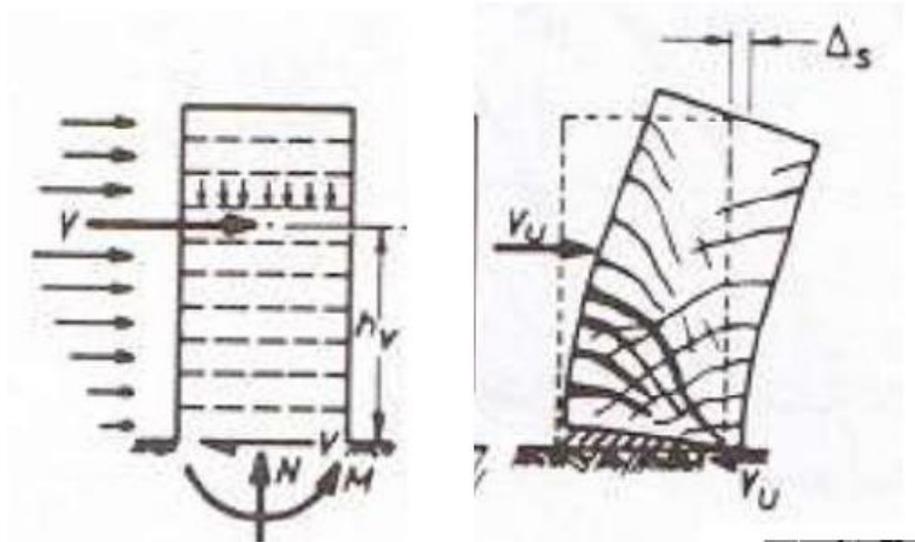


Figura 4: Esquema falla por cortante en edificios en base a muros  
 Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM

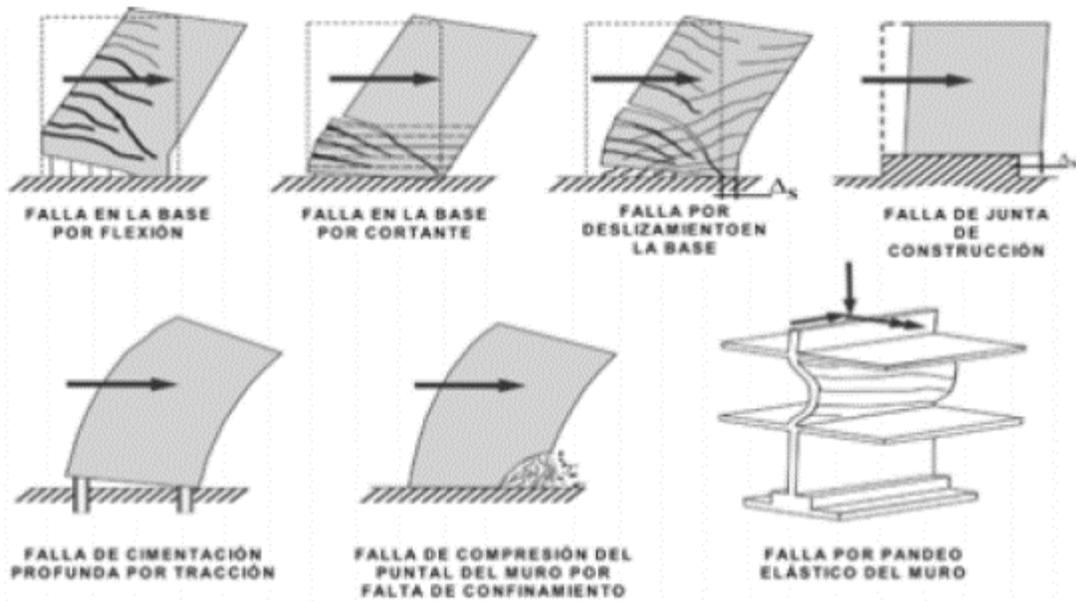


Figura 5: Posibles modos de fallas en muros [7]

Los daños más comunes en las edificaciones se presentan en el primer piso y/o primer subterráneo, donde se ubican los estacionamientos. Estos pisos son sometidos a una mayor fuerza de corte (Figura 6) y una mayor demanda sísmica, lo cual genera que estén más expuestos. La configuración estructural más vista en las edificaciones habitacionales consiste en un corredor central con muros longitudinales en los costados conectados a muros transversales, los cuales forman muro en T. En otros casos, este muro transversal no está directamente conectado al muro longitudinal, formando un muro rectangular. Estas configuraciones estructurales se pueden apreciar en la Figura 7. [10]

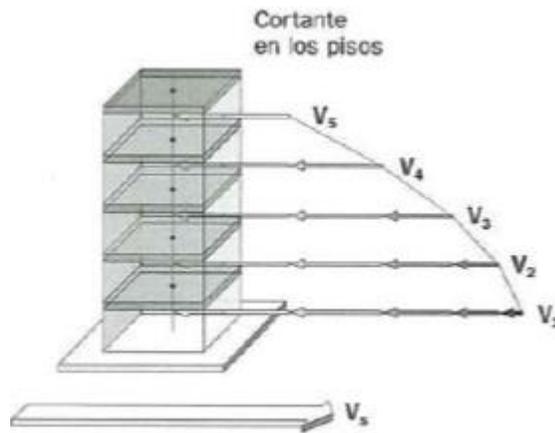


Figura 6: Fuerza de corte por piso en un sismo  
 Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM

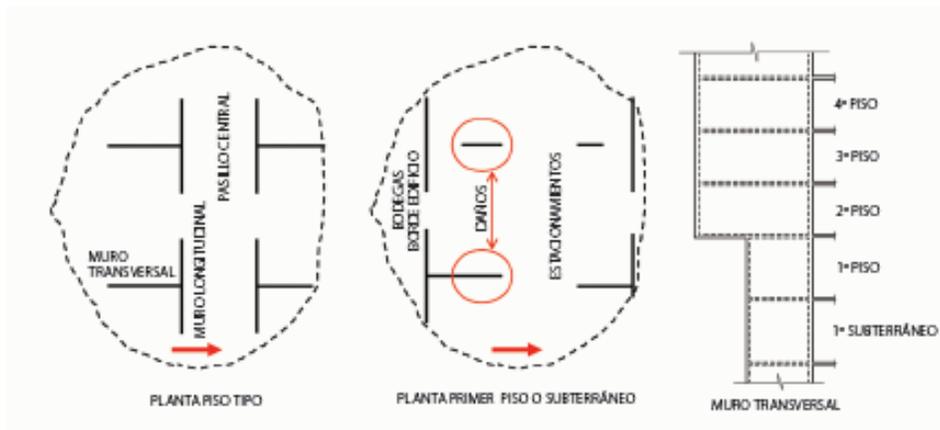


Figura 7: Configuración estructural primer piso y primer subterráneo [10]

### 2.3.3. Daños y fallas comunes debido a la acción sísmica.

Cuando un edificio es sometido a un sismo, éste debe soportar principalmente cargas horizontales, lo cual genera daños y fallas particulares que se estudiarán en esta sección.

En primer lugar se estudia la falla por corte, esta falla se produce cuando su capacidad de resistencia a fuerza cortante es inferior a la de flexión [11]. Se genera cuando existen fuerzas perpendiculares al eje longitudinal del elemento, para el caso de un muro, se puede generar por las fuerzas sísmicas horizontales o por deslizamiento. El segundo caso se explica más adelante en el trabajo.

Cuando el muro está siendo sometido a corte produce deformaciones que generarán tracción en el muro, para ilustrar esto se muestra un diagrama de esfuerzos internos de círculo de Mohr en la

Figura 8, donde el eje x corresponde a los esfuerzos longitudinales (tracción o compresión) y el eje y corresponde al corte. Como hormigón no tiene gran resistencia a la tracción, actúa el acero, lo cual genera grietas en forma de diagonal en el hormigón. Estas son más comunes en los primeros pisos de una estructura, debido a que están sometidas a un mayor corte.

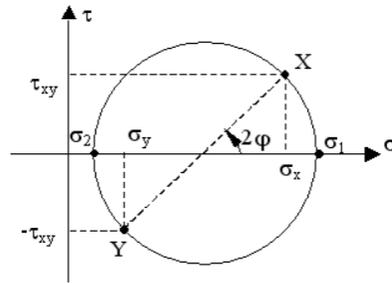


Figura 8: Círculo de Mohr, diagrama de esfuerzos internos con corte  
fuente: CI3202 – Mecánica de Sólidos 2016, FCFM

Las juntas de construcción mal concebidas o mal realizadas pueden proporcionar una superficie de falla ideal para falla de corte. Las fisuras pueden ser en un sentido como se muestra en la Figura 9 o en ambos sentidos.



Figura 9: Fallas en muros debido al corte [11]

Otra falla que se puede observar frecuentemente es la falla por flexo-compresión, esta falla se caracteriza por el balanceo del muro en torno a sus extremos, transmitiéndose gran parte de la carga vertical por el extremo comprimido, lo cual produce el aplastamiento del hormigón, que se considera una falla frágil, con el subsiguiente pandeo del refuerzo vertical, en caso de que no exista un buen confinamiento en los extremos [11]. La plasticidad de un muro comienza en su base y se propaga hasta cierta altura a partir de lo cual se forma el mecanismo de colapso y el resto del muro trabaja rotando como un cuerpo rígido alrededor de la articulación plástica. [7]

En el Terremoto del Maule del 2010, esta falla fue la más observada. Esta se puede identificar debido a que se caracteriza por tener una grieta horizontal propagada a lo largo del alma del muro ubicada a nivel del primer piso o primer subterráneo. En primer lugar se desprende el hormigón de recubrimiento y luego las barras de acero son sometidas a ciclos de tracción y compresión, producto de la alternancia de la acción sísmica [10]. En la Figura 10 y Figura 11 se muestran ejemplos de esta falla.

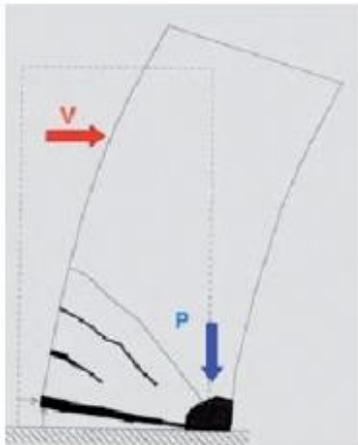


Figura 10: Fallas en muro debido a flexo-compresión [11]



Figura 11: Efecto de muros transversales. Edificio Sol oriente, Santiago [11]

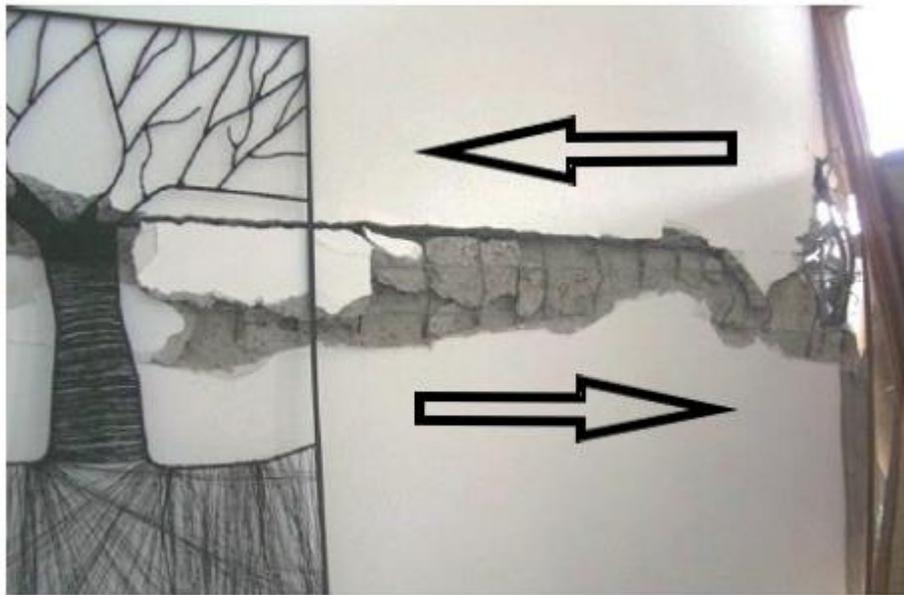
La mayor cantidad de fallas por flexo-compresión fue vista en los muros en T, los cuales se presentan con gran frecuencia en los estacionamientos. El daño más severo se encuentra dónde termina el alma del muro T, esto se debe a que en ese extremo se alcanzan las mayores deformaciones de compresión debido a las cargas de flexión y compresión a la que son sometidas.

El muro es sometido a cargas cíclicas de tracción y compresión, producto de la alternancia de la acción sísmica, lo cual puede generar pandeo o fractura en los aceros de refuerzo, como se muestra en la Figura 12.



*Figura 12: Falla en muro T [10]*

Después de un sismo no es de extrañarse que se encuentren varias fallas por corte-cizalle (deslizamiento). Por lo general, este tipo de falla es una derivación de la falla por flexión, producida al conectarse las dos grietas formadas por flexión en ambos extremos del muro. Se produce en las juntas de construcción del muro y se agravará cuando existe segregación del concreto, cuando las juntas son lisas o cuando los traslapes del refuerzo vertical son realizados en la misma sección transversal [11]. Se puede observar un ejemplo de esta falla en la Figura 13.



*Figura 13: Falla por deslizamiento en la junta de construcción. Edificio obispo Salas, Concepción [11]*

Debido a la naturaleza de los muros, que son elementos esbeltos, estos son susceptibles a fallar por pandeo. El pandeo es una falla elástica que se manifiesta por la aparición de desplazamientos

importantes transversales a la dirección principal de la compresión. Estos pueden ocurrir antes que se inicia la ruta de colapso del material [7].

El pandeo se clasifica generalmente en dos tipos, pandeo local y pandeo global. Se dice que el pandeo es local cuando el fenómeno ocurre en piezas o elementos aislados, donde el elemento alcanza su carga crítica, en cambio, el pandeo es global es cuando una estructura sufre pandeo de una forma más general, sin necesariamente que todos los elementos alcancen su carga crítica. En la Figura 14 se muestran los posibles modos de falla por pandeo

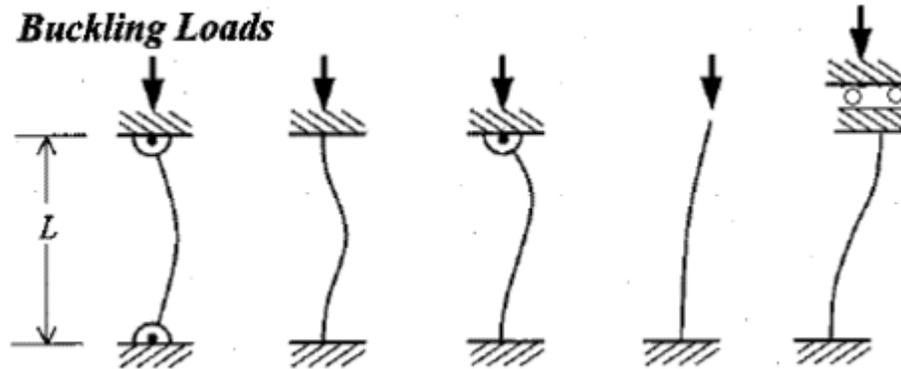


Figura 14: Posibles modos de falla por pandeo  
Fuente: [cadsolutions.pe/articulos/la-falla-pandeo-analisis-solidworks-simulation](http://cadsolutions.pe/articulos/la-falla-pandeo-analisis-solidworks-simulation)

Una causa común de la mayor cantidad de patologías presente en las edificaciones en base a muros de hormigón armado son las irregularidades estructurales tanto verticales como en la planta. La norma chilena actualmente no tiene restricciones en cuanto a irregularidades o cambio de rigidez a lo largo de la altura del edificio. Esto da la libertad a arquitectos de realizar diferentes diseños, formas de edificios y cambios drásticos de rigidez entre pisos. Las irregularidades tienden a generar concentraciones de esfuerzos y deformaciones, de tal forma que deben ser analizadas con especial atención debido a que son puntos críticos, que pueden sufrir daños importantes durante terremotos. Estas irregularidades son cambio de estructuración de un piso a otro para acomodar cambios de puertas u otras instalaciones. [10]

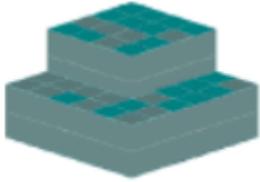
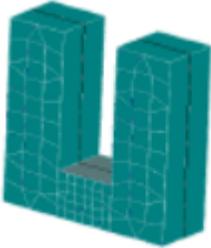
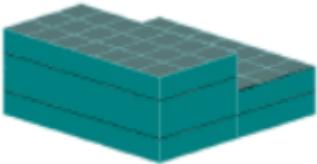
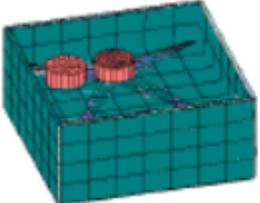
Las irregularidades estructurales son descritas y definidas con mayor detalle en el capítulo 4, subsección 4.3. Incorporación de factores de regularidad estructural, donde se muestran los casos más usuales y se catalogan según el riesgo sísmico que generan. Asimismo se definen brevemente a continuación.

Un problema que puede suceder son las plantas asimétricas o desproporcionadas. Estas generan o amplifican las torsiones y en algunos casos son incapaces de actuar como diafragma rígido para

distribuir de mejor manera las fuerzas horizontales. Pueden ser irregularidades en forma de U, forma de L, forma de T, de X o alguna irregularidad múltiple. [12]

Otra forma de presentarse estas irregularidades son elevaciones asimétricas o discontinuas, estas concentran esfuerzos y generan o amplifican torsiones. Se debe a los cambios bruscos en la volumetría y masa de la edificación. Se presentan algunos ejemplos de estos casos en la Tabla 2.

*Tabla 2: Irregularidades en elevación no recomendadas [12]*

Descripción	Esquema
Variación abrupta en elevación del sistema sismo resistente entre pisos consecutivos	
Variación de rigideces en sistemas verticales en cuerpos distintos en edificios	
Variación de ubicación de sistemas sismo resistentes entre un nivel y otro	
Variación abrupta de masas en niveles o pisos consecutivos	

**Muros Bandera:** Es un muro que por diseños arquitectónicos cambia su longitud entre pisos. Esto produce una concentración de esfuerzos en la zona donde se produce, afectando mayoritariamente al muro de menor longitud.

El problema de la irregularidad estructural incluye dos aspectos, que se ejemplifican en la Figura 15 y Figura 16:

- El método de análisis sísmico que se requiere para las estructuras irregulares
- La forma de diseñar los elementos estructurales vecinos a la irregularidad vertical, puesto que en estos elementos se producirá una demanda concentrada de ductilidad durante eventos sísmicos severos. [13]

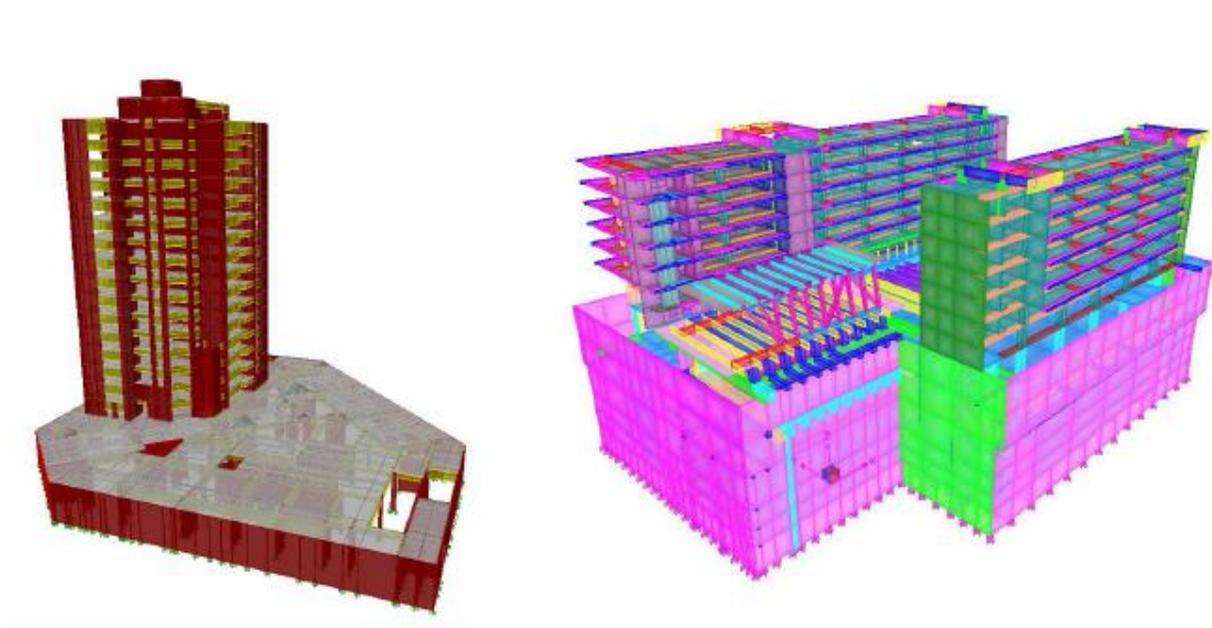


Figura 15: Ejemplos modelo da cálculo para irregularidades verticales  
Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM

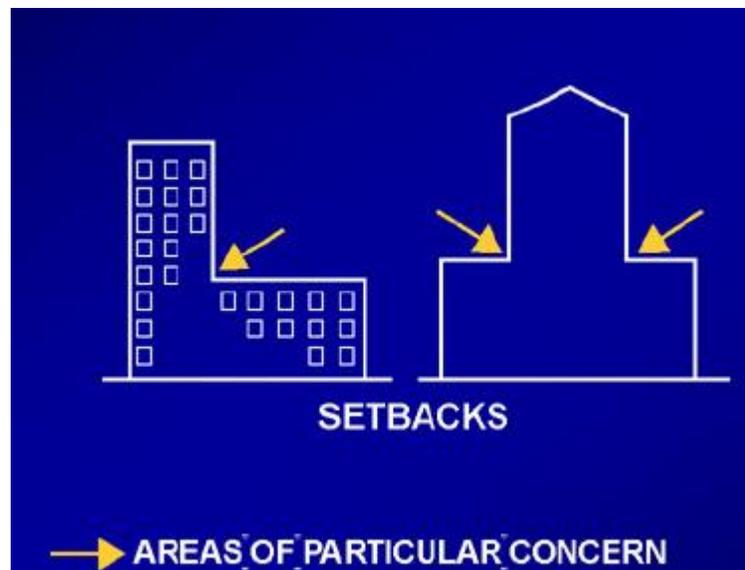


Figura 16: Áreas de mayor tensión con irregularidades verticales  
Fuente: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings, ATC-20

### **3. Clasificación metodologías y protocolos disponibles en la literatura internacional para la evaluación de daños en estructuras.**

En este capítulo se busca resumir documentos relacionados con la evaluación e inspección de edificaciones después de un sismo. Esto se realiza con el objetivo de ordenarlos y obtener de estos la base para armar un protocolo propio que se pueda aplicar en Chile.

#### **3.1. Evaluación utilizando teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales. [2]**

Este documento es un documento realizado el año 2010 por la Universidad Técnica de Cataluña, Barcelona, España. En primer lugar se definen ciertos conceptos para entender este texto de mejor manera.

Conjuntos difusos: Conjuntos cuyos elementos no le pertenecen de una manera absoluta, sino de forma graduada. Lógica multivaluada en la cual los valores de las variables pueden ser cualquier número real comprendido entre 0 y 1. Se emplea para estudiar la verdad parcial.

Redes Neuronales: Las redes neuronales están inspiradas a las neuronas que tienen los seres humanos. Son redes que se conectan entre sí mediante pequeños programas que identifican patrones en los datos de forma colaborativa, lo que les permite procesar, analizar e incluso aprender.

En el trabajo analizado se evalúan problemas de la ingeniería sísmica mediante la teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales, las cuales son herramientas de inteligencia computacional. El artículo desarrolla un método y una herramienta computacional que utiliza estas técnicas para apoyar la evaluación del daño y de la seguridad de los edificios después de sismos fuertes. Los datos de entrada del programa corresponden a la información subjetiva e incompleta del estado del edificio obtenida por profesionales posiblemente inexpertos en el campo de la evaluación del comportamiento sísmico de los edificios. El objetivo de este trabajo es realizar una herramienta de especial utilidad durante la fase de respuesta a emergencias, facilitando las decisiones sobre su habitabilidad y separabilidad de las estructuras.

Los procedimientos de evaluación de daños se aplican en diferentes etapas: evaluación rápida, evaluación detallada y evaluación de ingeniería. El objetivo de este artículo son las dos primeras. Las metodologías detalladas describen el nivel de daño estructural y su clasificación. El objetivo es revisar la seguridad de aquellos edificios sobre los que se tiene alguna duda por los cortos alcances de la evaluación rápida y la poca experiencia de sus evaluadores.

Se toman en cuenta tres aspectos que tienen que ver con la seguridad del edificio: Los elementos estructurales, los no estructurales y las condiciones del suelo. Adicionalmente se consideran las condiciones preexistentes, relacionadas con la calidad de los materiales de construcción, irregularidades y su configuración estructural.

El modelo y la herramienta computacional propuestos utilizan una red neuronal artificial (RNA) compuesta por tres capas cuya estructura general se muestra en la Figura 17. Donde se tiene una capa de entrada, capa intermedia y capa de salida. La primera toma los cuatro grupos: elementos estructurales (ES), elementos no estructurales (NE), condiciones del suelo (CS) y condiciones preexistentes (CP). Cabe a destacar que el número de neuronas en la capa de entrada del modelo no es constante, puesto que depende del sistema estructural que se evalúa y de la importancia que se le da a cada grupo de variables.

El entrenamiento de la red neuronal fue realizado usando una base de datos que contiene evaluaciones reales del daño sísmico hechas por ingenieros expertos después del terremoto de 1999 en Quindío, Colombia.

Los datos de entrada para la primera capa son, en el caso de los elementos estructurales, el porcentaje de elementos que corresponden a cada nivel de daño y, en el caso de los no estructurales, las calificaciones lingüísticas globales de cada elemento. La neurona se entrena

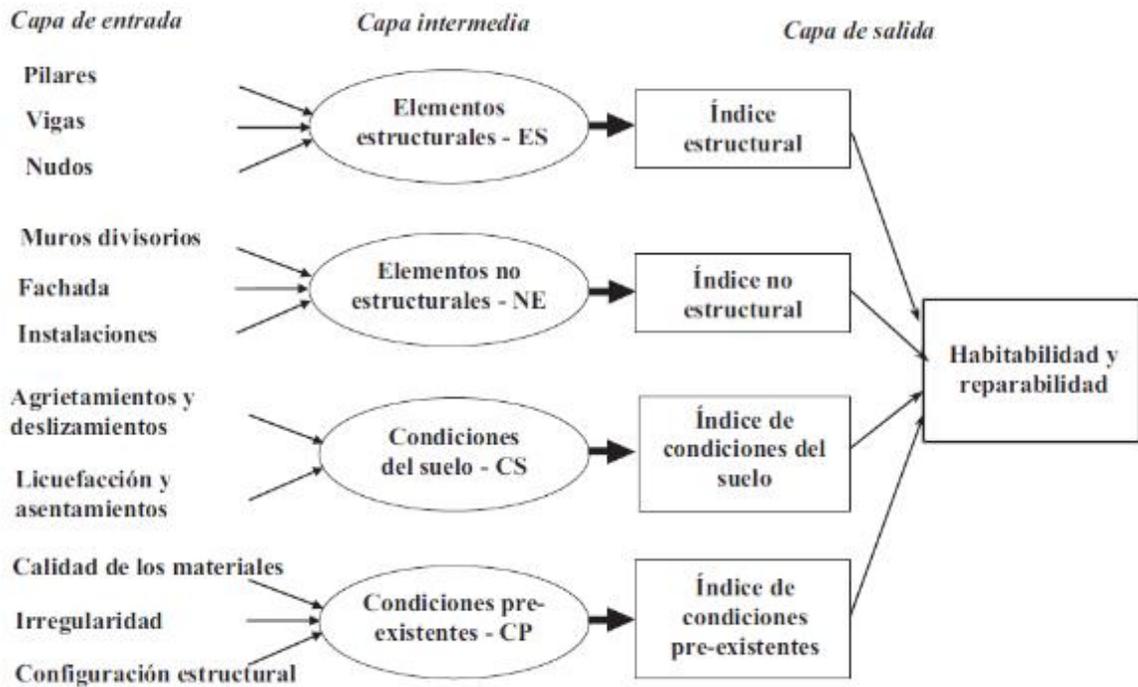


Figura 17: Estructura de la red neuronal [2]

La capa de entrada está agrupada en cuatro grupos, los mencionados anteriormente ES, NE, CS y CP.

Se califican los elementos estructurales y no estructurales dependiendo del daño observado utilizando cinco posibles niveles de daño, representados mediante conjuntos difusos:

- Ninguno/muy leve (N)
- Leve (L)
- Moderado (M)
- Fuerte (F)
- Severo (S)

Igualmente, las variables de condiciones del suelo y preexistentes son también valoradas durante el proceso de evaluación y sus calificaciones lingüísticas pueden ser:

- Muy buena (MB)
- Media (M)
- Muy mala (MM)

Para realizar esta clasificación, para cada variable  $i$  (por ejemplo, pilares, muros, vigas, etc.) en la capa de entrada son obtenidos de las calificaciones lingüísticas del daño a partir de una inspección visual del edificio y proporcionan el daño  $D_j$  en cada nivel  $J$  y su peso  $w_j$ .

La capa intermedia tiene cuatro neuronas correspondientes a cada grupo de variables: ES, NE, CS, CP. La Figura 18 muestra un esquema detallado del proceso de evaluación y de cómo funciona la red neuronal propuesta en este documento. Las variables de entrada no influyen sobre todas las neuronas intermedias, solo lo hacen sobre la neurona que corresponde al grupo de variables al que pertenecen.

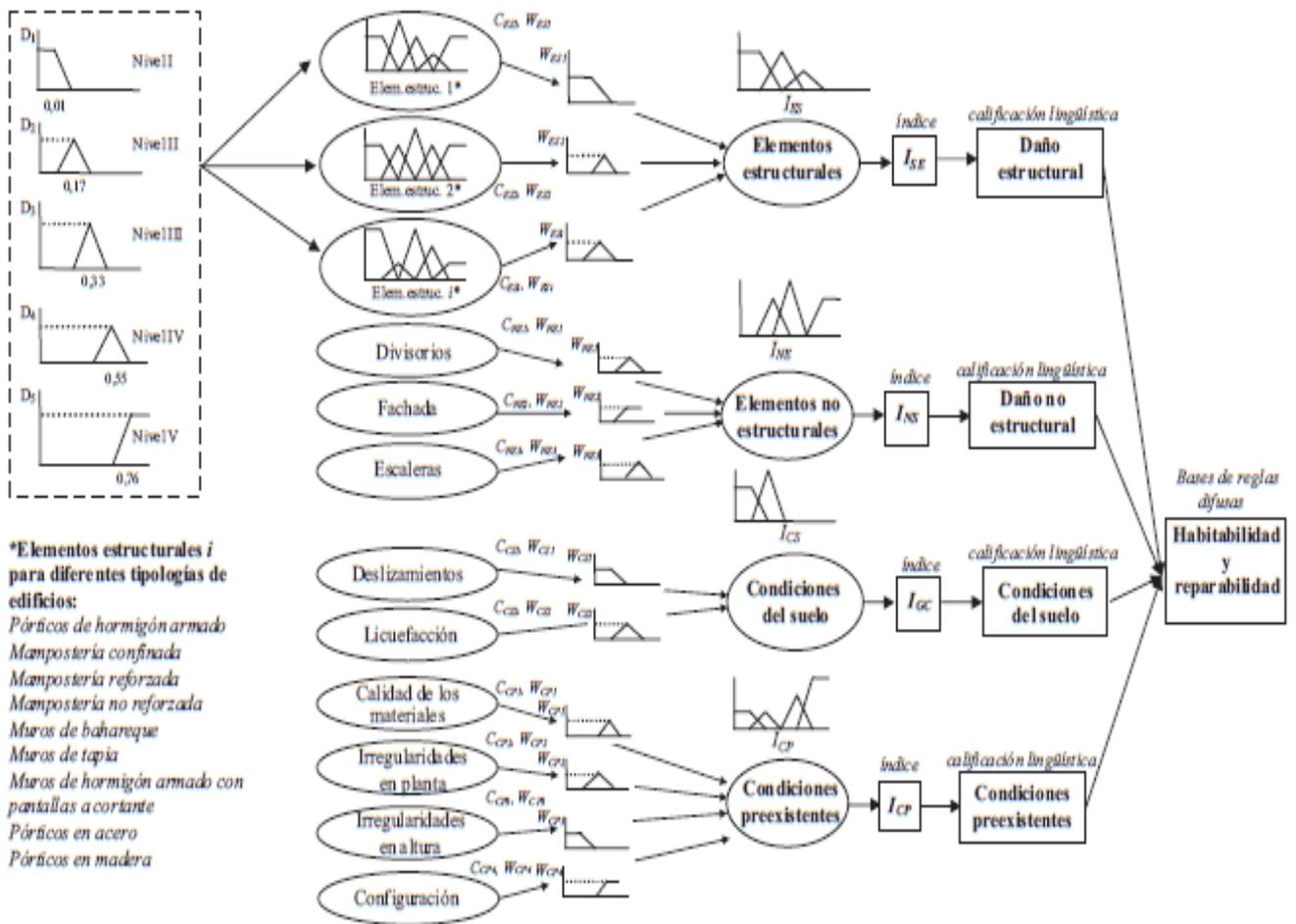


Figura 18: Estructura de la red neuronal artificial propuesta. [2]

La capa de salida de la RNA se asigna una calificación lingüística final a los índices globales obtenidos para los ES, NE, CS y CP. El nivel de daño se calcula de acuerdo con la proximidad del valor de las funciones globales de daño de referencia.

Este documento toma en total 150 evaluaciones de edificios de hormigón armado y 100 de mampostería no reforzada en la calibración. Para evaluar más sistemas estructurales se debe tener una mayor base de datos.

Las clasificaciones lingüísticas para la habitabilidad de la estructura tienen cuatro niveles posibles:

- Habitable
- Uso restringido
- Peligroso
- Prohibido

A modo de resumen se presenta en la Figura 19 un diagrama de flujo del proceso de evaluación del daño, donde se divide el proceso en siete pasos.

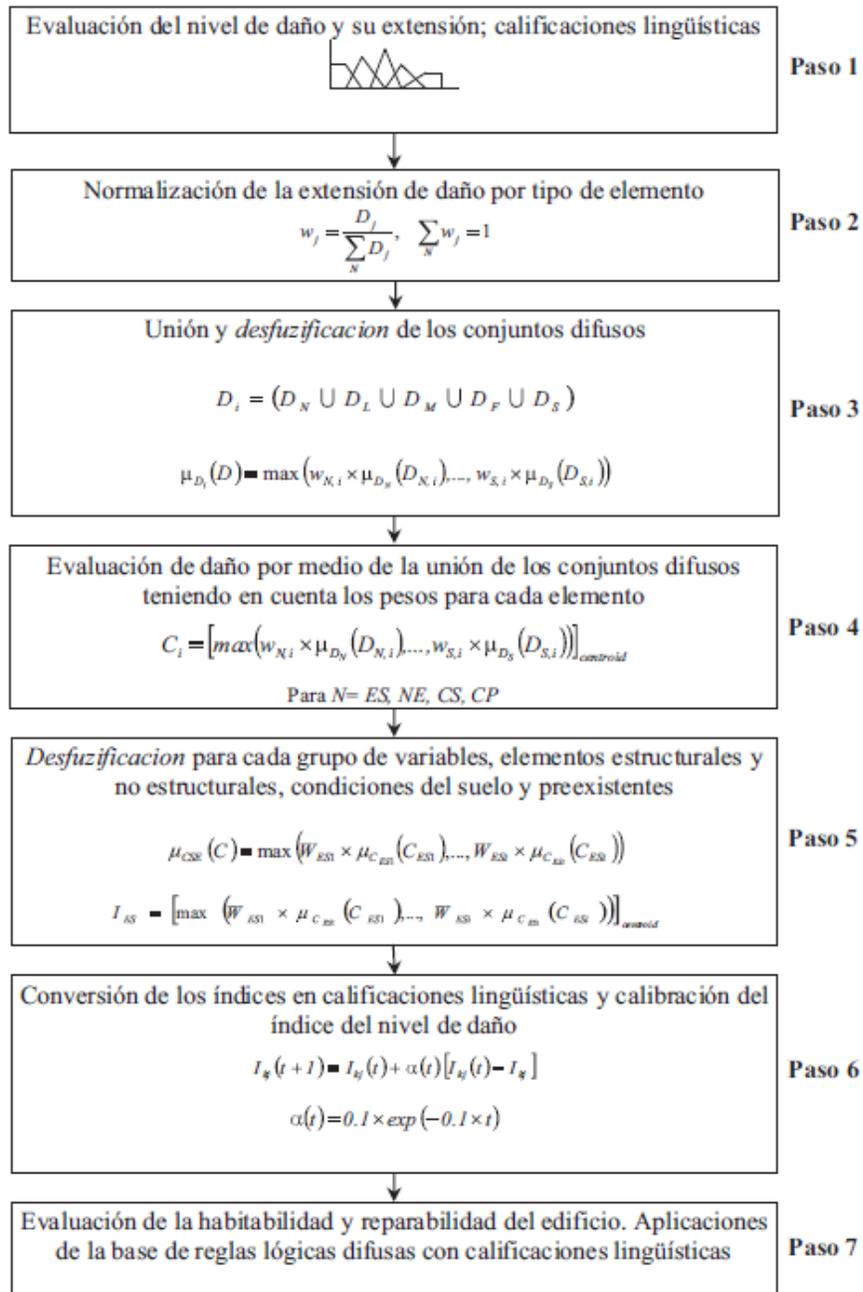


Figura 19: Diagrama de flujo del proceso de evaluación del daño [2]

Las metodologías presentadas en este documento hacen posible una evaluación más exacta del daño por parte de profesionales inexpertos, especialmente en los casos en los que puede haber dudas sobre la seguridad estructural. Este programa basado en red neuronal artificial permite que la subjetividad se reduzca al mínimo.

Es necesario que existan programas de capacitación de potenciales evaluadores y con una herramienta como el sistema experto aquí propuesto. En el caso de no existir estas capacitaciones, no es posible evitar los errores de evaluación cometidos por inexpertos.

La propuesta realizada en el documento analizado es interesante y genera la posibilidad de que existan potencialmente más evaluadores en el caso de que un sismo de gran magnitud afecte una zona que abarque muchas estructuras. Este trabajo se escapa de los objetivos del trabajo de título, pero su forma de clasificar las estructuras dañadas es de utilidad y por esta razón se incluye en la bibliografía.

### 3.2. Guía técnica Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta. [7]

Este trabajo consiste en utilizar una metodología explicativa, donde se relacionan los daños de una estructura con sus posibles causas con el fin de realizar un informe técnico sobre éste. La guía tiene el fin de ser un manual de apoyo, consulta y unificación de criterios para los trabajos de evaluación en campo.

El objetivo de esta es realizar una guía de fallas patológicas, mediante la inclusión de una detallada explicación de las patologías más comunes que puedan encontrarse en las estructuras y su sistema de cimentación, afectados por un sismo y sus causas de manera que puedan diferenciarse de patologías asociadas con cargas estáticas y exposición ambiental.

La metodología consiste, en primer lugar, en realizar un reconocimiento del área asignada, evaluando la distribución de daños en la zona, para saber si fueron daños locales o globales. Una vez recorrida la zona asignada, se inicia el proceso de inspección caso por caso. Se siguen los siguientes pasos:

- Observar el suelo alrededor de la edificación. Analizando la existencia de grietas, hundimientos, deslizamientos o cualquier anomalía en el terreno.
- Examinar desde el exterior la edificación, observar el estado general de la edificación. También se observan las edificaciones vecinas, para analizar si las vías de acceso y de evacuación son seguras.
- Evaluar de la mejor manera posible la integridad estructural de la edificación en términos de seguridad para ingresar a evaluar el interior. Observando la integridad de elementos no estructurales y estructurales que puedan representar un peligro

- Una vez calificada como segura para ingresar, se comienza a evaluar el interior de la estructura, para clasificar el grado de daño de los diferentes elementos estructurales y estableciendo un porcentaje de los elementos dañados en las áreas afectadas
- Evaluar elementos no estructurales, clasificando el grado de daño y estableciendo el porcentaje de elementos afectados en el área con mayores daños.
- Se clasifica la afectación de la edificación, de acuerdo a los resultados de la evaluación. Esto se realiza en base a los criterios establecidos en el mismo trabajo, los cuales se muestran más adelante.
- Explicar de manera verbal el significado de la clasificación obtenida a los ocupantes de la edificación. Se debe especificar de manera clara y concisa si pueden permanecer en la edificación o si es necesario evacuar. En caso de que sea segura solo parcialmente, se debe restringir el acceso a las áreas designadas como inseguras, demarcándolas con algún tipo de barreras.
- Notificar a los coordinadores para que se realicen los procedimientos que correspondan por parte de las autoridades pertinentes.

La Guía Técnica propone su propia clasificación del estado de la edificación. Esta requiere la identificación y evaluación de los daños de forma cualitativa con base en una inspección ocular. Para reducir la subjetividad al mínimo, el inspector debe ceñirse a los procedimientos y parámetros establecidos en la Guía Técnica para la Inspección de Edificaciones Después de un Sismo.

El estado de la estructura se reporta en términos de la seguridad funcional, es decir, en términos de su habitabilidad tras el sismo. En consecuencia, los resultados de la inspección se consignan en el formulario único de inspección, y el aviso de clasificación de la edificación se elabora de acuerdo con el resultado de la clasificación del daño.

La clasificación del daño y habitabilidad de la edificación toma en cuenta cuatro categorías distintas: Estado general de la edificación, daños en elementos estructurales, daños en elementos no estructurales, problemas geotécnicos. Estas categorías tienen sub categorías las cuales dan la clasificación global del daño y habitabilidad dividiendo en: Habitable, Uso Restringido, No Habitable, Peligro de Colapso. A continuación en la Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23 se muestran los cuadros con las distintas categorías.

Elemento y/o condición evaluada	DAÑOS	Clasificación global del daño y habitabilidad			
		HABITABLE (VERDE)	USO RESTRINGIDO (AMARILLO)	NO HABITABLE (NARANJA)	PELIGRO DE COLAPSO (ROJO)
ESTADO GENERAL DE LA EDIFICACIÓN	1. Existe colapso (1. No 2. Parcial 3. Total)	1	1	2	2 o 3
	2. Desviación o inclinación de la edificación o de algún entrepiso (1. Si 2. No 3. No se pudo determinar)	2	2	3	1
	3. Falla o asentamiento de la cimentación (1. Si 2. No 3. No se pudo determinar)	2	2	3	1
	Comentarios	No existe colapso, inclinación de la edificación o fallas en su cimentación	Inclinación o colapso puntual de algunos elementos que no representan peligro para la estabilidad de la edificación	Edificios con colapso parcial inferior al 50% del área, donde la parte colapsada no está sobrecargando la estructura. Existen dudas sobre posibles fallas de la cimentación	Edificios que han alcanzado estados últimos, con colapso total o parcial superior al 50% del área, notablemente inclinados o con entrepisos desplomados. Hundimiento o asentamiento de la cimentación

Figura 20: Estado general de la edificación [7]

Elemento y/o condición evaluada	DAÑOS	Clasificación global del daño y habitabilidad				
		HABITABLE (VERDE)	USO RESTRINGIDO (AMARILLO)	NO HABITABLE (NARANJA)	PELIGRO DE COLAPSO (ROJO)	
DAÑOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES	Niveles de daño Se evalúa en el piso de mayor afectación y los porcentajes se toman de los elementos esenciales de acuerdo al sistema estructural	1. Ninguno				
		2. Leve	< 30%	>30%		
		3. Moderado	No hay daños	< 30%	30 a 60%	> 60%
		4. Fuerte	No hay daños	< 10%	10 a 30%	> 30%
		5. Severo	No hay daños	< 5%	5 a 15%	>15%
	Comentarios	Daños muy leves y muy puntuales o que no evidencia ningún tipo de daño estructura	Los daños estructurales son tan puntuales que no reducen su capacidad global de resistencia ni ponen en peligro la estabilidad	Disminución de la capacidad de resistir cargas verticales u horizontales pero no existe inestabilidad potencial	Disminución significativa de la capacidad para resistir cargas verticales o laterales en tal proporción que existe inestabilidad potencial	

Figura 21: Daños en elementos estructurales [7]

Elemento y/o condición evaluada	DAÑOS		Clasificación global del daño y habitabilidad			
			HABITABLE (VERDE)	USO RESTRINGIDO (AMARILLO)	NO HABITABLE (NARANJA)	PELIGRO DE COLAPSO (ROJO)
DAÑOS EN ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES	Niveles de daño Percepción global de los daños en la edificación verificando principalmente aquellos elementos que representan mayor peligro	1. Ninguno				
		2. Leve	< 30%			
		3. Moderado	< 30%			
		4. Fuerte		30 a 60%	>60%	
		5. Severo				
		Comentarios	Daños muy leves y muy puntales o que no evidencia ningún tipo de daño estructura	Peligro puntual de falla o caída de objetos, en zonas diferentes a los accesos y escaleras Se pueden remover fácilmente	Daños generalizados Problemas en escaleras y accesos o en fachadas, balcones, cielo rasos que están en peligro de caer	

Figura 22: Daños en elementos no estructurales [7]

Elemento y/o condición evaluada	DAÑOS		Clasificación global del daño y habitabilidad			
			HABITABLE (VERDE)	USO RESTRINGIDO (AMARILLO)	NO HABITABLE (NARANJA)	PELIGRO DE COLAPSO (ROJO)
PROBLEMAS GEOTÉCNICOS		11. Falla en talud o movimientos en masa 12. Asentamientos, subsidencia o licuación (1. No 2. Parcial 3. Total)	1	1	2	3
		Comentarios	Fuera de la zona de influencia del fenómeno geotécnico y no existe ninguna posibilidad de reactivación	La edificación no se encuentra localizada en el área directa de influencia del fenómeno	El fenómeno es puntual pero sugiere una disminución significativa de la capacidad del suelo a resistir cargas. La edificación se encuentra dentro del área de influencia o de reactivación del fenómeno	La edificación se encuentra localizada sobre o muy cerca al área de influencia del fenómeno y el potencial de reactivación es inminente o muy probable

Figura 23: Problemas Geotécnicos [7]

Gracias a estos métodos de evaluación de daños post sísmicos existentes, se proponen procedimientos para la evaluación de daño de edificios. Esto permite, en algunos casos, la toma de decisiones sin entrar en procedimientos detallados, por lo que es considerada en estudios de anteproyectos.

Se necesita de toda la información disponible y su verificación para una mejor toma de decisiones con respecto a los daños sufridos, para así tener un mejor criterio para su reparación.

Esta guía técnica realizada en Cúcuta se acerca mucho a lo que se planea hacer en este trabajo de título.

### 3.3. Norma para evaluación del nivel de daño por sismo en estructuras y guía técnica de rehabilitación. - Ministerio de Construcción del Japón, 2001 [8]

La presente norma, contiene el procedimiento a seguir para la evaluación inmediata del nivel de daño y riesgo que presentan las estructuras dañadas sísmicamente. Asimismo, se presenta el procedimiento a seguir para evaluar la necesidad y factibilidad de una rehabilitación definitiva. El documento fue realizado por el Ministerio de Construcción del Japón y ha sido utilizado por otros países, tales como, México.

Se sugiere utilizar una metodología que consiste en identificar el tipo, nivel y distribución de daño en la estructura y en sus elementos constitutivos.

La norma para analizar es aplicable a edificios de hormigón armado (H.A), tanto para un sistema de marcos resistentes a momentos, como para un sistema de muros estructurales, para el trabajo de título solo es relevante el análisis de sistema de muros estructurales.

La evaluación del nivel de daño consiste en dos procedimientos a seguir: La evaluación inmediata (o de emergencia) del nivel de riesgo (o peligro) de una edificación y la evaluación del nivel de daño estructural y su clasificación. La primera consiste en una serie de procesos de evaluación posterior al sismo, donde se define si la estructura dañada o alguna parte de ella puede constituir un peligro para la vida humana. En cambio, la segunda, se daba en los resultados de la inspección sobre las condiciones y características de daño que exhiba el edificio, a fin de determinar las condiciones del inmueble y de sus elementos estructurales.

Una vez ocurrido el sismo y, con este, el daño a las edificaciones se realiza la evaluación de emergencia del nivel y peligro. Se inspecciona el nivel de riesgo y peligro de falla y caída de la estructura, caída de objetos, volcadura, inestabilidad de objetos. Tiene las siguientes características:

- Es realizada por profesionales y técnicos en edificación y obra civil
- Basada en la observación del estado interno y externo de las estructuras

Una vez llevada a cabo la primera etapa, se realiza un plan de información y respuesta inmediata. Esta se divide en 3 categorías:

- Peligro: Prohibida la entrada a la edificación
- Precaución: Entrada restringida y con precaución
- Seguro: Posibilidad de entrada

Luego de realizar la evaluación en primera instancia, se realiza la evaluación del nivel de daño y posterior clasificación. Esta se realiza aproximadamente una semana después de la ocurrencia de un sismo.

La inspección de las condiciones y estado de daño es realizada por profesionales y técnicos en edificación. La clasificación del nivel de daño se lleva a cabo bajo los siguientes conceptos:

- Daño ligero
- Daño menor
- Daño medio
- Daño grave
- Falla total

La evaluación y determinación de las necesidades de refuerzo, entre otros conceptos, se evalúa y define de acuerdo con los niveles de daño estructural y niveles de intensidad del sismo en la localidad. En la Tabla 3 se muestra la clasificación y las categorías mostradas son explicadas en detalle en la sección 3.3.4.

Tabla 3: Evaluación daños y determinación de cómo proceder.

Nivel de daño \ Intensidad sísmica (Intensidad según la AMJ)	Daño ligero	Daño menor	Daño Medio	Daño Grave	Falla total
Menor que IV					
V					
Mayor que VI					

Donde:

-  Reparación
-  Reparación y/o refuerzo. Requiere de inspección investigada detallada
-  Refuerzo o demolición. Requiere inspección e investigación detallada

Para la evaluación inmediata del nivel de riesgo de una edificación los aspectos o puntos considerados por inspeccionarse durante la visita de campo se asocian a un nivel de daño A, B o C. En base de los niveles de daño definidos, donde A es donde presenta un menor daño y C el mayor, se determina el nivel de riesgo de estabilidad estructural, los mismos criterios se utilizan para el nivel de riesgo debido a la caída y volcamiento de objetos y elementos no estructurales. Estos se muestran a continuación:

- Peligro: Se define cuando los resultados de los puntos a evaluar en la inspección de campo describen más de uno con nivel C o más de dos con nivel B
- Precaución: Se define cuando los resultados sobre cada uno de los puntos que se inspecciona incluyan más de uno con nivel B; o bien, cuando el nivel de daño estructural en algunos elementos se describió con un nivel mayor o igual a III
- Seguro: Cuando no se describen condiciones de estabilidad estructural que califiquen al inmueble en nivel de “peligro” o “precaución”

Teniendo estos resultados de la evaluación de riesgo, se realizan ciertas recomendaciones a los usuarios y dueños de los edificios para adoptar medidas de seguridad:

- En los edificios con nivel de “peligro” se prohíbe el acceso a estos. Si se cataloga como “peligro” elementos no estructurales, entonces aquellas zonas o accesos se les prohíbe el acceso.
- Cuando los edificios son calificados con el nivel de “precaución” en cualquiera de los puntos de inspección, total o parcial, se permite el acceso a los mismos siempre y cuando se tomen las precauciones pertinentes basándose en los resultados y recomendaciones de la inspección evaluativa.
- En los edificios que fueron calificados con el nivel de “seguro” en cualquiera de los aspectos de la inspección de campo, se permite el libre acceso a los mismos.

Para la evaluación del nivel de daño estructural y su clasificación el profesional realiza una inspección en los edificios dañados sobre la condición de posibles problemas de daños por asentamientos, desplomo, o bien, daños en los elementos estructurales. Al terminar la inspección clasifica el tipo de daño observado y con estos resultados emite un dictamen sobre la necesidad de rehabilitar la estructura. Se clasifica el tipo y nivel de daño y se emite el resultado sobre la necesidad de reparar o reforzar la edificación.

Para la revisión de elementos estructurales, basta con centrarse en el nivel o en los entresijos más dañados. Asimismo, para los elementos no estructurales que exhiban daño importante y tengan riesgo de caída o volcamiento. Finalmente se investiga la memoria de cálculo y planos de diseño arquitectónico y estructural.

Se evalúan, en primer lugar, los asentamientos totales de la estructura y el desplomo de la estructura. Los criterios se muestran en la Tabla 4, donde S (en metros) es el valor máximo de asentamiento y  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la estructura en radianes.

*Tabla 4: Criterios evaluación desplome y asentamiento estructural*

Asentamientos Totales		Ángulo inclinación	
Daño menor	$S \leq 0.2m$	Daño menor	$\theta \leq 1/100rad$
Daño medio	$0.2 < S \leq 1.0m$	Daño medio	$1/100rad < \theta \leq 3/100rad$
Daño grave	$S > 1.0m$	Daño grave	$3/100rad < \theta \leq 6/100rad$
		Volcamiento	$\theta > 6/100rad$

Para calcular  $\theta$  se considera la inclinación de la estructura en las direcciones X e Y, la cual se obtiene de la siguiente forma:

$$\theta = \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$$

La cuantía de daño en una estructura se denomina  $D_i$ , donde el sufijo “i” representa el tipo de daño, evaluado del 1 al 5. La sumatoria de los valores individuales  $D_i$  permiten efectuar la evaluación del nivel de daño y su clasificación como se indica a continuación en la Tabla 5.

*Tabla 5: Clasificación de cuantía de daños en la estructura.*

Daño ligero	$D \leq 5$
Daño menor	$5 < D \leq 10$
Daño medio	$10 < D \leq 50$
Daño grave	$D > 50$
Falla	$D_5 = 50$

La estimación de  $D_i$  se realiza considerando el entrepiso de la estructura que haya exhibido la mayor concentración de daño. Se determina el valor de  $D_i$  para las direcciones largas y cortas de la estructura (X e Y), en forma independiente

Se define la longitud total de los muros existentes como  $A_0$  y la longitud de muros con posibilidad de ser inspeccionados como A. Cada uno de estos muros se evalúa y clasifica el tipo de daño, entre el I y V, como muestra la Tabla 6. Posteriormente la longitud de muros con la misma clasificación del nivel de daño se denomina  $B_i$ . En base a los valores de A y  $B_i$  se determina el valor de  $D_i$ , como indica la Tabla 7.

Tabla 6: niveles de daños para elemento estructurales

Nivel de daño de columna, viga o muro estructural	Descripción del tipo de daño en columnas o muros
I	Agrietamiento muy pequeño, no se distingue a simple vista. (anchura de grieta menor a 0.2mm)
II	Agrietamiento distinguible a simple vista (anchura de grieta entre 0.2mm y 1.0mm)
III	Aparecen grietas comparativamente grandes, en los casos extremos se presenta desprendimiento incipiente del concreto (anchura de grieta entre 1.0 y 2.0 mm)
IV	Aparición de gran cantidad de grietas anchas (grietas con anchura mayor a 2.0 mm). Desprendimiento severo del recubrimiento de concreto y exposición del refuerzo longitudinal
V	Pandeo del refuerzo longitudinal, aplastamiento del concreto del núcleo, a simple vista se aprecia deformación vertical en columnas (o bien, en muros estructurales). Es característico observar fenómenos de asentamiento y/o desplomo. En algunos casos se puede observar falla por tensión del refuerzo longitudinal (fractura).

Tabla 7: Valores  $D_i$  en base a los valores de  $A$  y  $B_i$

$D_i$	Valores $D_i$	Formula
$D_1$	$10B_1/A$	Para $B_1/A \leq 0.5$
	5	Para $B_1/A > 0.5$
$D_2$	$26B_2/A$	Para $B_2/A \leq 0.5$
	13	Para $B_2/A > 0.5$
$D_3$	$60B_3/A$	Para $B_3/A \leq 0.5$
	30	Para $B_3/A > 0.5$
$D_4$	$100B_4/A$	Para $B_4/A \leq 0.5$
	50	Para $B_4/A > 0.5$
$D_5$	$1000B_5/7A$	Para $B_5/A \leq 0.35$
	50	Para $B_5/A > 0.5$

Finalmente se evalúa la necesidad de refuerzo y rehabilitación como se mostró en la sección 3.3.2 para el caso más desfavorable entre los distintos tipos de daño (asentamiento, desplomo o daño en los elementos estructurales).

El documento analizado brinda una gran ayuda en el proceso de evaluar edificaciones luego de un sismo. Logra homogenizar los parámetros para determinar el estado de la estructura y así poder determinar el estado de esta y, además, se evalúa la necesidad de refuerzo y rehabilitación. La norma contiene ejemplos del nivel de daño y tipo de daño, las cuales se pueden revisar en la bibliografía citada.

El trabajo realizado por el ministerio de construcción de Japón es similar a lo que se busca realizar en el trabajo de título, solo que este último es solo para sistema estructural de muros y busca entrar en un mayor detalle con respecto a los daños estructurales, diferenciando las razones a la que se deben estos daños y también adaptándolo a las características típicas del muro chileno.

### 3.4. Revisión de la Guía de Evaluación de Daño Post-Sismo de edificaciones de hormigón armado en Japón. [14]

En este documento se realiza una nueva revisión a la guía japonesa de evaluación y rehabilitación post-sismo realizado en 1991 y revisado en el 2001. Esta revisión se genera el año 2015. Con relación a lo expuesto en el punto anterior (3.3) en este documento se hace énfasis en un nuevo método para evaluar la resistencia sísmica residual que tiene una estructura de hormigón armado. Este método es basado en el “R-índice”, el cual es un parámetro que evalúa la resistencia sísmica de una estructura después de un sismo con su resistencia sísmica original.

Generalmente no es fácil identificar la resistencia sísmica residual cuantitativamente de inspecciones rápidas. Una vez terminada esta etapa se realiza un análisis de daños, que tiene una mayor precisión y luego un análisis técnico y económico para encontrar la mejor solución a edificaciones dañadas cuando es necesario.

El objetivo principal de la Guía de Evaluación de Daño es ayudar al ingeniero cuando necesita identificar el nivel de daño cuantitativamente y determinar las acciones necesarias a llevar a cabo con la edificación mediante un análisis técnico y racional, para así restaurar los daños en la estructura.

R-index es definido como el cociente entre la capacidad sísmica post-sismo,  $DIS$ , y la capacidad sísmica original,  $IS$ .

$$R = \frac{DIS}{IS} \cdot 100 (\%)$$

Los índices IS son basados en el coeficiente sísmico C y la ductilidad F (en este documento simbolizan la ductilidad como F). Se evalúa la resistencia a las cargas laterales de los elementos estructurales.

La evaluación de daño de una edificación se divide en las fundaciones y en la superestructura. En primer lugar, se evalúan las fundaciones, en caso de que estas se encuentren en buen estado o presenten un daño reparable, se procede a analizar la superestructura, en caso contrario se debe demoler. Para el caso de la superestructura se evalúa en primera instancia si la estructura puede utilizarse temporalmente o el acceso es denegado, luego se evalúa la necesidad de reparar la estructura y si esta es reparable.

En la Figura 24 se muestra un diagrama que explica el procedimiento mencionado. Realizando una comparación con este documento y el trabajo de título, el segundo está enfocado en la inspección rápida, en el análisis de las fundaciones y la superestructura en primera instancia, el resto del trabajo implica modelamientos estructurales del edificio que implican mayor tiempo de trabajo.

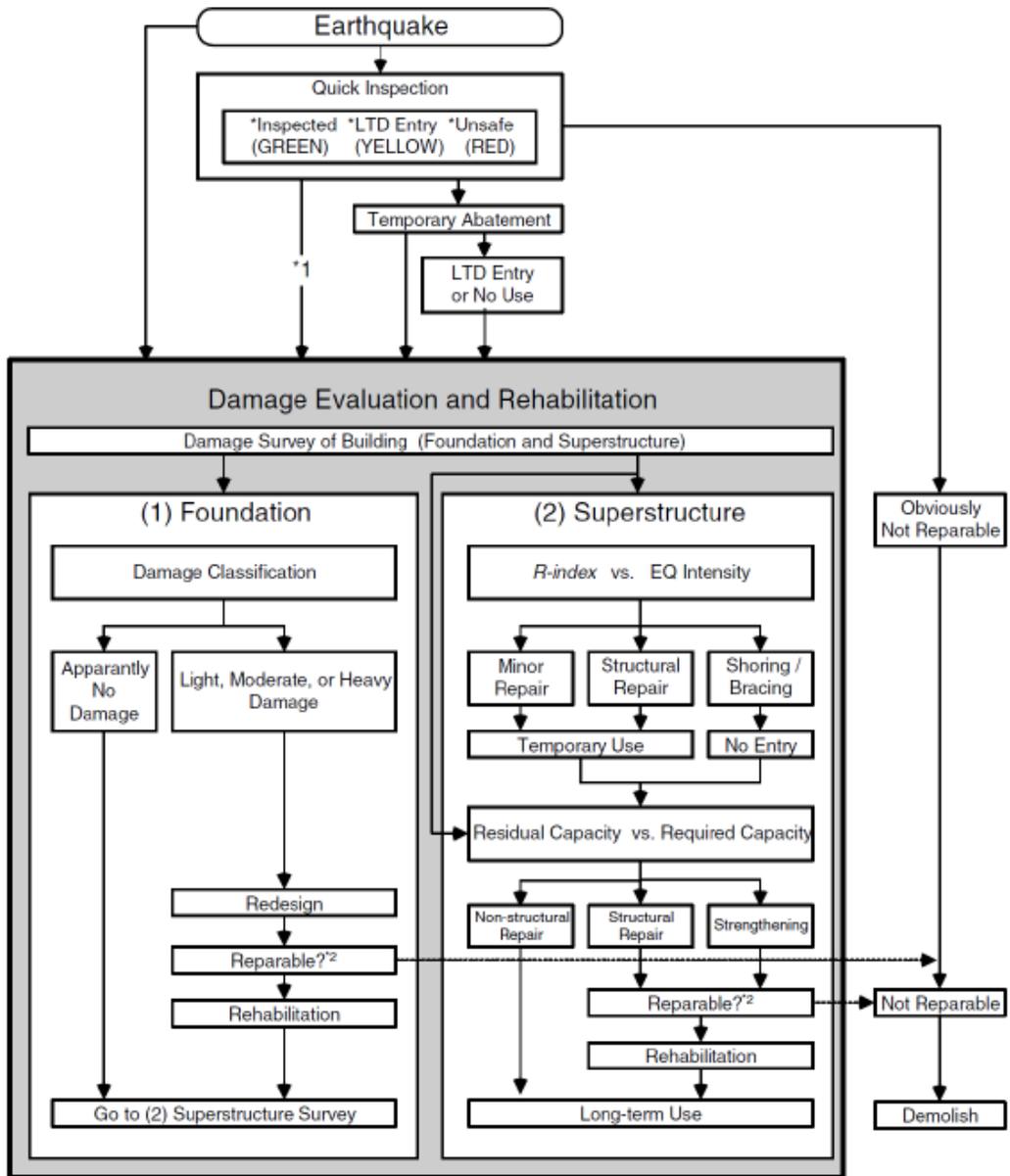


Figura 24 Diagrama de evaluación de daños y rehabilitación [14]

El daño de cada elemento estructural se clasifica en uno de los cinco niveles mostrados en la Tabla 8. En la Figura 25 y Figura 26 se muestra la relación con los niveles de daño y la deflexión del elemento estructural, la Figura 25 muestra el caso de un elemento dúctil y la Figura 26, un elemento frágil.

Las figuras mencionadas son gráficos de la carga aplicada vs la deflexión del elemento estructural. En el caso dúctil les da énfasis a los siguientes cuatro puntos:

- Cuando el elemento estructural comienza a mostrar grietas y se fisura
- El momento en que las barras de acero comienzan a fluir.
- El hormigón presenta fallas a compresión
- El hormigón de recubrimiento se cae del elemento y las barras de acero sufren pandeo. (se puede observar a simple vista)

Para el caso frágil se muestra cuando se muestran 3 puntos en particular:

- Cuando el elemento estructural comienza a mostrar grietas y se fisura
- El hormigón de recubrimiento cae del elemento y se expanden las fallas debido al corte
- Pandeo del elemento y/o fractura.

Tabla 8: Definición de clases de daños en elementos estructurales

Clase de Daño	Daño observado en elementos estructurales
I	Algunas fisuras son vistas, tienen un grosor menor a los 0.2mm
II	Fisuras de un grosor entre 0.2 y 1mm
III	Se encuentran algunas grandes fisuras de espesor de 1 a 2mm y se ve el desprendimiento de una parte del hormigón
IV	Muchas fisuras grandes son encontradas. Fisuras con espesor mayor a 2mm. Se observan barras de acero debido al desprendimiento del hormigón
V	Se ve a simple vista el pandeo del acero, deformación vertical de columnas y/o muros de corte. Se desprende el hormigón de recubrimiento y puede haber fractura de ciertos elementos.

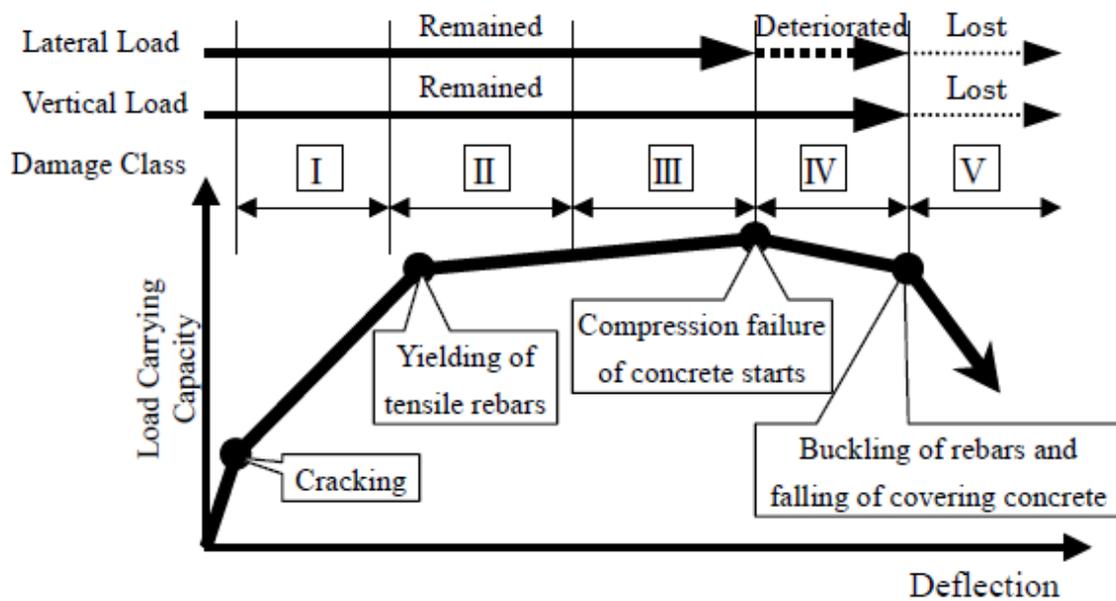


Figura 25: Relación fuerza-desplazamiento lateral y clases de daños para elementos dúctiles [14]

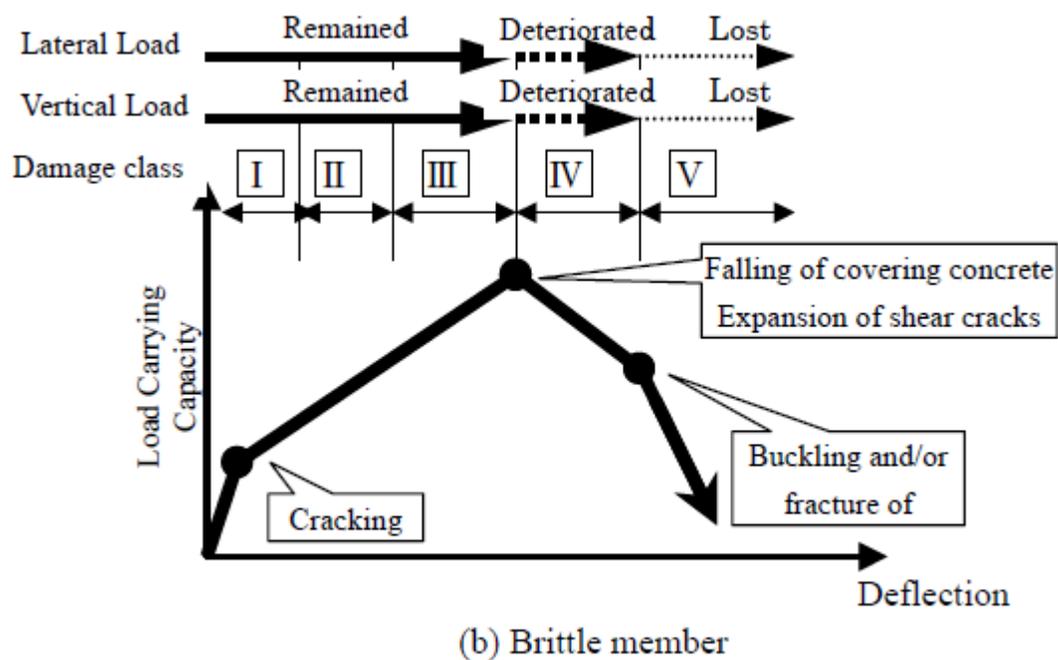


Figura 26: Relación fuerza-desplazamiento lateral y clases de daños para elementos frágiles [14]

El componente fundamental para el índice IS es la capacidad de la estructura de disipar energía en un sismo, índice  $E_0$ . Se definen los siguientes conceptos.

$E_d$  = Energía disipada

$E_r$  = Energía potencial que puede disipar

$E_t$  = Energía original de disipación ( $E_t = E_d + E_r$ )

$\eta = E_r/E_t$ . Factor de reducción sísmico

La Figura 27 muestra un diagrama conceptual ilustrando la curva de las fuerzas laterales vs desplazamiento y como las áreas de esta curva muestran las energías de disipación.

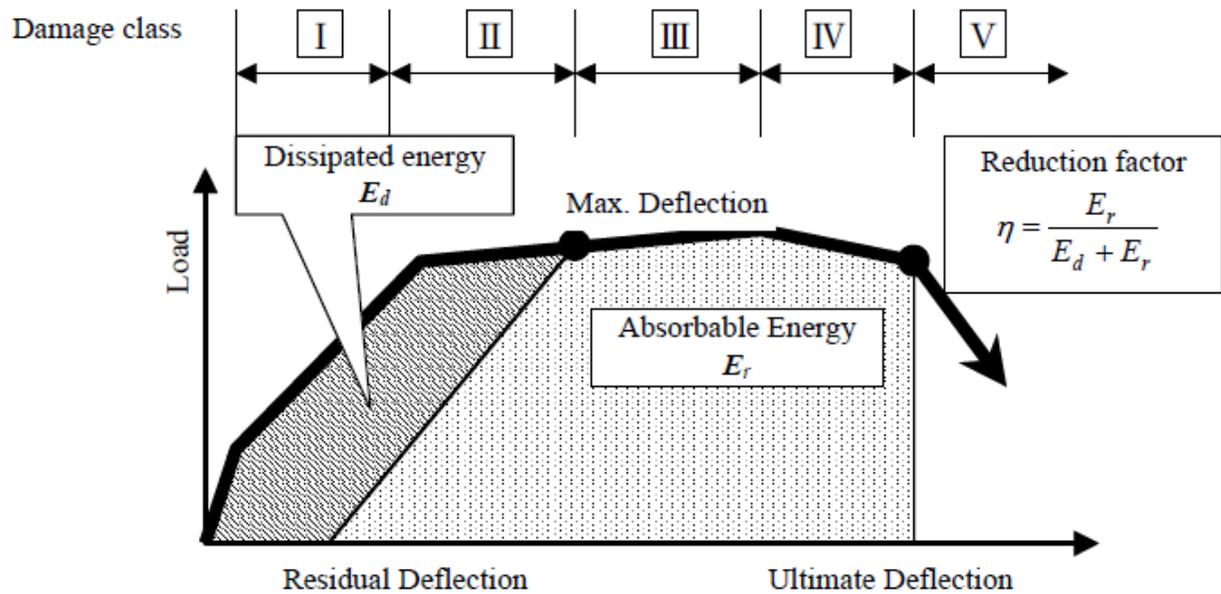


Figura 27: Factor de reducción sísmico [14]

El valor  $\eta$  se define como el cociente de la energía potencial que se puede disipar después del daño por la energía original de disipación. Estos valores sirven para cuantificar la importancia de los niveles de daño, donde si se tiene un mayor nivel de daño, implica un menor valor de  $\eta$ . En la guía técnica original se tenían siguientes valores para el índice  $\eta$  presentes en la Tabla 9. Estos valores del factor  $\eta$  son calibrados mediante experimentación.

Tabla 9: Capacidad sísmica de reducción original

Clase de daño	Columna dúctil	Columna frágil	Muro de corte
I	0.95	0.95	
II	0.75	0.6	
III	0.5	0.3	
IV	0.1	0	
V	0	0	

En la revisión de la guía técnica se modificaron los valores del factor  $\eta$  para otorgar una mayor precisión, además de la evaluación con el método de resistencia residual, R-index mencionado anteriormente. En la Tabla 10 se muestran los valores obtenidos del factor  $\eta$ .

Tabla 10: Capacidad sísmica de reducción actualizada

Clase de daño	Columna			Viga		Muro corte	
	dúctil	Cuasi-dúctil	frágil	dúctil	frágil	dúctil	frágil
I	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
II	0.75	0.7	0.6	0.75	0.7	0.7	0.6
III	0.5	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3
IV	0.2	0.1	0	0.2	0.1	0.1	0
V	0	0	0	0	0	0	0

El valor del R-index puede ser evaluado mediante el corte en los pisos, como se muestra en la siguiente ecuación. Esta ecuación asume que el índice de ductilidad es uniforme en todos los elementos verticales del piso.

$$R = \sum \left( \frac{Q_{ui}}{\sum Q_{ui}} \cdot \eta_i \right)$$

Donde  $Q_{ui}$  es la fuerza lateral a la cual es sometido el elemento estructural ocasionada por un sismo que se calcula según la norma de diseño sísmico de cada país. En el caso chileno sería calcular el corte por la NCh433 para el caso de edificios habitacionales y puede ser por método estático o método dinámico.

El valor R-index a momento se calcula de forma análoga al caso del corte, con la siguiente ecuación:

$$R = \sum \left( \frac{M_{ui}}{M_{ui}} \cdot \eta_i \right)$$

Donde  $M_{ui}$  es el momento generado por flexión en el elemento estructural.

Finalmente, una vez calculado el R-index se procede a clasificar el edificio, el cual se encuentra en las categorías señaladas en la Tabla 11.

Tabla 11: Clasificación del edificio según sus valores de R-index

Clasificación de daño	Valor de R
Levemente dañado	$R \geq 95\%$
Daños menores	$80 \leq R < 95\%$
Daño moderado	$60 \leq R < 80\%$
Daño severo	$R < 60\%$
Colapso	$R \approx 0$

En este documento se analiza el estado de una edificación post sismo mediante su resistencia sísmica residual. Para realizar esto se utilizan el factor de reducción sísmico ( $\eta$ ) y su relación con

los niveles de daño de los elementos estructurales, que se determina mediante datos experimentales. Este método es una buena aproximación a cómo se comporta una estructura después de recibir daño y resulta ser efectivo.

Este método es diferente a lo que se espera realizar con el trabajo de título, ya que la evaluación de un edificio dañado mediante el R-index toma más tiempo debido a que se necesitan realizar modelos de la estructura para así calcular los distintos parámetros. En cambio, en el trabajo de título se espera realizar una inspección más visual e inmediata del estado del edificio.

### 3.5. Evaluación de Daño Estructural Post-Sismo en Edificaciones: Estado del Arte [5]

El documento analizado evalúa y compara distintas metodologías de inspección y clasificación de daños en edificaciones después de un sismo. Recopila información de evaluaciones de daño post-sismo y de manera resumida muestra los procedimientos y sus aplicaciones. Se comparan modelos de Colombia, Chile y México.

En la Figura 28 se muestra la recopilación de información tomada en cuenta para el desarrollo del documento.

	AÑO	LUGAR	AUTOR	TITULO
1	2014	ITALIA	Antonio Di Cesare, Felice Carlo Ponso, Marco Vona, Mauro Dolce, Angelo Masi, Maria Rosaria Gallipoli, Marco Mucciarelli	Identification of the structural model and analysis of the global seismic behaviour of a RC damaged building
2	2012	LISBOA	S. Jérez	Post-seismic damage evaluation: A probability-based global damage index
3	2012	CHINA	Xiaohua Tong	Building-damage detection using pre- and post-seismic high-resolution satellite stereo imagery: A case study of the May 2008 Wenchuan earthquake
4	2011	CHINA	H. J. Jiang, L. Z. Chen, Q. Chen	Seismic Damage Assessment and Performance Levels of Reinforced Concrete Members
5	2011	USA	Asaollah Bassam, Amirhossein Iranmanesh, Farhad Ansari	A simple quantitative approach for post earthquake damage assessment of flexure dominant reinforced concrete bridges
6	2010	CHINA	Timo Balz Mingsheng Liao	Building-damage detection using post-seismic high-resolution SAR satellite data
7	2010	CHILE	H. Santa María, Allard, Lürdes, M. Santa María	Plan de protección civil: sistema de evaluación estructural rápida post-sismo de edificios e infraestructura
8	2009	TAIWAN	Q. Xue, C.W. Wu, C.C. Chen, W.Y Chou	Post-earthquake loss assessment based on structural component damage inspection for residential RC buildings
9	2007	ESPAÑA	Alex H. Barbat, Luis G. Pujades, Nieves Lantada	Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona
10	2006	COLOMBIA	Martha Liliana Carreño Omar Darío Cardona A Mabel Cristina Marulanda Alex H. Barbat	Herramienta Computacional para la evaluación post-sísmica de daños de edificios
11	2009	COLOMBIA	AIS	Procedimientos para la inspección de edificaciones después de un sismo
12	-	COLOMBIA	Martha Liliana Carreño Tibaduiza	Sistema experto para la evaluación del daño post-sísmico en edificios
13	-	USA	Yousef Bozorgnia, Vitelmo V. Bertero	Improved damage parameters for post-earthquake applications
14	2011	MÉXICO	Joel Aragón Cárdenas Leonardo E. Flores Corona Óscar A. López Bátis CENAPRED	Manual del formato de captura de datos para evaluación estructural. Red Nacional de Evaluadores
15	2006	ESPAÑA	Martha Liliana Carreño Tibaduiza	Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos
16	2013	MÉXICO	CENAPRED	Metodología para la evaluación de la seguridad estructural de edificios
17	-	CHILE	MINVU	Instructivo para la evaluación técnica de daños en viviendas post desastres

Figura 28: Recopilación de estudios realizados [5]

Las metodologías estudiadas se clasifican en tres tipos, dependiendo de los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 12 y en la Figura 29.

Tabla 12: Parámetros para clasificar las metodologías

Escala de evaluación	A gran escala
	Para una edificación en particular
Tipo de observación	Observaciones directas en el sitio
	Fotografías satelitales de alta definición
Enfoque de evaluación	Cuantitativas
	Cualitativas



Figura 29: Parámetros para clasificar las metodologías. [5]

No se entra en mayor detalle en los métodos estudiados por este documento, debido a que el trabajo de analizar distintas metodologías de inspección y clasificación de daños post-sismo es lo que se está realizando en este trabajo de título, por lo cual se considera que sería redundante y resultaría muy extenso.

Luego se comparan los distintos estudios. Se toma en cuenta cómo actúa cada país, como clasifica los daños y las condiciones necesarias para realizar esto. En la Tabla 13 se muestra la comparación entre los métodos cuantitativos.

Tabla 13: Comparación entre métodos cuantitativos presentes en el documento

País	Colombia	México	Chile
Condiciones Preexistentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calidad materiales de construcción</li> <li>- Irregularidades presentes en la edificación</li> <li>- Configuración estructural</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Censo de edificaciones</li> <li>- Estudio de vulnerabilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Evaluación de edificaciones construidas antes de la norma de diseño sísmico de 1996</li> <li>-Inspección y tratamiento especial a edificaciones de mayor importancia</li> </ul>
Capítulos de Evaluación	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Estado de la edificación</li> <li>- Daños en elementos no estructurales</li> <li>- Problemas geotécnicos</li> <li>- Porcentaje de daños en la edificación</li> <li>- Clasificación global del daño y habitabilidad de la edificación</li> <li>- Recomendaciones y medidas de seguridad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Daños y análisis de necesidades</li> <li>- Evaluación rápida de emergencia</li> <li>- Evaluación detallada de seguridad estructural</li> <li>- Evaluación detallada y especializada de seguridad estructural en edificaciones de alta importancia</li> </ul>	Evaluación de: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pilares</li> <li>- Vigas, muros estructurales, entresijos, columnas</li> <li>- Nudos</li> <li>- Comportamiento a flexión y corte</li> <li>- Comportamiento a aplastamiento</li> <li>- Falta de refuerzo en elementos estructurales</li> </ul>
Índice de Daño	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ninguno</li> <li>- Leve</li> <li>- Moderado</li> <li>- Fuerte</li> <li>- Severo</li> <li>-Colapso Total</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin daño</li> <li>- Daño medio</li> <li>- Daño grave o severo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ninguno</li> <li>- Leve</li> <li>- Moderado</li> <li>- Fuerte</li> <li>- Severo</li> <li>- Colapso total</li> </ul>
Habitabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Habitable</li> <li>- Uso restringido</li> <li>- No habitable</li> <li>- Peligro colapso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Habitable</li> <li>- Segura con restricciones</li> <li>- Insegura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inspeccionado</li> <li>- Ingreso limitado</li> <li>- Inseguro</li> </ul>

Por lo general los capítulos de evaluación estructural en las edificaciones en los tres países son similares, dando especial importancia a los elementos principales, como son: vigas, muros y columnas que hacen parte del sistema principal de resistencia al sismo.

Los índices de daño son cuantitativos y cubren un rango de gravedad del daño que posteriormente servirá para definir la habitabilidad.

Para la definición de habitabilidad el concepto es el mismo siempre. Lo que se busca es dar el calificativo adecuado a una edificación para que pueda continuar funcionando o, en el peor de los casos, ordenar su inhabitabilidad y evitar pérdidas humanas.

El documento resulta importante debido a que evalúa y compara distintos métodos, lo cual se realiza también en el trabajo de título, pero además se busca proponer una metodología propia.

### 3.6. Guía Técnica para Inspección de Edificaciones Después de un Sismo [15]

La guía técnica fue elaborada por la Asociación de Ingeniería Sísmica – AIS de Colombia, por el encargo de fondo de prevención y atención de emergencias (FOPAE). Se realizó recopilando las principales metodologías existentes en ese país y a nivel internacional para la evaluación post sismo de edificaciones.

El objetivo de este documento es realizar una metodología para la evaluación del nivel de daño y de la seguridad de edificaciones después de un terremoto, que permita definir las acciones de rehabilitación y reconstrucción de las edificaciones en las diferentes localidades de Bogotá.

La clasificación de la afectación de la edificación y de su habitabilidad se basa en los resultados de la inspección sobre las condiciones que presente la edificación de manera global, los daños en sus elementos arquitectónicos, estructurales y las condiciones geotécnicas de su entorno. Para el trabajo de título se analizan las metodologías y clasificaciones para los elementos estructurales, ya que los demás están fuera del alcance del trabajo.

Para llevar a cabo la metodología, en primer lugar, se realiza un reconocimiento de la ciudad durante las primeras horas después del terremoto. Esto se realiza con el fin de saber la magnitud y

extensión de los daños, la identificación de las zonas de mayor afectación, la estimación preliminar del número de edificaciones colapsadas y la extensión de otras condiciones de inseguridad.

El proceso de reconocimiento preliminar se realiza por diferentes comisiones que luego de esta deben reunirse para consolidar los informes de los daños observados y la extensión de estos y generar un mapa completo del área con códigos de colores por manzana de acuerdo a los grados de afectación.

Una vez realizado el reconocimiento preliminar de la ciudad, se reconoce el área asignada y se evalúa la afectación de la zona. Luego se una edificación es seleccionada para realizar la inspección y se siguen los siguientes pasos:

- 1) Se examina el exterior de la edificación, evaluando la calidad de la construcción, irregularidades y otros aspectos preexistentes. Se observan el estado general de la edificación para determinar si es seguro su acceso a esta. También se analiza el estado de edificaciones vecinas, para así establecer si las salidas de la edificación son seguras.
- 2) Observar el suelo alrededor de la edificación.
- 3) Examinar la seguridad de elementos no estructurales, identificar la caída de cielos rasos, muros, escaleras o elementos que representen peligro para la vida.
- 4) Una vez dentro de la edificación se evalúa el sistema estructural desde el interior. Se evalúan los elementos estructurales y se establece un porcentaje de elementos afectados en el piso con mayores daños
- 5) Clasificar la edificación de acuerdo con los resultados de la evaluación. Marcar en los mapas el resultado de la evaluación de acuerdo con los códigos de colores y al uso de la edificación
- 6) Explicar verbalmente el significado de la clasificación a los ocupantes de la edificación y especificar si pueden permanecer en la edificación, ya sea total o parcialmente y señalar si deben evacuarla.
- 7) Notificar a los coordinadores para que se realicen los procedimientos que correspondan por parte de las autoridades pertinentes.

Se debe llenar un formulario que contiene 10 secciones principales que incluyen los siguientes aspectos:

- Identificación de la edificación
- Descripción de la estructura
- Evaluación del estado de la edificación dividida en: estado general de la edificación, daños en elementos estructurales, daños en elementos arquitectónicos, problemas geotécnicos, porcentaje de daño de la edificación y clasificación global del daño.
- Recomendaciones y medidas de seguridad
- Esquema
- Condiciones preexistentes
- Efecto en los ocupantes

- Ocupación de la edificación y persona para contacto
- Comentarios
- Inspectores y fecha de inspección

Edificios con colapso total o parcial, notablemente inclinados, con entrepisos completamente desplomados, o con fallas en la cimentación son un excelente indicador de daño estructural que afecta la estabilidad de toda la edificación en su conjunto. Por lo tanto, se debe señalar su condición en el formulario y ser clasificado como inseguro. No es necesario describir los daños arquitectónicos o estructurales cuando existe colapso total.

Los elementos estructurales se evalúan según el sistema estructural de la edificación, los cuales se presentan en la tabla ASDSF. Para cada uno de los elementos y en cada nivel de daño se asigna un porcentaje del daño dependiendo de lo observado por el evaluador. A partir de la información del daño (nivel y porcentaje) que se presente en cada tipo de elemento y la de los demás elementos estructurales involucrados, se obtiene la noción de la gravedad del daño en el piso. En la Tabla 14 se presentan las variables estructurales a evaluar según el sistema estructural.

*Tabla 14: Variables estructurales a evaluar según el sistema*

Sistema Estructural	Elementos Estructurales
Pórtico en H.A.	Vigas, columnas, nudos y entrepisos
Pórtico con muros estructurales en H.A.	Vigas, columnas, nudos, muros y entrepisos
Estructuras Metálicas	Vigas, columnas, conexiones y entrepisos
Estructuras en Madera	Vigas, columnas, conexiones y entrepisos
Mampostería	Muros portantes y entrepiso
Tapia, adobe y bahareque	Muros portantes y entrepiso

Los niveles de daños en los elementos estructurales a considerar se dividen en la siguiente clasificación:

- Ninguno/muy leve: Algunas fisuras de ancho menor a 0.2mm, casi imperceptibles sobre la superficie del concreto
- Leve: Fisuras perceptible a simple vista, con anchos entre 0.2mm y 1mm sobre la superficie del concreto
- Moderado: Grietas con anchos entre 1mm y 2mm en la superficie del concreto, pérdida incipiente del recubrimiento
- Fuerte: Agrietamiento notable del concreto, pérdida del recubrimiento y exposición de las barras de refuerzo longitudinal.
- Severo: Degradación y aplastamiento del concreto, agrietamiento del núcleo y pandeo de las barras de refuerzo longitudinal. Deformaciones e inclinaciones excesivas.

Finalmente, se realiza la clasificación con daño severo de ciertos elementos estructurales esenciales que pueden comprometer toda la edificación y, por lo tanto, se dice que hay una situación de saturación del daño global. Se muestra en la Tabla 15.

*Tabla 15: Porcentaje de daño en la edificación*

Clasificación habitabilidad (color)	Caracterización del daño	Descripción
Habitable (verde)	Ninguno	Sin daño
Habitable (verde)	Leve	Inmueble sufre daño leve y muy puntuales en elementos arquitectónicos, los cuales pueden ser reparados fácilmente y que no ofrecen peligro para la integridad de las personas que la ocupan
Uso restringido (amarillo)	Moderado	La edificación sufre daños importantes en elementos no estructurales, su ocupación estaría condicionada al retiro o reparación de aquellos elementos que ofrezcan peligro de caerse
No habitable (naranja)	Fuerte	Inmuebles que sufrieron daños estructurales, grietas grandes en vigas, columnas o muros. Presenta disminución en su capacidad para resistir cargas. Hay que evaluar la necesidad de apuntalar la edificación
Peligro de colapso (rojo)	Severo	Inmuebles que sufrieron daños generalizados en su estructura, presentan peligro de colapso o derrumbe inminente. Es necesario evacuarlos totalmente y proteger calles y las edificaciones vecinas.
	Colapso Total	El inmueble está totalmente en ruinas

Aparte de los daños sísmicos, también se analizan las condiciones preexistentes, como lo son la configuración de planta y altura. El evaluador debe analizar las condiciones de irregularidad de la edificación. En la Tabla 16 se muestra una sugerencia para evaluar la configuración estructural.

Tabla 16: Criterios para evaluar regularidad en planta

Clasificación	Descripción
Buena	La distribución de masas con relación a los dos ejes ortogonales es aproximadamente simétrica en planta, así como muros y otros elementos resistentes. No tiene ninguna condición correspondiente a la clasificación mala
Regular	Entre la clasificación buena y mala
Mala	En planta tiene entrantes y salientes cuya dimensión excede el 30% de la dimensión en planta, medida paralelamente a la dirección que se considera de la entrante o saliente. Aberturas en el diafragma mayores del 30% del área del piso. La relación de aspecto (largo a ancho) de la base es mayor que 3.

El manual y guía técnica para inspección de edificaciones después de un sismo, explica una buena metodología de como inspeccionar una estructura después de un terremoto en primera instancia, la cual permite clasificar la edificación en una categoría de riesgo y luego de eso analizar cómo proceder.

La guía técnica no solo analiza los daños post sismo, también le da énfasis a las condiciones preexistentes de la edificación, como la configuración en planta y altura, además de identificar si existe o no redundancia estructural, efecto de columna corta, excentricidad y continuidad de los elementos estructurales. Lo cual ayuda a sacar mejores conclusiones a futuro, ver los puntos a mejorar y hasta modificar las normas de diseño.

### 3.7. Ficha de Evaluación de Daños para Inspección Rápida de Edificios Públicos – Chile, 2015 [16]

Este es un documento realizado por la Dirección de Arquitectura, Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile. Es un documento adaptado, ampliado y actualizado de la versión japonesa, con el fin de evaluar un inmueble para la seguridad de las personas, tanto en el interior como en las inmediaciones. La ficha de evaluación de daños está enfocada en la inspección rápida de diversos desastres naturales, pero para fines del trabajo de título, se realiza el enfoque en los desastres ocasionados por sismos.

En primer lugar, la ficha de evaluación de daños pide rellenar ciertos datos sobre la identificación del inspector, identificación del edificio, tipo de desastre que genero los daños y el sistema estructural analizado.

Luego el documento se divide en tres inspecciones, en primer lugar una inspección exterior, luego de los elementos estructurales y finalmente de los elementos no estructurales. Estas inspecciones sirven para clasificar la estructura en una de las tres categorías propuestas: Inspeccionado, Ingreso limitado e Inseguro.

El documento chileno al ser basado en la norma japonesa clasifica los daños en los mismos cinco niveles descritos en la sección 3.3. Norma para evaluación del nivel de daño por sismo en estructuras y guía técnica de rehabilitación. - Ministerio de Construcción del Japón, 2001 [8] en la Tabla 6

La primera inspección consiste en una inspección general de todo el inmueble desde su exterior. Para realizar esto se utiliza la Tabla 17. En el caso de que el inmueble sea claramente inseguro, no se realizan las inspecciones 2 y 3.

Tabla 17: Inspección 1, inspección general desde el exterior

Ranking	A	B	C
Colapso Total o parcial	<input type="checkbox"/> No	-----	<input type="checkbox"/> Si
Daño producto de edificaciones adyacentes o falla del suelo colindante	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Si
Asentamiento del Edificio debido a falla del suelo	<input type="checkbox"/> < 0.2m	<input type="checkbox"/> entre 0.2 y 1.0m	<input type="checkbox"/> >1.0m
Inclinación del Edificio completo o una parte debido a Asentamiento Diferencial	<input type="checkbox"/> < 1/60 rad	<input type="checkbox"/> Entre 1/60 y 1/30rad (aparentemente inclinado)	<input type="checkbox"/> > 1/30 rad (fácil de notar)
Deformación de Estructura de Techo del Edificio Total o Parcial	<input type="checkbox"/> < 1/60rad	<input type="checkbox"/> Entre 1/60 y 1/30 rad (aparentemente inclinado)	<input type="checkbox"/> > 1/30 rad (fácil de notar o grietas cordones)

La segunda inspección se enfoca en los peligros de daño en edificios adyacentes, terrenos colindantes y segmentos estructurales. Para realizar esta inspección se debe llenar la Tabla 18 y Tabla 19, además de seguir los siguientes pasos:

- Inspeccionar el piso más seriamente dañado, hacer un dibujo de la planta, contar las columnas y muros dañados y llenar la tabla que sigue. En el caso de que no se pueda ingresar, solo evaluar desde el exterior
- En el caso de no encontrar daño serio en los muros o columnas, pero sí en vigas y/o uniones viga-columna, arriba o debajo de la columna (o muro), se debe tomar en cuenta el daño como de la columna (o muro).
- En la columna de Pertinencia se debe agregar la cantidad NA (no aplica) en el caso de que el concepto no aplique para la estructura.

Tabla 18: Contabilización del daño por rango y tipo de elemento estructural

Elementos	Rango de Daño						
	Pertinencia	Ninguno (I)	Leve (II)	Moderado (III)	Fuerte (IV)	Severo (V)	Total elementos revisados
Columnas							
Muros							
Vigas							
Uniones o nudos							
Uniones soldadas							
Uniones apernadas							
Losas							
Entrepiso de Madera							
Techumbre							
Total Rango							

Tabla 19: Inspección 2, daño estructural

Daño a las Columnas			
Ranking	A	B	C
Porcentaje de daño IV o V	<input type="checkbox"/> <1%	<input type="checkbox"/> 1-10%	<input type="checkbox"/> > 10%
Razón del daño III	<input type="checkbox"/> < 12.5%	<input type="checkbox"/> 12.5-25%	<input type="checkbox"/> > 25%
Daño de muros estructurales			
Ranking	A	B	C
Porcentaje de daño IV o V	<input type="checkbox"/> <1%	<input type="checkbox"/> 1-10%	<input type="checkbox"/> > 10%
Razón de daño III	<input type="checkbox"/> < 12.5%	<input type="checkbox"/> 12.5-25%	<input type="checkbox"/> > 25%
Seguridad Estructural	<input type="checkbox"/> Inspeccionado (Solo A)	<input type="checkbox"/> Ingreso Limitado (B $\geq 1$ y C=0)	<input type="checkbox"/> Inseguro (B $\geq 2$ o C $\geq 1$ )

La tercera inspección consiste a elementos no estructurales que puedan presentar daño al caer y/o volcarse. En la Tabla 20 se muestra cómo se realiza esta inspección.

Tabla 20: Inspección 3, daños no estructurales

Ranking	Pertinencia	A	B	C
Marco y vidrio de ventana		<input type="checkbox"/> Sin o poco daño	<input type="checkbox"/> Deformación visible y/o grietas	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Terminaciones exteriores		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> Grietas leves	<input type="checkbox"/> Grietas significativas
Terminaciones interiores		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> Grietas leves	<input type="checkbox"/> Grietas significativas
Cielos falsos		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> Se observa daño	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Ductos de ventilación		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> Se observa daño	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Escaleras		<input type="checkbox"/> Sin o poco daño	<input type="checkbox"/> Gran cantidad de grietas pero las barras de refuerzo no están ancladas	<input type="checkbox"/> Inclinación / separación de los elementos con que se conecta, barras de anclaje separadas del elemento
Muros no estructurales con marco		<input type="checkbox"/> Sin o poco daño	<input type="checkbox"/> Se observan grietas sin deformación fuera del plano	<input type="checkbox"/> Grietas extensas interconectadas, o deformación fuera del plano
Muros no estructurales sin marco		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> Grietas leves	<input type="checkbox"/> Grietas de corte
Estanques, antenas, balcones, letreros, maquinaria, etc.		<input type="checkbox"/> Sin inclinación	<input type="checkbox"/> Un poco inclinado	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Cubierta de techo		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> algún daño observado pero no hay peligro de caída de objetos	<input type="checkbox"/> Inclinación, deformación o separación perceptible del piso superior
Lampistería		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> Algún daño observado pero no hay peligro de caída de objetos	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Bienes Muebles 1		<input type="checkbox"/> Sin inclinación	<input type="checkbox"/> Un poco inclinado	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Bienes Muebles 2		<input type="checkbox"/> Sin inclinación	<input type="checkbox"/> Un poco inclinado	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Bienes Muebles 3		<input type="checkbox"/> Sin inclinación	<input type="checkbox"/> Un poco inclinado	<input type="checkbox"/> Peligro de caída
Otro(s) peligro(s)		<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> Se observa daño	<input type="checkbox"/> Peligro para la vida
Seguridad no estructural		<input type="checkbox"/> Inspeccionado (Solo A)	<input type="checkbox"/> Ingreso Limitado ( $B \geq 1$ y $C=0$ )	<input type="checkbox"/> Inseguro ( $B \geq 2$ o $C \geq 1$ )

Una vez realizado estas inspecciones se debe determinar en que categoría se es clasificada la estructura. Si es categoría inspeccionada (solo presenta categoría clase A), ingreso limitado (presenta 1 o más categorías clase B y ninguna C) o si es insegura (2 o más categorías clase B o más de una categoría clase C).

El documento presenta unas recomendaciones y pasos a seguir para llevar a cabo esta inspección. Las recomendaciones para terreno se describen a continuación:

- Cada inspector debe estar debidamente equipado para su tarea: Casco plástico, zapatos de seguridad, lentes, overol, guantes de cabritilla, hilo de plomo y huincha 50m.

Adicionalmente deberá contar con un kit de emergencia personal y herramientas de trabajo como calculadora, lápiz, cámara digital y libreta de notas

- Cuadrilla de inspección: Cada equipo de inspección debiera consistir en dos inspectores como mínimo.
- La inspección debe comenzar por un estudio de daño general exterior
- Si la edificación es obviamente insegura, no se debe ingresar
- Desde el punto de vista de la seguridad el inspector debe definir y asegurar las vías de escape o espacios seguros en caso de réplicas, especialmente cuando se hacen inspecciones al interior
- En caso de una réplica abandonar lo más rápido posible la inspección hasta que pase el problema.

Los pasos por seguir se muestran a continuación:

- Paso 0: Rellenar la información general personal y de la edificación
- Paso 1: (Inspección 1) Inspección general de toda la edificación desde el exterior
- Paso 2: (Inspección 1) Verificar el peligro de daños a edificios adyacentes, terrenos colindantes y elementos estructurales
- Paso 3: (Inspección 3) Evaluar el peligro de caídas o volcamiento
- Paso 4: Sub- resumen de las inspecciones 2 y 3
- Resumir las inspecciones

El documento analizado contiene procesos de inspección claros y efectivos, además de recomendaciones de seguridad y pasos a seguir que vuelven la metodología más eficiente. Es muy importante su análisis ya que es el único documento encontrado de estas características encontrado en Chile, país en el cual los edificios y los sismos tienen características únicas y particulares.

La ficha de evaluación de daños para inspección rápida de edificios públicos es un documento similar al que se quiere realizar en el trabajo de título, en especial con su forma de clasificar los distintos daños en elementos estructurales. Donde se encuentra una deficiencia es en la clasificación del edificio según sus daños, al no ser tan detallada y contar solo con tres categorías (A, B o C). En el trabajo de título se espera profundizar en cuanto a la clasificación del edificio, tomando en cuenta cuatro categorías y tomar en cuenta las condiciones preexistentes del inmueble, para así considerar tomar en cuenta su posible resistencia a futura réplicas.

### 3.8. Resumen metodologías analizadas

En esta sección se resumen las metodologías analizadas con respecto a que partes de estas se utilizarán y cuáles no. En la Tabla 21 se muestran los comentarios con respecto a cada metodología analizada. Adicionalmente de estas metodologías resumidas y analizadas también se utiliza el documento FEMA P-154 [4] como referencia para crear la metodología propuesta para evaluar irregularidades del edificio y se explica en la sección 4.1.

Tabla 21: Resumen metodologías analizadas y comentarios

Número Metodología	Metodología	Comentarios positivos	Diferencias con lo que se espera realizar en el trabajo de título.
(1)	Evaluación utilizando teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales. – España	Evaluación más exacta del daño por parte de profesionales no tan expertos.	Se requiere una gran base de datos para llevar a cabo la red neuronal, lo cual se escapa del alcance.
(2)	Guía técnica Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta.	Metodología clara, con los pasos a seguir y similar a lo que se quiere realizar	Abarca varios sistemas estructurales, no se abarcan los sistemas de muros a la profundidad requerida
(3)	Norma para evaluación del nivel de daño por sismo en estructuras y guía técnica de rehabilitación- Ministerio de Construcción del Japón	Define de buena forma los niveles de daños y recomienda tablas para que el profesional realice la inspección. Homogeniza los parámetros para indicar el estado de la estructura	Abarca varios sistemas estructurales y no entra en mayor detalle con respecto a la condiciones preexistentes de los edificios
(4)	Revisión de la guía de evaluación de daño Post-Sismo de edificaciones de hormigón armado de Japón.	Define en mayor profundidad los niveles de daño y como estos afectan el rendimiento estructural.	Es una guía que no realiza evaluaciones en primera instancia, sino que hace una evaluación un poco más sofisticada. Necesita gran cantidad de experimentos y resultados para que sea efectivo.
(5)	Evaluación de daño estructural post-sismo en edificaciones: Estado del arte - Colombia	Evalúa y compara distintos métodos de inspección de estructura.	No propone una metodología propia para analizar los daños post-sismo.
(6)	Guía técnica para inspección de edificaciones después de un sismo. – AIS, Colombia	Metodología clara para seguir, define niveles de daño y habitabilidad de la estructura.	Analiza más sistemas estructurales y no combina los niveles de daños entre sí.
(7)	Ficha de Evaluación de Daños para Inspección Rápida de Edificios Públicos - Chile	Pasos a seguir claros, recomendaciones de seguridad y procesos de inspección eficientes.	Se espera clasificar los daños con mayor detalle y tomar en consideración las condiciones preexistentes de la edificación

La metodología propuesta se basa, en gran parte, en estas seis metodologías analizadas, con ciertas variaciones, en particular se utilizan los siguientes parámetros:

- Nivel de daño: Se basa en el expuesto por (3), esto debido a que son niveles de daños precisos y las demás metodologías tienen niveles de daños similares.
- Habitabilidad: Para definir esto se utilizan los porcentajes de daños dados por (6) debido a que se considera el más preciso porque tiene más categorías y es aplicable a la realidad chilena. Para mayor precisión también se evalúa la habitabilidad con el método expuesto en (3) porque este método combina los distintos niveles de daños en la clasificación de habitabilidad
- Los pasos por seguir para llevar a cabo la inspección de la estructura son una mezcla entre (2), (3) y (6).
- Las recomendaciones de seguridad están basadas en (7)

Las metodologías analizadas, en términos generales, definen sus niveles de daños en los elementos estructurales de forma similar, donde se encuentra la diferencia es en la clasificación del edificio. Se espera poder generar una clasificación del edificio según sus daños que sea rápida de realizar (sin la necesidad de modelos estructurales), pero que sea detallada y cuente con una precisión confiable.

## **4. Metodología de inspección propuesta para estandarizar el daño en edificaciones de muros de H.A.**

En esta sección se muestra y se explica la metodología de inspección para estandarizar el daño en edificaciones con sistema de muros de hormigón armado. Para realizar esto se tienen cuatro subsecciones: 1) Definición de los niveles de daño, 2) Clasificación del edificio según los daños presentados en este, 3) Modificación de la clasificación del edificio según sus irregularidades estructurales, 4) Resumen de la metodología y pasos recomendados a seguir.

### **4.1. Catalogo y caracterización de los daños según tipología**

#### **4.1.1. Niveles de daño**

Basado en los documentos analizados en el Capítulo 3 y en los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera universitaria, se proponen cinco niveles de daños para los elementos estructurales de una edificación de carácter habitacional con sistema de muros de hormigón armado. En la Tabla 22 se muestran los niveles de daño, se considera que estos son los que funcionan con una mayor precisión a la realidad chilena y son basados en la: Norma para Evaluación del Nivel de Daño por

Tabla 22: Descripción niveles de daño [8]

Nivel de Daño	Descripción
I	Elemento estructural sin daño o con agrietamiento muy pequeño, cuesta distinguirlo a simple vista. Existen fisuras pequeñas con un ancho menor a 0.2mm
II	Se tienen fisuras distinguibles a simple vista, con una anchura entre 0.2 y 1mm.
III	El elemento presenta grietas de abertura aproximada entre 1 y 2mm. Este tipo de agrietamiento sobresale a simple vista y en ciertos casos puede existir desprendimiento de hormigón. Este desprendimiento no es lo suficientemente severo para que se produzca pérdida de la adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón del núcleo.
IV	Es una falla donde el acero de refuerzo longitudinal presenta gran exposición. El ancho de las fisuras excede los 2mm. La condición del estado de falla se realiza tomando en cuenta el estado de la falla por aplastamiento, desprendimiento y caída del hormigón estructural. Las barras de acero están expuestas pero estas se encuentran en buen estado.
V	Además de ver el acero, ahora se puede apreciar su pandeo y deformación del elemento estructural. Es común observar fenómenos de asentamiento y/desplomo. En algunos casos puede existir fractura.

Los daños en una estructura se pueden presentar de muchas formas dependiendo del elemento estructural damnificado y los distintos esfuerzos que generan el daño. Con el fin de reducir la ambigüedad que se presentan distintos ejemplos y explicaciones de los modos de falla más comunes.

Se utilizan esquemas para representar algunos modos de falla que son tomados de la Guía Técnica Para Inspección de Edificaciones Después de un Sismo – Universidad Francisco de Paula Santander [7] y de la Ficha de Evaluación de Daños para Inspección Rápida de Edificios Públicos – Ministerio de Obras Públicas, Chile [16]. Estos documentos toman los esfuerzos más comunes que generan daños en edificaciones y describen sus modos de falla para los cinco niveles expuestos. En los esquemas utilizados utiliza  $lp$  para simbolizar la longitud de la rótula plástica.

Si bien es complejo identificar la razón de los daños, ya que usualmente en un sismo los elementos estructurales son sometidos a esfuerzos de compresión, tracción, flexión y torsión, se espera

mostrar las características típicas de cómo se comporta un elemento cuando uno de estos esfuerzos es el predominante. Este pequeño catálogo que busca generar está enfocado en los muros de hormigón armado, debido a que son el elemento estructural más relevante en el tipo de edificaciones que busca analizar este trabajo.

#### 4.1.2. Respuesta dúctil de muros a flexión

Para este caso el daño nivel I presenta pequeñas fisuras generadas por flexión, difíciles de percibir, de espesor entre 0 y 0.2mm, por lo general no hay fisuras ocasionadas por corte. Por estas razones no se presentan imágenes o esquemas con el patrón de daños nivel I.

Para el nivel II se tienen fisuras distinguibles a simple vista, con una anchura entre 0.2 y 1mm. En la Figura 30 se muestra un esquema de un muro sometido a flexión con daño nivel II. Se pueden observar fisuras de corte, no existe descaramiento ni fisuras verticales y no hay un desplazamiento residual significativo.

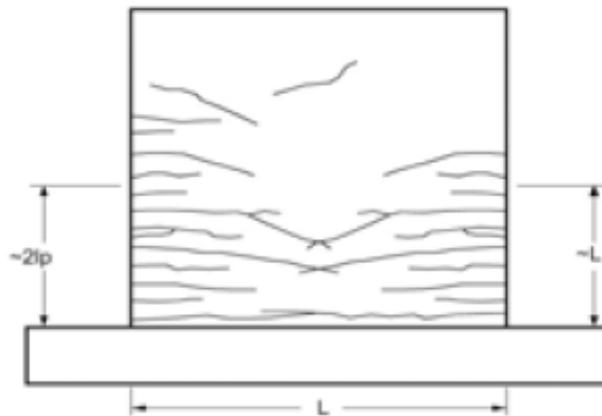


Figura 30: Diagrama muro sometido a flexión dúctil con daño nivel II [7]

Cuando un muro tiene un daño nivel III por ser sometido a flexión presenta fisuras entre 1 y 2mm. Presenta desprendimiento del hormigón o fisuras verticales en los extremos de la base del muro. Se presenta un esquema de esto en la Figura 31.

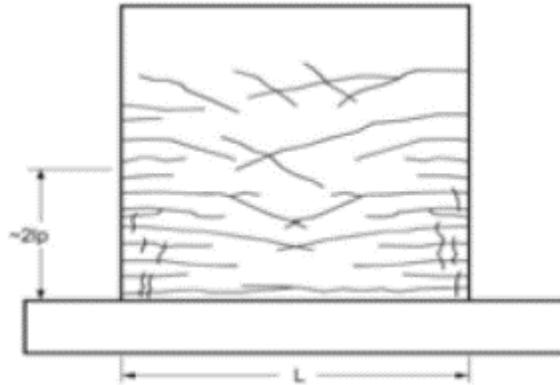


Figura 31: Diagrama muro sometido a flexión con respuesta dúctil y daño nivel III [7]

El daño nivel IV se evidencia cuando se tiene el muro con gran desprendimiento de hormigón, pero su refuerzo de acero longitudinal se encuentra en buen estado. En general para los daños de muros ocasionados por flexión dúctil no ocurren daño nivel IV, por lo cual no se muestra un esquema sobre este.

Si el muro presenta daño nivel 5 se encuentra el refuerzo fracturado, fisuras de flexión ancha concentrada en una sola grieta y grandes desplazamientos residuales.

#### 4.1.3. Muros sometidos a flexión y corte

El espesor de las grietas se encuentra en los parámetros normales de un daño nivel I (entre 0 y 0.2mm) y son difíciles de percibir y no tienen una gran extensión dentro del muro. Su apariencia típica se muestra en la Figura 32.

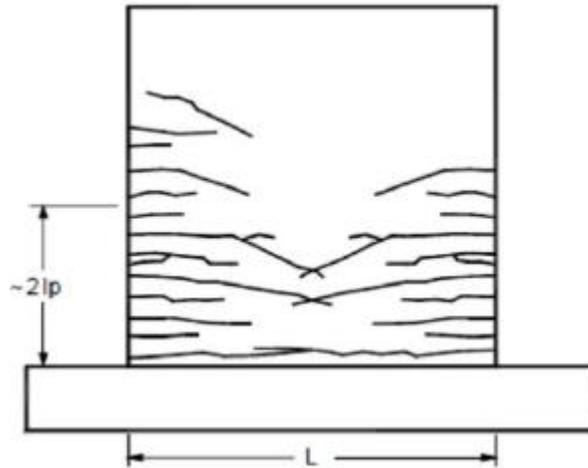


Figura 32: Esquema de daño típico ocasionado por flexión con tracción diagonal, nivel I [7]

El daño nivel II no se suele manifestar en cuando el muro es sometido a flexión con tracción diagonal, por lo cual se procede a representar el nivel III. Se pueden encontrar fisuras de corte con un largo menor a 3mm y de flexión con un largo menor a 6mm. Existe cierto desprendimiento de hormigón en el alma o en los bordes de base del muro. No hay refuerzo pandeado o fracturado ni tampoco desplazamiento residual significativo. Su apariencia típica es similar que para el caso del daño nivel I expuesto en la Figura 32, pero con fisuras de mayor espesor y un poco de desprendimiento del hormigón.

Cuando se tiene un daño nivel IV por el efecto de flexión con tracción diagonal, existen fisuras de corte de gran espesor (mayores a 3mm) y un claro desprendimiento del hormigón que puede exponer el acero de refuerzo. Su apariencia típica se presenta en la Figura 33.



Figura 33: Esquema de daño nivel IV ocasionado por flexión con tracción diagonal [7]

El daño nivel V cuando un muro es sometido a estos esfuerzos genera que el refuerzo longitudinal de acero se fracture. Su apariencia típica son fisuras de corte muy anchas concentrado en una sola grieta.

#### 4.1.4. Muros sometidos a flexo – compresión

Para este caso el comportamiento del muro es similar al caso descrito para los muros sometidos a flexión dúctil desde el nivel I hasta el nivel III y su particularidad comienza a notarse cuando se tiene daño nivel IV en el muro.

La compresión a la cual es sometida el muro genera aplastamiento y esta se puede identificar tanto en el centro del muro como en su base. En el caso de representarse en el centro del muro se encuentra un desprendimiento de hormigón significativo, se puede apreciar el acero de refuerzo pero este no se encuentra fracturado ni pandeado, se muestra de un muro con daño nivel IV con aplastamiento del alma en el centro en la Figura 34.

El daño nivel IV por flexo compresión también puede ocasionar aplastamiento del alma en su base, para este caso se desarrolla una importante grieta horizontal a lo largo de todo el muro, con desprendimiento de hormigón en la misma, que indica que ocurrió un deslizamiento. En la Figura 35 se muestra un esquema de este fenómeno.

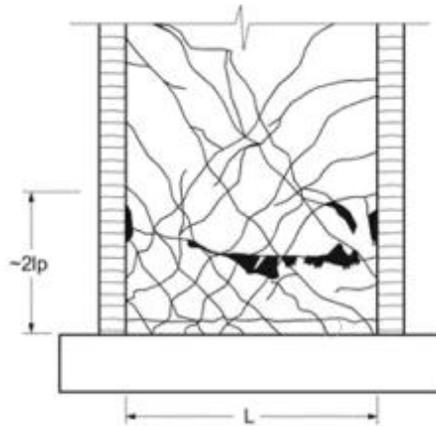


Figura 34: Esquema muro daño nivel IV por flexo-compresión con aplastamiento del alma en el centro [7]

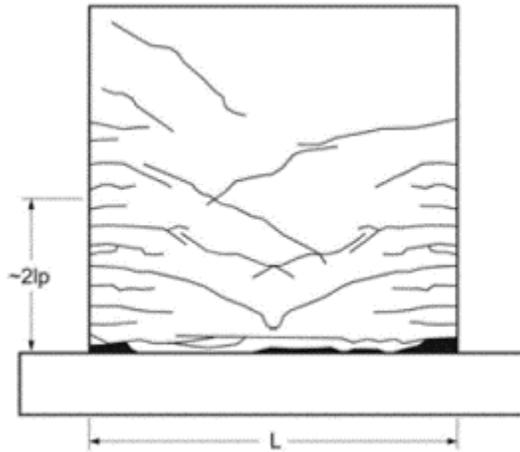


Figura 35: Esquema muro con daño nivel IV con aplastamiento del alma en la base [7]

El último modo de falla para un muro sometido a flexo compresión con daño nivel IV presentado (Figura 36) es cuando el muro tiene compresión de borde. Se manifiesta este fenómeno con desprendimiento o fisuras diagonales verticales en los bordes del muro y se puede apreciar claramente el refuerzo longitudinal en esta zona.

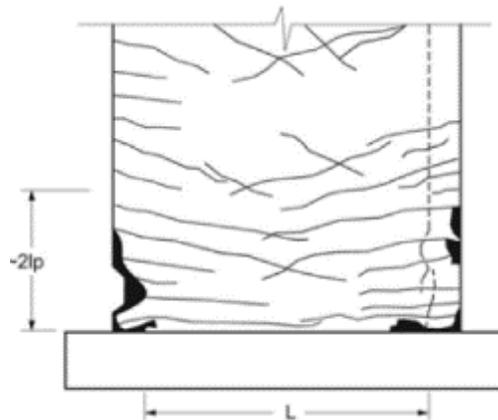


Figura 36: Esquema muro daño nivel IV con aplastamiento en los bordes [7]

Para el caso del daño nivel V se presenta con un gran desprendimiento de hormigón, se aprecia claramente el acero de refuerzo y este se encuentra notoriamente pandeado o, en algunos casos, fracturado. Se muestra como ejemplo un caso real de un muro en T sometido a flexo-compresión en la Figura 37 y en la Figura 38 otro muro aislado que presenta daño nivel V provocado probablemente por flexo-compresión.

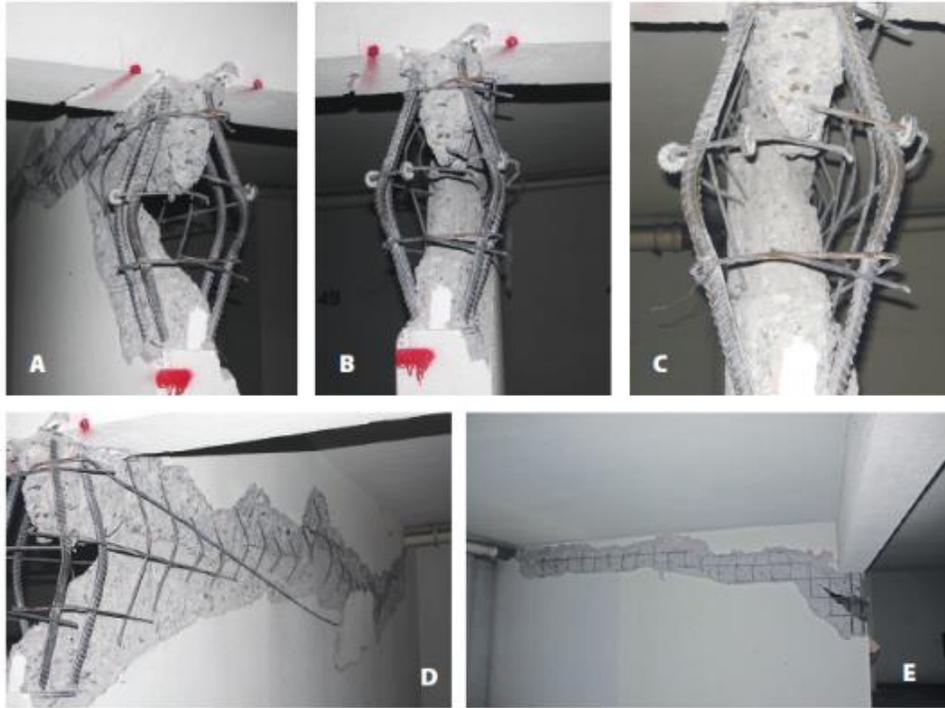


Figura 37: daño nivel 5 en muros ocasionado por flexo-compresión [10]



Figura 38: Daño nivel V en muro producido flexo-compresión [11]

#### 4.1.5. Muros sometidos a corte

En el caso de presentar un daño nivel I este es casi imperceptible, presenta grietas menores a 0.2mm de espesor en forma diagonal. No se presenta imagen para este caso.

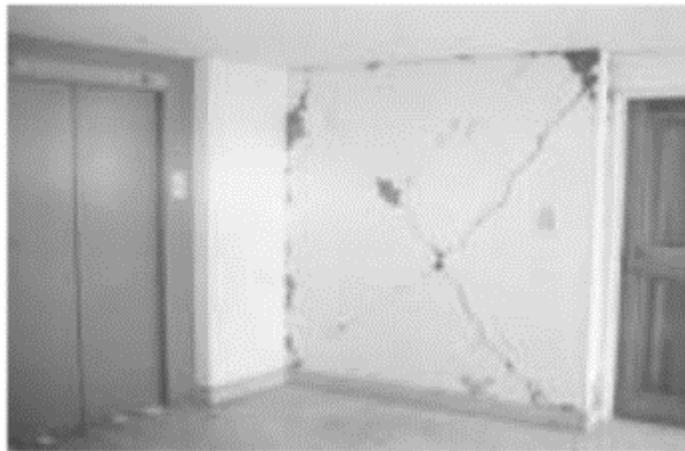
Si el muro sufre daño nivel II por corte se pueden apreciar a simple vista pequeñas grietas diagonales entre 0.2 y 1mm. Estos casos por lo general no requieren una mayor reparación

estructural. En la Figura 39 se muestra una foto de un muro con daño nivel II por corte de un caso real.



*Figura 39: Daño nivel II en muro por corte*  
*Fuente: Foto tomada en terreno, Edificio Av. Del Valle 534, Huechuraba*

Cuando el daño alcanza el nivel III tiene características similares al daño nivel II, pero con fisuras entre 1 y 2mm y leve desprendimiento de hormigón. Se puede apreciar un ejemplo de este daño en la Figura 40.



*Figura 40: Daño nivel III en muro por corte [14]*

En el caso de tener un nivel IV de daño se desprende una cantidad notoria de hormigón de recubrimiento y se puede apreciar la malla de acero utilizada para el refuerzo del muro, pero esta no se encuentra dañada. En la Figura 41 se muestra un ejemplo de este caso.



*Figura 41: Daño nivel IV por corte en muro  
Fuente: CI5504 Patología de las obras de Construcción, 2018 FCFM*

Si el muro tiene daño nivel V este es relativamente sencillo de identificar porque se puede apreciar el acero de refuerzo con una notoria deformación y probablemente fracturado. No se encontraron ejemplos de muros dañados solo por corte que generen daño nivel V, debido a que, por lo general, el muro es sometido a varios esfuerzos y falla por otras razones. A modo de ejemplo se muestra una falla por corte en una columna que es catalogada como nivel V en la Figura 42.



*Figura 42: Daño nivel V por corte en columna [11]*

#### 4.1.6. Vigas sometidas a flexión

Cuando una viga es sometida a flexión, en primera instancia, tiende a generar pequeñas fisuras cercanas al nudo, como se muestra en a la Figura 43. Esta grieta en el caso de nivel I tiene un espesor menor a 0.2mm, en el caso de ser nivel II es similar pero con una grieta de mayor espesor, entre 0.2 y 1mm y pueden presentarse más de una.



Figura 43: Fisura vertical en viga sometida a flexión [7]

Cuando la viga alcanza un daño nivel III se tienen grietas de mayor anchura y se encuentra una gran cantidad de estas. En la Figura 44 se muestra el ensayo de una viga simplemente apoyada sometida a flexión, en el momento de la foto la viga presentaba daño nivel III.



Figura 44: Daño nivel III en viga producido por flexión  
Ensayo viga a flexión UCLA, 2005

El daño nivel IV se expresa de manera similar a la presentada a la Figura 44, pero con fisuras de mayor espesor y desprendimiento del hormigón recubrimiento. Por último, el daño nivel V se

considera que el elemento estructural falló, debido a que ya no se encuentra en su zona elástica y probablemente presenta fracturas de sus refuerzos de acero o deformaciones notorias.

#### 4.2. Clasificación de habitabilidad del edificio.

Una vez analizado el nivel de daño para los distintos elementos estructurales, se procede a clasificar la habitabilidad del edificio. La habitabilidad se define como la clasificación del edificio según sus daños, para así poder determinar el estado de la estructura.

La habitabilidad se calcula con respecto al piso de la edificación que presenta la mayor cantidad de daños en su dirección más damnificada mediante dos métodos y se utiliza el caso más desfavorable entre estos.

Se espera realizar una clasificación del estado del edificio de una manera más detallada que en el documento chileno existente, la Ficha de Evaluación de Daños para Inspección Rápida de Edificios Públicos – MOP, Chile [16] y se espera poder complementarlo con este trabajo.

El primer método consiste en determinar la habitabilidad de la edificación mediante los porcentajes de daño que presenta el piso más solicitado, usualmente es uno de los primeros pisos o los pisos de subterráneo a menos que existan grandes irregularidades verticales en algún piso o alguna condición particular.

La habitabilidad de la estructura se define en la Tabla 23, la cual se divide en habitable (verde), Uso restringido (amarillo), no habitable (naranja) y riesgo de colapso (rojo). En la Tabla 24 se clasifica la habitabilidad de la estructura según el porcentaje de nivel de daños de sus elementos estructurales en la dirección larga y corta (X e Y), donde los colores representan su habitabilidad. El porcentaje de daño para definir la habitabilidad de la estructura se basa en el documento Guía Técnica para Inspección de Edificaciones Después de un Sismo en Colombia FOPAE-AIS [15].

Tabla 23: Habitabilidad de la estructura

Habitabilidad	Descripción
Habitable (verde)	Sin daño o daño menor localizado en algunos elementos estructurales que no requieren reparación o leves reparaciones.
Uso restringido (amarillo)	Presentan daños en elementos estructurales, los cuales son reparables y no representan riesgo de colapso de la estructura.
No habitable (naranja)	Disminuye la capacidad de resistencia a cargas horizontales y/o verticales, pero no existe inestabilidad.
Riesgo colapso (rojos)	Daño grave generalizado que puede significar demolición de la estructura. Se debe realizar un análisis más detallado para evaluar si la estructura es reparable o no.

Tabla 24: Habitabilidad de la estructura según porcentaje de nivel de daño

Porcentaje nivel de daño	Niveles de daño (%)				
	I	II	III	IV	V
0	Green	Green	Green	Green	Green
]0-5]	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow
]5-10]	Green	Green	Yellow	Orange	Orange
]10-15]	Green	Green	Yellow	Orange	Orange
]15-20]	Green	Green	Yellow	Orange	Red
]20-25]	Green	Green	Yellow	Orange	Red
]25-30]	Green	Green	Yellow	Orange	Red
]30-35]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]35-40]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]40-45]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]45-50]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]50-55]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]55-60]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]60-65]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]65-70]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]70-75]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]75-80]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]80-85]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]85-90]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]90-95]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]95-100]	Green	Yellow	Red	Red	Red

Este método no combina los distintos niveles de daño entre ellos y se utiliza el caso más desfavorable encontrado en la Tabla 24 para determinar la habitabilidad.

El segundo método evalúa la cuantía de daño y pérdida de capacidad de resistencia a la acción sísmica de los elementos estructurales. Éste tiene la virtud de combinar los distintos niveles de daño presente en la estructura. La cuantía de daño se denomina  $D_i$  (donde  $i$  representa el tipo de daño, evaluado de 1 a 5). La sumatoria de los valores individuales  $D_i$  permite efectuar la evaluación del nivel de daño y su clasificación, como se indica en la Tabla 25. Este método es basado en la Norma para Evaluación del Nivel de Daño por Sismo en Estructuras y Guía Técnica de Rehabilitación, del Ministerio de Construcción de Japón [8]. Se generan pequeñas variaciones a este método para adaptarlo a la realidad chilena, pero queda propuesto para trabajo a futuro calibrar estos datos mediante experimentos y análisis numéricos para que estos valores tengan una mayor precisión.

Tabla 25: Habitabilidad según la cuantía de daño  $D$

Habitabilidad	Valor $D$
Habitable	$D \leq 5$
Acceso restringido	$5 < D \leq 15$
No habitable	$15 < D \leq 50$
Peligro Colapso	$D > 50$

Para estimar el valor  $D_i$  se considera el piso de la edificación que exhibe la mayor concentración de daño. Al igual que en el primer método, se evalúa para la dirección larga y corta de la estructura (X e Y) en forma independiente.

La longitud total de los muros existentes se define como  $A_0$  y la longitud de muros con posibilidad de ser inspeccionados se define como  $A$ . Posteriormente la longitud de muros con la misma clasificación de daño (entre el I y V, Tabla 22) se denomina  $B_i$ . El valor  $D_i$  se calcula según lo muestra la Tabla 26. Finalmente se suman estos valores  $D_i$  y se obtiene la habitabilidad de la estructura. En el caso de tener  $B_5/A > 0.5$  se considera una falla total.

Tabla 26: Cálculo valor  $D_i$  en base a los valores  $A$  y  $B_i$

$D_i$	Valores $D_i$	Formula
$D_1$	$4B_1/A$	Para $B_1/A \leq 0.5$
	2	Para $B_1/A > 0.5$
$D_2$	$20B_2/A$	Para $B_2/A \leq 0.5$
	10	Para $B_2/A > 0.5$
$D_3$	$60B_3/A$	Para $B_3/A \leq 0.5$
	30	Para $B_3/A > 0.5$
$D_4$	$100B_4/A$	Para $B_4/A \leq 0.5$
	50	Para $B_4/A > 0.5$
$D_5$	$1000B_5/5A$	Para $B_5/A \leq 0.25$
	50	Para $B_5/A > 0.25$

Una vez realizados los dos métodos de inspección se obtienen dos clasificaciones de habitabilidad y se utiliza el caso más desfavorable, como se señaló anteriormente. En caso de que los dos métodos entreguen el mismo resultado, se puede utilizar cualquiera.

### 4.3. Incorporación de factores de regularidad estructural

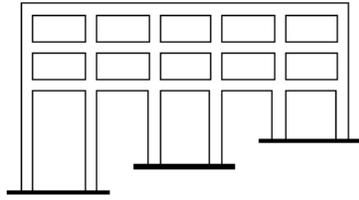
Cuando ocurre un terremoto de gran magnitud, usualmente este viene con réplicas o con sismos predecesores que pueden alcanzar a tener una magnitud considerable. Es por ello por lo que las estructuras tienen que estar capacitadas para resistir más de un sismo.

Por esta razón se busca tener una mayor seguridad y mitigar el riesgo de accidentes provocados por un futuro sismo en el corto y mediano plazo. Para cumplir este objetivo se utiliza un factor determinado por las condiciones preexistentes de la edificación, específicamente su regularidad estructural. El factor es basado en los documentos de los Estados Unidos FEMA P-154 [4] y la Guía Técnica para Inspección de Edificaciones Después de un Sismo. – AIS, Colombia [15]. En el caso de querer realizar un cálculo más detallado se recomienda ver el documento FEMA P-2018 y FEMA P155.

Como se describió en el marco teórico, las irregularidades se dividen en dos categorías: irregularidades verticales e irregularidades de planta. En primer lugar, se describen las irregularidades verticales y luego las de planta.

Existen seis tipos más comunes de irregularidad vertical y cada uno de estos se clasifican entre irregularidades severas o moderadas, según lo descrito por el documento FEMA P-154 [4]. Los tipos de irregularidades se mencionan a continuación:

- Debido a terreno inclinado: Si el edificio se encuentra en un plano inclinado, puede existir un problema, es probable que la rigidez en la zona inferior sea distinta a la rigidez de la zona superior. Además, colina arriba los apoyos más cortos atraen más carga sísmica (Figura 45 y Figura 46). Es considerada una irregularidad moderada, a menos que se encuentre en una pendiente con riesgo a deslizamiento o con pendiente muy pronunciada, donde se puede considerar como severa. [4]
- Piso débil: Se produce cuando un piso tiene notoriamente menor resistencia que los pisos que se encuentran arriba de éste (Figura 47). Se considera una irregularidad severa. [4]
- Variación de ubicación de sistemas sismo resistentes entre un nivel y otro: Ocurre cuando el sistema sismo resistente de un piso no está alineado verticalmente con el de otro piso. Puede ocurrir que el piso superior sea de menor área (Figura 48), lo cual sería considerado una irregularidad moderada, o bien, que el piso superior sea de mayor área (Figura 49) que es considerado una irregularidad severa. [4]
- Columna corta: Cuando una columna o muro tiene menor altura que el común de los muros. Estos muros más pequeños tienen que soportar una gran carga horizontal (Figura 50 y Figura 51). Es considerada una irregularidad vertical severa. [4]
- Discontinuidad nivel de pisos: Esto sucede cuando un piso en una parte de la edificación no está alineado con el piso en otra parte de la estructura (Figura 52). Es considerada una irregularidad moderada [4]
- Discontinuidad en la resistencia: Cuando muros de rigidez no son continuos en la estructura (Figura 53). Es considerada una irregularidad severa. [15]

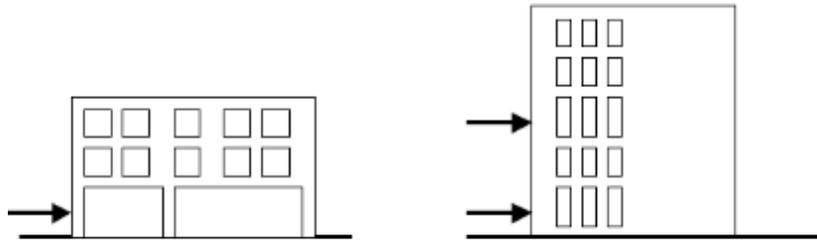


Edificaciones en colinas

Figura 45: Edificio en terreno inclinado (1) [15]



Figura 46: Edificio en terreno inclinado (2) [4]



Piso Débil

Figura 47: Ejemplos piso débil [15]

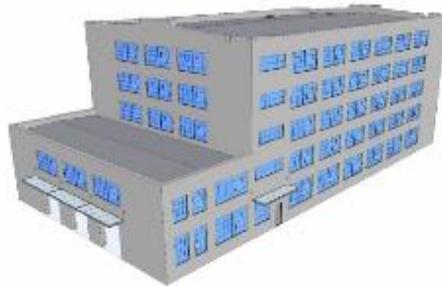


Figura 48: Variación ubicación de sistema sismo resistente (piso inferior con más área) [4]



Figura 49: Variación ubicación sistema sismo resistente (Piso inferior con menor área) [4]

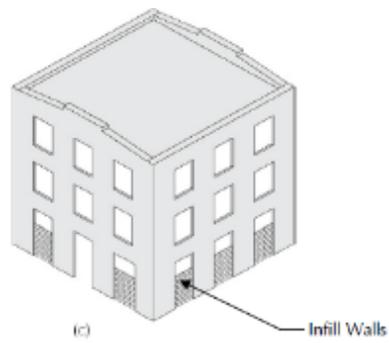


Figura 50: Ejemplo columna corta (1) [4]

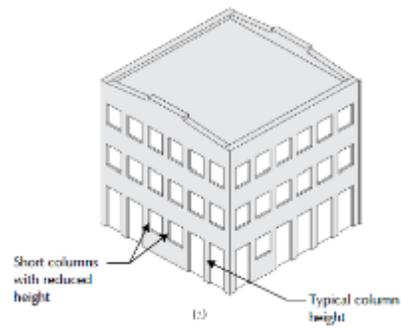


Figura 51: Ejemplo columna corta (2) [4]

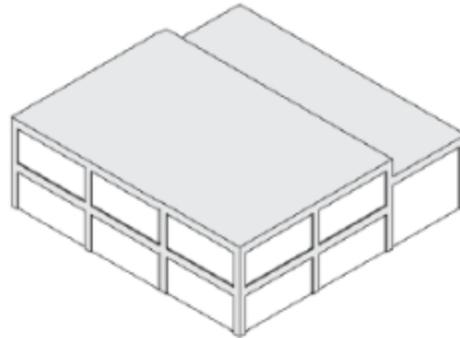


Figura 52: Discontinuidad en nivel de piso [4]

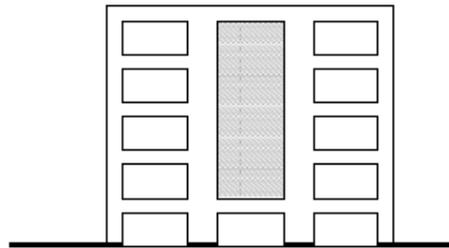


Figura 53: Discontinuidad en muros de rigidez [15]

El factor de modificación de la habitabilidad varía con la cantidad de irregularidades presentes en la edificación y si estas son moderadas o severas. Estas irregularidades aumentan el riesgo que la edificación tenga daños importantes en caso de una réplica. La regularidad estructural se definirá en tres categorías, buena, regular y mala y cada una de estas modifica la habitabilidad como se determina la habitabilidad con ambos métodos, según se describe en la Tabla 27. En el caso de tener más de dos irregularidades moderadas o una severa, estas se pueden multiplicar y aumentar su factor de modificación, queda a criterio del ingeniero.

Tabla 27: Criterios para evaluar regularidad en altura o vertical.

Clasificación	Descripción	Factor de modificación
Buena	No presenta irregularidades	1.0
Intermedia	Entre la clasificación buena y mala	1.1
Mala	Presenta al menos una irregularidad severa o dos irregularidades moderadas.	1.2

Para el caso de irregularidades de planta se dividirá en cuatro tipos comunes de irregularidades presentes en edificaciones de hormigón armado con sistema de muros, como se describe a continuación:

- Torsión: Una edificación presenta este problema cuando tiene una buena resistencia lateral en una dirección, pero en la otra no. También se presenta cuando el centro de rigidez está muy separado del centro geométrico de la estructura. (Figura 54). [4]
- Sistemas no paralelos: Los muros de alguna de las direcciones no son paralelos, formando una especie de triángulo (Figura 55). [4]
- Edificaciones con retrocesos excesivos de las esquinas: Edificios que tienen plantas del estilo: E, L, T, U, +. Sufren de gran concentración de esfuerzos en sus esquinas (Figura 56). [4]
- Edificios con diafragma abierto: las losas tienen la importante tarea de distribuir fuerzas sísmicas a los elementos verticales. Esta irregularidad de planta se presenta cuando se tiene una gran apertura en la losa. Es considerada una gran apertura cuando cubre una cantidad mayor a un 50% en una dirección. Se muestra un ejemplo en la Figura 57. [4]

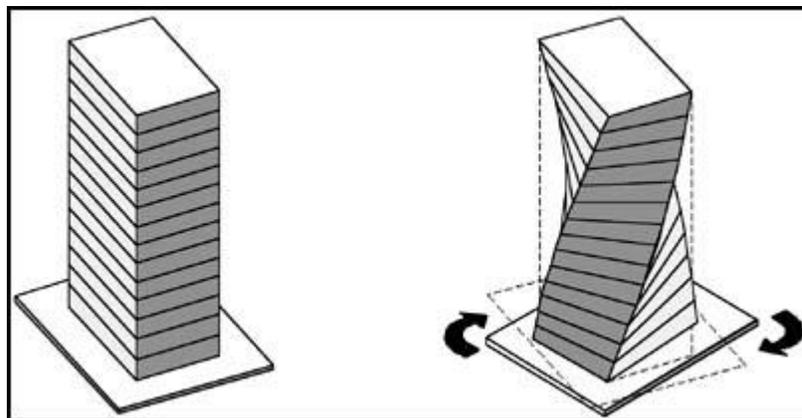


Figura 54: Ejemplo de torsión.

Fuente: Fundamentos para la mitigación de Desastres en Establecimientos de Salud (OPS; 2004)



Figura 55: Ejemplo sistema estructural no paralelo [4]

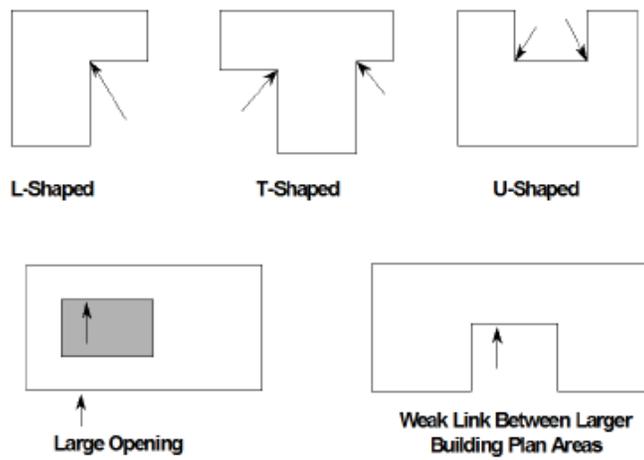


Figura 56: Edificaciones con retrocesos excesivos de las esquinas [4]

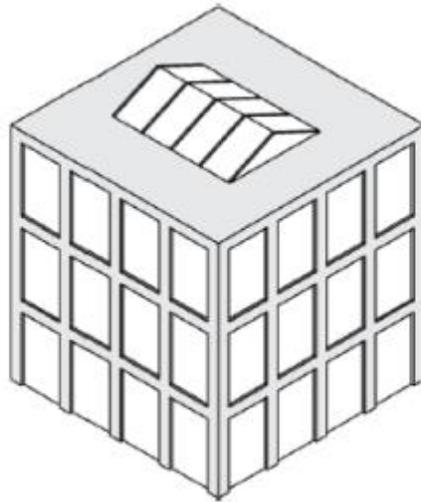


Figura 57: Edificación con diafragma abierto. [4]

Similar al caso de las irregularidades verticales se propone una forma de modificar la habitabilidad analizando la regularidad en planta de la estructura. Esta es catalogada en buena, intermedia y mala. Se describe en la Tabla 28.

Tabla 28: Criterios para evaluar regularidad en planta

Clasificación	Descripción	Factor de modificación
Buena	La distribución de masas con relación a los dos ejes ortogonales es aproximadamente simétrica en planta, así como muros y otros elementos estructurales.	1.0
Intermedia	Entre la clasificación buena y mala	1.1
Mala	En planta presenta de forma notoria al menos una de las condiciones de irregular descrita: torsión, sistemas no paralelos, retroceso excesivo de las esquinas, diafragma abierto.	1.2

Se aplica el factor de modificación tanto para el método de los porcentajes de daño, como para la cuantía de daño. Este se aplica en el piso más dañado en su dirección más dañada y puede variar su clasificación de habitabilidad.

El valor de los factores de modificación está basado en FEMA P154 [4] con ciertas modificaciones estimadas, pero estos valores no están calibrados para los edificios chilenos y queda como trabajo a futuro realizar esto.

#### 4.4. Metodología recomendada

La metodología que se recomienda seguir debe ser llevada a cabo por un profesional calificado, en el Anexo A se encuentra el manual de aplicación de esta metodología. En esta sección se describen ciertas medidas de seguridad recomendados y pasos a seguir para realizar la metodología de inspección rápida en un edificio.

Para las recomendaciones de terreno se utiliza como referencia las medidas de seguridad dadas por la Ficha de Evaluación de Daños para Inspección Rápida de Edificios Públicos – MOP, Chile [16]. En la Tabla 29 se muestran estas.

*Tabla 29: Recomendaciones generales para terreno*

Equipo para Terreno: Cada inspector debe estar debidamente equipado para su tarea. A modo de indicación mínima, ya que depende de la zona a revisar que se requiere.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Casco plástico (no de metal), zapatos de seguridad, lentes (antiparras claras y oscuras), casaca para clima frío u overol, guantes de cabritilla (tipo eléctricos), hilo de plomo y huincha de mínimo 50m.</li><li>- kit de emergencia personal y provisiones básicas.</li><li>- Calculadora pequeña, lápiz, fichas, cámara digital y libreta de notas.</li></ul>
Cuadrilla de inspección	Cada equipo de inspección deberá constituir de mínimo dos personas
Daño General a la Edificación:	<ul style="list-style-type: none"><li>- La inspección debe comenzar por un estudio de daño general exterior.</li><li>- Si la edificación es notoriamente insegura, no se debe entrar.</li><li>- Desde el punto de vista de la seguridad el inspector debe definir y asegurar las vías de escape o espacio seguros en caso de réplicas, especialmente cuando se hacen inspecciones al interior.</li><li>- En caso de una réplica abandonar lo más rápido posible la inspección hasta que pase el problema.</li></ul>

En la Figura 58 se muestra un diagrama de los pasos recomendados a seguir para realizar la inspección. Igualmente se describen estos pasos a continuación:

1. Realizar un chequeo a la zona donde se encuentra la edificación, para así ver posibles problemas en el terreno y además verificar si las estructuras aledañas presentan o no daños presentes a simple vista
2. Se procede a inspeccionar la edificación desde el exterior. Evaluando la calidad de la construcción, irregularidades y otros aspectos preexistentes. Además se observa el estado general de la edificación para determinar si es seguro su acceso o no.
3. Una vez determinado que es seguro su acceso y desplazamiento, se procede a la inspección más detallada de daños, evaluando cada uno de estos daños en uno de los cinco niveles expuestos en la Tabla 22.
4. Estimar porcentaje de daño y cuantía de daño del edificio. Explicar verbalmente el estado de la estructura que debe señalar como deben proceder los ocupantes de esta.
5. Determinar factores de modificación por regularidad estructural
6. Determinar habitabilidad con ambos métodos de clasificación y utilizar el caso más desfavorable.
7. Terminar de rellenar la planilla de daños y entregarla a las autoridades pertinentes para que se realicen los procesos necesarios.

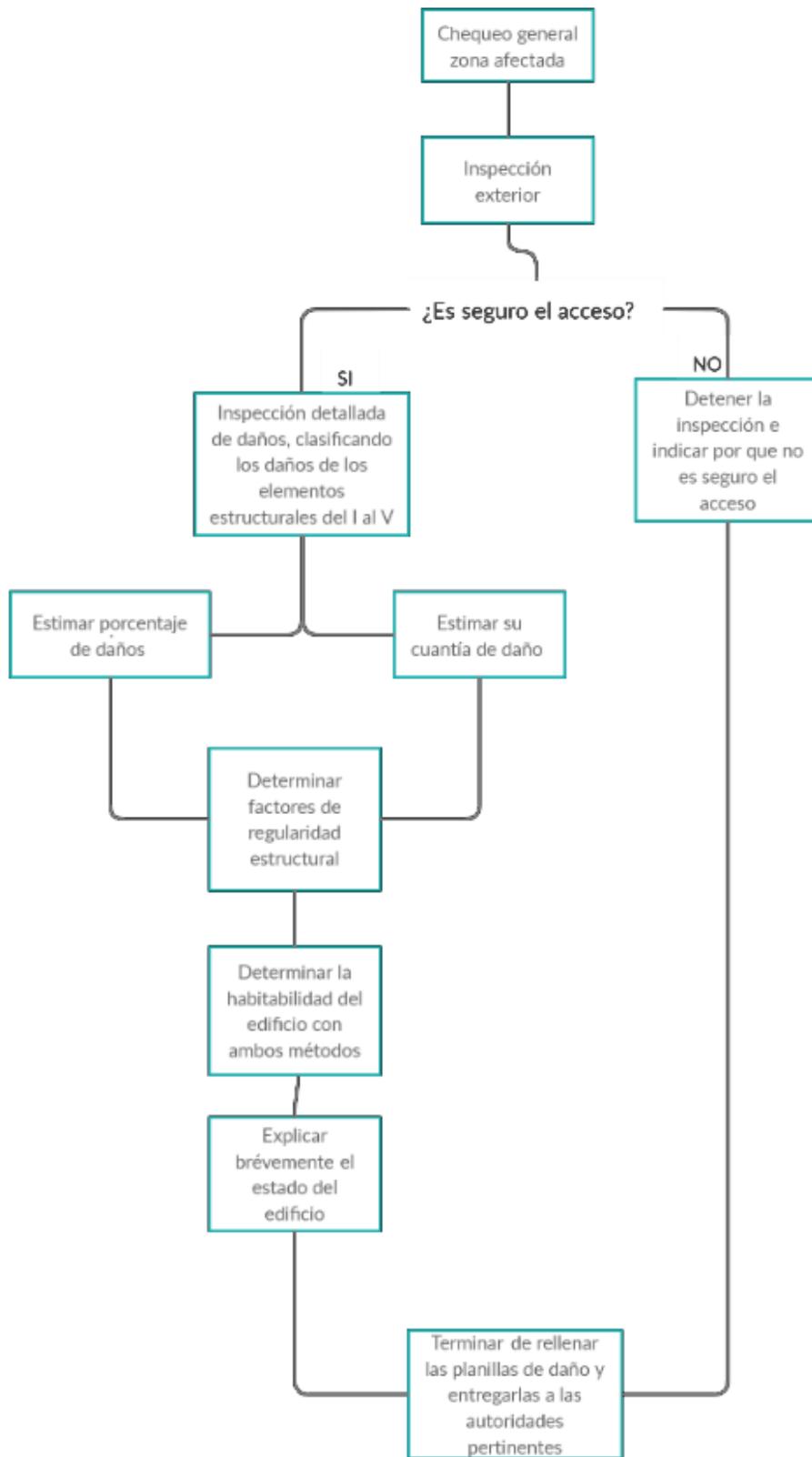


Figura 58: Diagrama de pasos recomendados a seguir

El objetivo del manual de aplicación en el Anexo A es entregar todos los datos de manera organizada y ordenada, para que así la autoridad a cargo de la edificación pueda comprender mejor el estado de esta y cómo proceder. También facilita la estandarización del proceso y así minimizar el error.

## **5. Ejemplificación de la metodología propuesta mediante casos reales después del Terremoto del Maule 2010**

En esta sección se evalúa el método propuesto para la inspección rápida de un edificio dañado después de un sismo y determinar que decisiones se hubieran tomado utilizando el método propuesto.

Debido a que este análisis ya se realizó después del Terremoto del Maule 2010 y los edificios ya fueron reparados, no se puede seguir el procedimiento de la metodología propuesta, pero igualmente se busca realizar la inspección de la forma más precisa posible.

Para realizar el procedimiento indicado se utilizan fotos de inspección en terreno y diversos informes de evaluación de los edificios evaluados por la metodología. Los edificios escogidos son el Edificio Antígona y el Edificio Torre Bosquemar.

La evaluación del edificio se divide en este trabajo se dividirán en cuatro etapas. En primer lugar, se describen los documentos utilizados para realizar la inspección del edificio y sus características generales, como la ubicación y año de construcción. En segundo lugar, se procede a realizar el análisis de regularidad estructural de la edificación, tomando en consideración la regularidad en planta y la vertical, para así determinar el factor de modificación. Luego, se procede a realizar el análisis de daños de la edificación, clasificando los daños de los elementos estructurales en uno de los cinco niveles expuestos y dando una breve explicación de que pudo haberlo generado. Finalmente se resumen estos daños y se procede a evaluar la habitabilidad del edificio mediante los dos métodos descritos en el Capítulo 4, subsección 4.2.

## 5.1. Edificio Antígona

### 5.1.1. Características generales Edificio Antígona

Para evaluar la efectividad de la metodología propuesta se analizan edificios dañados en el Terremoto del Maule 2010. En primer lugar, se evalúa el edificio Antígona, para llevar a cabo esto se utilizan los siguientes documentos:

- Rehabilitación Estructural Edificio Antígona. Documento realizado por RCP Ingeniería LTDA, con el ingeniero Rodrigo Concha P. a cargo del informe. [17]
- Edificio Antígona: Estudio de Diagnostico Estructural, Análisis Causas del Daño. Realizado por la Universidad Técnica Federico Santa María. [18]
- Validación de los Límites para Distintos Niveles de Desempeño en Edificios con Muros de Hormigón Armado. Tesis realizada por Betzabeth Suquillo donde se analiza el Edificio Antígona. [19]
- Fotos inspección en terreno dadas por el profesor Fabián Rojas
- Planos del edificio

El Edificio Antígona, construido el año 2004, es ubicado en Av. 5 Oriente – Viña del Mar y producto del sismo ocurrido el 27 de febrero de 2010, sufrió una cantidad considerable de daños en su estructura. La ubicación general del edificio se muestra en la Figura 59, en la Figura 60 se muestra la vista en planta y en la Figura 61 muestra la vista general de éste.

La estructura mencionada tiene dieciséis pisos para habitación y dos subterráneos destinados para estacionamientos y bodegas. Presenta una geometría rectangular con una planta de aproximadamente 30.4m en el sentido N-S y de 21m en el sentido E-W en el primero piso. En el primer subterráneo tiene un aumento de la planta de la estructura, con un aumento de 11.9m en el sentido E-W, 10.7m hacia el norte y 5.2m hacia el sur.



Figura 59: Ubicación general del edificio.  
Fuente: maps.google.cl

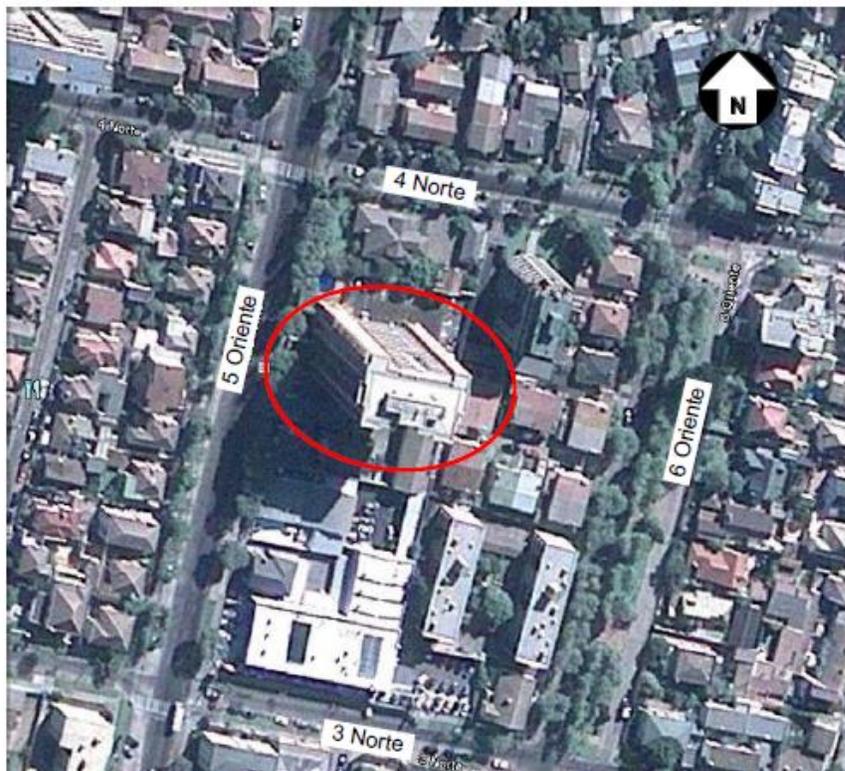


Figura 60: Vista en planta del Edificio Antígona [18]



*Figura 61: Vista general del edificio [18]*

El daño más importante se aprecia en algunos de los muros estructurales de hormigón armado en el subterráneo y primer piso. Estos presentan secciones con desprendimiento de hormigón, pandeo y hasta fractura del refuerzo longitudinal y desprendimiento del refuerzo transversal.

El daño que sufrido por el edificio fue considerado de una importancia suficiente para obligar a la evacuación de éste.

### 5.1.2. Análisis regularidad estructural del edificio

En primer lugar, se analiza la regularidad de planta y vertical. Para esto se observan los planos del edificio, se utiliza la adaptación de los planos realizada por la Universidad Técnica Federico Santa María, los cuales se pueden encontrar en el Anexo B.

Para la regularidad de planta se observa la losa de fundaciones y la vista en planta de los subterráneos y el primer piso. Analizando estos planos se puede apreciar que tiene cierto retroceso en las esquinas y que tiene un eje más resistente que el otro. Estas dos irregularidades de planta no son muy notorias, por lo cual se considera que la estructura tiene regularidad de planta intermedia, es decir, se utiliza un factor de amplificación de 1.1 amplificación.

En cuanto a la regularidad vertical se puede apreciar que el primer subterráneo tiene un área mayor de planta que el resto de la estructura, como se puede observar en sus respectivos planos en el

Anexo B. Al ser un subterráneo esto no tiene mayor efecto. Subiendo desde el primer piso hasta los pisos de mayor altura se encuentran pequeñas diferencias en la estructuración, como muros discontinuos en el eje N (Figura 62 y Figura 63), además se encuentran muros con distinto largo, generando el efecto de muro bandera como se puede observar desde la Figura 64 hasta la Figura 67, estas se producen en el eje A y entre el B y eje H. Las irregularidades señaladas son marcadas por un rectángulo amarillo y los planos marcan con gris cuando no existe muro en la planta mostrada, pero si existe muro en la planta superior.

Adicionalmente se encuentra una discontinuidad de machones en el Eje E, como se puede ver en la Figura 68, donde se produce la discontinuidad en el primer piso. Esta discontinuidad generó muchos daños en el edificio, como se estudia en la sección 5.1.3.

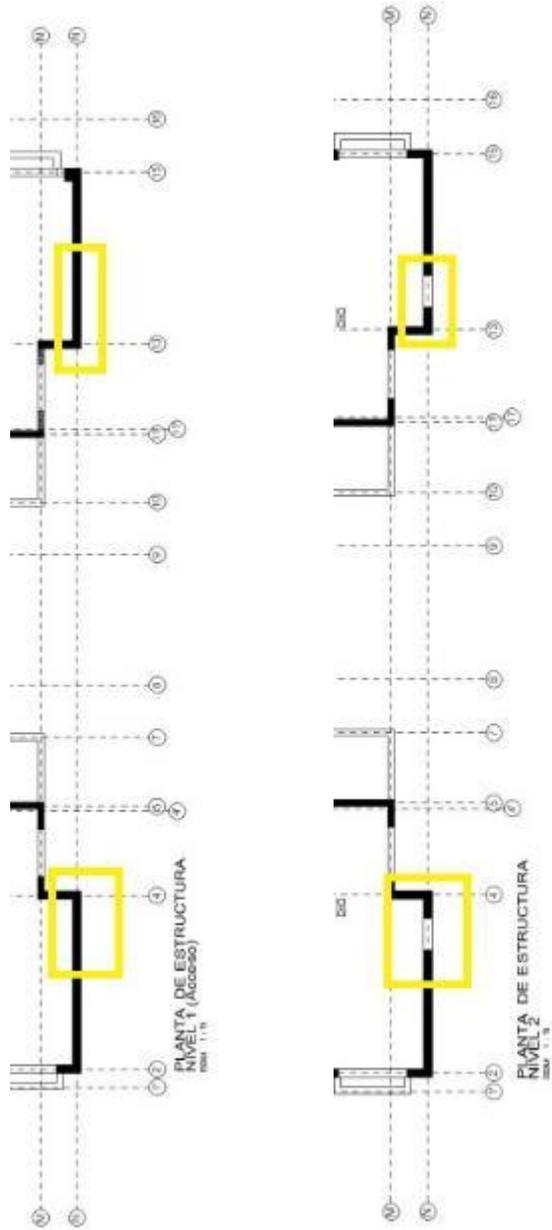


Figura 62: Planta 1° Piso eje N    Figura 63: Planta 2° piso eje N

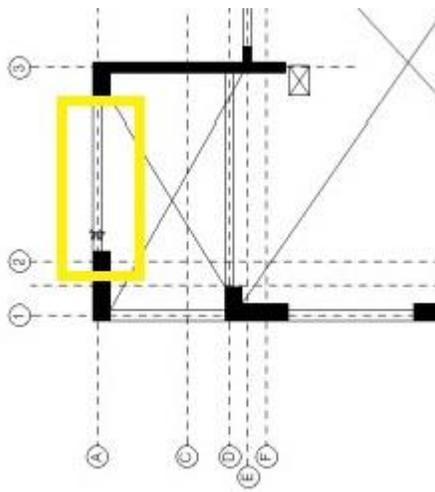


Figura 64: Planta 1° piso eje A

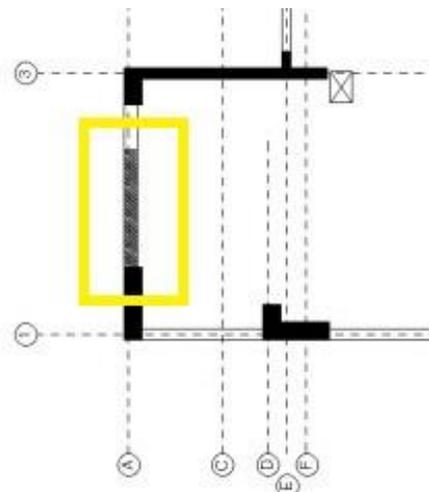


Figura 65: Planta 2° piso eje A

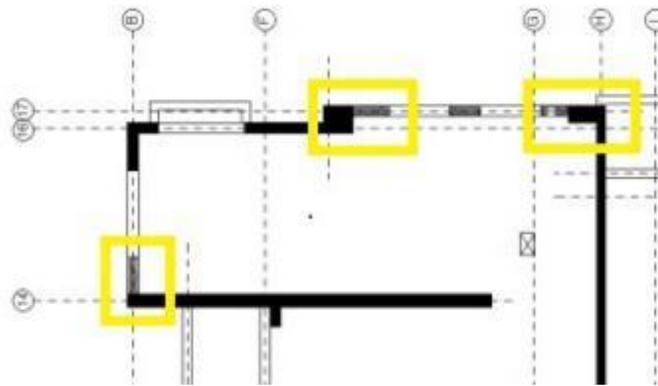


Figura 66: Planta 1° piso eje B y eje H

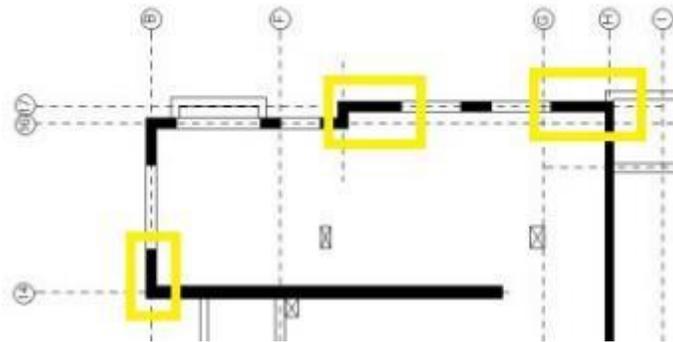


Figura 67: Planta 2° piso eje B y eje H

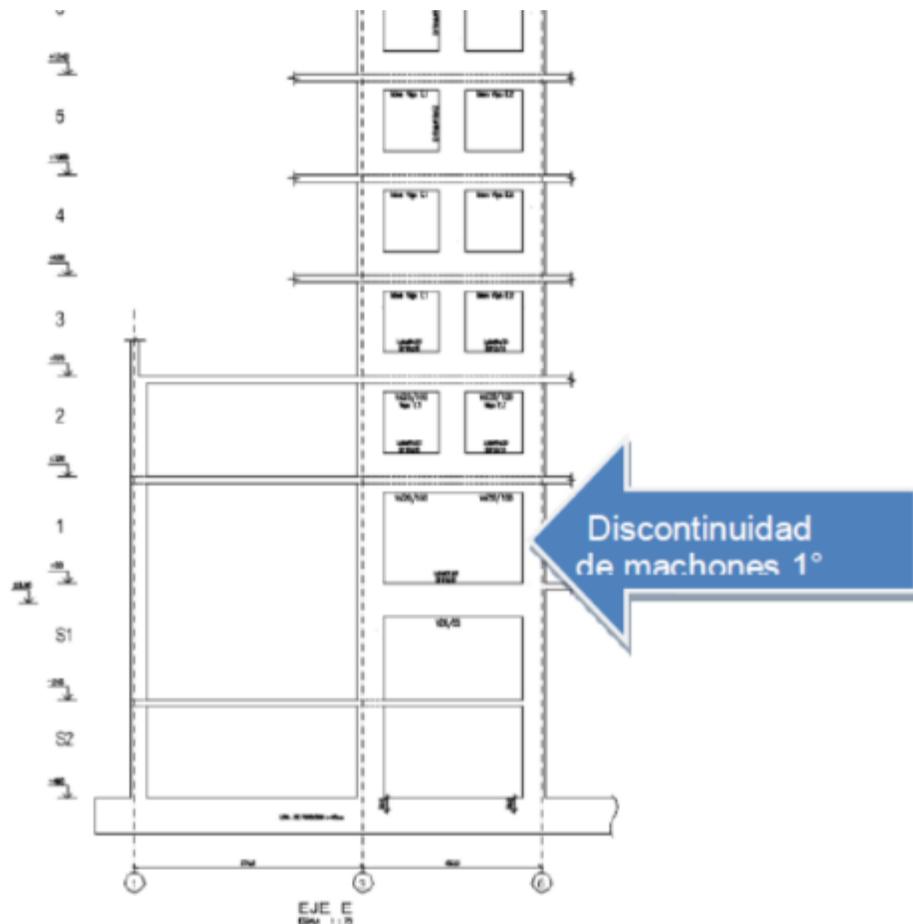


Figura 68: Corte Eje E, discontinuidad de machones [18]

Al sumar estas irregularidades verticales que se encuentran se determina que el edificio tiene una regularidad vertical mala, es decir, el factor de modificación equivale a 1.2.

En la evaluación de habitabilidad por el método de porcentaje de daños y cuantía de daño se debe multiplicar el resultado por los factores de modificación estimados.

### 5.1.3. Análisis de daños en el edificio.

Tratando de inspeccionar el edificio como si se estuviera en la situación real, en primer lugar se inspeccionará desde el exterior y luego desde el interior. A simple vista desde el exterior del edificio se puede apreciar gran desprendimiento de hormigón y fisuras en el machón ubicado en el eje E, debido a la discontinuidad señalada en la Figura 68. En la Figura 69 y Figura 70 se muestra cómo se encontraba el edificio en ese eje. Este daño se catalogará cuando se inspeccione la estructura desde su interior, para verla en más detalle.



*Figura 69: Daños en el eje E vistos desde el exterior (1)  
Fuente: Fotos inspección en terreno*



*Figura 70: Daños en el eje E vistos desde el exterior (2)  
Fuente: Fotos inspección en terreno*

En la fachada nororiental, en el eje 17, se aprecia fisuras y desprendimiento de hormigón en las vigas de fachada y machones centrales, entremedio de las ventanas. Éstas fueron producidas probablemente por corte. Como se muestra en la Figura 71 y Figura 72. En la misma fachada en el eje 16 se aprecia que se desprendió la pintura y enlucido y se puede ver claramente el hormigón estructural, que presenta ciertas fisuras.



*Figura 71: Fachada nororiente (1)  
Fuente: Fotos inspección en terreno*



*Figura 72: Fachada nororiental (2)  
Fuente: Fotos inspección en terreno*

Acercándose más al edificio se puede apreciar que en el primer piso, eje 16, entre el eje F y F' (Figura 73) se encuentra el muro y machón muy dañados. Se ve en la esquina inferior que hubo desprendimiento del hormigón, que los refuerzos longitudinales están claramente pandeados y los estribos fracturados. Por lo cual es un daño nivel V. En la Figura 74 se muestra una vista lejana de la falla y en la Figura 75 se muestra una vista cercana donde se puede apreciar lo dañada que se encuentra la armadura. Esta falla se debió a flexo-compresión y se reforzó el muro para apaciguar el riesgo de que aumenten los daños, como se puede observar en la Figura 76.

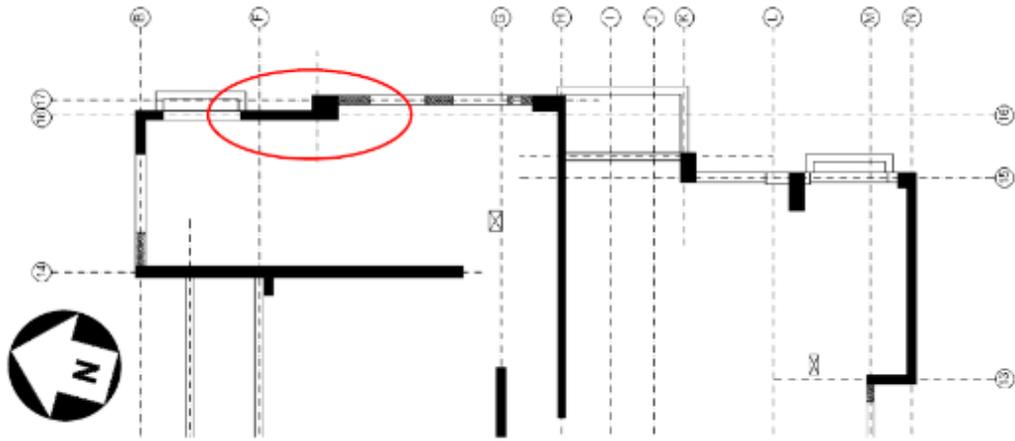


Figura 73: Ubicación muro dañado primero piso eje 16 [18]



Figura 74: Vista lejana muro dañado eje 16  
Fuente: Fotos inspección en terreno



Figura 75: Vista cercana muro dañado eje 16  
Fuente: Fotos inspección en terreno



*Figura 76: Refuerzos en muro dañado eje 16 [17]*

Inspeccionando el estacionamiento del primer piso se encuentran fisuras leves de un espesor menor a 0.3mm, por lo que son consideradas de nivel II, como se muestra en la Figura 77 y otras pocas fisuras que pueden ser consideradas nivel III (Figura 78). Adicionalmente se encuentra desprendimiento del hormigón en los extremos del muro, como se muestra en la Figura 79.



*Figura 77: Fisuras en estacionamiento primer piso (1)  
fuente: Fotos inspección en terreno*



*Figura 78: Fisuras estacionamiento primer piso (2)  
Fuente: Fotos inspección en terreno*



*Figura 79: Desprendimiento de hormigón en muros estacionamiento primer piso.  
Fuente: Fotos inspección en terreno*

Continuando con la inspección del edificio en el interior, se procede a inspeccionar el primer subterráneo.

El daño más notorio en el primer subterráneo se encuentra en la dirección corta del edificio en el eje 14. Este tiene un muro de largo 866cm y 30cm de espesor. Este muro se encuentra en ambos subterráneos y en el primer piso. El muro continua en toda la altura del edificio, pero disminuyendo su sección en los pisos superiores. En la Figura 80 se muestra su ubicación.

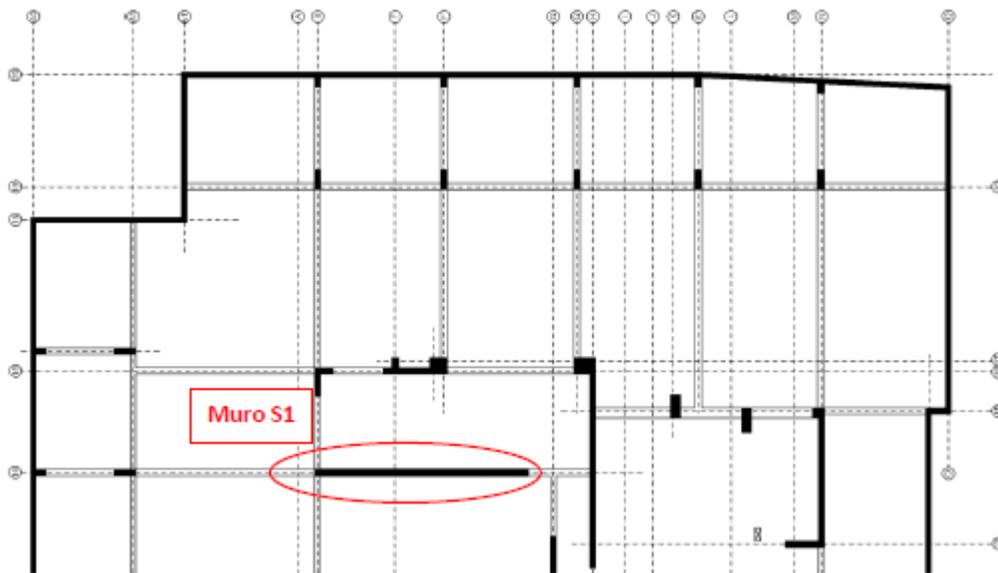


Figura 80: Ubicación muro dañado eje 14, primer subterráneo [18]

El daño fue causado por flexo-compresión y se encuentra prácticamente a lo largo de todo el muro, intensificándose en su extremo en el eje B. Donde se observa el refuerzo de acero claramente pandeado y los estribos fracturados, por lo tanto es considerado daño nivel V. En la Figura 81 se muestra el muro dañado en general y en la Figura 82 se muestra una toma más cercana a su zona más dañada, en ambas figuras se puede apreciar el refuerzo que se instaló en el muro para no sufrir daños mayores.

En el primer piso el mismo muro también sufrió daños, pero no en la misma intensidad que los daños presentes en el primer subterráneo. En el primer piso solo se encuentran fisuras y leve desprendimiento de hormigón, como se indica en la Figura 83. Se considera este daño en nivel II.



*Figura 81: Vista general muro dañado eje 14, primer subterráneo [17]*



*Figura 82: Zona más dañada muro eje 14, primer subterráneo [17]*

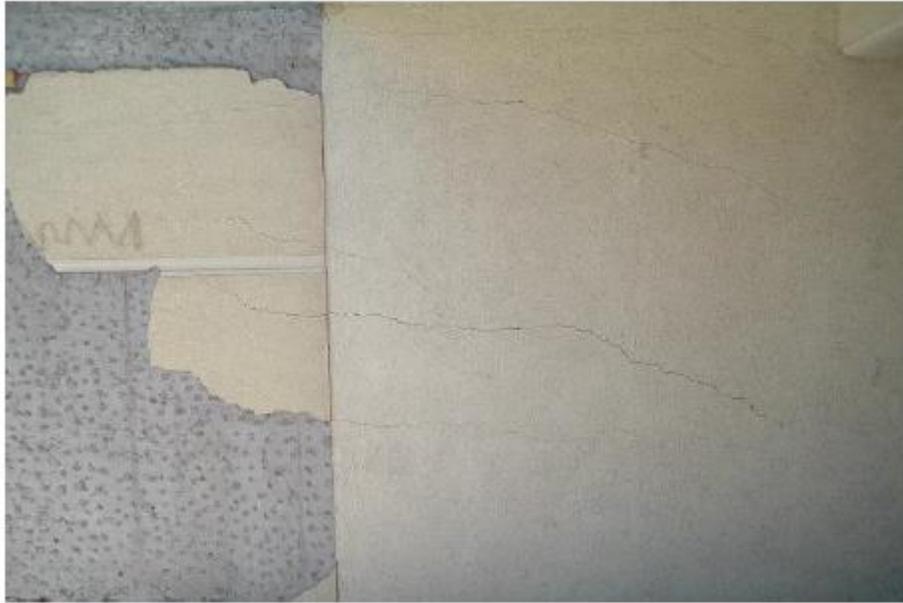


Figura 83: Daño muro eje 14, primer piso [18]

Otro elemento estructural dañado en el primer subterráneo se encuentra en el eje 16, pero a diferencia del daño encontrado en el primer piso, este se presenta en el muro de sección L en la esquina del eje 16 con eje B, como se indica en la Figura 84.

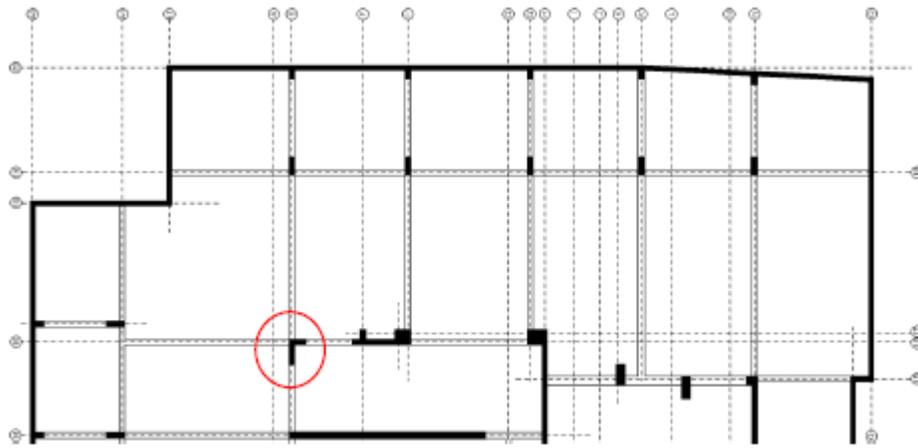
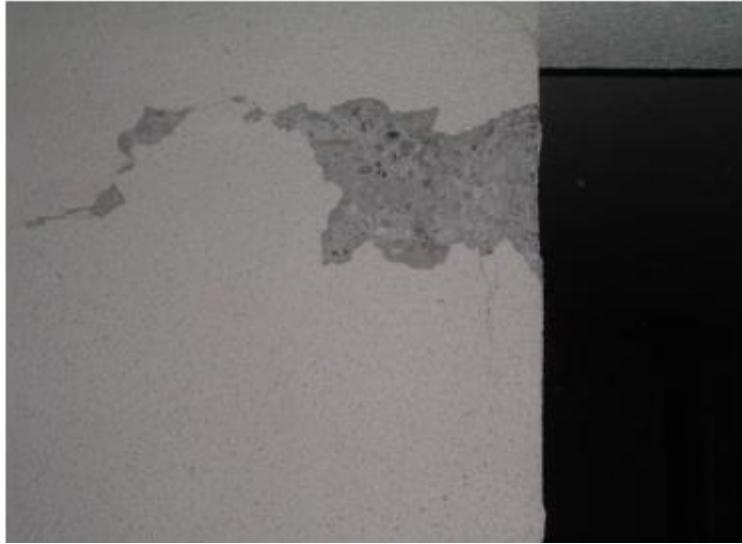


Figura 84: Ubicación muro sección L eje 16/B, primer subterráneo [18]

Este muro de sección L presenta fisuras con gran desprendimiento de hormigón, por lo cual es considerado daño nivel III, esto debido a que pese que hay gran desprendimiento del hormigón, no se alcanza a ver la armadura de refuerzo. Se muestra el daño en la Figura 85 y en la Figura 86



*Figura 85: Daño muro eje 16/B primer subterráneo [18]*



*Figura 86: Daño muro eje 16/B primer subterráneo. [17]*

Se encuentran otros daños menores de fisuras en el primer subterráneo y segundo subterráneo, pero estos tienen un espesor menor a 0.3mm y comparados con los daños descritos, estos no presentan mayor relevancia, por lo cual se prosigue en analizar otros daños de mayor nivel encontrados en la estructura.

Al comienzo se analizó exteriormente la edificación y se encontraron notorios daños en el eje E, donde se encuentra una discontinuidad de machones en la estructura, la cual produce una gran concentración de esfuerzos.

En la Figura 69 y Figura 70 ya mencionadas se muestra la vista exterior de los daños ocasionados por corte. Se procede a analizar los daños desde el interior. Se encuentran fisuras de espesor mayor a 2mm, gran desprendimiento de hormigón que permite ver la armadura de refuerzo, pero no se alcanza a observar pandeo o fractura en el refuerzo, por lo que este daño es considerado de nivel IV. Se muestra un ejemplo del daño desde el interior en la Figura 87.



*Figura 87: Daño eje E fachada norte, falla por corte [18]*

Otro daño visto en primera instancia desde el exterior son los ubicados en el eje 17 en los machones centrales, dinteles y en la viga alta que recibe los machones centrales, como ya se mencionó en la Figura 71 y Figura 72. De estos no se tiene mayor detalle en el interior, pero por cómo se ve desde el exterior se catalogan como daño nivel III.

En los pisos superiores se aprecia daño en la conexión entre las vigas de borde y el machón del eje K que se indica en la Figura 88. En la Figura 89 y Figura 90 se muestra el detalle del daño. Esta falla por conexión consiste en fisuras importantes y desprendimiento de hormigón, que en algunos pisos permite ver la armadura de refuerzo. El daño recibido en el eje K es considerado de nivel III o de nivel IV dependiendo del piso, donde no se encontró mayor detalle.

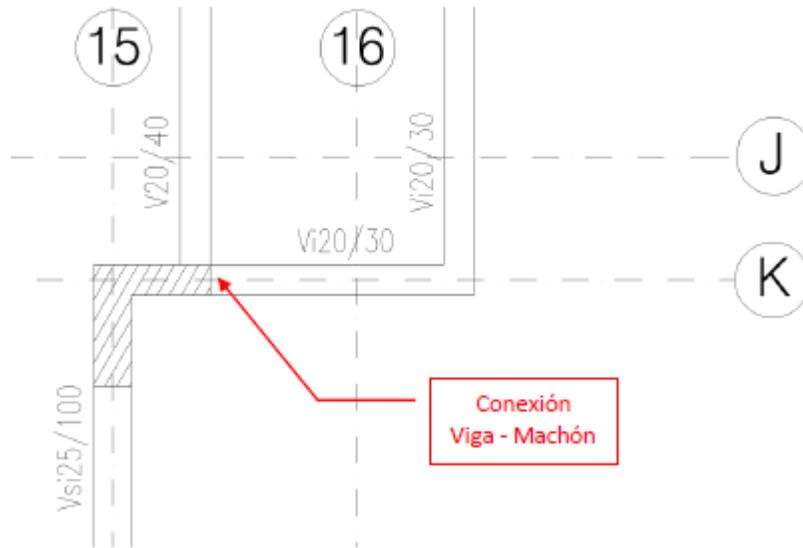


Figura 88: Plano conexión viga-machón [18]



Figura 89: Daño eje K (1) [18]



*Figura 90: Daño eje K (2) [17]*

Se observa agrietamiento en losas de piso a lo largo del eje H en la ubicación indicada en la Figura 91. El patrón observado se produce por la acción de dintel de la losa en zonas que no tienen capacidad de rotación dúctil debido a su reducida longitud entre apoyos. Se muestra un ejemplo en la Figura 92.

Estas grietas reflejan el comportamiento que ha tenido el edificio, por lo que siempre es importante estudiarlo de manera más profunda, pero no representan riesgo para la estabilidad de éste.

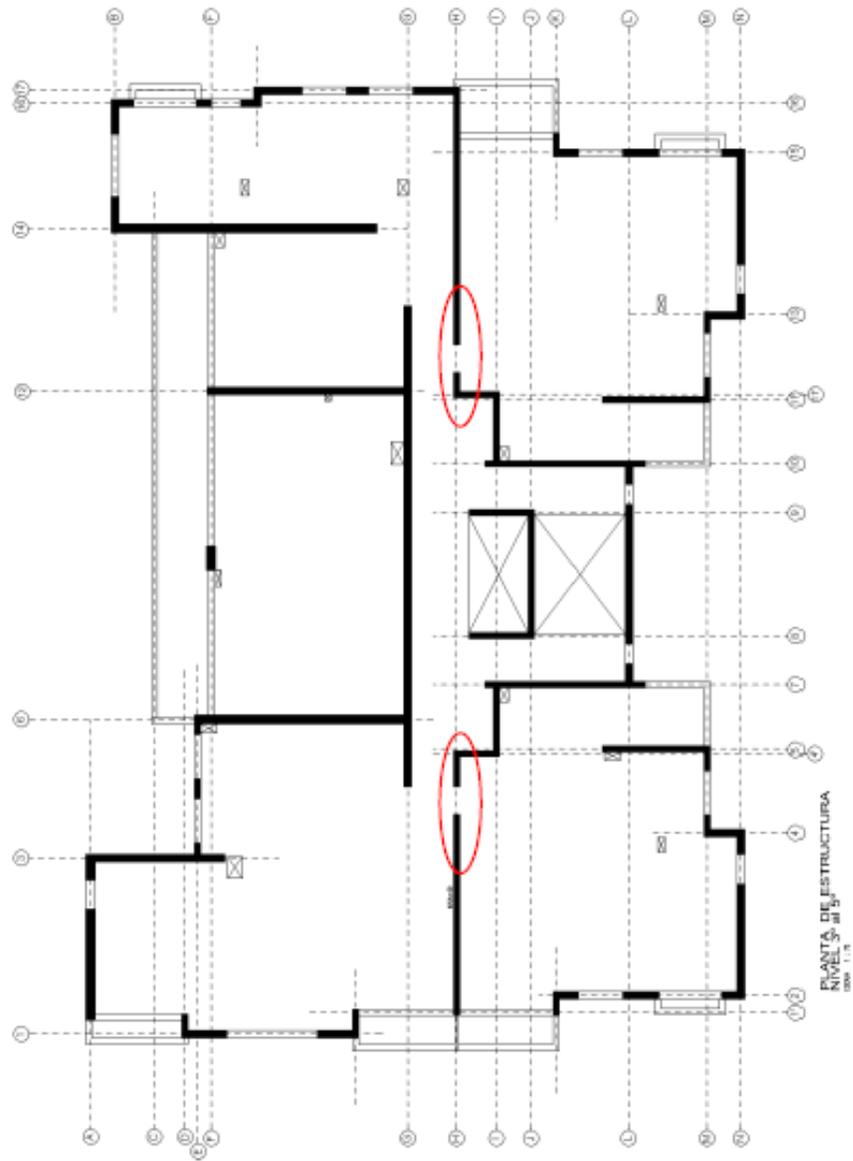
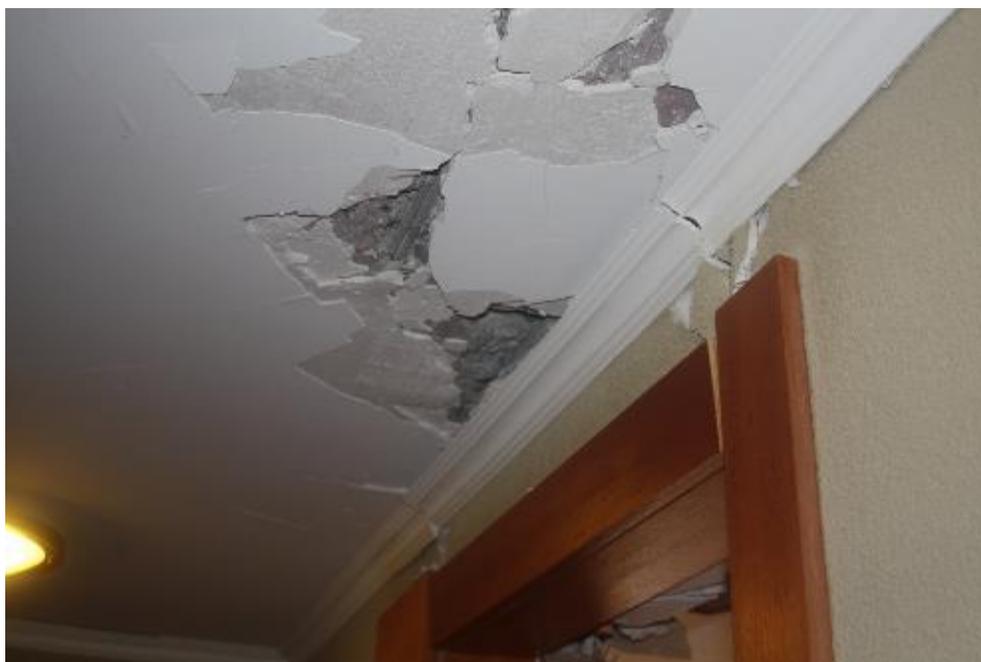


Figura 91: Ubicación losas con efecto dintel [18]



*Figura 92: Daño en losas eje H*  
*Fuente: Fotos inspección en terreno*

Otros daños fueron encontrados en marcos de puertas, ventanas y terrazas, estos daños no se analizan ya que no comprometen la estabilidad estructural del edificio. Así también con muros que presentan grietas, pero comparadas con los muros más dañados no tienen mayor relevancia.

#### 5.1.4. Resumen daños y evaluación habitabilidad Edificio Antígona

La metodología propuesta determina la habitabilidad de la estructura analizando el piso más dañado, pero para poder evaluar que piso es el más dañado se debe realizar un chequeo rápido de la estructura, por esta razón se realizó el análisis en la sección 5.1.3. Los pisos más dañados son el primer piso y primer subterráneo, donde se encuentran muros con daño nivel V. Los pisos superiores si bien tienen daños, estos son de menor magnitud que los que presentan los niveles ya mencionados. En la Figura 93 se muestra una vista en planta del primer subterráneo, donde se marca con rojo el daño nivel V y con amarillo el daño nivel III. De manera análoga, en la Figura 94 se muestra una planta del primer piso con sus muros dañados, marcando con rojo el daño nivel V y con verde el daño nivel II. Adicionalmente en la Tabla 30 se muestra un resumen de los muros más dañados en el primer subterráneo y primer piso.

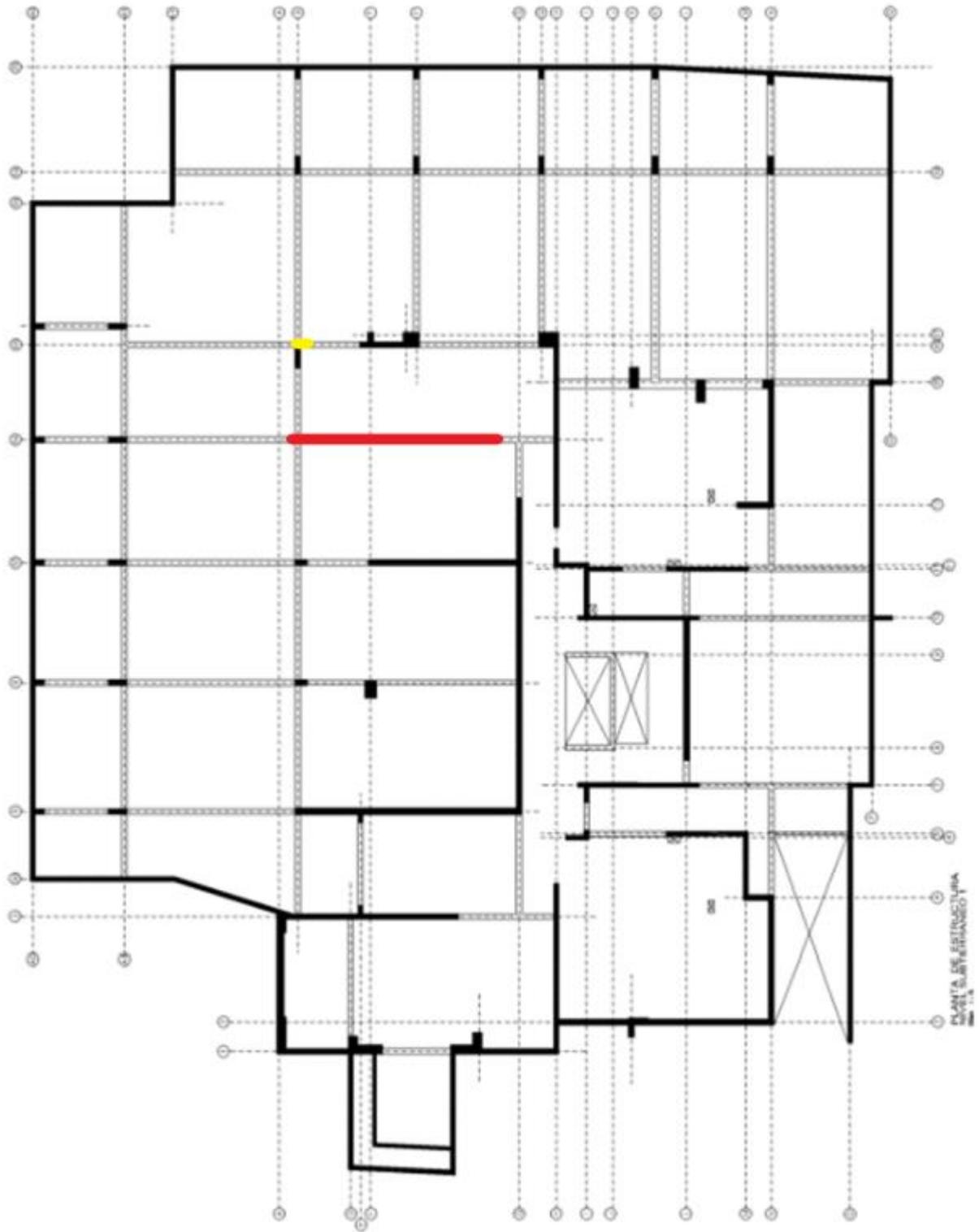


Figura 93: Plano primer subterráneo con muros dañados

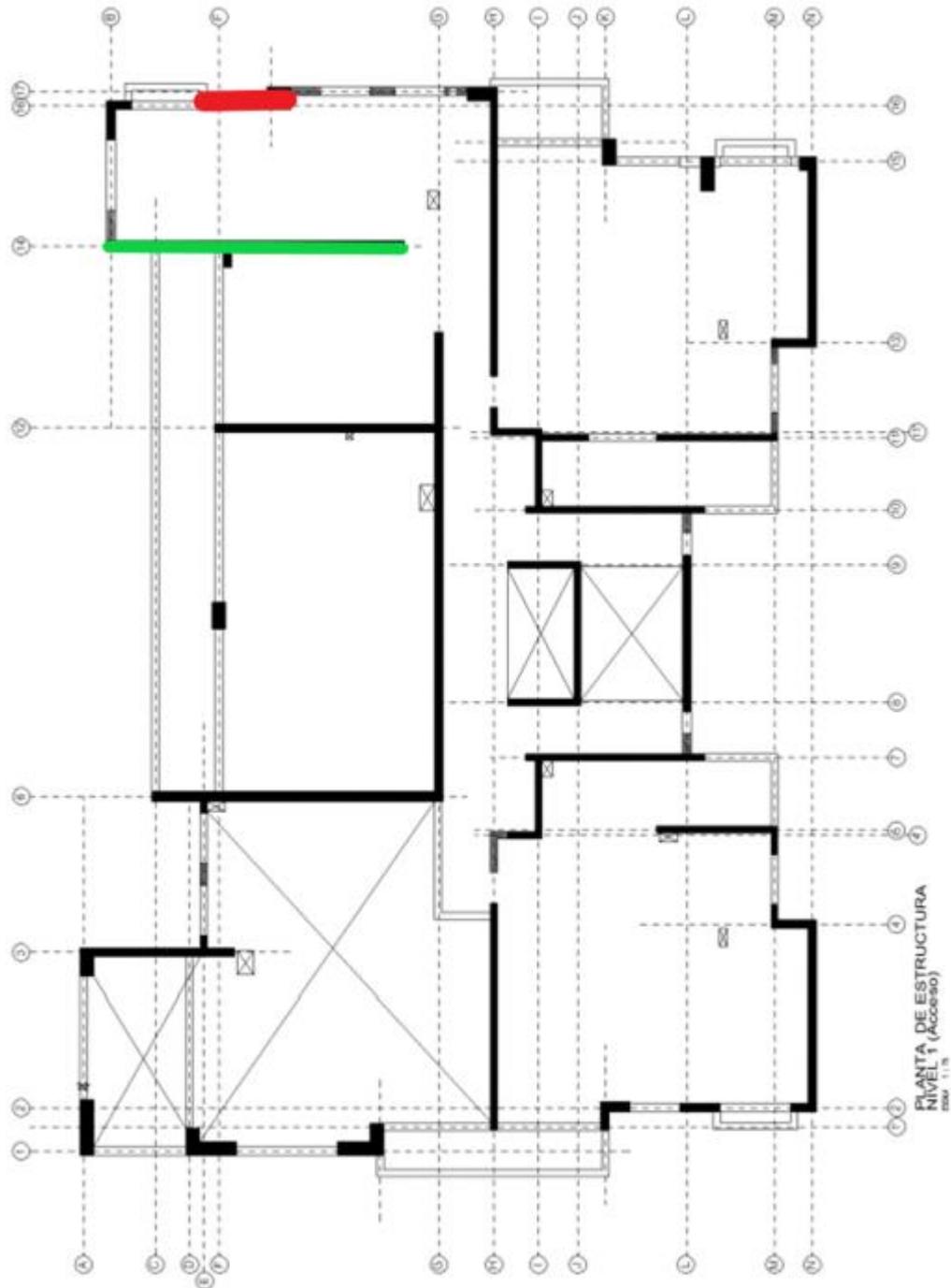


Figura 94: Plano primer piso con muros dañados

Tabla 30: Resumen daños de mayor magnitud primer piso y primer subterráneo

Piso	Muro dañado	Nivel de daño
Primer piso	Muro eje 16, desde eje F a eje F'	V
	Muro eje 14, desde eje B a eje G	II
Primer subterráneo	Muro eje 14, desde eje B a eje G	V
	Muro en L eje 16/B	III

Los daños producidos por discontinuidad en el eje E y por conexión en la fachada nororiente en el eje 17 causaron daños en los pisos superiores y no en el primer piso o primer subterráneo. Los pisos superiores tienen una menor cantidad de daños al compararse con el primer piso y el primer subterráneo, por lo cual no son considerados en el análisis de habitabilidad.

Para evaluar la habitabilidad se realizan los dos métodos propuestos, en primer lugar se analizan por porcentaje de daño. La estimación del porcentaje dañado se realiza midiendo el largo de la totalidad del muro dañado dividiéndolo en la suma de los largos de todos los muros en la misma dirección, se muestran los porcentajes de daño en la Tabla 31.

El segundo método es el método de las cuantías de daños, donde se combinan los niveles de daño utilizando las ecuaciones mostradas en la Tabla 26. Para el caso de este edificio, se muestran los valores obtenidos de  $D_i$  en la Tabla 32.

Tabla 31: Estimación porcentaje de daños Edificio Antígona

Primer subterráneo		Primer piso	
%Daño I	0	%Daño I	0
%Daño II	0	%Daño II	14
%Daño III	0.7	%Daño III	0
%Daño IV	0	%Daño IV	0
%Daño V	6.5	%Daño V	4.3

Tabla 32: Cálculo cuantía de daño Edificio Antígona

Primer subterráneo				Primer piso			
B1	0	D1	0	B1	0	D1	0
B2	0	D2	0	B2	14%	D2	2.8
B3	0.7%	D3	0.39	B3	0	D3	0
B4	0	D4	0	B4	0	D4	0
B5	6.5%	D5	13	B5	4.3%	D5	8.6
$\sum D_i = 13.39$				$\sum D_i = 11.4$			

Para ambos métodos se puede observar que el piso más dañado es el primer subterráneo, por lo cual se procede a determinar la habitabilidad del edificio evaluando el primer subterráneo. En la Tabla 33 se muestran los resultados multiplicados por los factores de modificación (F.M.) de regularidad para obtener la habitabilidad definitiva.

Finalmente se obtiene de ambos métodos que el edificio es No Habitable. Se debe evacuar el edificio y que éste pase a una inspección más detallada mediante modelos estructurales y luego realizar el proyecto de rehabilitación del inmueble.

Tabla 33: Clasificación habitabilidad Edificio Antígona

Método	Valor	F.M. regularidad en planta	F.M. regularidad vertical	Valor final	Habitabilidad
Porcentajes	6.15%	1.1	1.2	8.12	No Habitable
Cuantía de daño	13.39	1.1	1.2	17.67	No Habitable

## 5.2. Edificio Torre Bosquemar

### 5.2.1. Características generales Torre Bosquemar

El segundo edificio a evaluar consiste en el Edificio Inmobiliario Bosquemar. Para realizar este análisis se utilizan los siguientes documentos:

- Memoria de Cálculo Edificio Inmobiliario “Bosquemar Torre 20 pisos”. TENSAR INGEIEROS, Ing Civil Joan Leal J. [20]
- Evaluation of the Damage Observed in a Reinforced Concrete Wall Building During the February 27, 2010 Chile Earthquake. Fabián Rojas, James Anderson. [21]
- Performance of the Torre Bosquemar and Olas Buildings in San Pedro de la Paz and the Pedro de Valdivia Building in Concepción in the 27 February 2010 offshore Maule, Chile Earthquake. [22]
- Planos Calculo Torre Bosquemar.
- Fotos inspección en terreno Fabián Rojas.

El edificio fue diseñado el año 2006 y terminó su construcción el año 2008. La edificación consta de 20 pisos y un subterráneo, cada piso tiene una superficie promedio de 850 m<sup>2</sup>. Está ubicado en la avenida costanera de la ruta 160, entre Concepción y Coronel, en San Pedro de la Paz, en la provincia de Concepción, octava región (Figura 95). Tiene una forma rectangular con su eje largo orientado norte-sur y el corte en este-oeste, en la Figura 96 se muestra la vista desde el este y en la Figura 97 la vista desde el oeste.

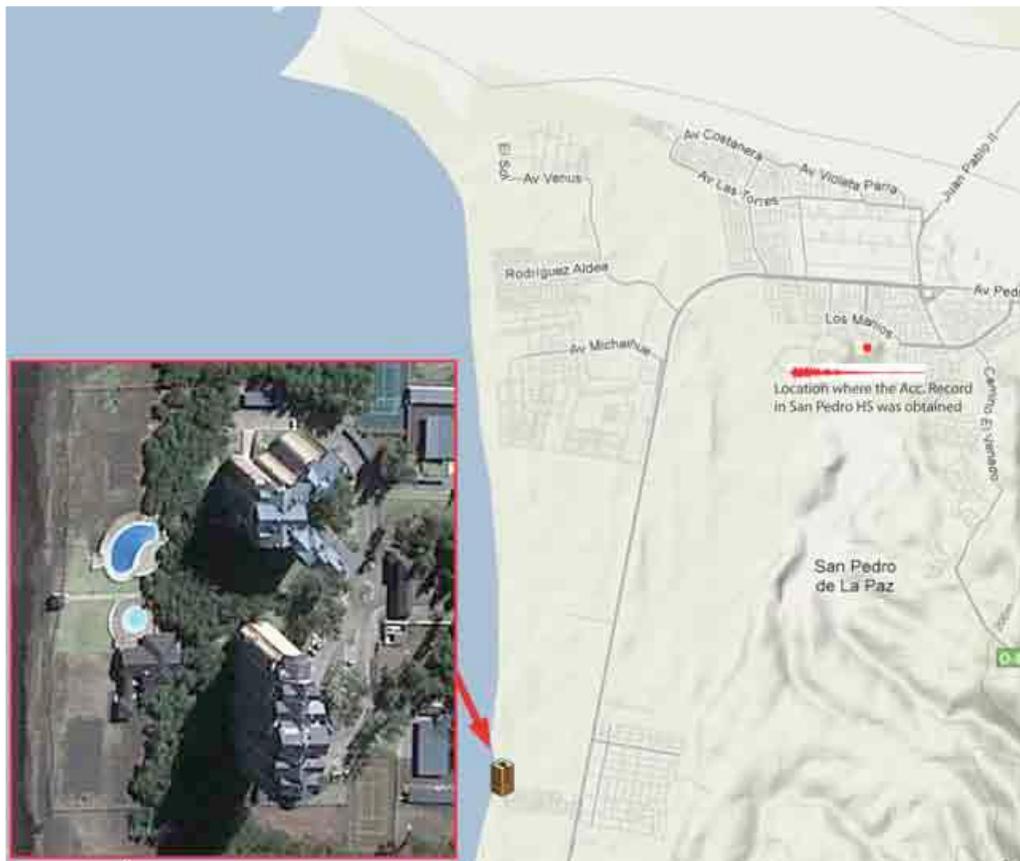


Figura 95: Ubicación Torre Bosquemar [21]



Figura 96: Vista Torre Bosquemar desde el este [21]



Figura 97: Vista Torre Bosquemar desde el oeste [21]

El edificio está estructurado en base a muros de hormigón armado dispuestos en el perímetro e interior de la estructura. En la dirección larga los muros principales se encuentran en el eje K y L, para la dirección corta los muros están distribuidos por todo el edificio. En cuanto a las vigas, las principales se disponen en el perímetro del edificio configurando balcones y antepechos. Las losas de hormigón armado proporcionan el diafragma rígido a cada piso del edificio, presentando aberturas en los accesos a ascensores y escaleras. Se utilizó un sistema de losa de fundaciones donde está apoyado el edificio. En la Figura 98 se aprecia la vista en planta del segundo piso y junto a ella el modelo 3D del edificio realizada en ETABS.

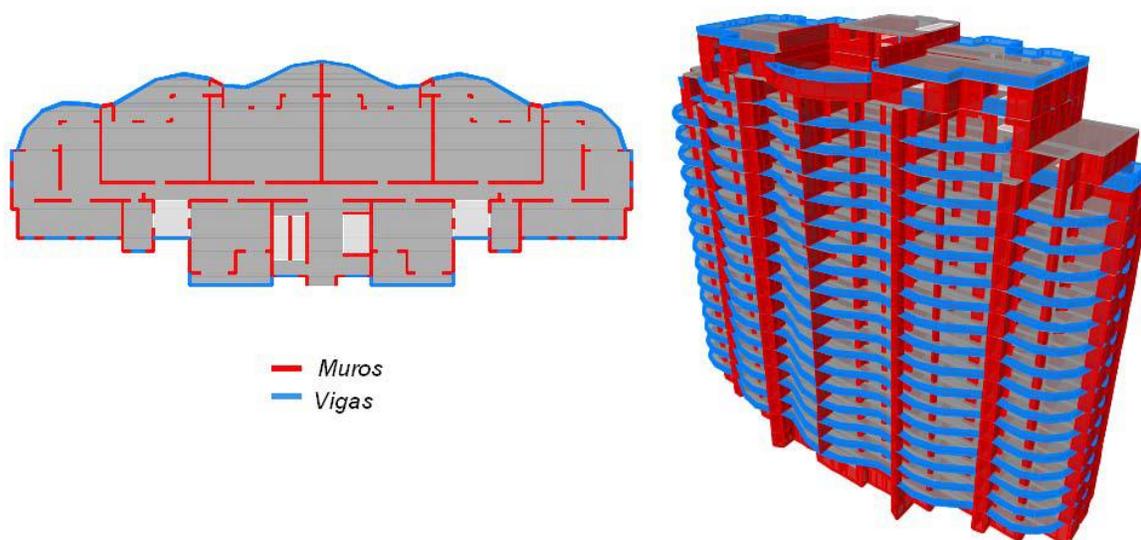


Figura 98: Vista planta segundo piso y vista modelo 3D ETABS [20]

Los elementos estructurales tienen las dimensiones expuestas en la Tabla 34.

Tabla 34: Dimensiones elementos estructurales [20]

Elemento	Sección transversal		Recubrimiento (cm)
Muros	e (cm)	20	2.5
Losas Piso	e (cm)	15	2
Losa Fundación	e (cm)	100	5
Vigas	h (cm)	b (cm)	-
	20	67.5	2.5
	20	112.5	2.5
	20	152.5	2.5

En el Anexo D se encuentran algunos de los planos estructurales de la edificación, la vista en planta de los distintos pisos y la elevación de los ejes K y L, los cuales son los más relevantes en la dirección larga.

### 5.2.2. Análisis regularidad estructural Torre Bosquemar

En primer lugar se analiza la regularidad en planta. Para realizar esta tarea se utilizan los planos de estructuras de planta de fundaciones, subterráneo y primer piso, que se pueden encontrar en el Anexo D. En la Figura 99 se muestra un esquema de la losa de fundación, en esta se puede apreciar gran retroceso de las esquinas y que la estructura es simétrica cuando se divide en su dirección corta, pero al dividir en la dirección larga no es simétrica. Adicionalmente el edificio estará sometido a torsión por tener gran diferencia de rigidez en sus dos direcciones.

Se considera que el edificio tiene una regularidad de planta mala, por lo cual se tiene un factor de modificación de valor 1.2 y este se aplica en la estimación de habitabilidad.

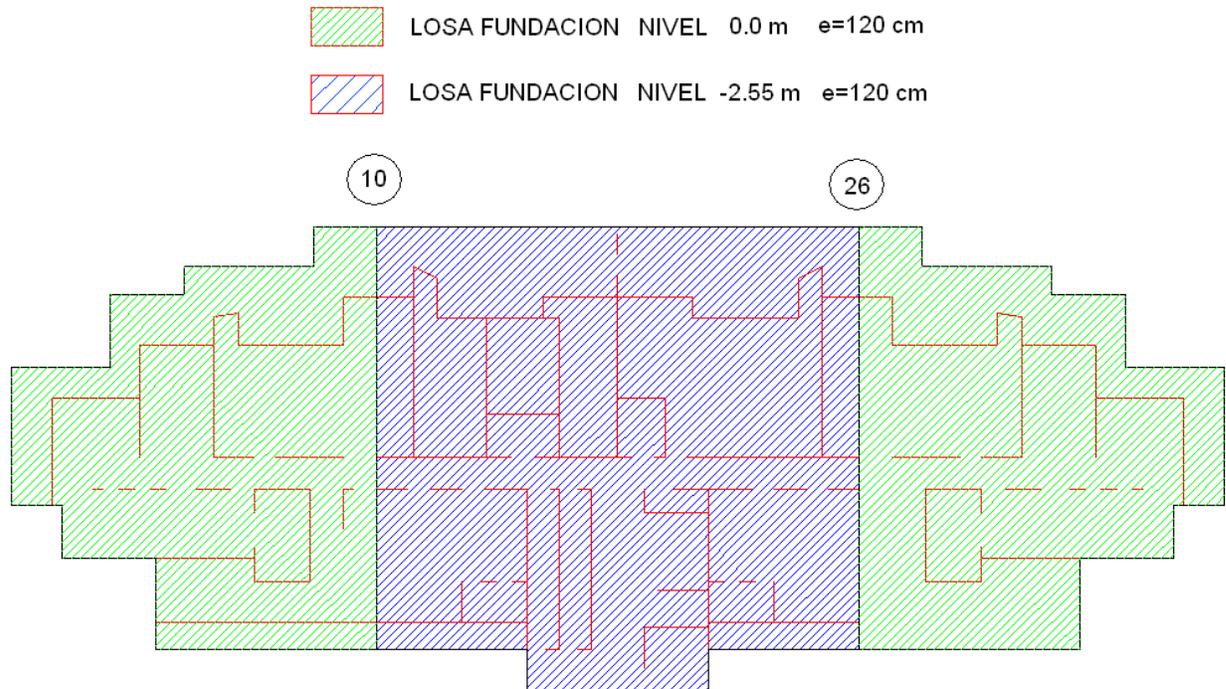


Figura 99: Esquema losa fundación [20]

En cuanto a la regularidad vertical se analizan los muros presentes en el eje largo, en el eje L y K, y los muros en el eje corto. El edificio analizado tiene una serie de irregularidades verticales, por lo que se cubren las más relevantes e influyentes.

En primer lugar el subterráneo tiene una menor dimensión que el resto del edificio (del eje 10 al eje 26), esto genera que los muros estén apoyados en distintas fundaciones, como se aprecia en la Figura 99, la cual es considerada una irregularidad moderada, debido a que es un subterráneo y los demás muros están unidos apoyados en las fundaciones. En la Figura 100 se muestra una sección de la elevación del eje L y en la Figura 101 una sección de la elevación del eje K, en estas dos elevaciones se muestra una gran cantidad de aberturas en los muros, esto se realiza con fines arquitectónicos y genera que se concentren esfuerzos donde suceden estas irregularidades debido a que se tienen varias discontinuidad en el sistema resiste y se produce el efecto de columna corta, por lo tanto, es una irregularidad severa. Además, en la parte superior del eje K (Figura 102) se aprecia cómo se tiene distintas alturas para el edificio, probablemente por las instalaciones de piscina y gimnasio en el último piso, esta irregularidad es considerada como una irregularidad vertical moderada.

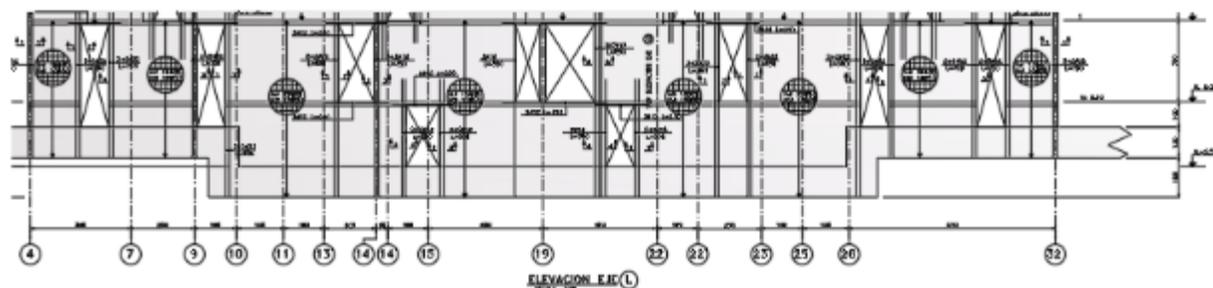


Figura 100: Sección de la elevación eje L

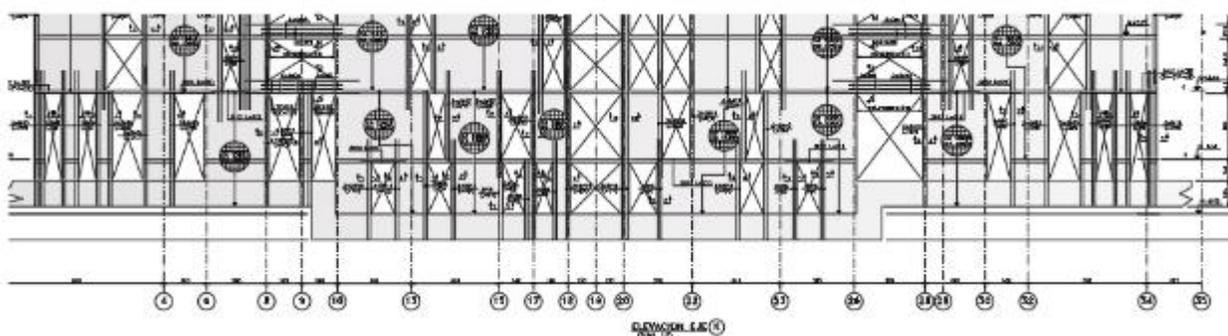


Figura 101: Sección de la elevación eje K

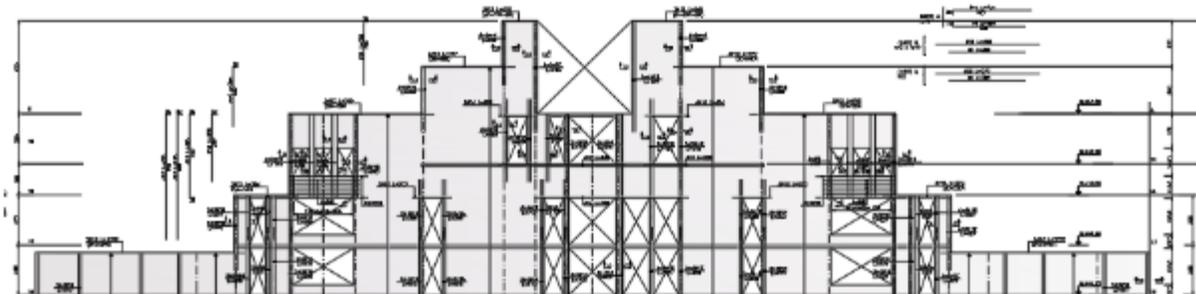


Figura 102: Sección superior elevación eje K

En la Figura 103 se muestra una sección del eje 15, donde se tienen dos grandes aberturas entre el eje B y el eje A, la que se encuentra en el subterráneo es considerada como irregularidad vertical severa y la ubicada en el primer es una irregularidad vertical moderada, adicionalmente el largo de los muros se reduce en los niveles superiores al primer piso, lo cual es una irregularidad moderada. En el eje 19 (Figura 104) se puede apreciar una gran abertura que es utilizada como entrada y otra pequeña abertura con fines arquitectónicos, la cual deja a un muro susceptible a daños, lo cual también es considerado una irregularidad severa, todo ubicado en el primer piso.





Como se encuentran tres irregularidades verticales severas más otras moderadas y varias causaron daño importante en la estructura, como se analiza en la sección 5.2.3, se opta por multiplicar las irregularidades verticales, lo que da un factor de modificación de 1.72. Finalmente la clasificación de habitabilidad deberá multiplicarse por el factor de modificación de regularidad en planta (1.2) y el factor de modificación de regularidad vertical (1.72).

### 5.2.3. Análisis de daños Torre Bosquemar

Se realiza una simulación de la inspección de daños de la estructura, donde se trata de seguir el procedimiento recomendado a pesar de que el edificio ya fue inspeccionado en su momento.

En primer lugar se inspeccionan los alrededores y el suelo que rodea la edificación. En la Figura 106 se muestra una imagen satelital, donde se aprecia que existe un edificio contiguo a Torre Bosquemar, pero este no presenta daños de la magnitud que presenta el edificio analizado, esto puede deberse a la dirección de los edificios, debido a que fueron diseñados y construidos con métodos similares. Esto permite hacerse una idea del comportamiento del sismo.



Figura 106: Imagen satelital que muestra los dos edificios [22]

En el exterior de la estructura se puede apreciar depresiones en el suelo en la dirección larga de ésta, en la cara que da hacia el océano, como se muestra en la Figura 107 y Figura 108. Estas depresiones probablemente fueron causadas por una deficiente compactación de relleno después de la construcción, porque no hay indicaciones sobre un posible asentamiento global o diferencial de las fundaciones.



*Figura 107: Asentamiento del suelo en la cara mirando al océano [22]*



*Figura 108: Asentamiento del suelo [22]*

Desde el exterior de la estructura, a simple vista se pueden observar daños relevantes en el primer piso, los cuales son producidos por distintas razones y son analizados con mayor detalle más adelante. La Figura 109 se divide en 4 distintas imágenes donde (a) muestra daño importante por columna corta (nivel IV); (b) muestra una fisura nivel III producida por corte en una viga; (c) se

aprecia un muro con gran desprendimiento de hormigón (daño nivel IV) probablemente producido por compresión; (d) muestra un muro dañado por flexo-compresión, nivel V. Los daños mostrados en (a) y (b) se ubican en el eje H.



*Figura 109: Daños generales apreciados desde el exterior [21]*

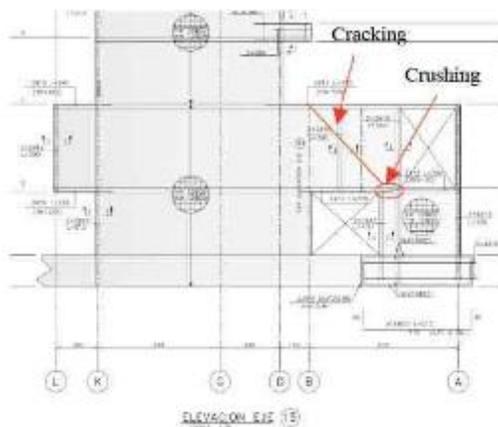
Una vez realizada una breve inspección exterior para poder asegurar la entrada al edificio, se comienza a analizar los daños interiores y exteriores con mayor detalle evaluando cada uno de estos en una de las cinco categorías presentes en la metodología.

Como se indicó en la sección 5.2.3 existen varias irregularidades verticales en la estructura. Este es el caso del eje 15 y el eje 22, entremedio de los ejes K y D, donde se genera una irregularidad para formar la entrada al edificio.

En la Figura 110 se muestra una elevación del eje 15 y el daño que se encuentra en este muro. En (a) se aprecia un esquema de la elevación en el eje 15 donde se señalan los daños, en (b) se muestra una foto en terreno y en (c) se muestra el detalle de la zona más dañada. El daño presente en este muro se debe a la abertura que produce una irregularidad vertical y que los extremos del muro están apoyados en distintas fundaciones. Se genera una gran compresión en la esquina inferior del muro que produjo desprendimiento del hormigón de recubrimiento y se aprecia la armadura de refuerzo, por lo cual es daño nivel IV en esa zona, además a lo largo del muro se visualizan fisuras en diagonal generadas probablemente por corte.

En cuanto al eje 22 se tiene el subterráneo más extenso que el primer piso, como ya fue mencionado en la sección anterior. Sin embargo, este recibió daño considerable que se señala en la Figura 111. Una parte del muro está apoyada en la losa de fundaciones y la otra en una fundación distinta, lo cual pudo generar una deformación diferencial en el muro tanto en el primer piso (figura XCIV) como en el primer subterráneo (figura XCV).

En la Figura 112 se muestra este daño en el primer piso, primero desde una vista general (a) y luego desde una vista cercana (b), en la Figura 113 se muestra el daño del subterráneo de forma análoga, donde (a) es la vista general y (b) la vista cercana. Estos daños muestran fisuras de un gran espesor con desprendimiento de hormigón que permite observar el acero de refuerzo, este daño se considera nivel IV debido a que no se logra apreciar daño en el acero. Otra razón para que se generen estos importantes daños por flexo-compresión es debido a que los muros eran delgados y estaban confinados de una manera deficiente.



(a)



(b)



(c)

Figura 110: Daño eje 15 [21]

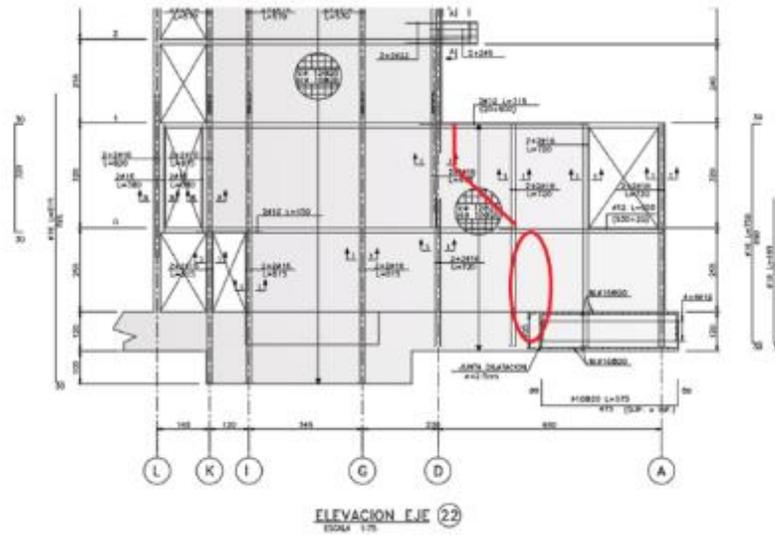


Figura 111: Daños en el eje 22 [21]



(a)



(b)

Figura 112: Daño eje 22 en el primer piso  
Fuente: (a) [21]; (b) fotos inspección en terreno



(a)



(b)

*Figura 113: Daño eje 22 en el subterráneo  
Fuente: Fotos inspección en terreno*

En el eje 19 en el primer piso se encuentran dos aberturas, una pequeña debido a razones arquitectónicas y una más grande para ubicar una entrada. Entre estas irregularidades verticales y que debido a la estructuración del edificio, el borde exterior es sometido a largas cargas de compresión y tracción, generado por el momento oscilante que genera los muros en pisos superiores. En la Figura 114 se muestra este daño, donde en (a) se muestra la ubicación de daño en la elevación del eje 19, en (b) se muestra la vista general del daño y en (c) una vista más cercana. Se puede apreciar que se desprende casi la totalidad del hormigón en la zona superior y que las barras de acero de refuerzo longitudinal se encuentran pandeadas, por lo cual es daño nivel V.



se considera que tiene un daño nivel IV, debido al desprendimiento que tiene en su base y se pueden observar claramente la armadura de acero, pero esta no se ve dañada.

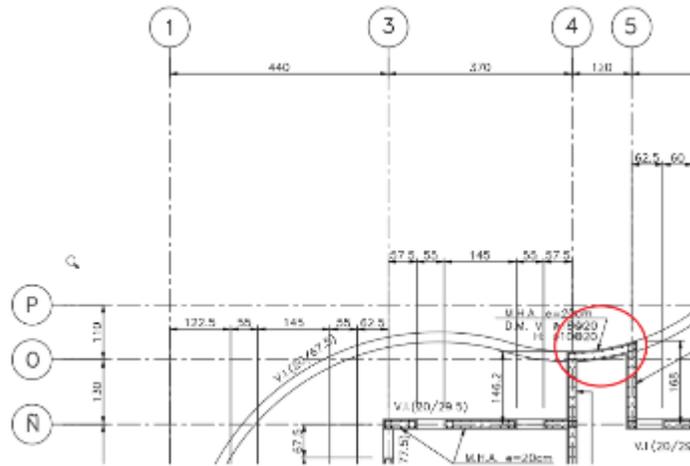


Figura 115: Ubicación muro dañado eje O.  
Fuente: Planos estructurales Torre Bosquemar



(a)



(b)

Figura 116: Muro dañado eje O [22]

En el interior de la estructura el daño se concentra en la dirección larga, en el eje L. En la Figura 117 se muestra un esquema de la elevación del eje L, donde están marcados con óvalos rojos los daños flexo-compresión en los elementos de borde y con líneas rojas las fisuras.

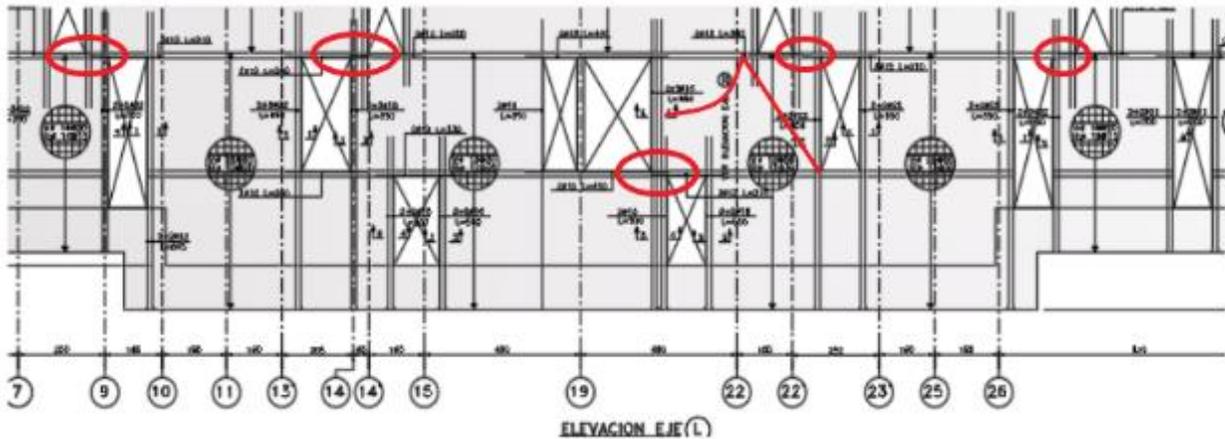
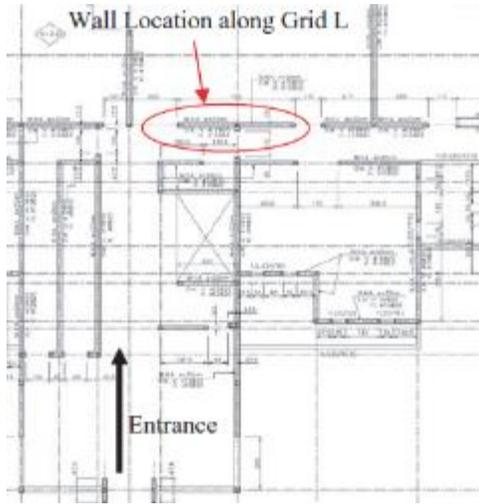


Figura 117: Ubicación daños en eje L [21]

En el primer piso el daño se encuentra cercano al eje 22. Las fisuras tienen un gran espesor mayor a dos milímetros y se vuelven horizontal en el final del muro, con desprendimiento del hormigón en los elementos de borde, además de pandeo y hasta fractura de ciertos refuerzos longitudinales. Estos daños se generan por las constantes discontinuidades presentes en el eje L, en combinación con un muro de bajo espesor y un confinamiento deficiente en los elementos de borde. En la Figura 118 se muestra: (a) la ubicación general de este muro; (b) vista general de las fisuras; (c) vista cercana de la fisura en el lado izquierdo; (d) vista cercana de la fisura en el lado derecho.

Adicionalmente se encuentran los daños marcados con círculo rojo en la Figura 117. Estos afectaron tanto el primer piso como el segundo. En las esquinas se observa desprendimiento de hormigón y pandeo de las barras de acero, esto debido a la compresión a la que son sometidos estos elementos, se muestran ejemplos de estos daños en la Figura 119, en (a) el daño en el lado izquierdo y en (b) el daño en el lado derecho.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 118: Daños eje L en el primer piso  
Fuente: (a) [22]; (b) y (c) [21]; (d) fotos inspección en terreno



(a)



(b)

Figura 119: Ejemplo de daños eje L en segundo piso [21]

En el resto del edificio el daño está concentrado principalmente en las losas, donde actúan como vigas de acople o viga dintel entre los ejes L y K. No se logra apreciar un diseño particular en la armadura de estas losas, donde normalmente se aprecian barras de acero con diámetro de 8mm y 20cm de espaciamiento. Los daños presentes se encuentran en la posición de las puertas debido al impacto que se tiene en la conexión y fisuras en diagonal entremedio las puertas y aberturas (Figura 120). Adicionalmente se encuentran daños paralelos a la dirección del pasillo, esto debido a su función como viga dintel en la dirección corta (Figura 121).

Finalmente se encuentran daños en el último piso de la estructura, donde se encuentra el gimnasio, se produce el fenómeno de muro bandera lo cual genera que se concentren los esfuerzos en una zona y produjo fisuras y gran desprendimiento del hormigón de recubrimiento, se puede observar claramente el acero de refuerzo, por lo cual se considera daño nivel IV. Se muestra en la Figura 122, donde (a) muestra una vista general y (b) una vista más cercana.



*Figura 120: Daño en losas debido a puertas o aberturas*



*Figura 121: Daño en losas de forma paralela al pasillo*



(a)



(b)

*Figura 122: Daños en el gimnasio*

#### 5.2.4. Resumen de daños y evaluación Torre Bosquemar

La mayor concentración de daños en el edificio se encuentra en el primer piso, en la Figura 123 se muestra la vista en planta con los muros dañados reconocidos en el primer piso, donde en color rojo se representan los muros dañados nivel V, en naranja los muros dañados nivel IV y en amarillo los daños nivel III.

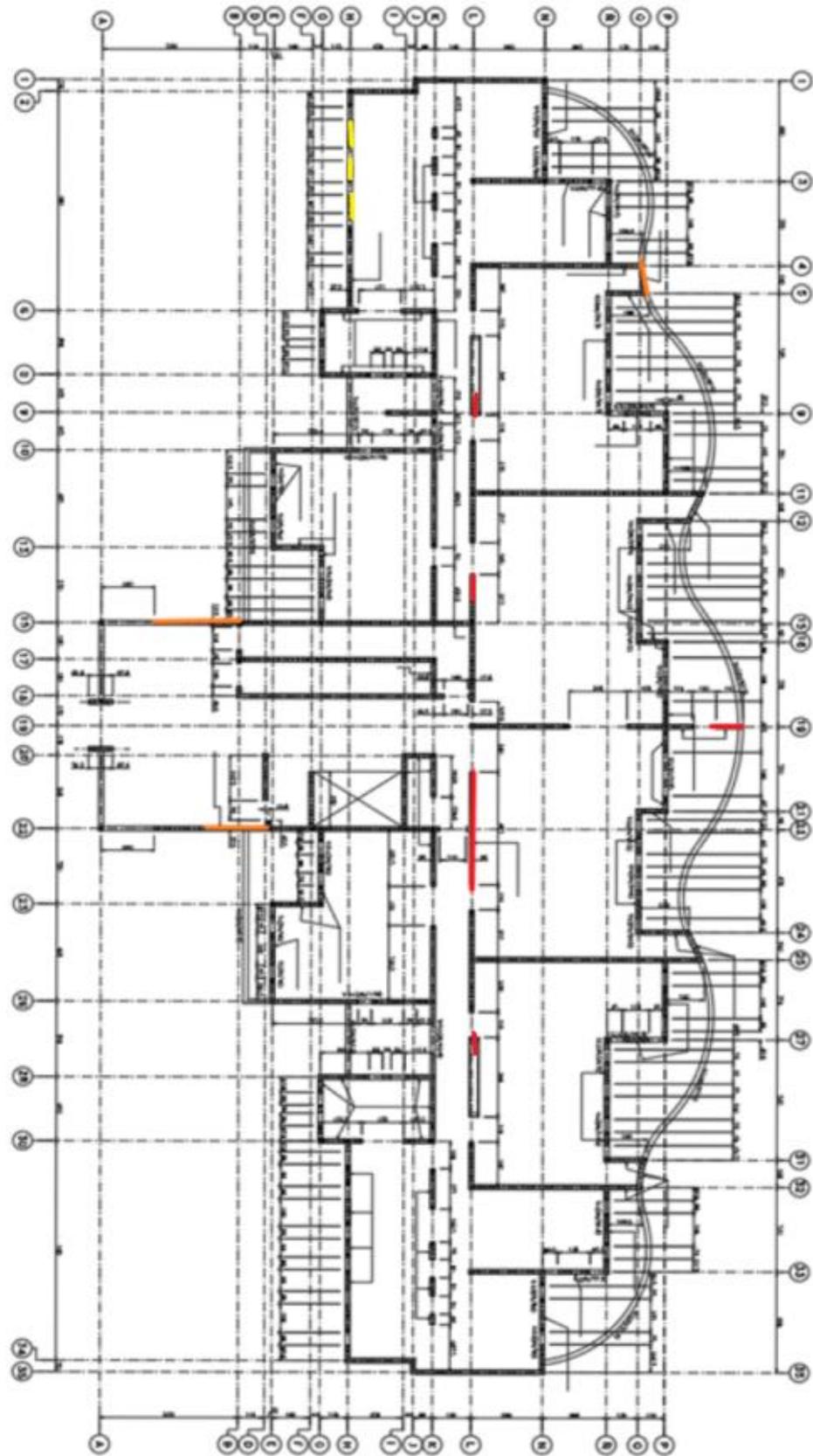


Figura 123: Plano en planta primer piso con muros dañados marcados

Para evaluar la habitabilidad con los dos métodos expuestos en el Capítulo 4 se mide el largo de los muros en la dirección larga y dirección corta, además se mide el largo de los muros dañados. En la Tabla 35 se muestra un resumen de daños en el primer piso, donde no se consideran los daños nivel II y daños nivel I. Luego en la Tabla 36 se muestra los resultados por el método de porcentajes y en la Tabla 37 se muestran los mismos aplicando la cuantía de daño.

Tabla 35: Resumen muros dañados primer piso

Dirección larga		Dirección corta	
Daño nivel III	3[m]	Daño nivel III	0
Daño nivel IV	1.38[m]	Daño nivel IV	5.36[m]
Daño nivel V	6.43[m]	Daño nivel V	1.1[m]
Largo total muros	125[m]	Largo total muros	108[m]

Tabla 36: Resultado porcentaje de daños

Dirección larga		Dirección corta	
%Daño I	0	%Daño I	0
%Daño II	0	%Daño II	0
%Daño III	2.4	%Daño III	0
%Daño IV	1.1	%Daño IV	4.92
%Daño V	5.14	%Daño V	1.1

Tabla 37: Resultados método de cuantía de daño

Dirección larga				Dirección corta			
A = 125				A = 108			
B1	0	D1	0	B1	0	D1	0
B2	0	D2	0	B2	0	D2	0
B3	3	D3	1.44	B3	0	D3	0
B4	1.38	D4	1.1	B4	5.36	D4	4.92
B5	6.43	D5	10.28	B5	1.1	D5	2.02
$\sum D_i = 12.832$				$\sum D_i = 6.94$			

Se puede apreciar que los resultados en la dirección larga tienen mayor valor, por lo cual este es el caso más desfavorable. En la Tabla 38 se muestran los resultados multiplicados por los factores de modificación (F.M.) de regularidad para obtener así la habitabilidad definitiva con este método.

Finalmente se obtiene que el edificio es No Habitable utilizando los dos métodos, los dos indican que se debe seguir el mismo procedimiento, evacuar el edificio y que este pase a una inspección más detallada y se evalúe la reparación de éste.

Tabla 38: Clasificación habitabilidad edificio Torre Bosquemar

Método	Valor	F.M. regularidad en planta	F.M. regularidad vertical	Valor final	Habitabilidad
Porcentajes	5.14%	1.2	1.72	10.61%	No Habitable
Cuantía de daño	12.83	1.2	1.72	26.48	No Habitable

## 6. Conclusiones y Comentarios

Este trabajo de título tiene como objetivo crear una metodología de inspección para edificios después de un sismo y clasificarlos en una categoría de habitabilidad. Para cumplir este objetivo en primer lugar se estudiaron metodologías similares de la bibliografía internacional, donde sí están estandarizados los procesos de inspección.

Para realizar la propuesta de metodología de inspección se toman elementos principalmente de cuatro documentos.

- Norma para la Evaluación del Nivel de Daño por Sismo en Estructuras y Guía Técnica, Ministerio de Construcción de Japón, 2001
- Guía Técnica para Inspección Después de un Sismo, AIS- FOPAE- Colombia
- FEMA P154, U.S. Department of Homeland Security.
- Ficha de Evaluación de Daños para Inspección Rápida de edificios Públicos – MOP, Chile, 2015

Se escogen estos documentos porque se determina que estos son los más efectivos para cumplir los objetivos propuestos y son adaptables a la realidad chilena. La norma japonesa y la colombiana definen de una manera precisa los distintos niveles de daño y la clasificación del edificio. Se busca combinar los dos documentos y complementarlos a modo de que sean más útiles para el trabajo de título.

El documento FEMA P154 es un documento que evalúa el riesgo sísmico de una estructura y se utilizó para proponer como evaluar las condiciones preexistentes en una edificación, específicamente las irregulares de planta y verticales en ésta. La ficha de evaluación de daños chilena es el documento actual que se utiliza para la inspección rápida de edificios y se busca complementarla, tomando en cuenta condiciones preexistentes y en una clasificación de los edificios distinta a la que estaba propuesta en ese documento.

Para ejemplificar la metodología de inspección se analizan dos edificios que fueron dañados en el Terremoto del Maule 2010, el Edificio Antígona y edificio Torre Bosquemar. El primero tiene una estructuración típica del edificio chileno y el segundo tiene una forma más peculiar. Ambos edificios fueron evacuados después del sismo y, luego de distintos estudios y trabajos, fueron reparados. Gracias a que los edificios tienen una arquitectura distinta, se pudo apreciar cómo se comporta la metodología de inspección para edificaciones con leves irregularidades (Edificio Antígona) o para uno con grandes irregularidades (Edificio Torre Bosquemar).

La metodología de inspección entregó resultados satisfactorios en los edificios analizados, donde los dos obtienen la categoría de “No Habitable”, lo cual tiene sentido con lo que se determinó en su momento con estos dos.

Uno de los beneficios principales que tiene estandarizar la inspección de edificios después de un sismo es que permite ayudar a los ingenieros estructurales, en especial a los que no tienen muchos años de experiencia, a evaluar un edificio y brindarles un protocolo a seguir, que usualmente está dado por las distintas empresas consultoras. Además se tiene como objetivo estandarizar los resultados que obtenidos.

Se espera con este trabajo que se tenga una mayor cantidad de profesionales capacitados para realizar la inspección en primera instancia después de un sismo, la cual está enfocada en la seguridad de las personas y prevenir accidentes. Esto podría ser de gran utilidad en el caso de que haya un terremoto de gran magnitud y afecte a una vasta zona de edificaciones y sea necesario inspeccionarlos de forma rápida y determinar su habitabilidad para la seguridad de sus habitantes.

Como trabajo a futuro de este trabajo de título se propone calibrar los valores utilizados para la clasificación de habitabilidad de los edificios y los factores de modificación por condiciones preexistentes mediante experimentación y trabajos de métodos numéricos. Los valores utilizados actualmente son valores tomados de otros documentos y modificados levemente para que coincidan mejor con el contexto chileno. Se plantea calibrar estos valores para poder utilizarlos de una manera más precisa en el edificio chileno. Estos estudios no fueron realizados porque no estaban dentro del alcance del trabajo debido al tiempo que demandarían. Otro trabajo a futuro es aumentar la validez de esta metodología probándola en una gran cantidad de edificios dañados después de un sismo, en este trabajo solo se realizó este proceso debido a que el enfoque del trabajo era crear la metodología y agregar una mayor cantidad de ejemplos aumentaría la extensión del trabajo más de lo deseado.

Una vez realizado el trabajo a futuro indicado, se espera generar una aplicación computacional que resuma el proceso de inspección, para así poder entregar la información de manera más ordenada y que los cálculos sean de una forma más automatizada.

## Bibliografía

- [1] S. Ruiz, «[dgf.uchile.cl](http://dgf.uchile.cl),» Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, 13 marzo 2018. [En línea].
- [2] O. C. y. A. B. M.I. Carreño, «Evaluación de la habitabilidad de edificios afectados por sismo utilizando la teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales,» *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 2011.
- [3] F. R. J. M.-R. R. J. C. F. M. R. M. H. H. S. M. R. C. Juan Carlos de la Llera, *Data collection after the 2010 Maule earthquake in Chile*, Santiago Chile: Crossmark, 2016.
- [4] F. P-154., *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazard: A Handbook*, 2015.
- [5] Z. C. G. Mancipe, *EVALUACIÓN DE DAÑO ESTRUCTURAL POST-SISMO EN EDIFICACIONES: ESTADO DEL ARTE*, Bogota: ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO, 2015.
- [6] J. Calavera, *Patología de Estructuras de Hormigon Armado y Pretensado*, INTEMAC, 1996.
- [7] R. M. Torres, *Guía Técnica para Inspección de Edificaciones después de un Sismo*, San Jose de Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander. Facultad de Ingenierías, 2013.
- [8] M. d. C. d. Japón, *NORMA PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO POR SISMO EN ESTRUCTURAS Y GUÍA TÉCNICA DE REHABILITACIÓN*, Tokio, 2001.
- [9] T. Manuel, «[www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/4\\_es\\_fuerzos.html](http://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947489/contido/4_es_fuerzos.html),» Xunta de Galicia: Conselleria de cultura, educación e ordenación universitaria. , 2014. [En línea].
- [10] F. Rojas y L. Massone, «Comportamiento de edificios de hormigón armado,» Universidad de Chile.
- [11] D. Q. y. W. S. Ángel San Bartolomé, «Comentarios relativos al tipo de falla en los muros de concreto de edificios chilenos en el sismo del 27 de febrero de 2010,» *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, vol. 3, nº 1, 2011.
- [12] E. G. MEJÍA, *EVALUACIÓN DE DAÑOS TÍPICOS DE EDIFICACIONES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR ANTE LOS SISMOS OCURRIDOS EN 1986 Y 2001*, UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, 2003.
- [13] I. N. D. N. -. I.-. CHILE, *NCh 433of1996 DS61-2011: Diseño Sísmico de edificios*, Santiago, 2011.

- [14 T. N. K. M. M. M. Maeda, «Revision of Guideline for Post-Earthquake Damage Evaluation of Reinforced Concrete Buildings in Japan,» de *16th World Conference on Earthquake, 16WCEE* , Santiago Chile, 2017.
- [15 A. C. d. I. S.-. AIS, *Guía Técnica para Inspección de Edificaciones Después de un Sismo*, Bogota, 2002.
- [16 C. Ministerio de Obras Publicas, «FICHA DE EVALUACIÓN DE DAÑOS PARA INSEPCCIÓN RÁPIDA DE EDIFICIOS PÚBLICOS,» Gobierno de Chile, 2015.
- [17 R. Ingeniería y R. Concha, «Rehabilitación Estructural Edificio Antígona,» 2011.
- [18 G. Leiva Henríquez, M. Bravo Fortune, F. Matus Mardones y J. Riquelme Maggini, «Estudio Diagnostico Estructural Edificio Antígona,» Universidad Técnica Federico Santa María.
- [19 B. J. Suquillo Ronquillo, «VALIDACIÓN DE LOS LÍMITES PARA DISTINTOS NIVELES DE DESEMPEÑO EN EDIFICIOS CON MUROS DE HORMIGÓN ARMADO,» Universidad de Chile, 2017.
- [20 J. Leal, «MEMORIA DE CÁLCULO EDIFICIO INMOBILIARIO "BOSQUEMAR TORRE 20 PISOS",» TENSAR INGENIEROS, Concepción, 2006.
- [21 F. Rojas y J. Anderson , «Evaluation of the Damage Observed in a Reinforced Concrete Wall Building During the February 27, 2010 Chile Earthquake,» 2011.
- [22 N. Youssef, D. Tunick, F. Naeim, M. Lew, L. Carpenter, F. Rojas, R. Saragoni y M. Schachter, «Perfomance of the Torre Bosquemar and Olas buildings in San Pedro de la Paz and the Pedro de Valdivia Building in Concepción in the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake,» 2010.

## **Anexo A – Manual de inspección después de un sismo**

En este anexo se presenta un manual de inspección después de un sismo, el cual resume la metodología de inspección propuesta. Este manual es para ayudar a los ingenieros civiles a realizar y estandarizar este trabajo.

Para los procedimientos de evaluación se recomienda contar con los siguientes elementos:

- Planos de la zona a inspeccionar
- Libreta de notas, lápiz o bolígrafo
- Linterna
- Cámara fotográfica
- Cinta métrica o flexómetro
- Nivel, destornillador o cincel ligero
- EPP exigidos por ley

A continuación se presentan los pasos a seguir para realizar la inspección, además se adjuntan planillas que permiten ordenar los resultados de cada edificio. Se espera que el profesional realice una inspección rápida en el edificio en terreno y luego, utilizando planos, concluir la habitabilidad final de la estructura.

### Chequeo general a la zona donde está ubicado el edificio

Se realiza un chequeo general a la zona donde se encuentra la edificación. El objetivo es buscar posibles problemas de terreno y además verificar si las estructuras aledañas presentan o no daños a simple vista, así poder saber si existió daño local o daño global. Realizar este proceso permite formar una idea del comportamiento del sismo

### Inspección visual al edificio desde el exterior

Se procede a inspeccionar la edificación desde el exterior. Evaluando mediante un chequeo visual sus condiciones preexistentes, que son estudiadas con mayor detalle utilizando planos y evaluar la regularidad de la estructura. Adicionalmente se observa el estado general de la edificación para determinar si es seguro su acceso o no. Dándole énfasis a las entradas del edificio y si hay posibilidad de que elementos estructurales y no estructurales generen accidentes.

### Clasificación de daños en elementos estructurales

Una vez determinado que es seguro movilizarse, se analizan los elementos estructurales catalogándolos en uno de los cinco niveles de daño, mostrados en la Tabla 39. Idealmente este

proceso se realiza en todo el edificio para tener una idea de que piso es el más dañado y así poder determinar la habitabilidad en este.

Tabla 39: Niveles de daño en elementos estructurales

Nivel de Daño	Descripción
I	Elemento estructural sin daño o con agrietamiento muy pequeño, cuesta distinguirlo a simple vista. Existen fisuras pequeñas con un ancho menor a 0.2mm
II	Se pueden observar fisuras de un grosor entre 0.2mm y 1mm en el elemento estructural
III	Se encuentran algunas fisuras grandes de espesor 1 a 2mm, además existe desprendimiento de una parte del hormigón
IV	Se observan fisuras con un espesor mayor a 2mm y se logra observar desprendimiento severo del hormigón y exposición del acero de refuerzo
V	Además de ver el acero, ahora se puede apreciar su pandeo y deformación del elemento estructural. Es común observar fenómenos de asentamiento y/desplomo. En algunos casos puede existir fractura.

### Evaluación habitabilidad

Se evalúa la habitabilidad del edificio, para realizar esto se deben evaluar los posibles pisos más dañados mediante los dos métodos expuestos en el Capítulo 4, sección 4.1, mediante su porcentaje de daño y su cuantía de daño. La clasificación de habitabilidad queda en una de las cuatro categorías para los dos métodos y se toma el caso más desfavorable.

El edificio puede ser habitable (verde), uso restringido (amarillo), no habitable (naranja), riesgo colapso (rojo) y se muestran las clasificaciones en la Tabla 40 con el método de porcentaje de daños y Tabla 41 con el método de cuantía de daño. Para esta última, se calculan los valores de  $D$  con la Tabla 42, donde  $A$  es el largo total de muros en la dirección que se está calculando,  $B_i$  el largo de muros dañados para cada nivel de daño  $i$  en la dirección indicada y  $D_i$  corresponde a la cuantía de daño que aporte cada nivel de daño, luego se suman los valores  $D_i$ .

Tabla 40: Habitabilidad para el método de porcentajes de daño

Porcentaje nivel de daño	Niveles de daño (%)				
	I	II	III	IV	V
0	Green	Green	Green	Green	Green
]0-5]	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow
]5-10]	Green	Green	Yellow	Yellow	Orange
]10-15]	Green	Green	Yellow	Orange	Orange
]15-20]	Green	Green	Yellow	Orange	Red
]20-25]	Green	Green	Yellow	Orange	Red
]25-30]	Green	Green	Yellow	Orange	Red
]30-35]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]35-40]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]40-45]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]45-50]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]50-55]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]55-60]	Green	Yellow	Orange	Red	Red
]60-65]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]65-70]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]70-75]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]75-80]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]80-85]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]85-90]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]90-95]	Green	Yellow	Red	Red	Red
]95-100]	Green	Yellow	Red	Red	Red

Tabla 41: Habitabilidad para el método de cuantía de daño

Habitabilidad	Valor D
Habitable	$D \leq 5$
Acceso restringido	$5 < D \leq 15$
No habitable	$15 < D \leq 50$
Peligro Colapso	$D > 50$

Tabla 42: Ecuaciones para el cálculo del valor D de cuantía de daño

$D_i$	Valores $D_i$	Formula
$D_1$	$4B_1/A$	Para $B_1/A \leq 0.5$
	2	Para $B_1/A > 0.5$
$D_2$	$20B_2/A$	Para $B_2/A \leq 0.5$
	10	Para $B_2/A > 0.5$
$D_3$	$60B_3/A$	Para $B_3/A \leq 0.5$
	30	Para $B_3/A > 0.5$
$D_4$	$100B_4/A$	Para $B_4/A \leq 0.5$
	50	Para $B_4/A > 0.5$
$D_5$	$1000B_5/5A$	Para $B_5/A \leq 0.25$
	50	Para $B_5/A > 0.25$

### Aplicación de factor de modificación

A la clasificación de habitabilidad mediante el método de porcentajes se le aplica el factor de modificación dado por su regularidad de planta y regularidad vertical. Este se explica en detalle en la sección 4.2 del Capítulo 4. Una vez aplicado el factor de modificación se tiene la clasificación de habitabilidad final.

En la Tabla 43 y la Tabla 44 se muestra la determinación del factor de regularidad vertical y regularidad en planta, respectivamente. En el caso de regularidad vertical la evaluación puede ser más de una vez mala, en caso de considerarse que se tiene dos o más irregularidades severas, el factor de modificación se multiplicará.

Tabla 43: Factor de regularidad vertical

Clasificación	Descripción	Factor de modificación
Buena	No presenta irregularidades	1.0
Intermedia	Entre la clasificación buena y mala	1.1
Mala	Presenta al menos una irregularidad severa o dos irregularidades moderadas.	1.2

Tabla 44: Factor de regularidad en planta

Clasificación	Descripción	Factor de modificación
Buena	La distribución de masas con relación a los dos ejes ortogonales es aproximadamente simétrica en planta, así como muros y otros elementos estructurales.	1.0
Intermedia	Entre la clasificación buena y mala	1.1
Mala	En planta presenta de forma notoria al menos una de las condiciones de irregular descrita: torsión, sistemas no paralelos, retroceso excesivo de las esquinas, diafragma abierto.	1.2

### Rellenar fichas de inspección

Se recomiendan planillas para realizar la inspección de una manera más ordenada y estandarizada. Se dividen en cinco planillas, la primera (Tabla 45) es un resumen del estado del edificio y datos del inspector, la segunda (Tabla 46) inspección desde el exterior y datos edificio, la tercera (Tabla 47) trata sobre el análisis detallado de los elementos estructurales y su evaluación, clasificando el edificio según sus daños, sin agregar los factores de modificación por regularidad estructural. En la Tabla 48 se presenta la cuarta planilla que agrega los factores de modificación de regularidad estructural, para así tener una clasificación final de habitabilidad. La última planilla (Tabla 49) es sobre datos de elementos no estructurales que puedan presentar riesgo.

Tabla 45: Planilla resumen edificio y datos del inspector

Nombre edificio	
Dirección	
Habitabilidad de la estructura	<input type="checkbox"/> Habitable
	<input type="checkbox"/> Uso restringido
	<input type="checkbox"/> No habitable
	<input type="checkbox"/> Riesgo colapso
Inspector	Nombre:
	Apellido Paterno:
	Apellido Materno:
	Lugar de trabajo:
	Cargo:
	Número:
	Correo:
Fecha	Hora:
	Día:
	Mes:
	Año:
Número inspecciones realizadas:	

Tabla 46: Planilla inspección exterior del edificio

Nombre del edificio				
Dirección				
Dueño o usuario	Nombre			
	Teléfono			
	Dirección			
Dimensiones	Pisos			
	Subterráneo			
	Superficie planta aproximada __ (m) x __ (m)			
Zona Sísmica	<input type="checkbox"/> I	<input type="checkbox"/> II	<input type="checkbox"/> III	
Tipo de suelo	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> E <input type="checkbox"/> F	
Configuración suelo Terreno	<input type="checkbox"/> Plano	<input type="checkbox"/> Altiplano	<input type="checkbox"/> Inclinado	<input type="checkbox"/> hondonada
Asentamiento del edificio por fallas subsuelo	<input type="checkbox"/> < 0.2m	<input type="checkbox"/> 0.2-1m	<input type="checkbox"/> >1m	
Inclinación debido a asentamientos diferenciales	<input type="checkbox"/> < 1°	<input type="checkbox"/> 1°-2°	<input type="checkbox"/> >2°	
Desprendimiento y caída de objetos	No Presenta	Se observan algunos casos	Se observan muchos casos	
¿Es seguro entrar al edificio?	<input type="checkbox"/> SI		<input type="checkbox"/> NO	

Tabla 47: Planilla inspección y clasificación de daños y habitabilidad en el edificio

Aspecto de inspección o investigación	Método de inspección e investigación	Habitable	Uso Restringido	No Habitable	Peligro Colapso	
Falla en muros estructurales % investigados= ___%	Longitud total de muros con nivel de daño II	<input type="checkbox"/> < 30%	<input type="checkbox"/> > 30%	No aplica	No aplica	
	Longitud total de muros con nivel de daño III	<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> < 30%	<input type="checkbox"/> 30-60%	<input type="checkbox"/> > 60%	
	Longitud total de muros con nivel de daño IV	<input type="checkbox"/> sin daños	<input type="checkbox"/> < 10 %	<input type="checkbox"/> 10-30%	<input type="checkbox"/> >30%	
	Longitud total de muros con nivel de daño V	<input type="checkbox"/> Sin daños	<input type="checkbox"/> < 5%	<input type="checkbox"/> 5-10%	<input type="checkbox"/> > 10%	
Clasificación por cuantía de daño	B1 = B2 = B3 = B4 = B5 =	D1 = D2 = D3 = D4 = D5 = $\sum D_i =$	<input type="checkbox"/> $D \leq 5$	<input type="checkbox"/> $5 < D \leq 15$	<input type="checkbox"/> $15 < D \leq 50$	<input type="checkbox"/> $D > 50$

Tabla 48: Habitabilidad incluyendo los factores de modificación por regularidad estructural

Método de clasificación	Valor	F.M. Regularidad en planta	F.M. Regularidad vertical	Valor modificado	Clasificación habitabilidad
Porcentaje de daño					<input type="checkbox"/> Habitable <input type="checkbox"/> Acceso Restringido <input type="checkbox"/> No Habitable <input type="checkbox"/> Riesgo Colapso
Cuantía de daño					<input type="checkbox"/> Habitable <input type="checkbox"/> Acceso Restringido <input type="checkbox"/> No Habitable <input type="checkbox"/> Riesgo Colapso

Tabla 49: Planilla riesgos presentes en elementos no estructurales

Peligro y riesgo de volcamiento y caída de objetos	<input type="checkbox"/> Acabado de techos	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
	<input type="checkbox"/> Escaleras interiores	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
	<input type="checkbox"/> Muros divisorios	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
	<input type="checkbox"/> Otros 1 (_____)	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
	<input type="checkbox"/> Otros 1 (_____)	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
Instalaciones	<input type="checkbox"/> Eléctricas	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
	<input type="checkbox"/> Suministro de agua	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
	<input type="checkbox"/> Gas	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro
	<input type="checkbox"/> Servicio sanitario	<input type="checkbox"/> Sin peligro	<input type="checkbox"/> Incierto	<input type="checkbox"/> Existe peligro

## Anexo B – Planos Edificio Antígona

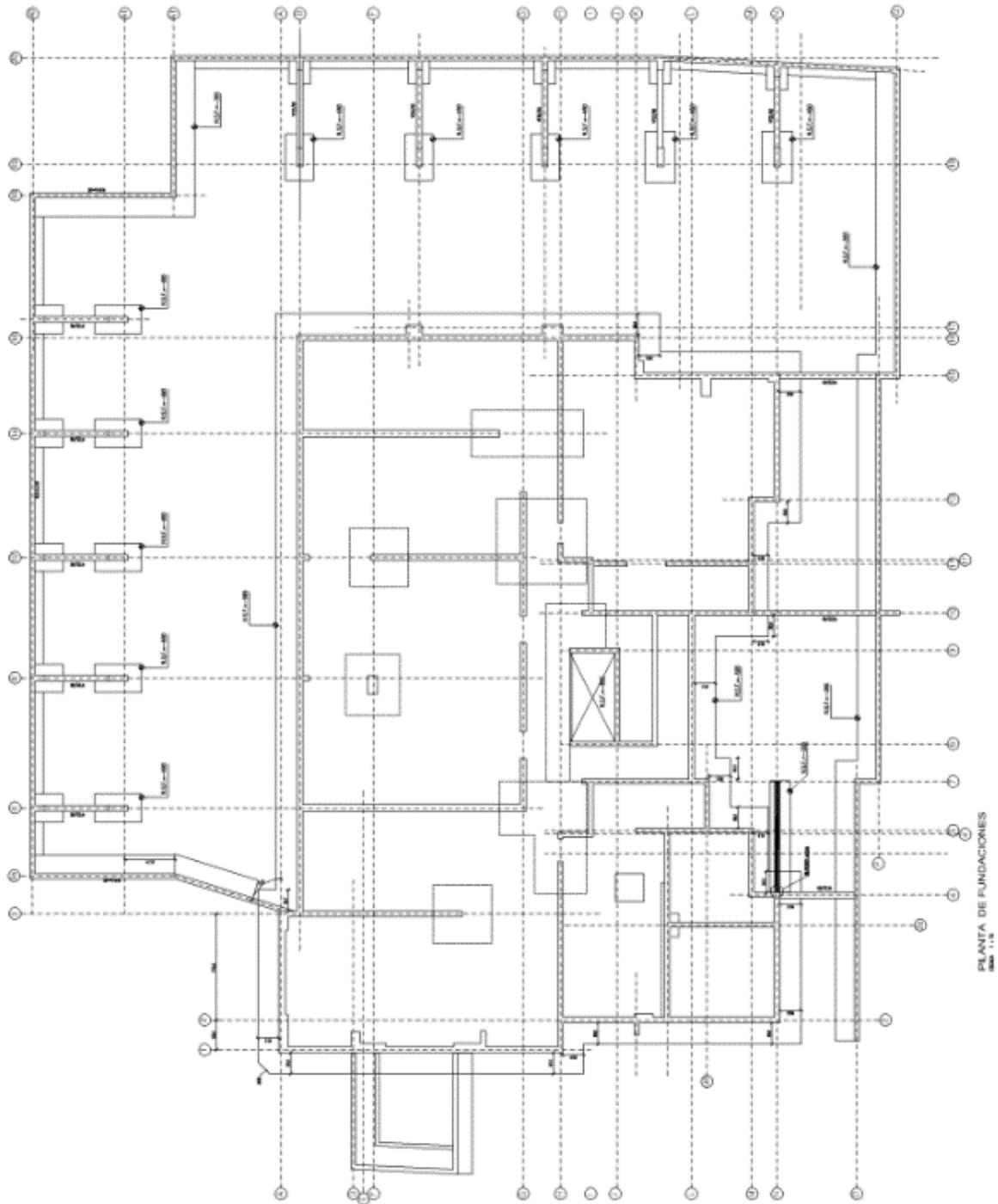


Figura 124: Planta fundaciones

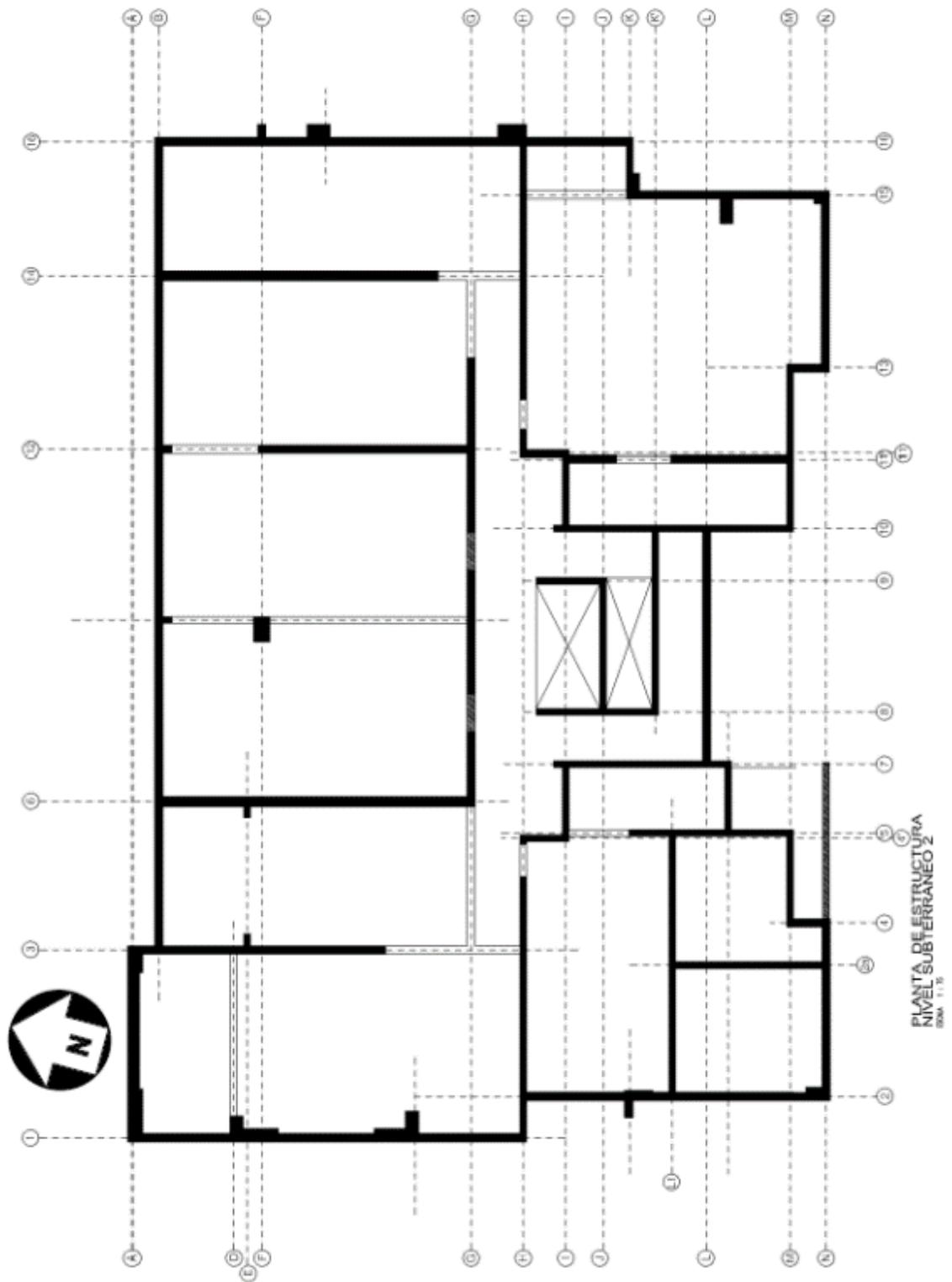


Figura 125: Planta subterráneo 2

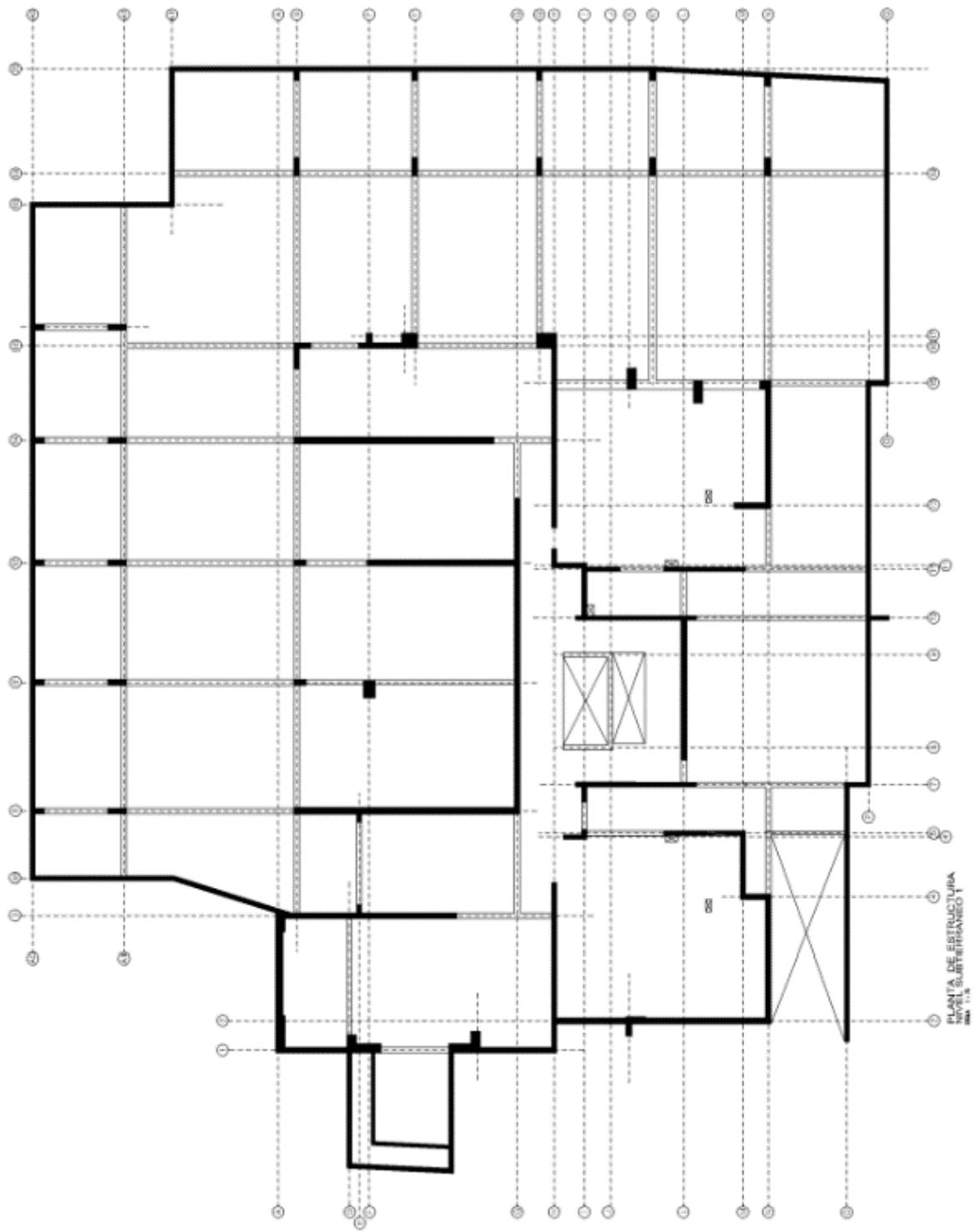


Figura 126: Planta subterráneo 1

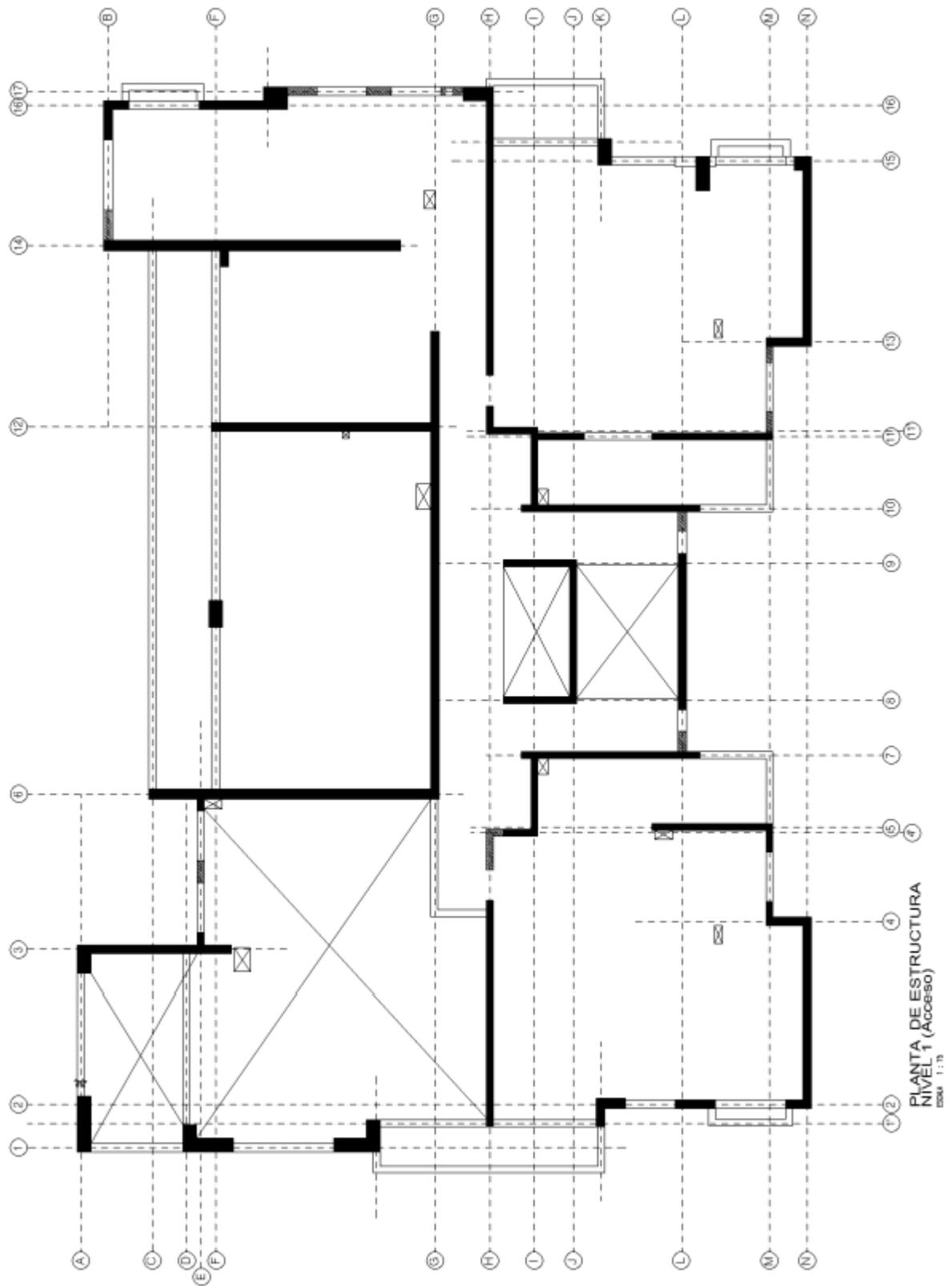


Figura 127: Planta estructura 1° piso

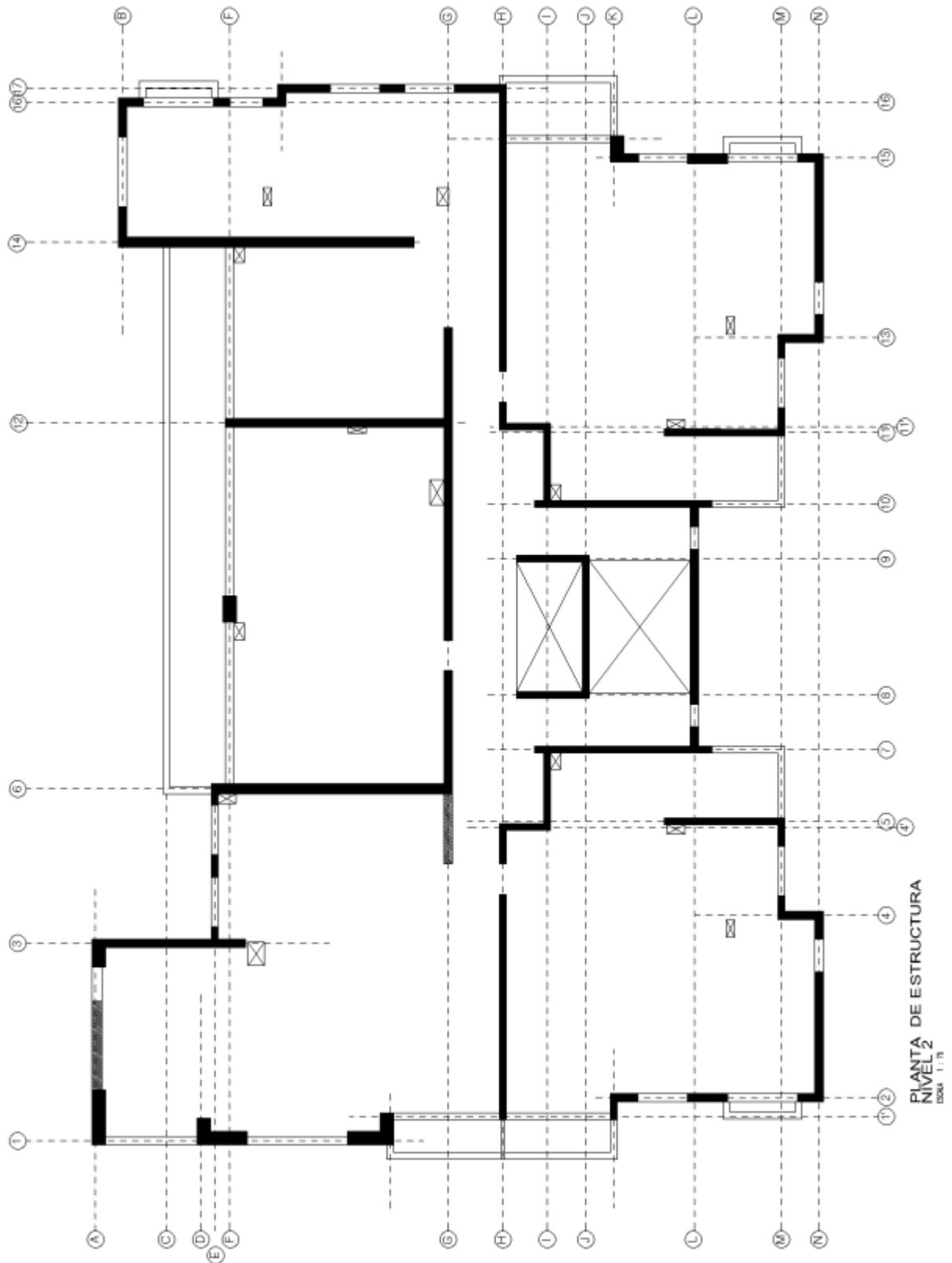
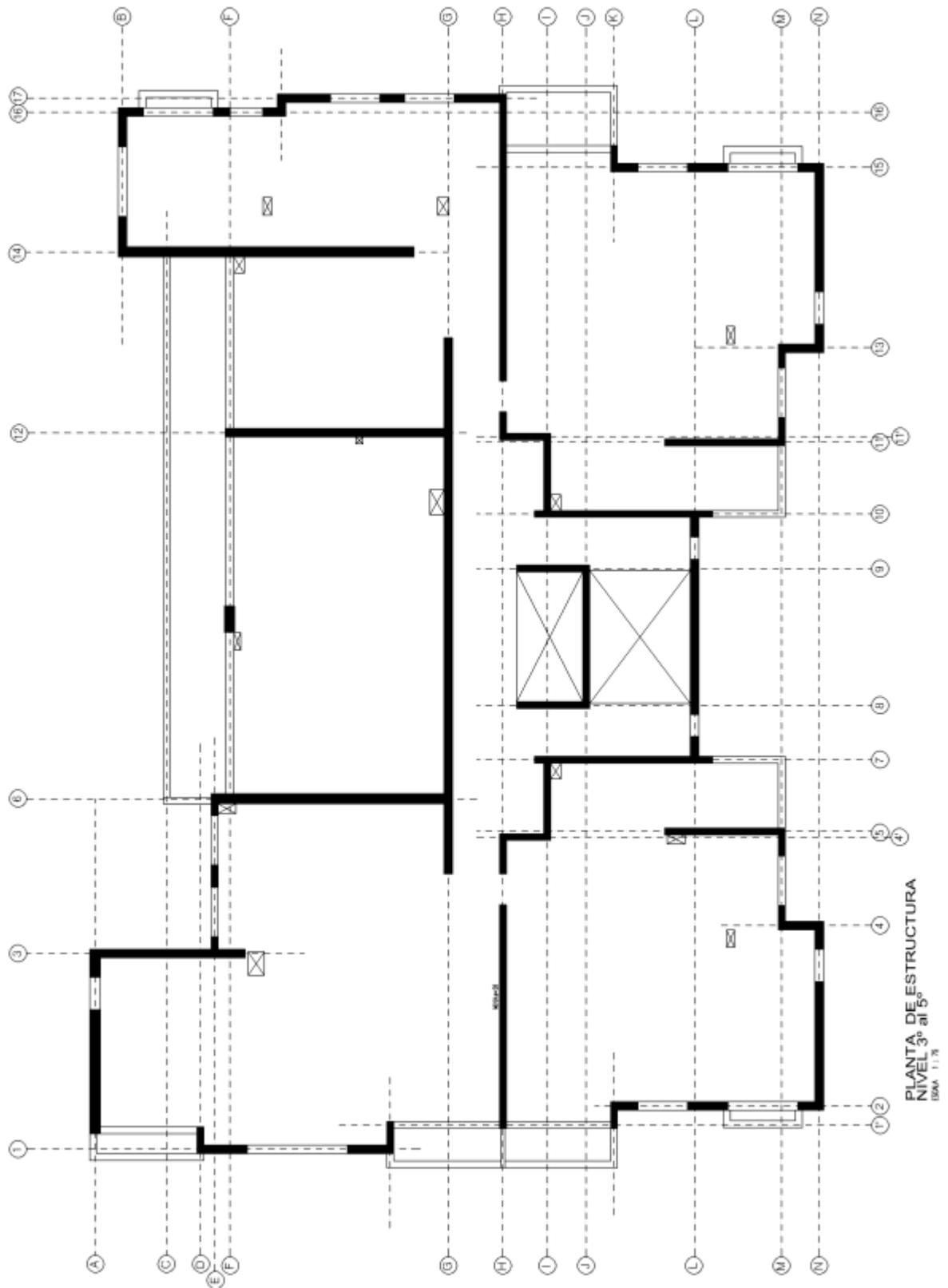


Figura 128: Planta estructura 2° piso



PLANTA DE ESTRUCTURA  
 NIVEL 3º al 5º piso  
 ESCALA 1:1/2

Figura 129: Planta estructura 3° al 5° piso

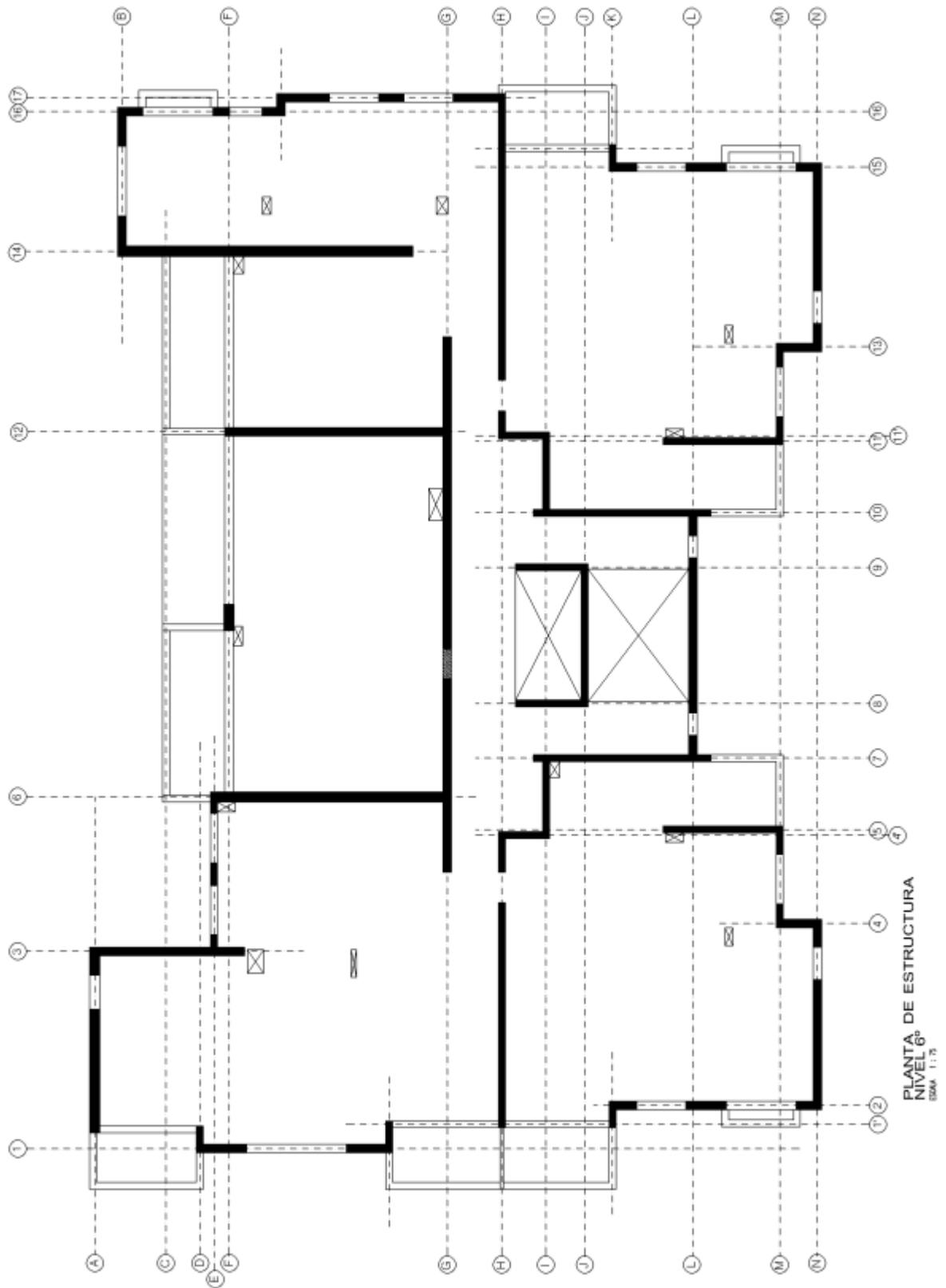


Figura 130: Planta estructura 6° piso

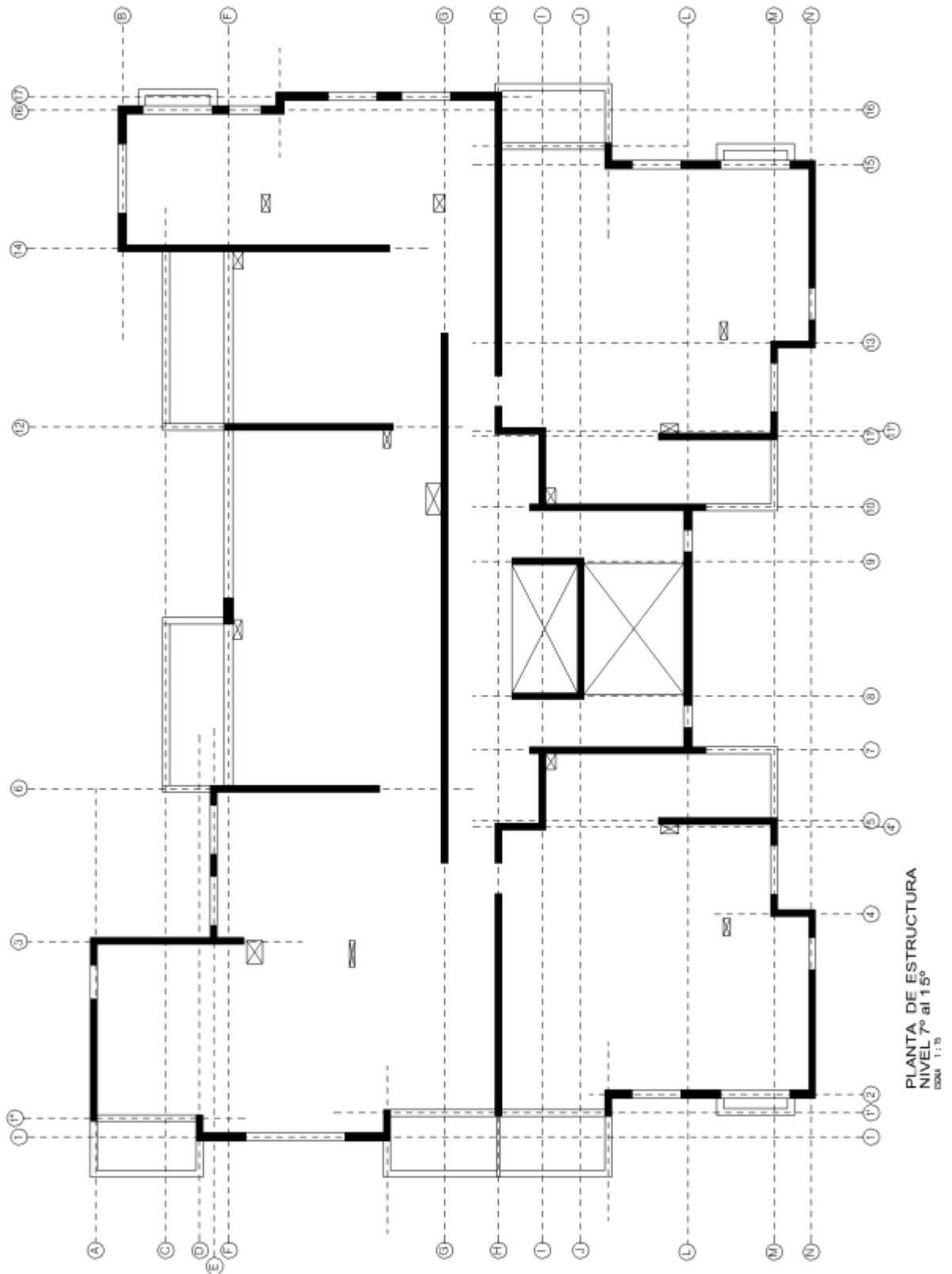


Figura 131: Planta estructura 7° al 15° piso

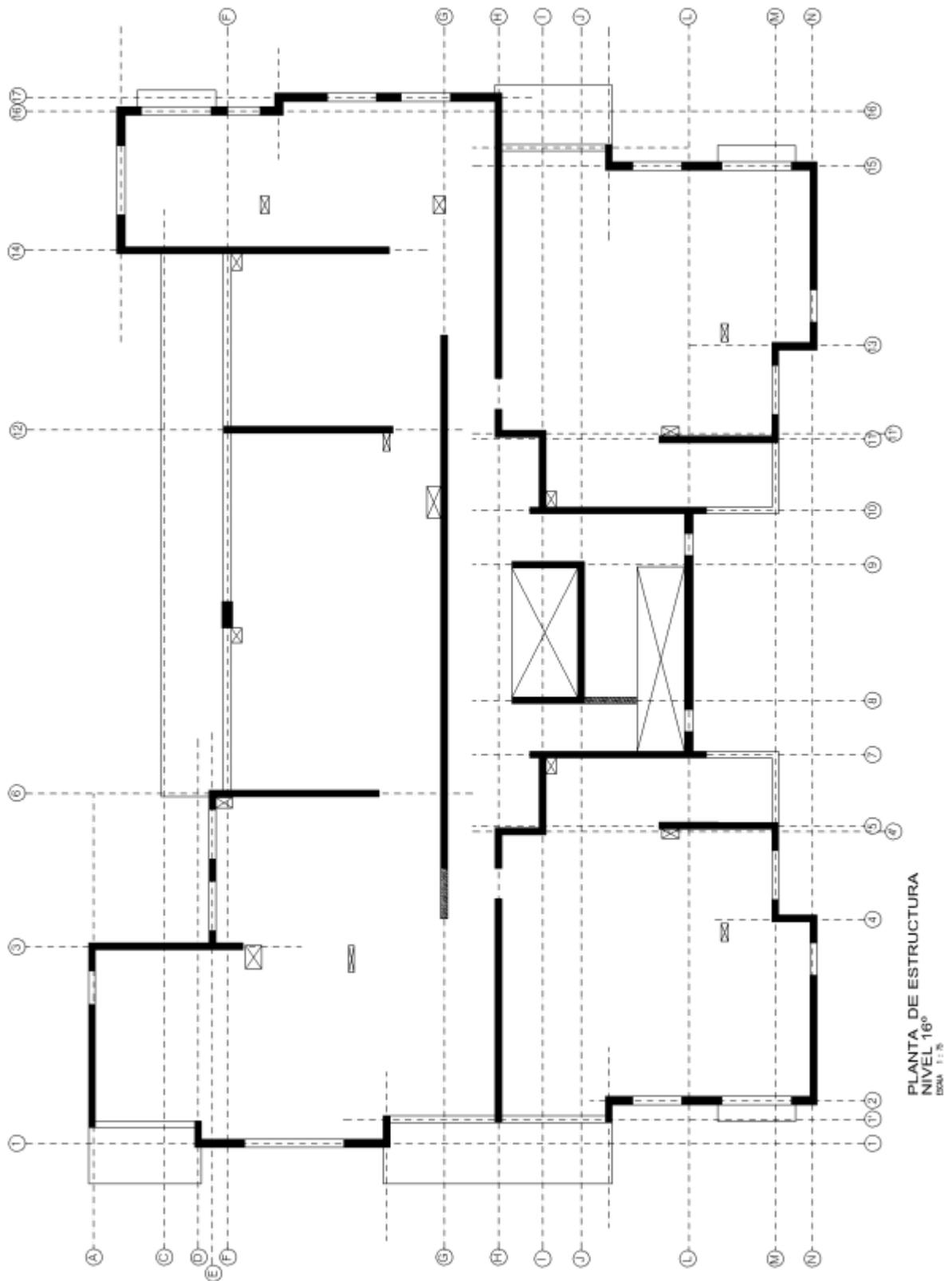


Figura 132: Planta estructura 16° piso

## Anexo C – Planos Torre Bosquemar

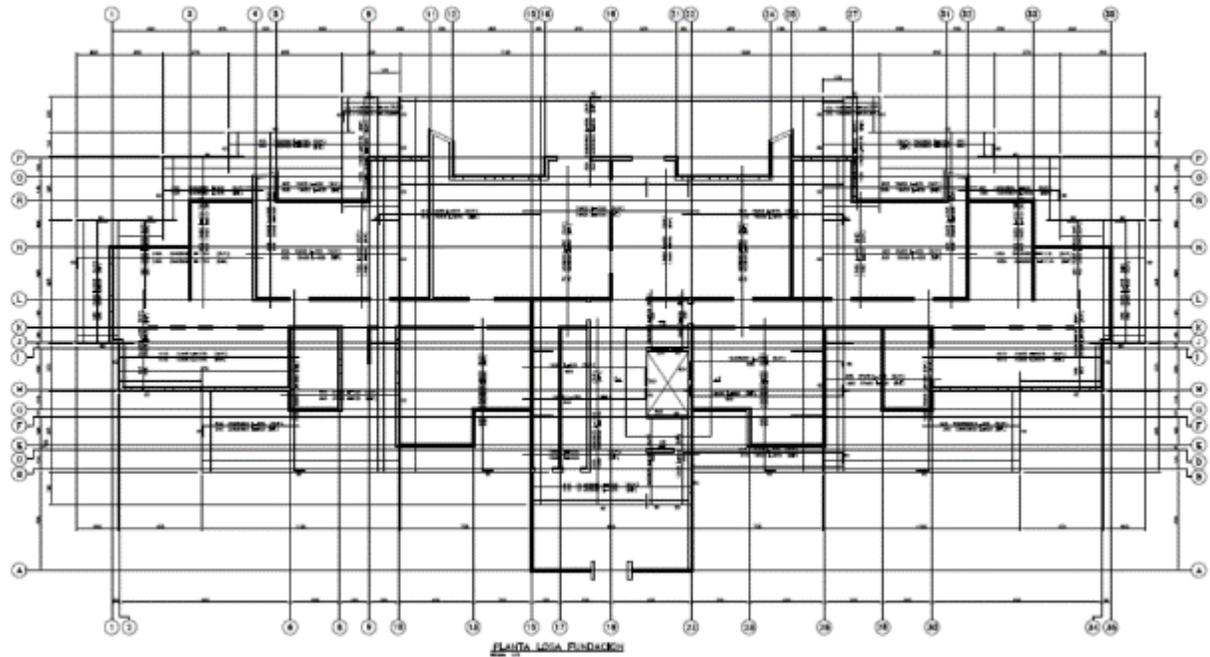


Figura 133: Planta losa fundaciones

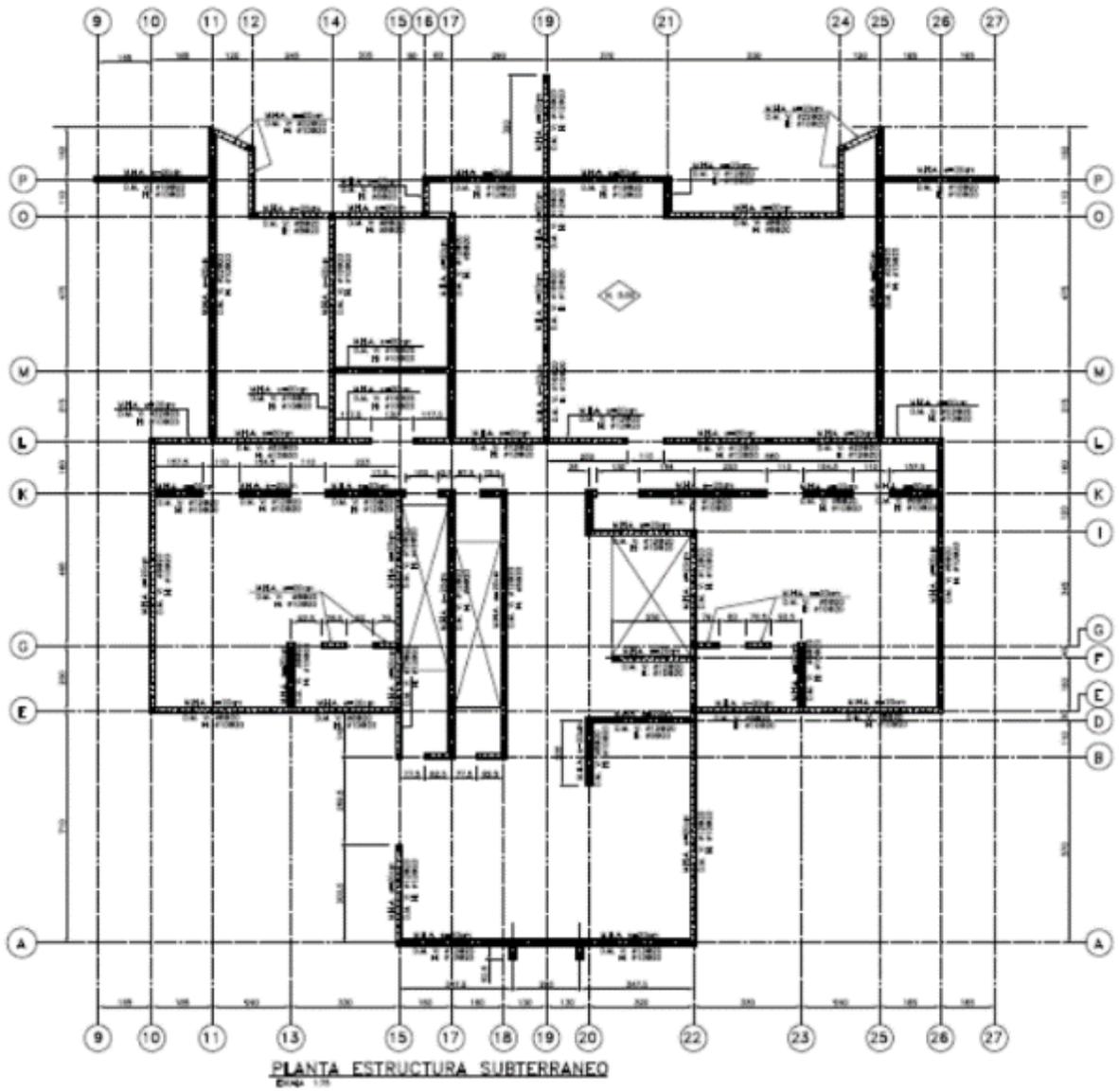


Figura 134: Planta estructura subterráneo

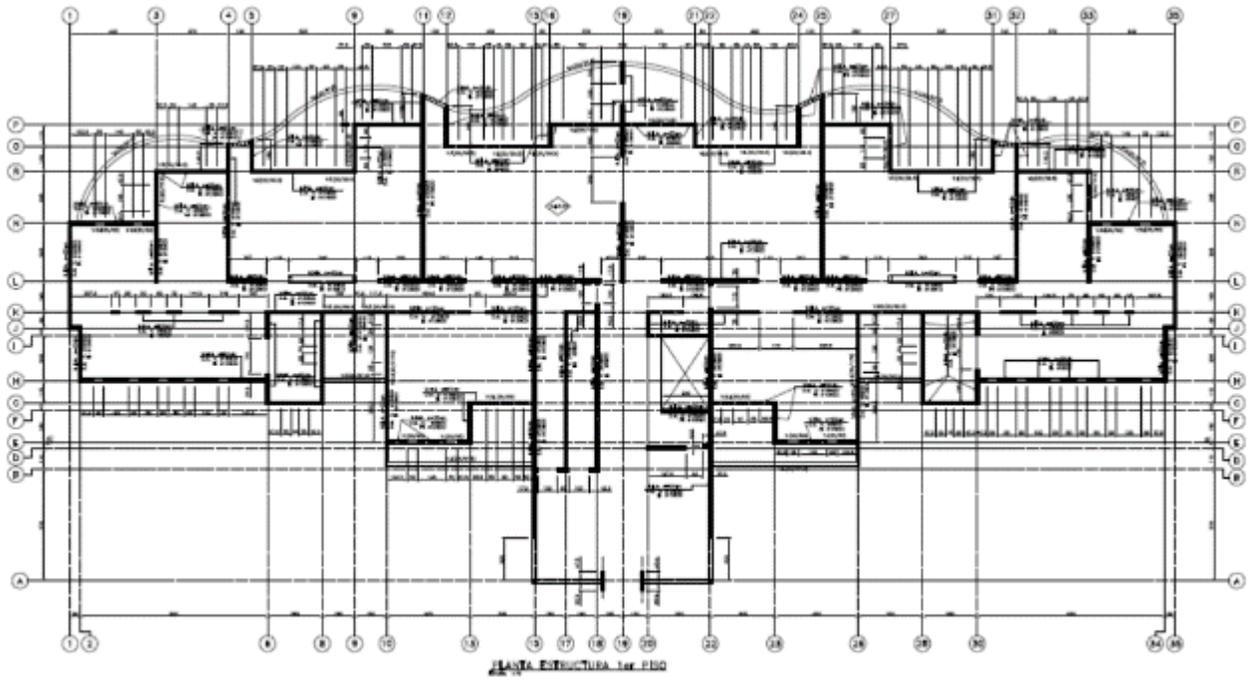


Figura 135: Planta estructura primer piso

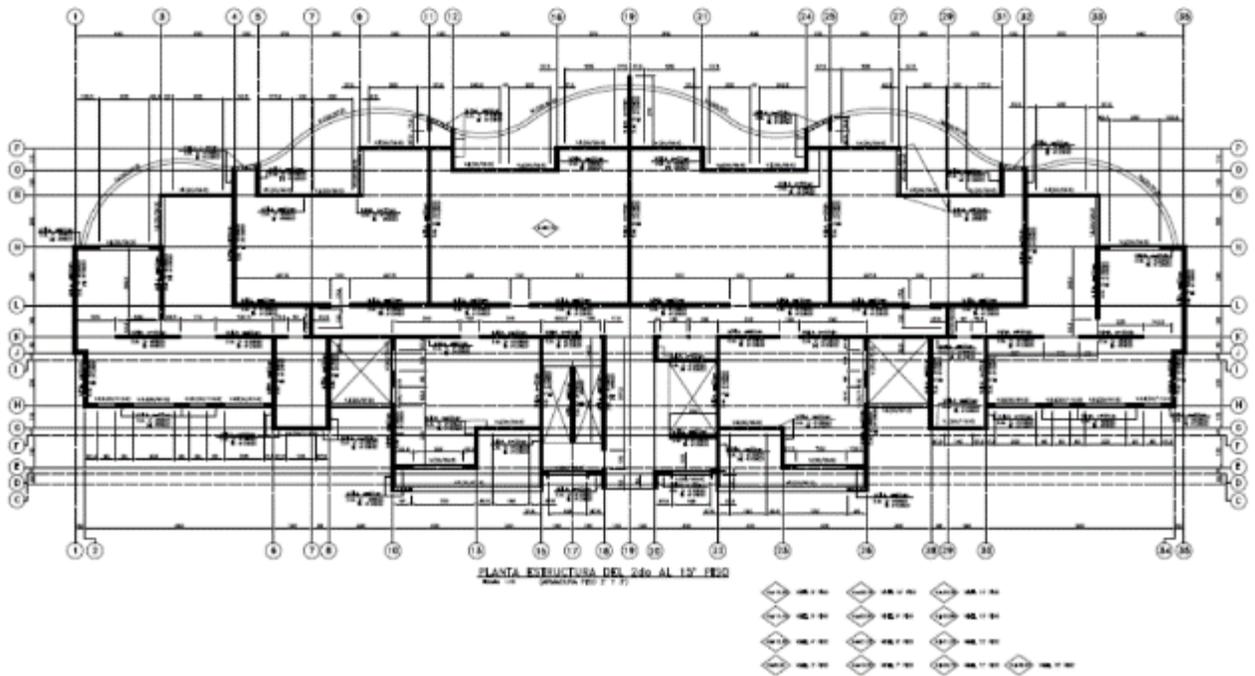


Figura 136: Planta estructura piso 2 al 15

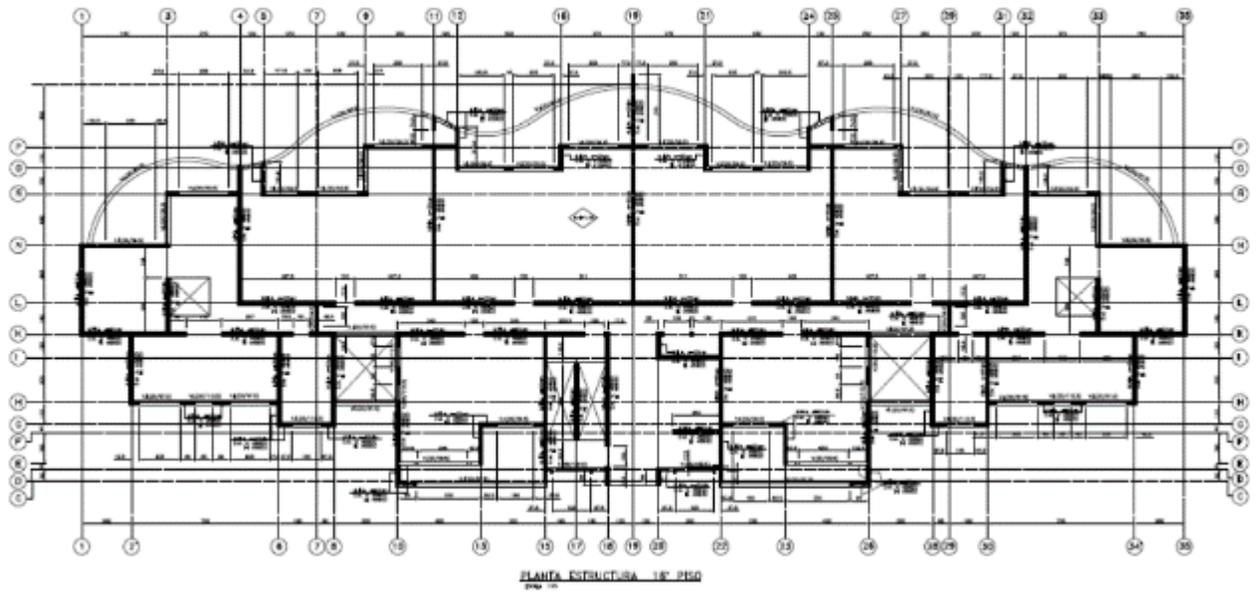


Figura 137: Planta estructura piso 16

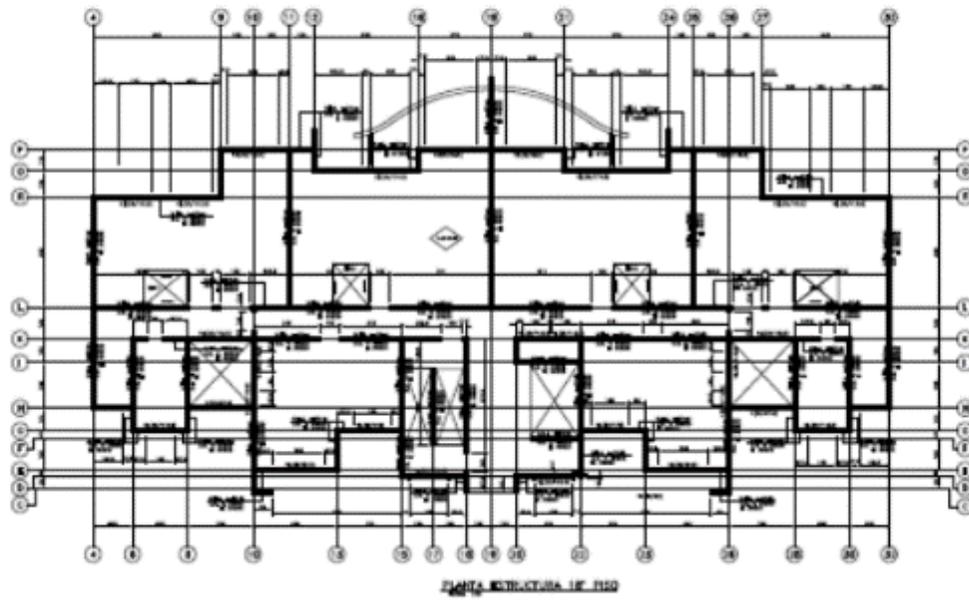
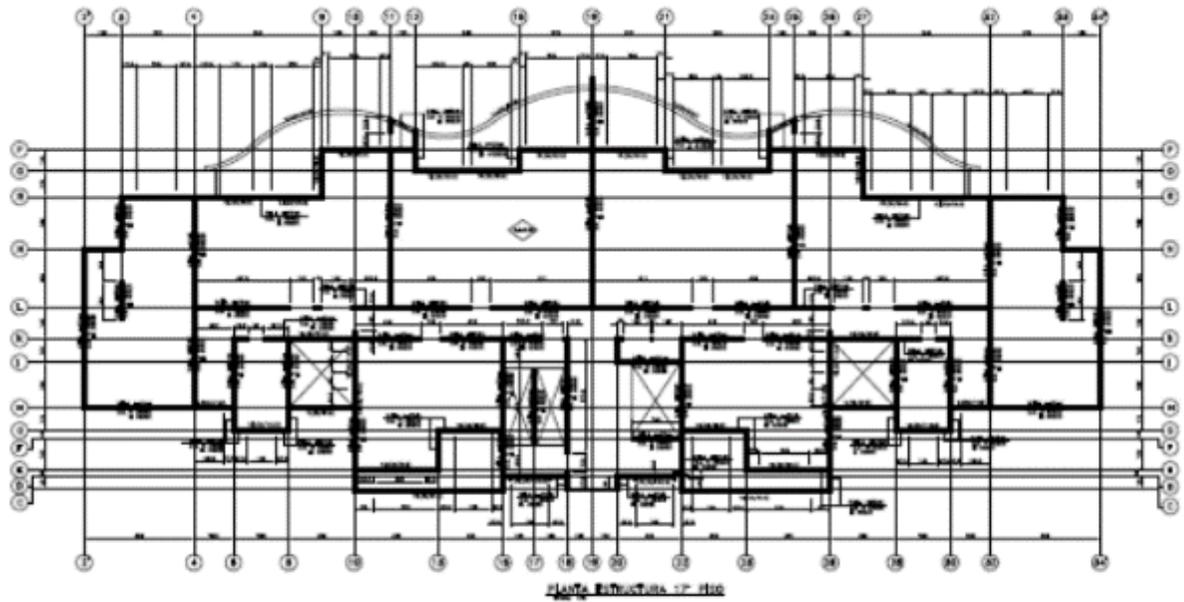


Figura 138: Planta estructura piso 17 y 18

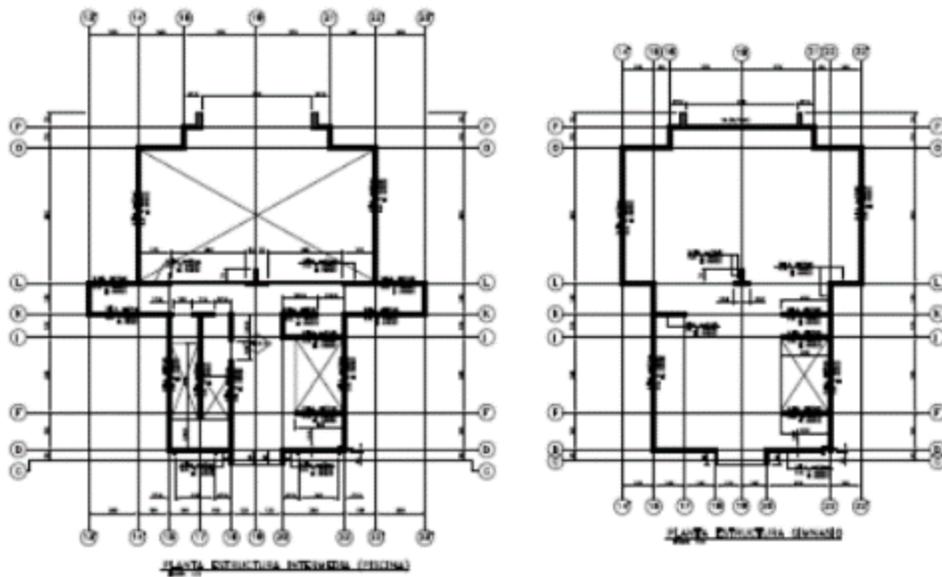
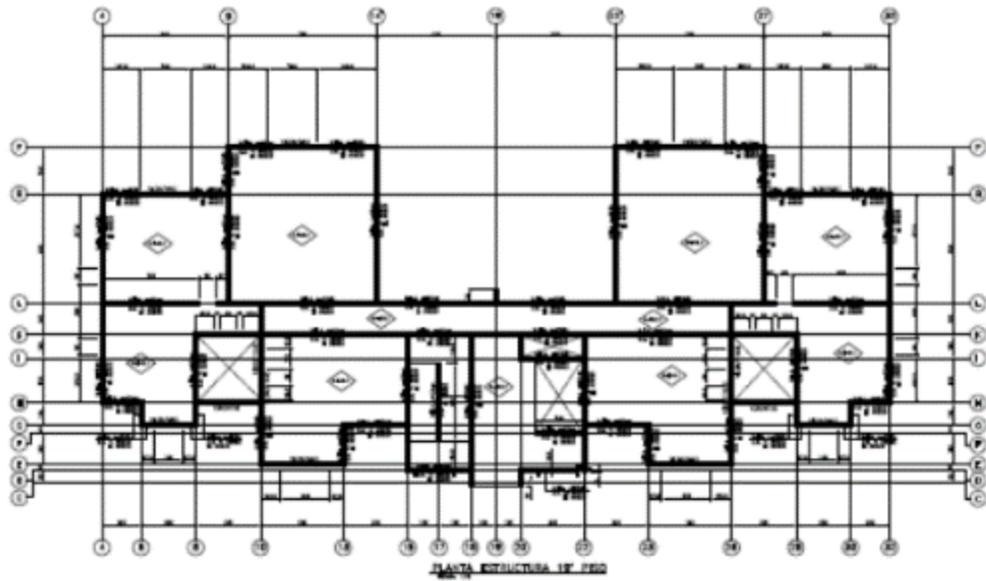


Figura 139: Planta estructura piso 19

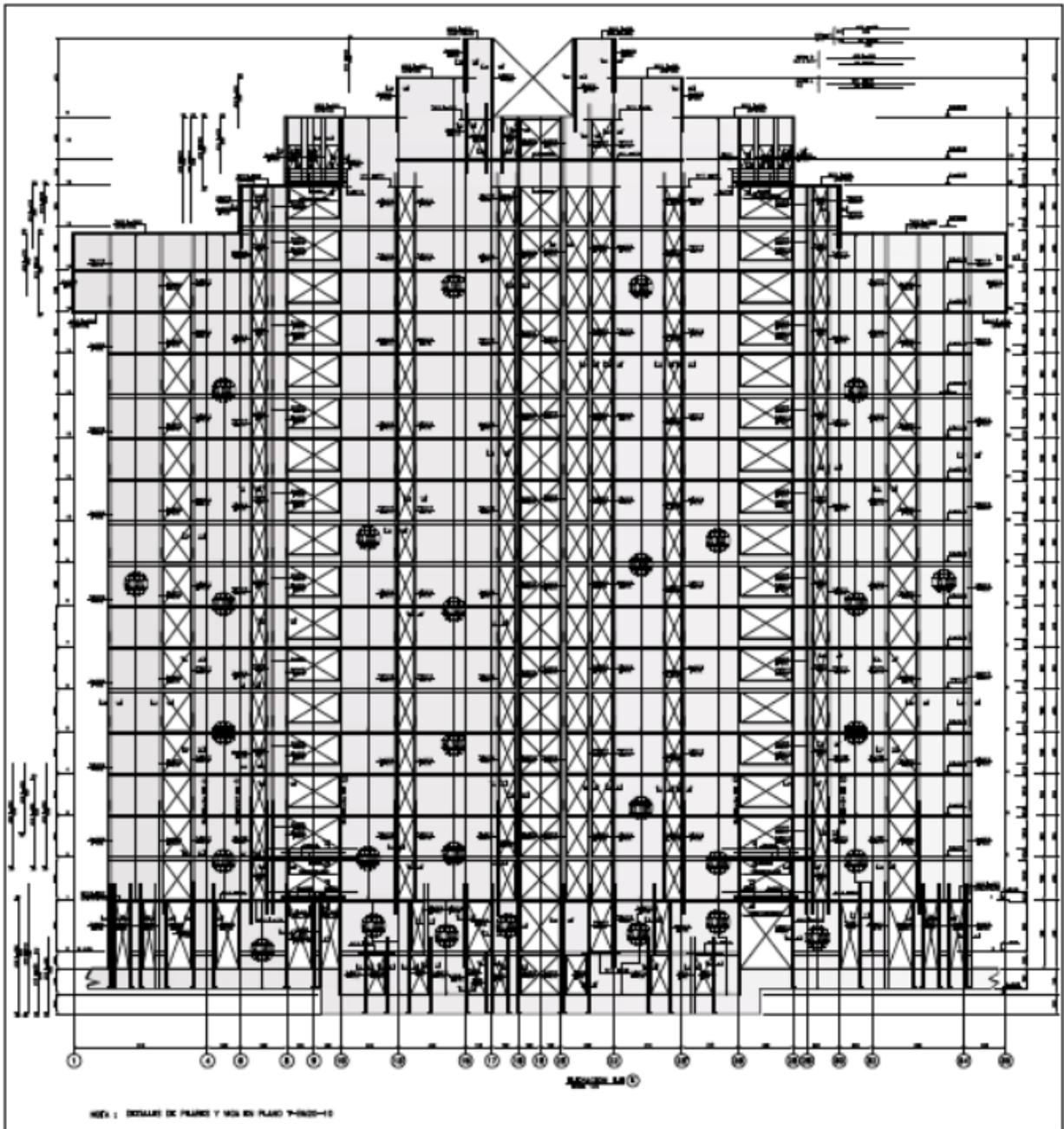


Figura 140: Elevación eje K

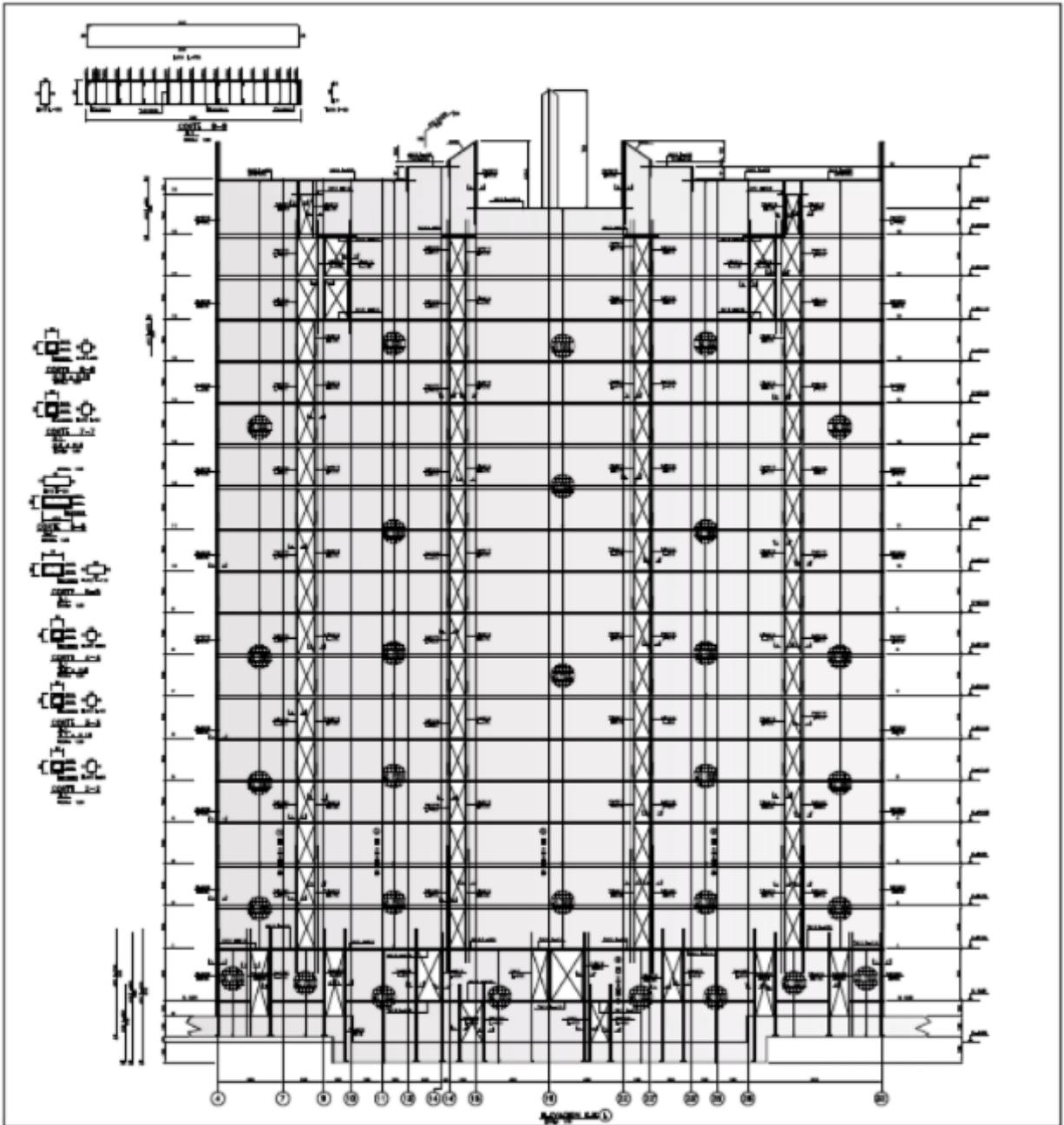


Figura 141: Elevación eje L