



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría en Estructuras

**METODOLOGÍA BIM EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES DE CONCRETO
REFORZADO Y DE ESTRUCTURA METÁLICA EN GUATEMALA**

Ing. Carlos Andres Pérez Torres

Asesorado por el MSc. Ing. Óscar Andrés García Valdés

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**METODOLOGÍA BIM EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES DE CONCRETO
REFORZADO Y DE ESTRUCTURA METÁLICA EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. CARLOS ANDRES PÉREZ TORRES
ASESORADO POR EL MSC ING. ÓSCAR ANDRÉS GARCÍA VALDÉS
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. José Humberto Rosal Paz
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**METODOLOGÍA BIM EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES DE
CONCRETO REFORZADO Y DE ESTRUCTURA METÁLICA EN GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 14 de Julio de 2020.

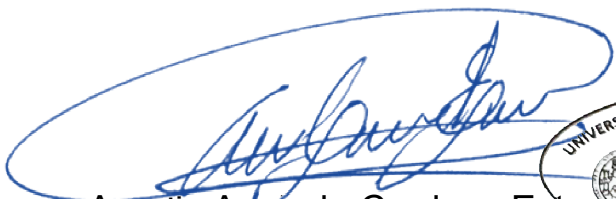
Ing. Carlos Andres Pérez Torres

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.736.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **METODOLOGÍA BIM EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES DE CONCRETO REFORZADO Y DE ESTRUCTURA METÁLICA EN GUATEMALA**, presentado por: **Carlos Andres Pérez Torres**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, noviembre de 2022

LNG.EEP.OI.736.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“METODOLOGÍA BIM EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES DE CONCRETO REFORZADO Y DE ESTRUCTURA METÁLICA EN GUATEMALA”

presentado por **Carlos Andres Pérez Torres** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 24 de octubre de 2021

MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que se ha revisado y APROBADO la siguiente TESIS DE GRADUACIÓN titulada: "METODOLOGÍA BIM EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES DE CONCRETO REFORZADO Y DE ESTRUCTURA METÁLICA EN GUATEMALA" del estudiante Carlos Andres Pérez Torres, quien se identifica con numero de carné 201213514, del programa de Maestría en Estructuras.

Con base en la evaluación realizada, se hace constar que se ha evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014.

Por lo anterior, se entrega con la presente, la hoja de evaluación aprobada por el docente del curso y toda la documentación administrativa de respaldo, para su aprobación correspondiente por parte de la Escuela de Estudios de Postgrado.

Sin otro particular

Vo. Bo. Msc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador Área Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 24 de octubre de 2021

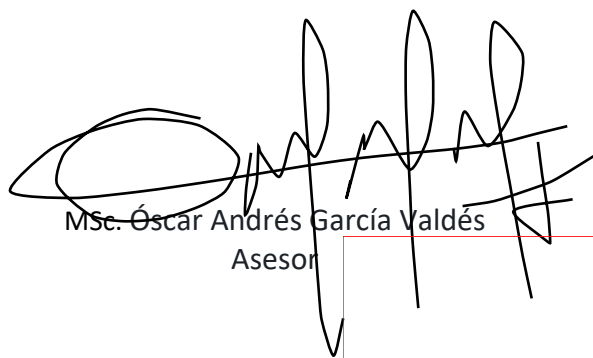
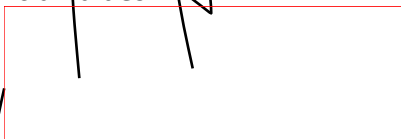
MSc. Ing Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del alumno:

Carné: 201213514
Alumno: Carlos Andres Pérez Torres
Maestría: Ingeniería Estructural
Título de la Investigación: METODOLOGÍA BIM EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES DE CONCRETO REFORZADO Y DE ESTRUCTURA METÁLICA EN GUATEMALA

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Sin otro particular


MSc. Óscar Andrés García Valdés
Asesor 

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Carlos Pérez (q.e.p.d) y Claudia Torres por su apoyo incondicional lleno de amor.
Mis hermanos	Astrid y Roberto Pérez por los miles aventuras que vivimos y viviremos.
Mi abuela	Eva Castro, por ser mi segunda madre y brindarme sabiduría.
Mis sobrinos	Carlos y Gabriel Girón por motivarme con una sonrisa a esforzarme más.
Mi familia	Especialmente a la familia Mendoza Torres y Calderón Pérez por siempre estar en las buenas y en las malas.
Mis amigos	William Pineda, Sergio Cardona, Julio Álvarez, Emanuel López y Raúl Lemus. Por hacer esta experiencia universitaria muy agradable.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindar educación pública en Guatemala que es fundamental para el desarrollo de nuestro país.

**Escuela de Postgrado
de Ingeniería**

Por brindar los medios para mejorar mis conocimientos en la ingeniería Estructural.

Mi asesor

Mtro. Ing. Andrés García, por todos los conocimientos técnicos que me aportó para la realización de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XIX
RESUMEN.....	XXV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXVII
OBJETIVOS.....	XXIX
HIPÓTESIS.....	XXXI
INTRODUCCIÓN	XXXIII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Conceptos y definición de BIM	1
1.1.1. Objeto paramétrico	4
1.1.2. Diseño paramétrico.....	5
1.1.3. <i>Level of Development</i>	5
1.1.3.1. LOD 100	6
1.1.3.2. LOD 200	6
1.1.3.3. LOD 300	6
1.1.3.4. LOD 350	6
1.1.3.5. LOD 400	7
1.2. BIM en la elaboración de proyectos	8
1.2.1. Proyecto piloto	9
1.2.2. Proceso de diseño utilizando la metodología BIM ..	10
1.2.2.1. Diseño conceptual	10
1.2.2.2. BIM para el análisis y diseño	11

	1.2.2.3.	Desarrollo de la información de construcción	11
1.3.		BIM estructural	11
	1.3.1.	Modelo BIM estructural.....	11
	1.3.2.	Herramienta S-BIM.....	12
	1.3.3.	Herramientas EF	12
	1.3.4.	Coordinación de diseño estructural	13
1.4.		Interoperabilidad	14
2.		FLUJO DE TRABAJO BIM ESTRUCTURAL	17
2.1.		Normas internacionales sobre metodología BIM.....	17
	2.1.1.	ISO 19650	17
	2.1.1.1.	ISO 19650-1	18
	2.1.2.	ISO 16757	22
	2.1.3.	BIM en el mundo	23
2.2.		Normas de diseño estructural en Guatemala	25
	2.2.1.	Normas de Seguridad Estructural NSE	25
	2.2.1.1.	NSE 1 – Generalidades, administración de las normas y supervisión.	26
	2.2.1.2.	NSE 2 – Demandas estructurales y condiciones de carga.	26
	2.2.1.3.	NSE 3 – Diseño estructural de edificaciones.....	26
	2.2.1.4.	NSE 7.1 – Diseño de concreto reforzad.....	27
	2.2.1.5.	NSE 7.5 – Diseño de estructuras de acero.....	27
	2.2.2.	Normas y Reglamentos de Seguridad Estructural Internacionales.....	27

	2.2.2.1.	ACI 318-14.....	28
	2.2.2.2.	ANSI/AISC 341-16.....	28
	2.2.2.3.	ANSI/AISC 360-16.....	28
2.3.		Trabajo colaborativo	28
	2.3.1.	Trabajo cooperativo	29
	2.3.2.	Herramientas de trabajo colaborativo	30
	2.3.2.1.	BIM 360 Design	30
	2.3.2.2.	usBIM.platform.....	30
2.4.		Flujo de información estructural BIM	31
	2.4.1.	<i>Add-on Tools</i>	32
	2.4.2.	<i>Direct Link</i>	32
	2.4.3.	<i>Indirect Link</i>	33
3.		PARÁMETROS NORMATIVOS PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO	
		ESTRUCTURAL.....	37
3.1.		Carga muerta.....	37
	3.1.1.	Peso propio de la estructura	37
	3.1.2.	Cargas muertas superpuestas.....	37
	3.1.3.	Cargas especiales	37
3.2.		Carga viva	38
	3.2.1.	Cargas vivas especificadas	38
	3.2.2.	Impacto	38
3.3.		Carga de viento	38
	3.3.1.	Velocidad básica del viento y exposición.....	39
	3.3.2.	Presiones de viento para diseño.....	41
3.4.		Carga sísmica.....	44
	3.4.1.	Espectro sísmico de respuesta.....	46
	3.4.1.1.	Período de vibración de transición.....	47

3.4.1.2.	Fórmula empírica para período fundamental de vibración	48
3.4.1.3.	Coeficiente sísmico al límite de cedencia.....	49
3.4.1.4.	Probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño.....	50
3.4.1.5.	Espectros genéricos probables	51
3.4.1.6.	Aceleración máxima del suelo.....	52
3.4.1.7.	Componente vertical del sismo de diseño.....	53
3.5.	Combinación de cargas.....	53
3.5.1.	Combinación para el método de resistencia.....	53
3.5.2.	Combinación para dimensionar cimientos.....	54
3.6.	Propiedades del sistema estructural	55
3.6.1.	Tipología estructural.....	55
3.6.1.1.	Sistema E-1.....	56
3.6.1.2.	Sistema E-3.....	56
3.6.2.	Parámetros para modelar respuesta sísmica.....	56
3.6.2.1.	Derivas tolerables.....	60
3.6.2.2.	Efecto P-Delta	61
4.	ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL CON LA METODOLOGÍA BIM .	63
4.1.	Concreto reforzado.....	63
4.1.1.	Diseño arquitectónico	63
4.1.2.	Predimensionamiento estructural	67
4.1.2.1.	Cargas gravitacionales	68
4.1.2.2.	Columnas	68
4.1.2.3.	Vigas	69
4.1.2.4.	Losas.....	71

	4.1.2.5.	Cimentaciones	71
4.1.3.		Interoperabilidad a plantilla estructural	72
	4.1.3.1.	Vinculación de proyecto arquitectónico	72
	4.1.3.2.	Creación de materiales	73
	4.1.3.3.	Vinculación de elementos estructurales	74
4.1.4.		Interoperabilidad a software Etabs	77
4.1.5.		Análisis estructural.....	78
	4.1.5.1.	Inercias fisuradas.....	79
	4.1.5.2.	Cargas gravitacionales	79
	4.1.5.3.	Espectro sísmico de respuesta.....	80
	4.1.5.4.	Fuente de masa.....	82
	4.1.5.5.	Diafragmas	83
	4.1.5.6.	Condiciones de apoyo	83
	4.1.5.7.	Zona rígida.....	83
	4.1.5.8.	Calibración de espectro sísmico de diseño.....	84
	4.1.5.9.	Participación de masa	85
	4.1.5.10.	Irregularidades.....	86
	4.1.5.11.	Derivas tolerables	87
	4.1.5.12.	Efecto P-Delta.....	88
4.1.6.		Diseño de elementos estructurales.....	89
	4.1.6.1.	Diseño de vigas	91
	4.1.6.2.	Diseño de columnas	96
	4.1.6.3.	Diseño de nudos.....	100
	4.1.6.4.	Diseño de losas	102
	4.1.6.5.	Diseño de cimentaciones.....	106
4.1.7.		Interoperabilidad a plantilla estructural	110
4.2.		Estructuras metálicas	112
	4.2.1.	Diseño arquitectónico	112

4.2.2.	Predimensionamiento.....	115
4.2.2.1.	Cargas gravitacionales.....	115
4.2.2.2.	Columnas y vigas acarteladas.....	116
4.2.2.3.	Costaneras.....	120
4.2.3.	Análisis Estructural.....	120
4.2.3.1.	Cargas gravitacionales.....	121
4.2.3.2.	Carga sísmica	121
4.2.3.3.	Fuente de masa	124
4.2.3.4.	Diafragmas.....	124
4.2.3.5.	Arriostramiento	125
4.2.3.6.	Condiciones de apoyo.....	125
4.2.3.7.	Zona rígida	125
4.2.3.8.	Participación de masa.....	125
4.2.3.9.	Irregularidades	126
4.2.3.10.	Derivas tolerables.....	127
4.2.3.11.	Efecto P-Delta	128
4.2.4.	Diseño de elementos estructurales	129
4.2.4.1.	Diseño por resistencia ASCE-7	129
4.2.4.2.	Sistema de marcos ordinarios a momento(OMF).....	130
4.2.4.2.1.	Diseño de columnas y vigas.....	131
4.2.4.2.2.	Diseño de conexión a hombro.....	133
4.2.4.2.3.	Sistema de marcos ordinarios con arriostramiento concéntrico (OCBF)...	135
4.2.4.4.	Diseño de riostras	135
4.2.4.4.1.	Diseño de tensores	137
4.2.4.4.2.	Diseño de vigas.....	138
4.2.4.4.3.	Diseño de columnas....	140
4.2.4.5.	Diseño de cimentaciones	141

4.2.4.5.1.	Diseño de platina.....	141
4.2.4.5.2.	Diseño de pedestal	142
4.2.5.	Interoperabilidad a programa paramétrico	144
5.	GESTIÓN DE PROYECTOS BIM	147
5.1.	Gestión de proyectos.....	147
5.1.1.	Administradores y usuarios.....	148
5.1.2.	Equipo de trabajo.....	150
5.1.3.	Modelo central	151
5.1.4.	Sincronización del modelo	152
5.1.5.	Paquetes	155
5.1.6.	Detección de Interferencias	157
6.	RESULTADOS	163
6.1.	Flujo de trabajo estructural	163
6.2.	Resultados del análisis estructural BIM vs CAD	165
6.3.	Información obtenida según nivel de desarrollo	168
6.4.	Gestión de modelo en la nube	170
6.5.	Discusión de resultados.....	171
	CONCLUSIONES	173
	RECOMENDACIONES.....	175
	REFERENCIAS	177
	APÉNDICES	181
	ANEXOS.....	185

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Modelo virtual arquitectónico.....	2
2.	Modelo virtual estructural	2
3.	Modelo matemático estructural	3
4.	Ciclo de vida de un proyecto BIM.....	4
5.	<i>Level of Development</i> de concreto reforzado	7
6.	<i>Level of Development</i> de acero.....	8
7.	Modelo BIM Estructural	12
8.	Revisión de cambios e interferencias estructurales	13
9.	Elementos del Nivel de Información Necesario	19
10.	Entorno común de datos	21
11.	Flujo de requisitos de información.....	22
12.	Información requerida según nivel de desarrollo	23
13.	BIM en el mundo	24
14.	Relación entre diferentes involucrados en un proyecto BIM.....	31
15.	Diagrama de flujo para <i>Add-on Tools</i>	32
16.	Diagrama de flujo para <i>Direct Link</i>	33
17.	Diagrama de flujo para <i>Indirect Link</i>	34
18.	Diagrama de flujo para BIM estructural	35
19.	Mapa de zonificación por viento de Guatemala.....	40
20.	Mapa de zonificación sísmica de Guatemala	45
21.	Isométrico estructural de oficinas	64
22.	Elevación oeste de estructura	64
23.	Elevación este de estructura	65

24.	Elevación sur de estructura.....	65
25.	Elevación norte de estructura	66
26.	Planta primer nivel de estructura	66
27.	Planta segundo y tercer nivel de estructura	67
28.	Proyecto arquitectónico vinculado en plantilla estructural.....	73
29.	Concreto 4,000 PSI.....	74
30.	Columnas monitoreadas en proyecto estructural	75
31.	Modelo estructural y modelo analítico estructural	76
32.	Exportación de modelo Revit a Etabs	77
33.	Chequeo conexión entre elementos estructurales	78
34.	Modelo analítico importado en Etabs.....	78
35.	Espectro sísmico de respuesta y de diseño.....	82
36.	Chequeo de diseño para elementos estructurales	89
37.	Chequeo de capacidad Columna/Viga.....	90
38.	Porcentaje de acero longitudinal en elementos estructurales	90
39.	Acero longitudinal en cm^2 (Eje C-3 XX)	91
40.	Cortantes en toneladas (Eje C-3 XX).....	91
41.	Detalles de armado de viga principal	96
42.	Curvas de interacción para una columna (Eje C-3 XX).....	97
43.	Curvas de interacción para columna (Eje C-3 XX).....	98
44.	Separación de estribos de confinamiento en columna.....	99
45.	Detalles de armado de columna principal	100
46.	Detalle de armado de Nudo	101
47.	Momentos en losas producidas por cargas gravitacionales.....	102
48.	Área de acero requerida en losas	103
49.	Detalle de armadura de losa	105
50.	Detalle de armadura de losa 3D	106
51.	Capacidad portante vertical	106
52.	Punzonamiento y longitudes	107

53.	Modelo analítico con cimentaciones.....	108
54.	Presiones admisibles del suelo	109
55.	Detalle de armado de Zapata	110
56.	Exportación de modelo Etabs a Revit	111
57.	Exportación de modelo Etabs a Revit	111
58.	Isométrico de nave industrial.....	113
59.	Elevación sentido corto de nave industrial	113
60.	Elevación sentido largo de nave industrial	114
61.	Planta de nave industrial	114
62.	Cargas gravitacionales.....	115
63.	Esquema de nave industrial con elementos acartelados	116
64.	Modelo analítico extruido de nave industrial.....	121
65.	Distribución de cortante basal en marco ordinario	124
66.	Momento ultimo de vigas y columnas	131
67.	Momentos de vigas y columnas	131
68.	Cortante último en cumbrera y hombro (kip-ft)	133
69.	Conexión a hombro y a cumbrera	134
70.	Tensión última en riostra	135
71.	Conexión de arriostramientos.....	137
72.	Carga axial última en tensores	137
73.	Carga axial última de viga	139
74.	Carga axial última de columna	140
75.	Conexión a pedestal.....	142
76.	Dimensionamiento de pedestal y zapata.....	143
77.	Solicitaciones del suelo	144
78.	Exportación de modelo Etabs a Advance Steel.....	145
79.	Asignación de conexiones entre elementos	145
80.	Modelo Estructural de Nave Industrial.....	146
81.	Esquema general de un proyecto central	148

82.	Jerarquía de usuarios	149
83.	Equipos de trabajo y carpetas asociadas.....	151
84.	Diagrama de flujo para crear el modelo central	152
85.	Comentario de cambios en modelo	153
86.	Comparación entre versiones del modelo.....	154
87.	Elementos modificados en la nueva versión	155
88.	Lineal del tiempo de paquetes	156
89.	Superposición de arquitectura y estructuras	156
90.	Recorrido virtual superpuesto de arquitectura y estructuras	157
91.	Detección de interferencias en armado.....	158
92.	Detección de interferencias en acero.....	159
93.	Interferencia entre cimentaciones e instalaciones	160
94.	Interferencia entre viga y muro	161
95.	Flujo de trabajo BIM estructural	164
96.	Momentos y cortantes en viga con CAD	166
97.	Momentos y cortantes en viga con metodología BIM	167
98.	Niveles de desarrollo de modelos	169
99.	Modelo sincronizado	170

TABLAS

I.	Coeficiente C_{ez}	42
II.	Coeficiente de presión C_q	43
III.	Nivel de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño.....	44
IV.	Amenaza sísmica para municipios.....	46
V.	Factores para período fundamental de vibración.....	49
VI.	Factor K_d de acuerdo con el nivel de sismo	50
VII.	Coeficientes y factores para sistemas sismo-resistentes.....	57
VIII.	Irregularidad en planta	58

IX.	Irregularidad vertical	59
X.	Derivas últimas Δu máxima tolerable	60
XI.	Derivas últimas Δu máxima tolerable para edificaciones de acero	60
XII.	Cargas gravitacionales y densidades	68
XIII.	Dimensión mínima de columna	69
XIV.	Altura mínima de vigas no preesforzadas	70
XV.	Peralte mínimo de viga	70
XVI.	Momentos de inercia fisurados	79
XVII.	Clasificación de obra según función	80
XVIII.	Cálculo espectro sísmico de respuesta	81
XIX.	Factor de calibración de sismo dinámico	84
XX.	Participación de masa modal	85
XXI.	Chequeo de irregularidades	86
XXII.	Derivas tolerables sismo en X	87
XXIII.	Derivas tolerables sismo en Y	87
XXIV.	Estabilidad en sentido X	88
XXV.	Estabilidad en sentido Y	88
XXVI.	Cálculo de cortante para vigas	93
XXVII.	Separación de estribos de confinamiento en vigas	95
XXVIII.	Predimensionamiento de secciones acarteladas	116
XXIX.	Condiciones de diseño para elementos acartelados	119
XXX.	Dimensiones de columnas y vigas acarteladas	120
XXXI.	Clasificación de obra según función	122
XXXII.	Cálculo de sismo estático	123
XXXIII.	Participación de masa modal	126
XXXIV.	Chequeos de irregularidades	127
XXXV.	Deriva tolerable de sismo en X y Y	128
XXXVI.	Estabilidad en sentido X	128
XXXVII.	Estabilidad en sentido Y	128

XXXVIII.	Diseño de columnas y vigas	132
XXXIX.	Chequeo de conexión a hombro y cumbrera	133
XL.	Chequeo de riostras.....	136
XLI.	Chequeo de tensores.....	138
XLII.	Chequeo de viga.....	139
XLIII.	Diseño de columnas	140
XLIV.	Comparación entre metodologías de trabajo	165

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Alto del bloque a compresión en un elemento a flexión
H	Altura del edificio
As	Área de acero longitudinal
AS_{max}	Área de acero máximo
AS_{min}	Área de acero mínimo
Ash	Área de refuerzo horizontal
Avh	Área de refuerzo vertical
Ag	Área gruesa de la sección
An	Área neta de la sección
AT	Área tributaria
M	Carga muerta
Sh	Carga sísmica horizontal
V	Carga viva
Vt	Carga viva de techo
Wv	Carga viva uniformemente distribuida
Na	Coeficiente por proximidad de amenazas especiales por períodos cortos
Nv	Coeficiente por proximidad de amenazas especiales para períodos largos
Fa	Coeficiente de sitio para períodos de vibración corto
Fv	Coeficiente de sitio para períodos de vibración largo
ph	Cuantía de acero horizontal
pv	Cuantía de acero vertical

Δu	Deformación última admisible
ϵ	Deformación unitaria
δe	Desplazamiento elástico
f'_c	Esfuerzo máximo a compresión
C_d	Factor de amplificación de desviación
k_d	Factor de escala para reducir el sismo
K	Factor de longitud efectiva
R	Factor de reducción de respuesta sísmica
Ω_0	Factor de sistema estructural
F	Fuerza aplicada
P_n	Fuerza compresión nominal
P_c	Fuerza axial disponible
P_r	Fuerza axial requerida
I_0	Índice de sismicidad
L	Longitud del elemento
M_2	Masa saturada de superficie seca
M_1	Masa seca al horno del bloque
M_3	Masa suspendida sumergida
E_s	Módulo de elasticidad del acero
M_{ax}	Momento admisible alrededor del eje X
M_{ay}	Momento admisible alrededor del eje Y
M_{sx}	Momento alrededor del eje X debido a cargas de servicio
M_{ux}	Momento alrededor del eje X debido a cargas últimas
M_{sy}	Momento alrededor del eje Y debido a cargas de servicio
M_{uy}	Momento alrededor del eje Y debido a cargas últimas
M_{nx}	Momento nominal alrededor del eje X
M_{ny}	Momento nominal alrededor del eje Y

S_{1s}	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto.
S_{cs}	Ordenada espectral ajustada del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto. Relación de la distancia d, desde el centroide del esfuerzo a compresión a la colocación del refuerzo, utilizado en el diseño por el método ASD.
S_{1r}	Ordenada espectral de periodo 1 segundo del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés.
S_{cr}	Ordenada espectral de periodo corto del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés.
T	Período de vibración de la estructura
T_s	Período expresado en segundos que separa los períodos cortos de los largos
M_c	Resistencia a la flexión disponible
M_n	Resistencia a la flexión nominal
f_y	Resistencia a la fluencia del acero
R_b	Resistencia bruta
R_n	Resistencia neta

GLOSARIO

ACI	Instituto Americano del Concreto (<i>American Concrete Institute</i>).
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
AIA	Instituto Americano de Arquitectura (<i>American Institute of Architects</i>).
AISC	Instituto Americano de Construcción con Acero (<i>American Institute of Steel Construction</i>).
Análisis estructural	Utilización de ecuaciones de resistencia de materiales o programa para determinar los esfuerzos actuales en una estructura.
ASD	Método de diseño por esfuerzos admisibles.
ASCE	Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (<i>American Society of Civil Engineers</i>).
Barlovento	Es la dirección de donde proviene el viento.
BIM	Modelado de información de construcción (<i>Building Information Modeling</i>).

Breiza	Elemento estructural cuya función es de proveer estabilidad al marco para soportar cargas perpendiculares a su plano.
Carga de servicio	Combinación que incluye todas las cargas sin modificarlas.
Carga muerta	Carga permanente presente en el elemento de diseño.
Carga última	Combinación que mayor las cargas según su tipo.
Carga viva	Carga de ocupación presente en el elemento de diseño.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.
Columna	Miembro, usualmente o predominante vertical, usado principalmente para resistir carga axial de compresión, pero que también puede resistir momento, cortantes o torsión. Para un miembro de sección variable, la menor dimensión superior e inferior del lado menor. Las columnas usadas como parte del sistema resistente ante fuerzas laterales resisten las cargas axiales, momentos y cortante combinadas.
Combinación de cargas	Conjunto de fuerzas mayoradas por su respectivo factor de acuerdo a la metodología utilizada.

Concreto	Material de construcción que suele elaborarse mezclando cal, cemento, agregados y agua. También se le conoce como concreto simple.
Diafragma horizontal	Elemento plano conformado para lámina metálica (<i>metal deck</i>), concreto reforzado y miembros horizontales (vigas principales y secundarias).
Ductilidad	Capacidad que tiene una estructura para resistir deformación sin colapsar bajo las sollicitaciones de carga inducida.
Efecto P-Delta	Desplazamiento lateral proporcional al momento adicional inducido por una carga gravitacional, a la estructura deformada por la acción sísmica.
Factor de carga	Considera las desviaciones de la carga real respecto a la carga nominal, la incertidumbre en el análisis que transforma la carga en demandas; y la probabilidad que más de una carga extrema ocurra simultáneamente.
FEMA	Agencia Federal de Manejo de Emergencias (<i>Federal Emergency Management Agency</i>).
IBC	Código Internacional de Construcción (<i>International Building Code</i>).

IFC	<i>Industry Foundation Classes</i> traducido literalmente como Establecimiento de Clases para la Industria, es un estándar común para el intercambio de datos independientemente de la aplicación de software que se esté utilizando.
Interoperabilidad	Capacidad de diversos sistemas (y organizaciones) para trabajar juntos sin problemas, sin pedir datos y sin esfuerzos especial.
<i>Level of Development</i>	Nivel de Desarrollo. Define el nivel de o madurez de información que posee un elemento del modelo.
LRFD	Metodología de diseño por factores de carga y resistencia (<i>Load and Resistance Factors Design</i>).
Mampostería	Procedimiento de construcción que consiste en la unión de bloques con mortero, colocándolos por hiladas para formar un plano vertical.
Modelo de proyecto	Modelo en el que se define, determinan y justifican técnicamente las soluciones de acuerdo con las especificaciones de la normativa aplicable en cada fase de trabajo.
Mortero	Mezcla de cemento, cal, arena y agua, que sirve para pegar las unidades de mampostería.

Muro	Elemento vertical usado para dividir o delimitar un ambiente. Puede o no ser estructural.
Nivel de desarrollo	Describe el nivel de compleción al cual debe ser desarrollado cada elemento.
Parámetros	Variables usadas en funciones o ecuaciones para asignar valores: Coordenadas, dimensiones, materiales, distancias, ángulos, colores, unidades, precio, y muchos más.
Predimensionamiento	Selección de un elemento estructural (Columna, viga, breiza), de forma rápida con base a condiciones de servicio, sin mayor comprobación.
Realidad virtual	Es un entorno de escenas u objetos de apariencia real generado mediante tecnología informática que crean en el usuario la sensación de estar inmerso en él.
Resistencia	Capacidad que tiene un elemento para soportar una carga.
Resistencia de diseño	Resistencia nominal multiplicada por el factor de resistencia.
Viga	Miembro sometido principalmente a flexión y cortante, con o sin fuerza axial o de torsión. Las vigas en los pórticos resistentes a momentos que forman parte del

sistema resistente ante fuerzas laterales son miembros predominante horizontales.

RESUMEN

Con el paso del tiempo los avances en softwares de análisis, diseño estructural y modelos de información virtual generan nuevas metodologías de trabajo que satisfacen las condiciones de ciclo de vida de un proyecto y aprovechan los recursos para facilitar el trabajo multidisciplinario.

El presente trabajo muestra como la metodología BIM puede adaptarse al diseño estructural en Guatemala, para las tipologías de edificaciones de concreto reforzado y edificaciones de acero produciendo beneficios en las distintas fases de la ingeniería estructural.

Se plantea un flujo de trabajo para el diseño estructural de edificaciones de concreto reforzado y acero, con base en una propuesta arquitectónica que abarca desde el predimensionamiento estructural hasta la documentación, utilizando la interoperabilidad de los softwares paramétricos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante el proceso de planificación de una obra participan profesionales de distintas ramas en tareas específicas, el constante flujo de información y actualizaciones generan interrupciones en elementos estructurales que son detectados hasta fases avanzadas del ciclo de vida del proyecto, estos descuidos perjudican de manera directa la seguridad estructural, el tiempo de ejecución y el costo total de una obra. Diversos países han aplicado normativas sobre la metodología BIM para el sector público y privado que permiten detectar errores de construcción de manera virtual desde fases iniciales, en Guatemala no se han adaptado normas nacionales para la correcta aplicación de la metodología BIM.

Los avances en el desarrollo tecnológico son exponenciales, en la rama de ingeniería estructural los softwares son herramientas fundamentales para el diseño estructural, poco a poco alrededor del mundo el sector de arquitectura, ingeniería y construcción está emigrando del 2D y 3D a prácticas más eficientes basadas en la metodología BIM. su implementación es distinta en cada país porque debe satisfacer los requerimientos de las normativas utilizadas a nivel nacional.

La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica, AGIES, no considera en ninguna de sus normativas la implementación de esta metodología por lo que es necesario adaptarla para su estandarización en el diseño estructural guatemalteco enfocándose en el análisis y diseño estructural.

Es necesario adaptar proceso de diseño estructural con la metodología BIM aplicado a las condiciones y normas del territorio guatemalteco, a través de

modelos de construcción virtual para que su diseño sea el óptimo, con un proceso de planificación que a través de los diversos softwares que emplea esta metodología, se tenga la mayor eficiencia de recursos, evitando sobrecostos de la obra y reduciendo los efectos negativos en el impacto ambiental, todo lo anterior daría resultados positivos que con la metodología tradicional son difíciles de obtener de manera apropiada.

En tal sentido es importante cuestionar lo siguiente:

¿De qué manera beneficia la aplicación de la metodología BIM en el diseño estructural en Guatemala?

- Para ser más particulares se desglosan las siguientes preguntas:
 - ¿Cuál es el procedimiento de creación de un modelo virtual con la metodología BIM para las condiciones de sitio de Guatemala?
 - ¿Cómo es la respuesta de un modelo matemático BIM vs un modelo matemático CAD?
 - ¿Qué información se puede obtener de un modelo BIM según su nivel de desarrollo?
 - ¿Cómo afecta trabajar con un modelo centralizado al trabajo colaborativo?

OBJETIVOS

General

Utilizar la metodología BIM en el diseño estructural para determinar los beneficios e inconvenientes de su implementación en el diseño de edificaciones de concreto reforzado y de estructura metálica en Guatemala, basándose en normativas internacionales.

Específicos

- Establecer un flujo de trabajo para un modelo de construcción virtual a través de la metodología BIM aplicando las normas de seguridad estructural AGIES NSE.
- Comparar los resultados del análisis estructural de un modelo BIM con un modelo CAD.
- Determinar la información obtenida de un modelo central según su nivel de desarrollo.
- Generar un modelo de gestión en la nube para describir los alcances del trabajo colaborativo.

HIPÓTESIS

La aplicación de la metodología BIM en el diseño estructural en Guatemala, permitirá realizar edificaciones de concreto reforzado y de estructura metálica de manera más eficiente.

- Variable: metodología BIM para edificaciones de concreto reforzado.
 - Definición conceptual: consiste en la utilización de concreto con barras de acero en la construcción de edificaciones.
 - Definición operacional: comportamiento en condiciones de cargas de servicio. Chequeos de derivas, momentos y fuerzas cortantes en los elementos estructurales.
- Variable: metodología BIM para edificaciones de estructura metálica.
 - Definición conceptual: consiste en la utilización de acero estructural como material principal en la construcción de edificaciones.
 - Definición operacional: comportamiento en condiciones de cargas de servicio. Chequeos de derivas, momentos y fuerzas cortantes en los elementos estructurales.

INTRODUCCIÓN

La metodología BIM (*Building information Modeling*) permite realizar un modelo de construcción virtual previo a la construcción real de una obra, facilitando la detección de errores de diseño desde la fase de planificación. Esta metodología tiene áreas poco exploradas, donde los ejes que necesitan un mayor desarrollo a nivel internacional son el investigativo, formación y empleabilidad, como también la adaptación de este proceso para cada país.

Existen múltiples softwares paramétricos que a través de su interoperabilidad directa o indirecta permiten desarrollar a través de un flujo de trabajo modelos de información virtual para el ciclo de vida de un proyecto, dentro de este proceso de trabajo es necesario adaptar las normativas de diseño utilizadas en diversos países por lo que es necesario desarrollar este tema con un enfoque descriptivo. La importancia del presente estudio consiste en la reducción de errores aleatorios y humanos en la fase de diseño estructural a través de la correcta implementación de la metodología BIM al realizar edificaciones optimas a través de modelos paramétricos por medio de las nuevas tecnologías.

La investigación se desglosa en cuatro capítulos, el primero tratará sobre las generalidades de la investigación enfocándose en el origen de la metodología, sus conceptos esenciales, BIM estructural, BIM en los proyectos, interoperabilidad y fundamentos; el segundo capítulo se centrará en los flujos de trabajo para el desarrollo del modelo de construcción virtual, las normativas de diseño e interoperabilidad entre softwares; el tercer capítulo describe los parámetros normativos para el análisis y diseño estructural para las condiciones

de sitio de Guatemala, el cuarto capítulo se desarrollará el proceso de diseño estructural para una edificación de concreto reforzado y para otra de estructuras metálicas para los que se desarrollara para ambas el pre dimensionamiento estructural, análisis estructural, diseño de elementos estructurales, diseño de cimientos y documentación, y en el último capítulo se describirá la gestión virtual de un proyecto central.

1. GENERALIDADES

1.1. Conceptos y definición de BIM

Building Information Modeling (BIM) es una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de proyectos de construcción.

Consiste en centralizar toda la información relacionada con el proyecto en un modelo de información virtual, que permite estudiarlo durante su ciclo de vida. Es decir, desde su concepción como idea, su planificación, la ejecución física, mantenimiento y hasta su posterior demolición o rehabilitación.

BIM simula la construcción de proyectos en un ambiente virtual, obteniendo un modelo de construcción preciso conocido como modelo de información de construcción, que cuando se completa contiene datos relevantes que sirven como soporte para el diseño, obtención de información, fabricación y actividades de construcción requeridas para realizar la construcción real. (Eastman, 2008)

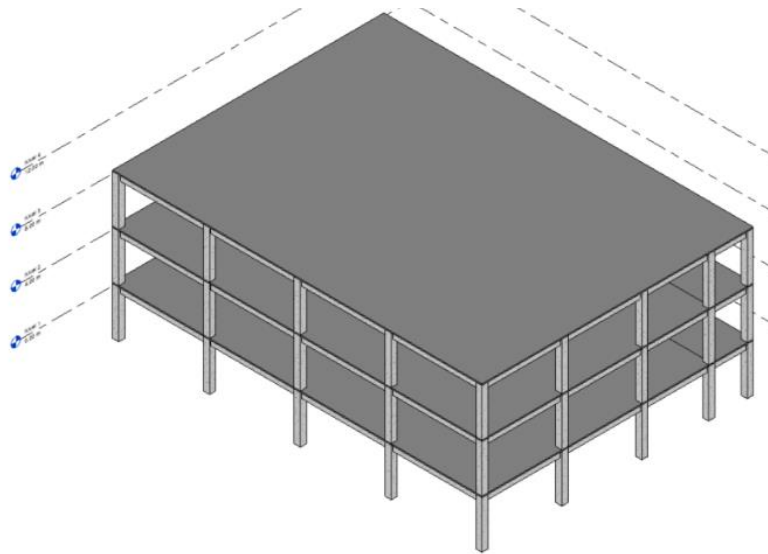
Lo que integra un modelo de información virtual es la geometría, relación espacial, información geográfica, cantidades y propiedades de los elementos de construcción, costo estimado, inventario de materiales y documentación del proyecto. El modelo puede ser utilizada para mostrar el ciclo de vida completo de la infraestructura. (Bazjanac, 2006)

Figura 1. **Modelo virtual arquitectónico**



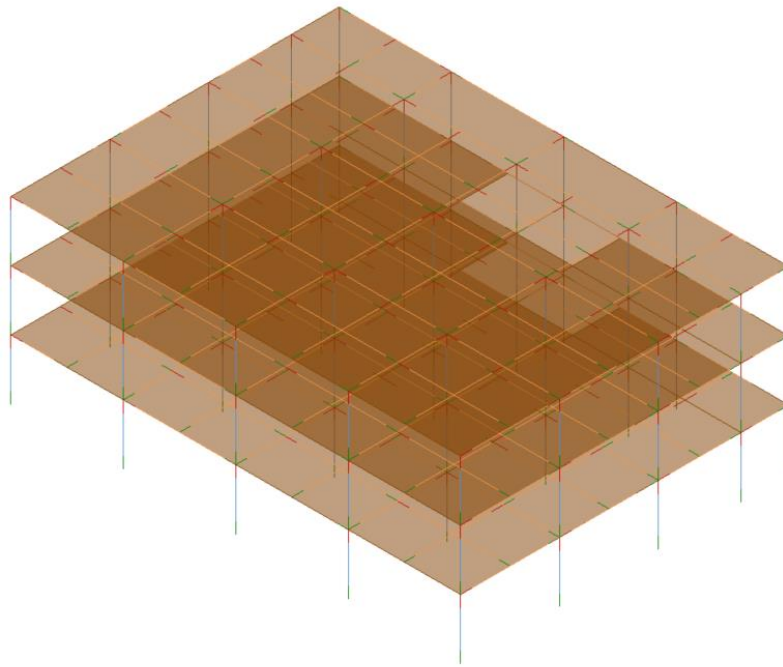
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 2. **Modelo virtual estructural**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 3. **Modelo matemático estructural**

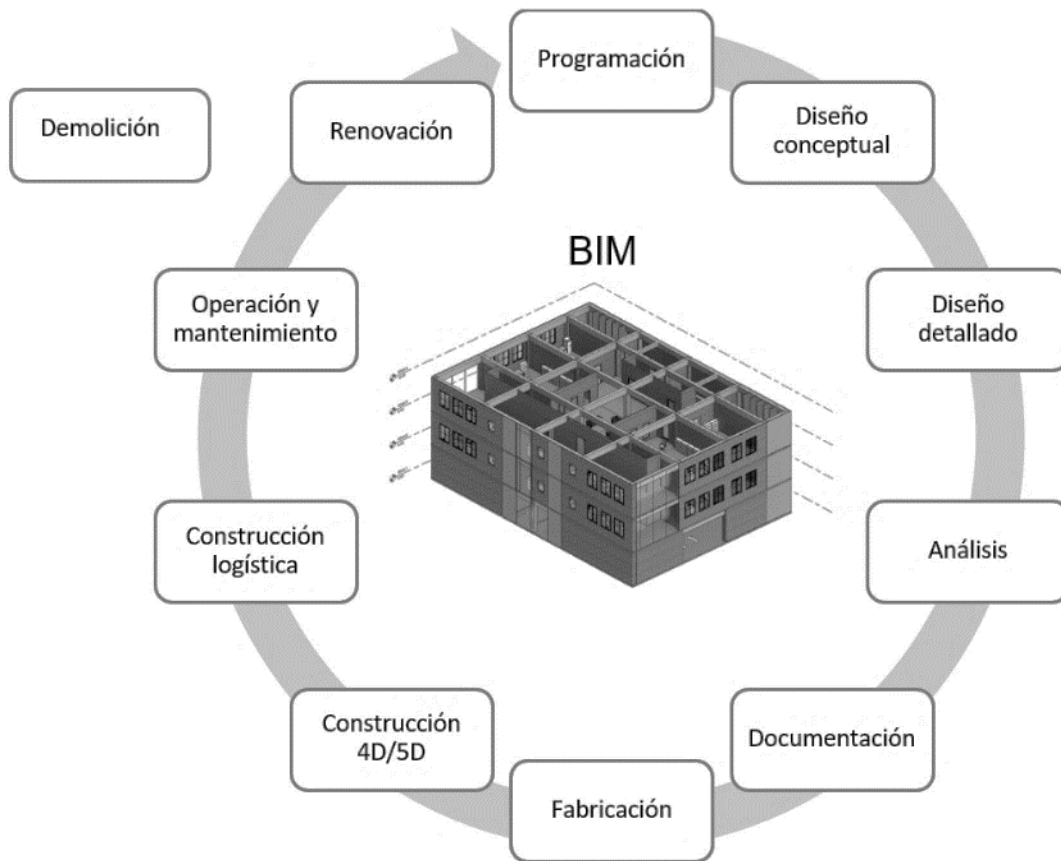


Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Cuando se habla de BIM se habla de un proceso que utiliza diversos softwares que relacionan los aspectos de un todo, en la integración de un único modelo de construcción virtual que permite que los miembros involucrados durante el ciclo de vida del proyecto, puedan interactuar de manera que se simplifique y se vuelve más eficiente la colaboración para seleccionar las alternativas ideales en el diseño arquitectónico, instalaciones y de ingeniería, para que la construcción real sea optima. (Hardin, 2009)

De una forma más sencilla se puede expresar que BIM es sobre conectar datos de manera eficiente y significativa. (Gajendran, 2012)

Figura 4. **Ciclo de vida de un proyecto BIM**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

1.1.1. Objeto paramétrico

Según Eastman (2008) es fundamental para comprender BIM diferenciar el concepto de objeto paramétrico de un objeto tradicional 3D. Los Objetos paramétricos BIM se definen de la siguiente manera:

- Datos geométricos (dadas por la forma 3D), datos informativos y reglas establecidas entre estos datos.

- Una geometría integrada y sin redundancia, es decir que sus dimensiones no pueden ser alteradas en una parte del modelo y en otra no. Por ejemplo, no es posible cambiar el ancho de una columna en un 3D, sin afectar una vista de elevación.
- Reglas que modifican automáticamente la geometría del objeto y la de objetos relacionados a este.
- Agrupaciones o niveles de jerarquía, que permitan realizar cambios a los objetos de manera conjunta o particular.
- Reglas que evalúan la factibilidad de los cambios que se realicen, es decir, si un cambio infringe alguna regla definida, este no se ejecuta.
- Capacidad de enlazar atributos, lo cual permita importar o exportar los mismos. Por ejemplo, importar materiales estructurales.

1.1.2. Diseño paramétrico

Se refiere una clase de elementos que definen una diversidad de características que poseen interacciones unas con otras, a través de pautas determinadas por el diseñador. En la ingeniería estructural se definen reglas que satisfacen los requerimientos que el diseño necesita, como los recubrimientos en elementos de acero, dobleces de refuerzos y especificaciones particulares de cada uno. El diseño paramétrico es menos susceptible a generar errores y el diseño se ejecuta de manera rápida.

1.1.3. *Level of Development*

LOD *Specification*, es una organizada colección de interpretaciones de definiciones del AIA (*American Institute of Architects*) que describen requerimientos de información proporcionando ejemplos gráficos de los

diferentes niveles de desarrollo de una amplia variedad de tipos de elementos constructivos. (BIM Forum, 2019)

1.1.3.1. LOD 100

Los elementos no son representaciones geométricas. Estos son, solo símbolos o representaciones genéricas de información que puede ser derivada de otro elemento del modelo. La información que puede ser derivada de un LOD 100, debe ser considerada como aproximada.

1.1.3.2. LOD 200

Los elementos son representados gráficamente, pero son estáticos y genéricos. Por ejemplo, volúmenes, cantidades, localización u orientación. La información derivada de un LOD 200, debe ser considerada como aproximada.

1.1.3.3. LOD 300

Los elementos son gráficamente representados como sistemas específicos, objetos o arreglos a partir de los cuales es posible medir directamente cantidades, formas, tamaños, entre otros. Sin tener información no modelada como notas especiales.

1.1.3.4. LOD 350

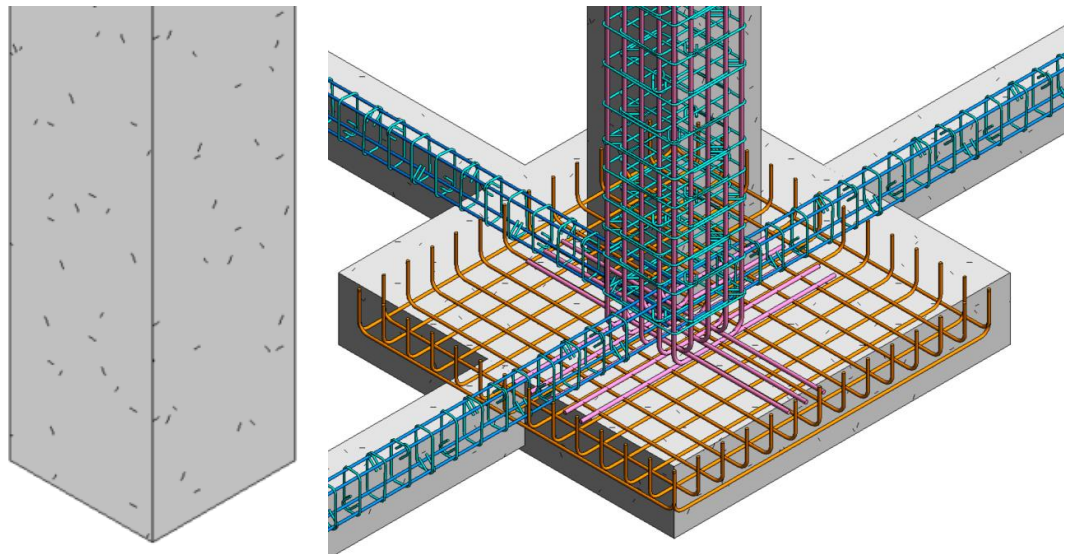
Son elementos mejorados del LOD 300 dada la adición de información respecto a otros sistemas de construcción.

1.1.3.5. LOD 400

Elementos con suficiente detalle y precisión para la fabricación de sus componentes.

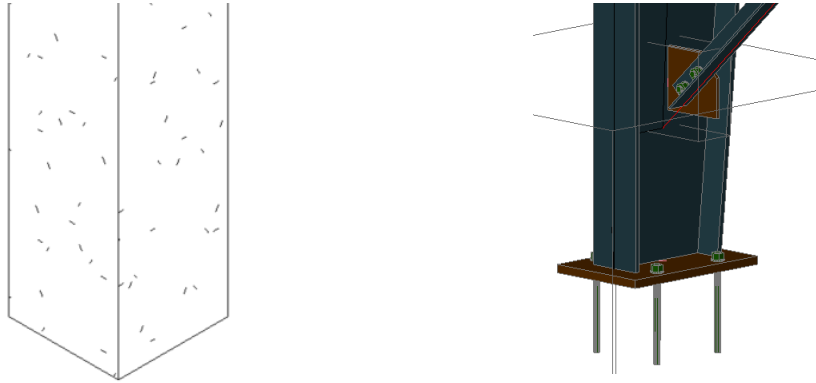
Debe diferenciarse la terminología *Level of Detailing* (LoD) con *Level of Development* (LOD) ya que la primera se refiere al nivel de detalle de un elemento y la segunda a la geometría del elemento y la información añadida a este. En definición *Level of Detailing* es un dato de entrada, mientras que *el Level of Development*, como un dato de salida.

Figura 5. ***Level of Development* de concreto reforzado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 6. ***Level of Development de acero***



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

1.2. BIM en la elaboración de proyectos

El primer paso para la implementación BIM en los proyectos, es la planificación de cómo se llevará a cabo este cambio de forma de trabajo para que la transformación se realice de forma ordenada y garantice el éxito del proceso. Es clave que esta planificación tenga en cuenta los tiempos de formación del equipo de su adecuación en la nueva metodología y tecnología.

El paso siguiente es la elección y desarrollo de un proyecto piloto, el cual preferiblemente sea un proyecto en curso del estudio o la empresa. Una vez seleccionado el mismo se debe establecer los objetivos que se quieran conseguir para este proyecto en particular. Es decir, hay que responder a la pregunta ¿Para qué generar el modelo BIM?, ya que será la pauta para proceder a la hora de aplicar la metodología.

La elección del proyecto piloto permitirá determinar qué equipo de trabajo será necesario para llevar adelante el mismo y que soporte tecnológico sería el más adecuado en términos de software y hardware.

Es muy importante definir los alcances y orientar el modelado con base a la información que se desea extraer del proyecto seleccionado. Es decir, será necesario definir cuál es el nivel de desarrollo a alcanzar para cada etapa denominada como LOD (Nivel de desarrollo). No será igual el nivel de desarrollo que tendrá un modelo que sirva para un anteproyecto al que sirva para un proyecto ejecutivo. De la misma manera no contendrá la misma información un proyecto del cual se quiera extraer únicamente planos que uno del cual se quieran obtener cómputos de materiales.

En la actualidad la implementación del estándar ISO 19650 para la administración de información usando modelado BIM, proviene de las necesidades de la industria para la transformación digital. Los estándares 1192 son reemplazadas por esta nueva serie de ISO. La evolución de estos estándares facilita el enfoque coherente de la administración de proyectos con la metodología BIM de manera internacional para estandarización de su implementación. (Kemp, 2019)

1.2.1. Proyecto piloto

A la hora de elegir el proyecto piloto para la implementación BIM, es necesario los siguientes puntos. (Cámara Argentina de la Construcción, 2020)

- El primer paso es elegir una tipología estructural en la cual el equipo de trabajo tenga experiencia y se sienta familiar ya que se enfrentarán a un

cambio de metodología y se evita agregarle dificultades extras que puedan ralentizar el proceso de adecuación del nuevo flujo de trabajo.

- Iniciar con proyectos pequeños para que se puedan observar a corto plazo los logros obtenidos.
- Elegir un proyecto de complejidad media para poder experimentar la resolución de pequeños problemas que no se enfrentarían si se inicia con un proyecto sin dificultad.

1.2.2. Proceso de diseño utilizando la metodología BIM

Se basa en la creación de objetos paramétricos que a través de la interoperabilidad de softwares generan un diseño que acompaña al proyecto durante su ciclo de vida, en conjunto ofrecen muchos beneficios en las fases de diseño, se puede describir en 3 puntos. (Eastman, 2008)

1.2.2.1. Diseño conceptual

Es la concepción del diseño que a partir de una idea crea las bases de construcción para el diseño a detalle pueda ser desarrollado en las diversas etapas consolidando su geometría, tipología, condiciones ambientales y condiciones locales. Esta es la parte más creativa del proceso de diseño. Se han desarrollado aplicaciones que apoyan en gran medida a este diseño conceptual ya que permiten visualizar en un entorno virtual diseños aproximados que son el preámbulo del diseño final.

1.2.2.2. BIM para el análisis y diseño

Se denomina análisis a las operaciones realizadas para medir las interacciones de algún o algunos parámetros físicos que se puedan esperar de la construcción real. Estos análisis son llevados a cabo por medio de modelos que cumplen con datos técnicos específicos de entrada. En esta etapa, BIM se centra en la colaboración adecuada de equipos multidisciplinarios que son parte del proceso de diseño.

1.2.2.3. Desarrollo de la información de construcción

Se refiere a la generación de los documentos de construcción a partir del modelo de construcción final que integra todas las especialidades; que aborda la integración entre diseño (planificación) y construcción (ejecución).

1.3. BIM estructural

El BIM estructural tiene la particularidad de poseer la información necesaria para el cálculo estructural a través de la interoperabilidad. Se resume como la aplicación de la metodología BIM al ciclo de vida del proyecto en la especialidad de estructuras.

1.3.1. Modelo BIM estructural

Modelo BIM que contiene la información necesaria para realizar análisis y diseño de cualquier tipo de estructura. Esta información incluye las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, así como las cargas y parámetros de

diseño utilizados según los requerimientos de las normativas o reglamentos propios de cada país.

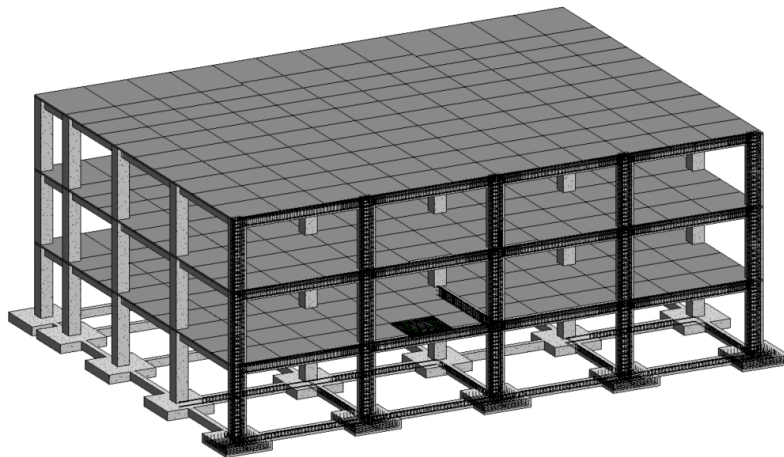
1.3.2. Herramienta S-BIM

Son las herramientas digitales específicas que ayudan a trabajar un modelo estructural BIM, que abarcan desde la conceptualización de la estructura, el análisis y diseño hasta la extracción de documentación.

1.3.3. Herramientas EF

Son las herramientas digitales que utilizan el método por elementos finitos para efectuar el análisis estructural de una construcción. Si bien el desarrollo tecnológico permite tener diseños más precisos en esta herramienta es muy importante el buen criterio y uso de las normas de la persona a cargo del diseño estructural.

Figura 7. **Modelo BIM Estructural**



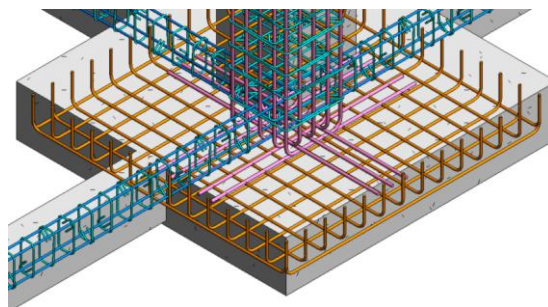
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

1.3.4. Coordinación de diseño estructural

En el proceso de diseño estructural se consideran revisiones y reanálisis que consumen tiempo considerable. La mayoría de tiempo perdido se debe a cambios arquitectónicos; sin embargo, trabajar de manera integrada, coordinada y colaborativa entre varias disciplinas de un proyecto es una manera más útil que permite guardar datos de objetos y facilita su acceso en una base de datos. Esto permite que los diseños estructurales y otros procesos sean eficientes con el uso de tecnología paramétrica. (Eastman, 1999)

El modelado de construcción virtual permite contemplar los aspectos arquitectónicos y estructurales de todo el equipo de desarrollo lo que permite tomar mejores decisiones basadas en la geometría coordinada, este modelo puede ser utilizado para facilitar el proceso constructivo de la obra. La coordinación por medio de la metodología BIM requiere que los involucrados estén conscientes de la importancia de un buen modelado, la información puede ser compartida a través de diversas plataformas. El diseño se optimiza tras resolver los problemas durante la fase temprana de planificación.

Figura 8. Revisión de cambios e interferencias estructurales



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

1.4. Interoperabilidad

Los modelos de información virtual BIM contienen información y detalles muy variados lo que dificulta a una herramienta digital individual proveer los recursos necesarios para satisfacer los niveles de desarrollo. Por lo que es necesario el uso de interacción de herramientas, plataformas y medios BIM, de esto nace el concepto de interoperabilidad.

En cuanto a, Eastman (2008) explica que la interoperabilidad es la habilidad para transferir información entre distintas aplicaciones, lo cual orienta los flujos de trabajo y los automatiza.

Esto reduce el error proveniente de trasladar datos manuales entre los distintos softwares especializados, pudiendo centrarse en mayor medida a la solución de problemas presentes en el diseño.

Se puede definir también de manera más específica, la interoperabilidad entre softwares BIM, como el método donde se circunscribe el traslado de datos de una herramienta que se especializa en el análisis estructural a otra que se especializa en diseño estructural. También se puede indicar la interoperabilidad entre Herramienta y Plataforma, en este caso se refiere de una herramienta especializada en diseño estructural a una plataforma de modelado BIM. El grado más complejo se refiere a hablar de interoperabilidad Plataforma-Plataforma, es lo idóneo de la metodología, consiste en crear estándares de transferencia de información que no dependen de una plataforma individual. El formato que más se aproxima a logra este tipo de interoperabilidad es el de *Industry Foundation Classes* (IFC).

Para contextualizarlo como ejemplo la interoperabilidad Herramienta, Plataforma el hecho de transferir datos de nodos, barras, apoyos, cargas gravitacionales y dinámicas no se traducen de manera automatizada ya que requiere de la experiencia y la toma de decisiones del profesional desarrollador de esta fase. Por lo que existen herramientas muy adecuadas en la transferencia de datos, pero siempre debe ser verificada de manera interactiva por el especialista encargado de la fase requerida.

2. FLUJO DE TRABAJO BIM ESTRUCTURAL

2.1. Normas internacionales sobre metodología BIM

BIM es una metodología que se ha reconocido a nivel internacional como un proceso de digitalización para la revitalización en el desarrollo de construcción. Se han desarrollado múltiples series de estándares internacionales para este proceso, la serie ISO 19650 para las fases de desarrollo y operación, y la serie ISO 16757 para la estructura de datos de productos digitales son en las que se basan este documento. Estas normas se han adoptado en varios países, adaptando según las condiciones territoriales y normalizado en sus políticas nacionales.

2.1.1. ISO 19650

Es una serie de normas internacionales que definen los fundamentos para el uso y gestión de la información de proyectos de construcción de ingeniería civil y arquitectura durante su ciclo de vida, este conjunto de normas se agrupa en dos fases:

- Fase de desarrollo: diseño, construcción y servicio de activos construidos.
- Fase de operación: gestión de activos, operación y mantenimiento.

La serie EN ISO 19650 está compuesta por cinco normas, las primeras dos circunscritas en la fase de desarrollo y las restantes en la fase de operación, estas normas son las siguientes:

- ISO 19650-1. Define los principios recomendados para el proceso de desarrollo y gestión de información durante el ciclo de vida del proyecto.
- ISO 19650-2. Define la gestión y desarrollo de la información durante la fase de desarrollo.
- ISO 19650-3. Define los procesos de uso y gestión de la información durante la fase de operación.
- ISO 19650-4. Define el intercambio de información BIM durante las fases de desarrollo y operación. Esta norma se encuentra en elaboración.
- ISO 19650-5. Establece los requisitos de seguridad de la información.

El desarrollo del capítulo 4 del presente documento se basa en lo descrito por la EN ISO 19650-1.

2.1.1.1. ISO 19650-1

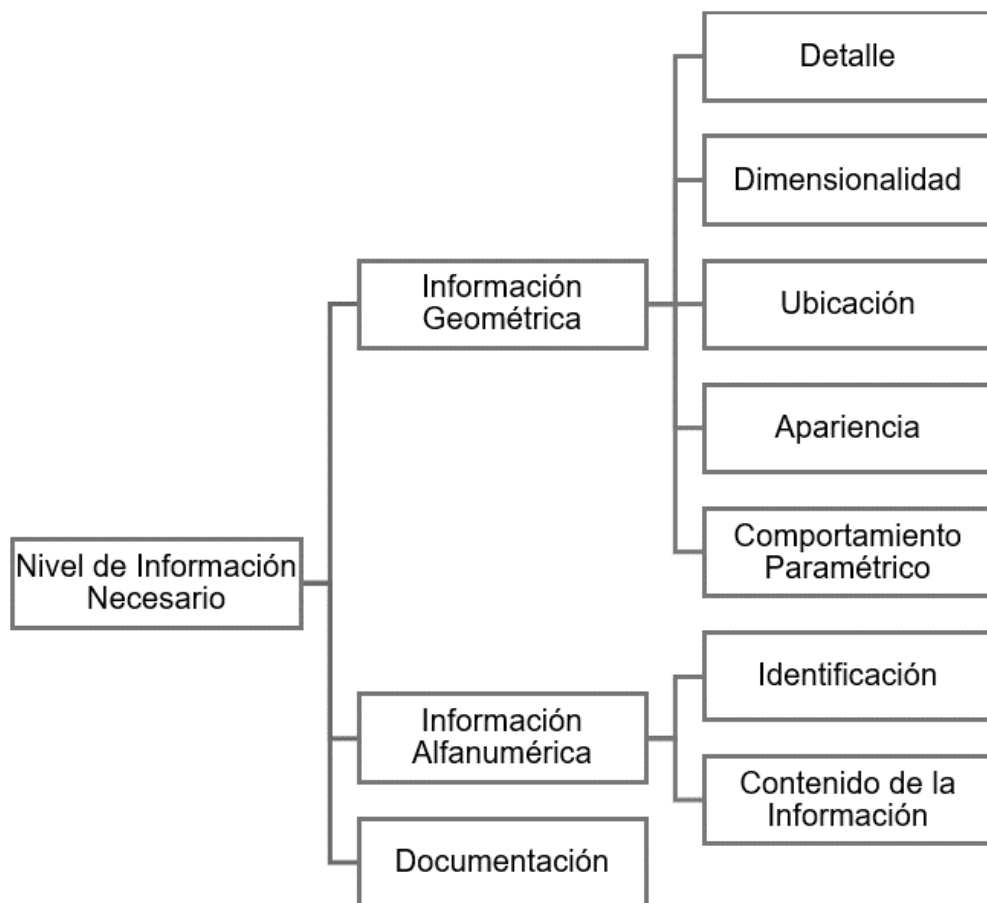
Establece los principios de la gestión de información según las razones del modelo a desarrollar donde pueden clasificarse como:

- OIR: requisitos de información de la organización (Objetivos)
- PIR: requisitos de Información del proyecto (Desarrollo)
- AIR: requisito de Información del activo (Operación)

- EIR: requisitos de Intercambio de información (Adjudicación)

El desarrollo requerido se establece según el nivel de información necesaria en el modelo, esta dependerá de los objetivos para los que se solicite aplicando la información geométrica, alfanumérica y documentación.

Figura 9. **Elementos del Nivel de Información Necesario**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

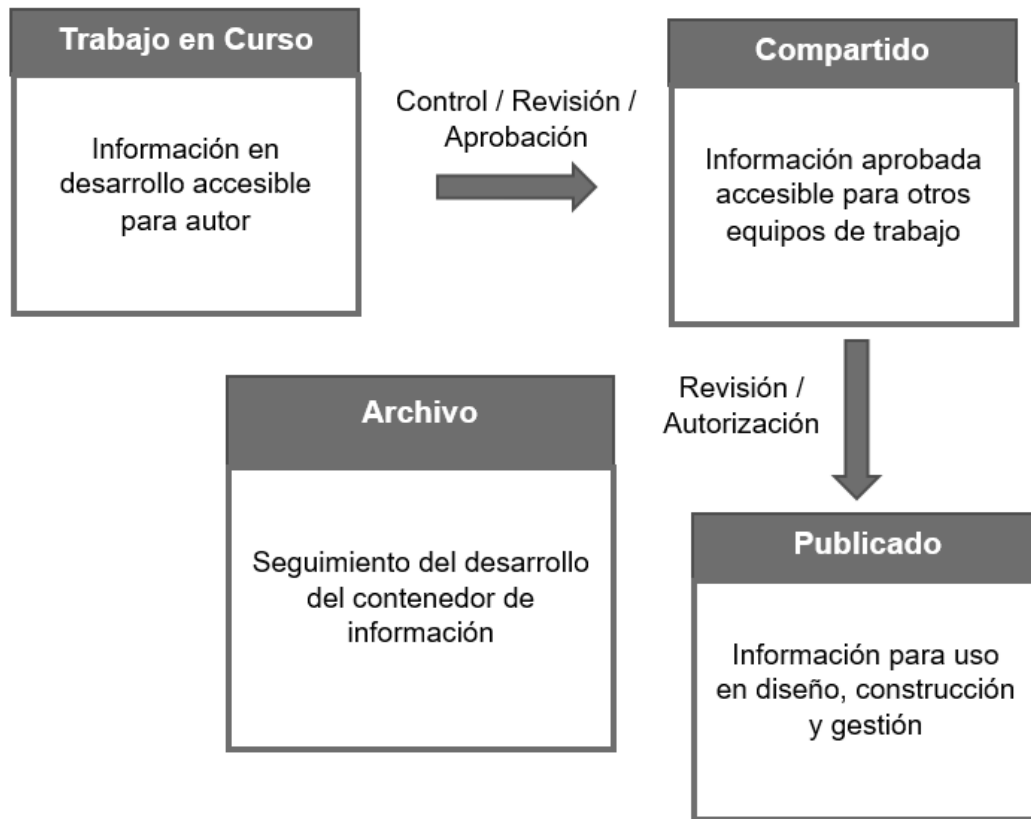
Esta información es necesaria respaldarla en contenedores de información, estos son sistemas de almacenamiento con información recuperable que se clasifican como:

- De información estructurada: modelos paramétricos, propiedades mecánicas de los materiales, modelos matemáticos, entre otros.
- De información no estructurada: documentación multimedia.

Para que el trabajo colaborativo sea efectivo se debe tener un entorno en común de datos (CDE), El CDE es un entorno de gestión de la información que se puede definir según su estado como:

- Trabajo en curso (WIP): información en desarrollo
- Compartido (S): información al alcance de grupos específicos
- Publicado (P): información autorizada para uso
- Archivo (ARC): información compartida, publicada y registrada

Figura 10. **Entorno común de datos**



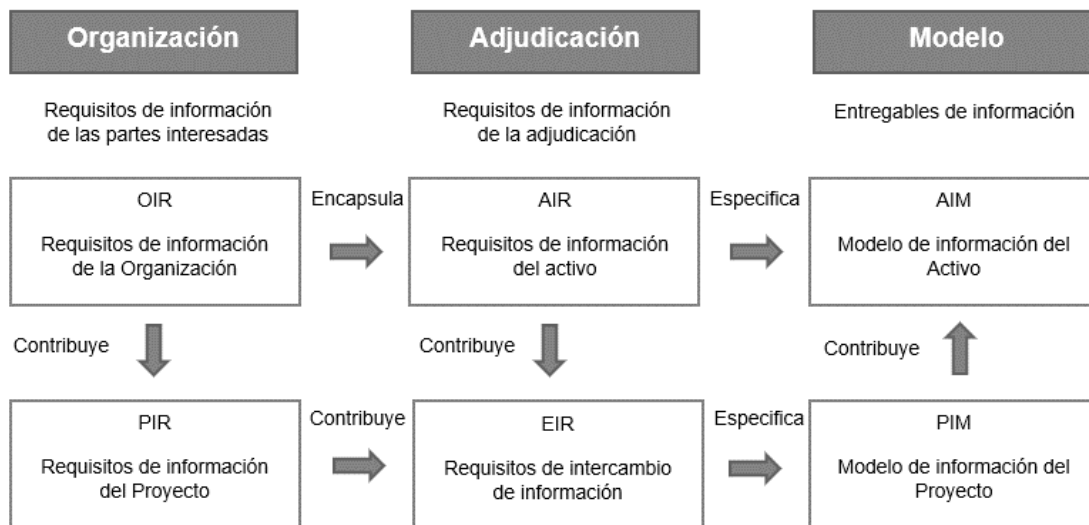
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

El objetivo del entorno en común es el de crear un flujo de trabajo colaborativo que permita tomar decisiones para la resolución de problemáticas que permita:

- Gestionar los estados de información
- Agrupar los contenedores de información
- Supervisar las versiones de los modelos
- Regular el acceso a la información

Por su parte, el conjunto de contenedores que permiten una toma de decisiones se le denomina modelo de información que simplifican los procesos de filtrado de información.

Figura 11. **Flujo de requisitos de información**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Tras la realización del entregable se debe avalar que se han alcanzado los objetivos propuestos en el modelo de información para iniciar la fase de operación.

2.1.2. ISO 16757

Es una serie de normas internacionales que establecen modelos virtuales con base en propiedades paramétricas, formas adaptables y su interoperabilidad con sistemas de gestión. Fomentando la creación de modelos inteligentes y no el sobre modelado para las funciones requeridas.

El propósito de esta serie es definir las estructuras de datos de catálogos electrónicos de productos de construcción. Con esto busca estandarizar aspectos técnicos en conjunto con la geometría de los elementos para facilitar la vinculación de datos a través de procesos BIM. Los estándares buscan establecer el nivel de detallado según las necesidades de requerimiento de la información para evitar el saturar datos que serán innecesarios que pueden genera modelos virtuales inmanejables.

Figura 12. Información requerida según nivel de desarrollo

Modelo	Modelo	Modelo	Modelo
Solo se establece la existencia de los elementos	Dimensiones y formas aproximadas de los elementos	Propiedades de los materiales en elementos	Modelo para construcción
Datos gráficos - Existencia de elementos - Ubicación aproximada	Datos gráficos - Existencia de elementos - Unidades, espesores y dimensionamientos aproximadas.	Datos gráficos - Materiales - Unidades, espesores y dimensionamientos - Capas y comportamiento	Datos gráficos - Elementos con especificaciones para construcción - Capas, comportamiento, materiales y dimensiones
Datos no gráficos - No necesarios	Datos no gráficos - Tipología estructural bien establecida.	Datos no gráficos - Parámetros físicos, químicos y mecánicos según normas de diseño - Modelos de capas y materiales.	Datos no gráficos - Todos los datos necesarios para la construcción que conforman la estructura.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

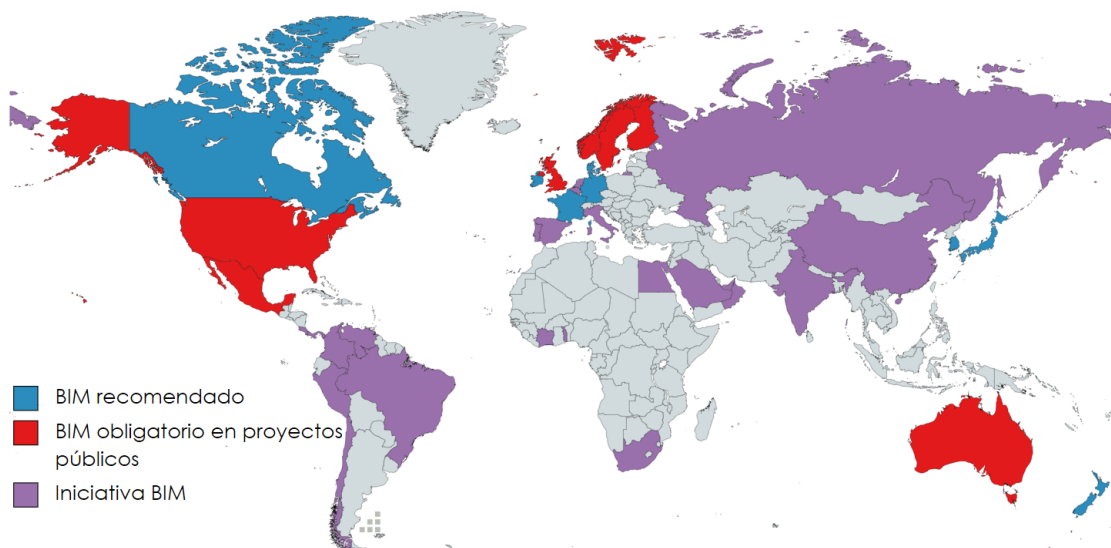
2.1.3. BIM en el mundo

La adopción de la metodología BIM surge del déficit del modelo productivo tradicional en el sector de la construcción. En el sector público las brechas entre

el presupuesto original y el costo total de una obra son significativos debido a la mala planificación que genera sobre costos en la fase de ejecución.

En la década de los 70's inician los conceptos BIM, en la década de los 90's toma un mayor impulso esta metodología en el sector privado debido a los avances tecnológicos. A raíz de los buenos resultados de su implementación en empresas, en el 2007 en Estados Unidos se crean las directrices y estándares BIM nacionales por la Administración de Servicios Generales (GSA). En Europa el Reino Unido crea un plan de implementación gubernamental de 5 años que inicio en el 2011 y se inicia la creación de las normas internacionales. Esta metodología está siendo adoptada por su alta eficiencia de recursos alrededor del mundo.

Figura 13. **BIM en el mundo**



Fuente: elaboración propia, realizado con MapChart.

2.2. Normas de diseño estructural en Guatemala

Las normas estructurales por lo general especifican cargas de diseño, esfuerzos permisibles para diferentes elementos estructurales, requerimientos de materiales, hipótesis y ecuaciones de diseño. En Guatemala las normas más utilizadas son las Normas de Seguridad Estructural NSE, pero también se utilizan normas internacionales como las del ACI, ASCE, ANSI/AISC, entre otras.

2.2.1. Normas de Seguridad Estructural NSE

- Las NSE 2018 revisadas en Julio del 2020 son las siguientes:
 - NSE 1 – Generalidades, administración de las normas y supervisión
 - NSE 2 – Demandas estructurales y condiciones de sitio
 - NSE 2.1 – Estudios geotécnicos
 - NSE 3 – Diseño estructural de edificaciones
 - NSE 5.1 – Presas de tamaño y altura limitados
 - NSE 5.2 – Puentes de tamaño y altura limitados
 - NSE 5.3 – Obras de retención
 - NSE 6 – Evaluación y rehabilitación de obras existentes
 - NSE 7.1 – Diseño de concreto reforzado
 - NSE 7.3 – Diseño de concreto prefabricado y preesforzado
 - NSE 7.4 – Diseño de mampostería reforzada
 - NSE 7.5 – Diseño de estructuras de acero
 - NSE 7.9 – Diseño de edificaciones de concreto reforzado con muros de ductilidad baja

Si bien existe una gran variedad de normas NSE que abordan diferentes temas, se utilizarán únicamente las que conciernen a las tipologías de concreto reforzado y estructuras metálicas, siendo estas las siguientes.

2.2.1.1. NSE 1 – Generalidades, administración de las normas y supervisión

En esta norma se definen los alcances y la limitación de compromisos del diseñador estructural, así como los deberes a las que se rige. Se establecen los niveles de protección sísmica (NPS) y la clasificación de las obras que deberá determinarse cuidadosamente y que influyen grandemente en los requisitos que deberán cumplirse en el diseño estructural. (AGIES, NSE 1, 2018)

2.2.1.2. NSE 2 – Demandas estructurales y condiciones de carga

Estipula las cargas mínimas, las bases para establecer la condición del terreno y los niveles mínimos de protección sísmica (NPS) que se deberán emplear en el diseño estructural de edificaciones. Define las distintas solicitaciones y otras condiciones que deberán formar parte del diseño estructural. (AGIES, NSE 2, 2018)

2.2.1.3. NSE 3 – Diseño estructural de edificaciones

Cubre la estructuración, la selección de los procedimientos de análisis y la obtención de los resultados del análisis estructural de edificaciones habitables, nuevas, de cualquier tamaño, con diversas tipologías y modalidades de estructuración, especialmente estructuras modulares y edificaciones de cajón. (AGIES, NSE 3, 2018)

2.2.1.4. NSE 7.1 – Diseño de concreto reforzado

Adopta a la ACI 318S-14 como Norma de Referencia; sus lineamientos, criterios, formulaciones y requisitos deberán utilizarse para diseñar estructuras de concreto reforzado. En este texto, especialmente en el capítulo 6, se estipulan las modificaciones, ampliaciones, restricciones u opciones alternas que aplican en el ámbito de aplicación de las NSE. (AGIES, NSE 7.1, 2018)

2.2.1.5. NSE 7.5 – Diseño de estructuras de acero

Esta norma deberá aplicarse para el diseño, fabricación y montaje de estructuras de acero y estructuras compuestas de acero y concreto reforzado que posean características similares a edificios, especialmente en lo referente a los sistemas de resistencia gravitacional y lateral. (AGIES, NSE 7.5, 2018)

2.2.2. Normas y Reglamentos de Seguridad Estructural Internacionales

Como se observó en la sección anterior; existen una gran variedad de normas aplicadas para la tipología de concreto reforzado y acero, sin embargo, algunas normas guatemaltecas solo son descriptivas, por lo cual es necesario utilizar normas internacionales sobre las que se basan, siendo las más importantes:

2.2.2.1. ACI 318-14

El reglamento para edificaciones de concreto estructural prescribe únicamente los requisitos mínimos para proteger la salud y la seguridad del público. Se puede exigir materiales o procedimientos constructivos mejores que los mínimos requeridos por el Reglamento para proteger al público en general; no obstante, no se permiten inferiores. (ACI 318-14, 2014)

2.2.2.2. ANSI/AISC 341-16

Este reglamento describe las provisiones sísmicas para edificios de acero estructural, la información que contiene fue consensuada por el comité de AISC mediante procedimientos y principios reconocidos de diseño y construcción. Su intención es brindar requisitos mínimos para diseño sin embargo no sustituye el criterio del diseñador estructura. (AISC 341-16, 2016)

2.2.2.3. ANSI/AISC 360-16

El reglamento de especificaciones para la construcción de acero ha sido desarrollado en forma consensuada mediante procedimientos acreditados por ANSI, con tal de proporcionar una práctica uniforme en el diseño de edificaciones de pórtico de acero y otras estructuras. Su intención es proporcionar criterios de diseño en usos habituales, y no para problemas de baja frecuencia, los cuales tienden a ocurrir en todo el espectro del análisis estructural. (AISC 360-16, 2016)

2.3. Trabajo colaborativo

Eastman (2008) describe el trabajo colaborativo como el sistema de producción, distribución y consumo de bienes de información que se caracteriza

por acciones individuales descentralizadas, ejecutadas a través de medios ampliamente distribuidos y ajenos al mercado y a sus estrategias.

En cuanto a, Eseverri (2020) define que BIM es una metodología de trabajo colaborativo para la creación y gestión de un proyecto de construcción. Su objetivo es centralizar toda la información del proyecto en un modelo de información digital creado por todos sus agentes.

2.3.1. Trabajo cooperativo

Durante el ciclo de la vida de un proyecto, el intercambio de datos se gestiona a través de un entorno común: un espacio digital común abierto al que todos los miembros involucrados en el proyecto puedan tener acceso y compartir información del desarrollo del proyecto.

Para una descripción más dinámica de la organización para trabajo cooperativo, se utilizará el diagrama usado en BuildingSMART (2019). Para la estructura del entorno existen flujos descritos en los documentos de organización y digitalización de la información en obras de edificaciones e ingeniería civil específicamente en ISO 1650-1:2018 y la ISO 1650-2:2018. (UNE, 2018)

Como menciona Eseverri (2020) en un entorno colaborativo también se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Las estrategias de actualización de los modelos
- Las estrategias de aprobación o autorización

- Las estrategias documentales y control de revisiones
- Las estrategias de entrega
- Las estrategias de seguridad

2.3.2. Herramientas de trabajo colaborativo

Existen diversas herramientas para el trabajo cooperativo en red, se describirán las dos más utilizadas:

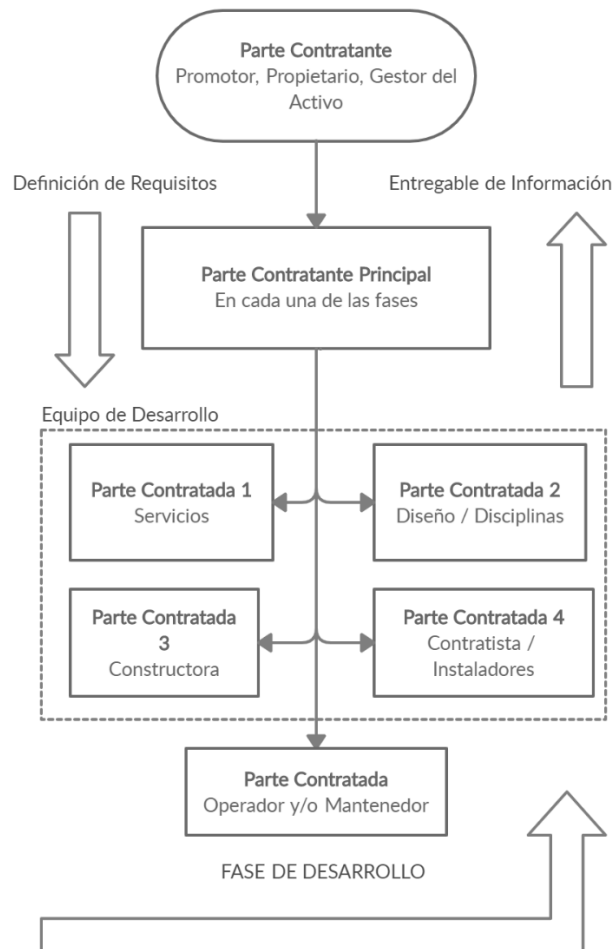
2.3.2.1. BIM 360 Design

Es la plataforma en la nube de Autodesk que permite la centralización de la información y facilita la colaboración multidisciplinaria de un proyecto. La plataforma fue diseñada para ayudar a la toma de decisiones durante el ciclo de vida del proyecto.

2.3.2.2. usBIM.platform

Es la plataforma en la nube de ACCA software en un entorno de intercambio de datos o CDE en el cual se adopta el estándar IFC para el intercambio de datos. Para el desarrollo de esta tesis se utilizará BIM 360 Design ya que la mayoría de los softwares a utilizar serán de la misma desarrolladora Autodesk.

Figura 14. **Relación entre diferentes involucrados en un proyecto BIM**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

2.4. Flujo de información estructural BIM

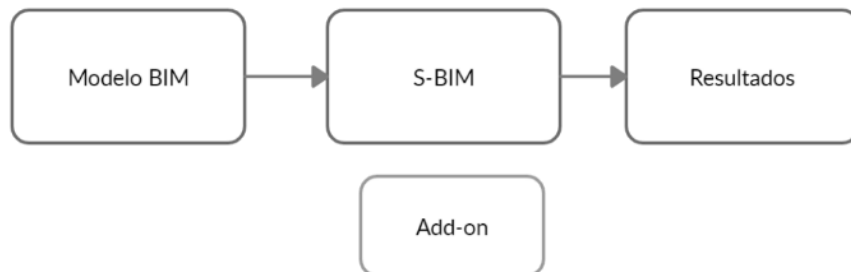
Una de las partes fundamentales para la elaboración de un proyecto de estructuras es el análisis. Para esto es necesario el concepto de la interoperabilidad descrito en la sección 1.4.

El uso de las herramientas EF en conjunto con diseños paramétricos o plataformas son la base del BIM estructural. Surge la necesidad de la utilización de interoperabilidad Plataforma-Herramienta o Herramienta-Herramienta en esta etapa de análisis estructural. Para su correcto entendimiento se describen los siguientes pasos. (Nielsen, 2010)

2.4.1. Add-on Tools

Son las herramientas que permita obtener resultados analíticos de manera directa del modelo BIM estructural por medio de herramientas propias de la aplicación.

Figura 15. **Diagrama de flujo para Add-on Tools**



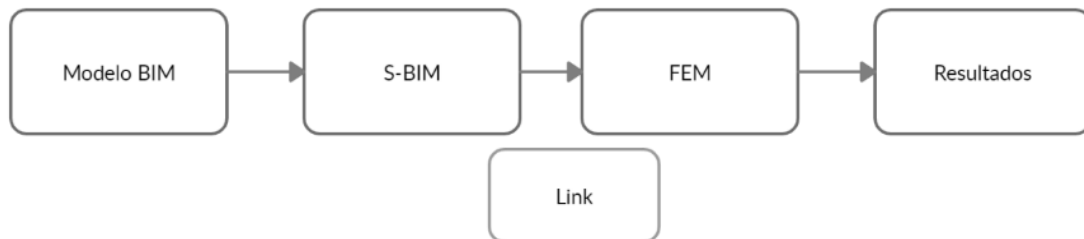
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

2.4.2. Direct Link

Se considera también como herramienta S-BIM, permite analizar y diseñar una estructura en una herramienta EF de manera directa. A través del proceso exportación/importación a través de una extensión o aplicación. Este tipo de

transferencia depende de los desarrolladores de software debido a que funcionan para herramientas EF específicas.

Figura 16. **Diagrama de flujo para *Direct Link***

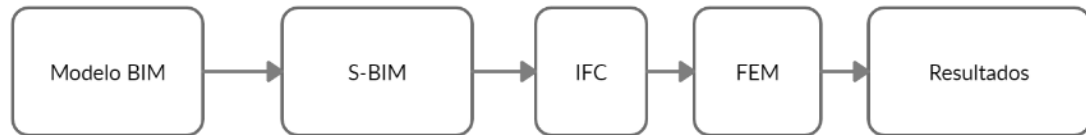


Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

2.4.3. *Indirect Link*

También es considerado una herramienta y se basa en una interoperabilidad general. Los procesos de importación/exportación, se realiza a través del formato estandarizado IFC, que puede interactuar tanto para las herramientas BIM como las herramientas EF, por lo cual se pueden utilizar distintos softwares sin importar su desarrollador u opciones de terceros. Esta es la opción que define la naturaleza de BIM para realizar cualquier tipo de interoperabilidad, sin embargo, como es un formato estándar presenta mayor cantidad de errores en la transferencia de información, pero la herramienta está en constante evolución.

Figura 17. Diagrama de flujo para *Indirect Link*



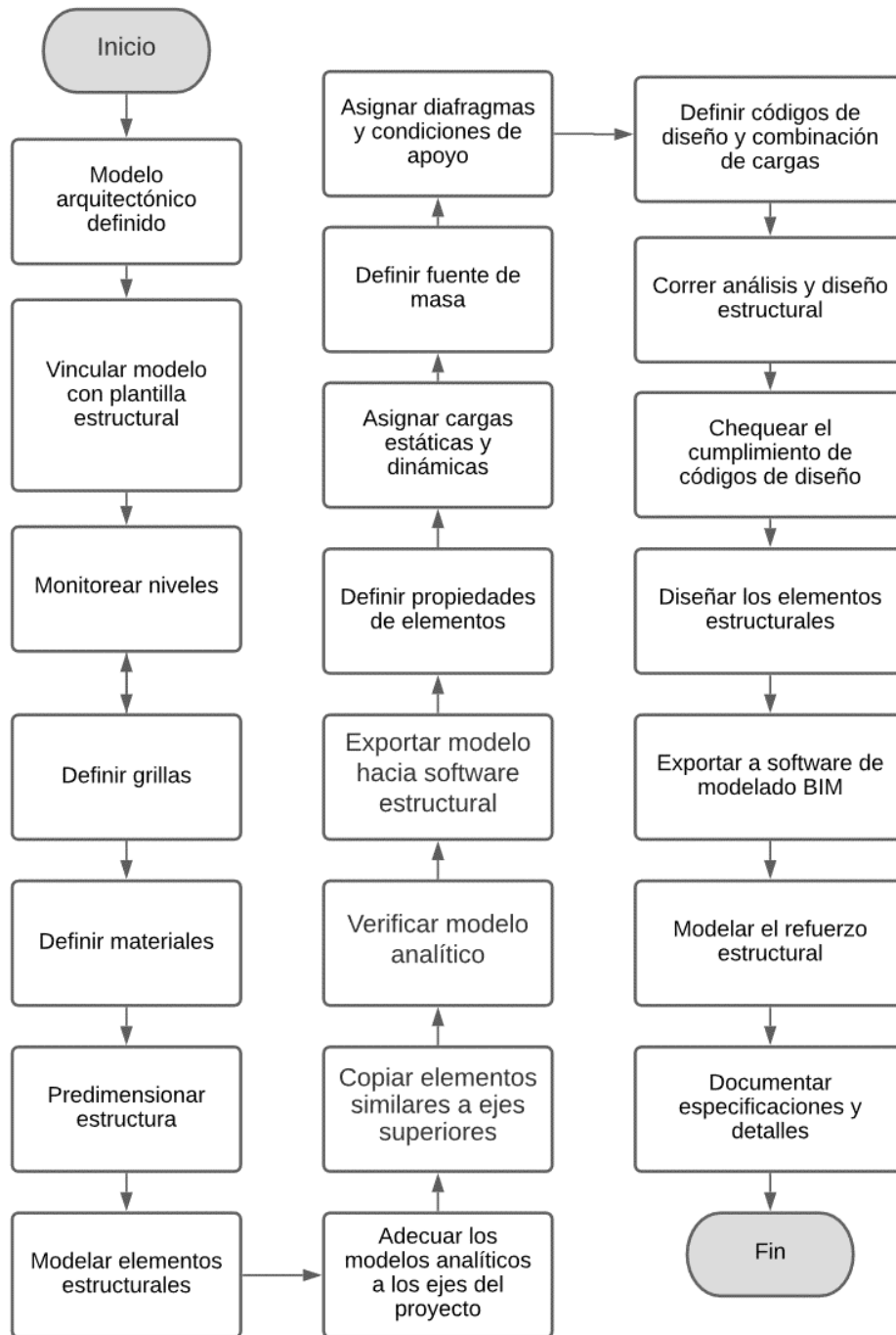
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Se observa a través de los diagramas la diferencia en la complejidad de cada herramienta, siendo *Add-on Tools* la manera más directa, y la herramienta que se proyectará a ser la más completa es *Indirect Link* por ser un lenguaje universal. Para el desarrollo de esta tesis se utilizó *Add-on Tools* ya que presenta la mejor relación de transferencia de datos para software BIM.

Los diagramas de flujo se describieron de manera general para la información estructural, se deben desglosar los pasos generales que rigen el proceso de interoperabilidad que parte desde la vinculación del modelo arquitectónico paramétrico, pasando por la creación de materiales asignándoles propiedades mecánicas, definiendo los códigos de diseño, combinaciones de carga, chequeando el análisis y diseño estructural hasta la documentación de los elementos estructurales.

El adecuado flujo de trabajo permite poseer modelos de información virtual funcionales, con datos necesarios para el análisis, diseño y supervisión estructural. Con base en lo descrito en las normativas mencionadas durante este capítulo y adaptándola a las normativas utilizadas en Guatemala se establece un flujo de trabajo a continuación:

Figura 18. Diagrama de flujo para BIM estructural



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

3. PARÁMETROS NORMATIVOS PARA EL ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL

3.1. Carga muerta

Las cargas muertas la constituyen los pesos permanentes que se encuentran en la edificación y se pueden agrupar de la siguiente manera:

3.1.1. Peso propio de la estructura

Consiste en el peso propio de los elementos estructurales y no estructurales anclados.

3.1.2. Cargas muertas superpuestas

Estas cargas las aportan los elementos no estructurales como los pisos, rellenos; fachadas, tabiques y cerramientos que se aplican como cargas linealmente distribuidas.

3.1.3. Cargas especiales

La constituyen las cargas cuyo peso o frecuencia vibratoria no están especificadas o presentan comportamientos variables, en estas cargas se encuentran las producidas por equipos pesados, equipos fijos que aportan masa en la dinámica de la estructura, cargas móviles que estarán de manera frecuente y establecidas en las instalaciones.

3.2. Carga viva

Son producidas por uso y ocupación en el ambiente, son transitorias y poseen una distribución variable, su intensidad está establecida por reglamentos, se pueden agrupar de la siguiente manera:

3.2.1. Cargas vivas especificadas

Este tipo de cargas se basan en experiencia empírica, incluyen las cargas de entepiso uniformemente distribuidas, las cargas concentradas en puntos desfavorables, escaleras, cargas que generan cargas de impacto y dinámicas.

3.2.2. Impacto

Las cargas generan impacto tras presentar movimientos continuos o soportar cargas que generan vibraciones como en el caso de los elevadores, apoyos de maquinarias movidas por motor, vigas puentes, tensores, parqueos, entre otros.

3.3. Carga de viento

Las acciones del viento provocan empuje y succión que afecta directamente a la fachadas, cubiertas y componentes ligeros o con grandes áreas perpendiculares al viento Esta carga se debe analizar como mínimo en dos direcciones horizontales perpendiculares e independientes.

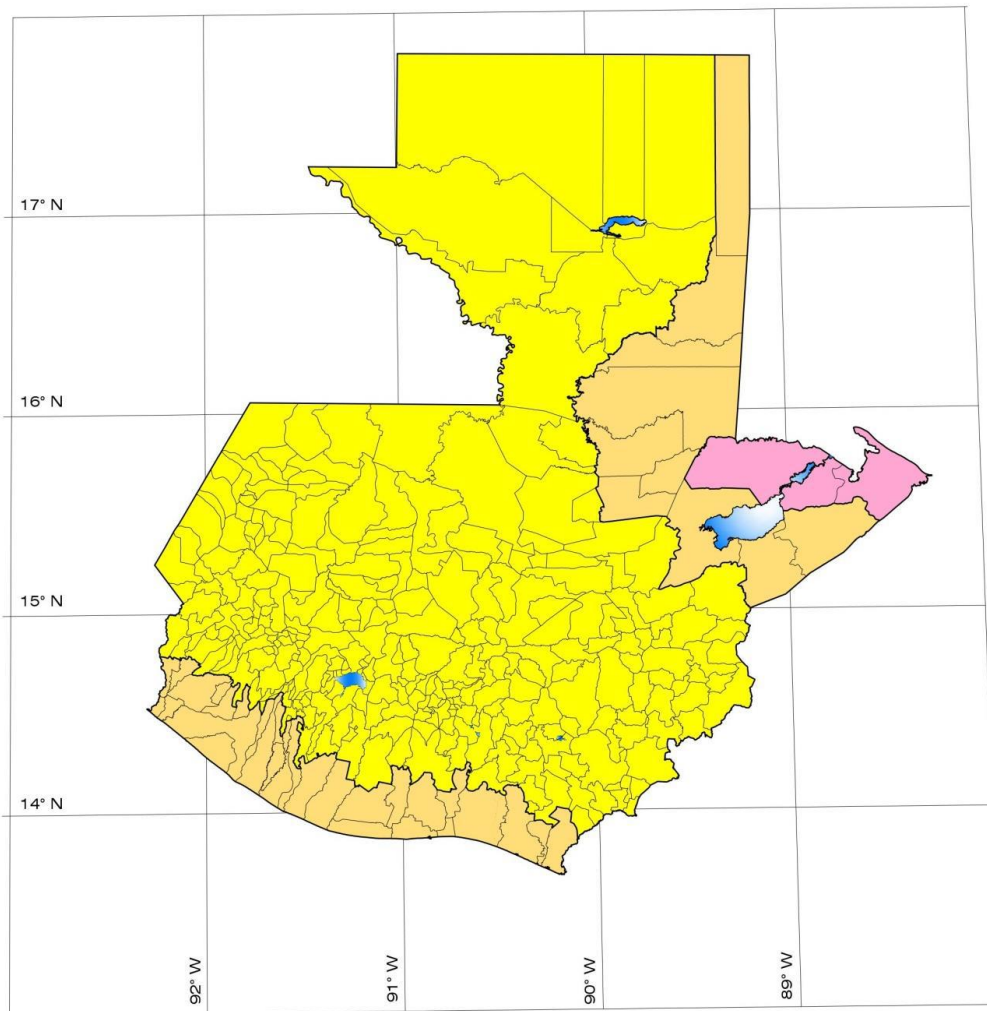
3.3.1. Velocidad básica del viento y exposición

Las exposiciones del viento se clasifican según las condiciones topográficas próximas a la edificación, se pueden clasificar de la siguiente manera.

- Exposición B – 80 % de dirección a barlovento se encuentra en zona urbana con construcciones de distintas alturas, bosques u otras irregularidades topográficas que se extienden a partir del sitio hasta 1,50 km.
- Exposición C – 80 % de dirección a barlovento se encuentra en áreas planas y abiertas, sin irregularidades topográficas que se extienden a partir del sitio hasta 0,75 km.
- Exposición D – 80 % de dirección a barlovento esta frente a un cuerpo de agua que se extiende a más de 1,50 km a la costa. También entra en esta clasificación si se encuentra a 0,50 km desde la costa o 10 veces la altura de la edificación.

Por otra parte, para el territorio guatemalteco se han realizado zonificaciones de acuerdo a la velocidad básica del viento esta velocidad es la de una ráfaga de 3,00 s a una altura de 10,00 m en un sitio con exposición C con una probabilidad de excedencia del 2 % anual.

Figura 19. Mapa de zonificación por viento de Guatemala



MAPA BASADO EN DOCUMENTO AGIES PE-01 2017

VELOCIDAD BASICA DEL VIENTO TERRITORIO DE GUATEMALA

Uso conforme AGIES NSE 2 - Seccion 5.2.2

VELOCIDAD BASICA 10m SOBRE EL SUELO

	120 kph
	110 kph
	100 kph

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

3.3.2. Presiones de viento para diseño

El cálculo de las presiones del viento para la estructura principal o complementos de la misma requiere conocer los coeficientes de exposición, altura, presión y velocidad básica de la manera siguiente:

$$P_z = C_{EZ} \cdot C_q \cdot q_s \cdot l_c \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- P_z = presión de diseño por viento, z metros sobre el suelo, en Kg/m²
- C_{EZ} = es el coeficiente de exposición y altura
- C_q = es el coeficiente de presión
- q_s = es la presión de remanso del viento
- l_c = es el factor de importancia. Se usará 1,15 para obras Categoría IV; se usará 1,00 para las otras categorías

La presión básica del viento se correlaciona directamente con la velocidad básica del viento mediante la siguiente ecuación:

$$q_s = 0,0048V_s^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- q_s = es la presión básica del viento
- V = es la velocidad básica del viento

El coeficiente de exposición C_{EZ} indica las presiones de diseño a lo alto de la edificación conforme a la tabla I.

Tabla I. **Coficiente C_{ez}**

Altura sobre el nivel promedio del terreno (m)	Exposición D	Exposición C	Exposición B
4,50	1,39	1,06	0,62
6,00	1,45	1,13	0,67
7,50	1,50	1,19	0,72
9,00	1,54	1,23	0,76
12,00	1,62	1,31	0,84
18,00	1,73	1,43	0,95
24,00	1,81	1,53	1,04
30,00	1,88	1,61	1,13
36,00	1,93	1,67	1,20
48,00	2,02	1,79	1,31
60,00	2,10	1,87	1,42
90,00	2,23	2,05	1,63
120,00	2,34	2,19	1,80

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

Los elementos casi horizontales como lo son las cubiertas livianas se diseñan para soportar fuerzas de succión vertical y clasifican como livianas si su peso es 1.6 veces menor a esta fuerza. Cuando existen fachadas abiertas o permeables se generan presiones interiores adicionales ya que el viento que penetra la estructura se suma a los empujes en el sentido del barlovento. Se considera fachada abierta si el área abierta es mayor al 75 % de la superficie total del área a barlovento entre soportes.

Tabla II. **Coefficiente de presión C_q**

	Descripción	Coefficiente C_q
Sistema resistente principal	PRESIÓN SOBRE SUPERFICIES VERTICALES	
	Superficie a barlovento	0,8 empuje
	Superficie a sotavento	0,5 succión
	TECHO PLANO	0,7 succión
	TECHO INCLINADO	
	Viento perpendicular a la cumbrera	
	Sector a sotavento	0,7 succión
	Sector a barlovento:	
	Pendiente $\leq 1:6$	0,7 succión
	$1:6 < \text{Pendiente} \leq 3:4$	0,9 succión – 0,3 empuje
	$3:4 < \text{Pendiente} \leq 1:1$	0,4 empuje
	Pendiente $> 1:1$	0,7 empuje
	Viento paralelo a la cumbrera	0,7 succión
Elementos y componentes que SI están en áreas de discontinuidad.	ELEMENTOS VERTICALES	
	Todos los casos	1,2 empuje
	Recintos cerrados y abiertos	1,2 succión
	Recintos permeables	1,6 succión
	ELEMENTOS INCLINADOS	
	Recintos cerrados	
	Pendiente $\leq 1:2$	1,3 succión
	$1:2 < \text{pendiente} \leq 1:1$	1,3 succión – 1,3 empuje
	Pendiente $> 1:1$	Como elemento vertical
	Recintos abiertos	
	Pendiente $\leq 1:2$	1,3 succión
	$1:2 < \text{pendiente} \leq 1:1$	1,3 succión – 1,3 empuje
	Pendiente $> 1:1$	Como elemento vertical
	Recintos permeables	
	Pendiente $\leq 1:6$	1,7 hacia afuera
	$1:6 < \text{pendiente} \leq 1:2$	1,6 succión – 1,8 empuje
	$1:2 < \text{pendiente} \leq 1:1$	1,7 succión – 1,7 empuje

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

3.4. Carga sísmica

El territorio de Guatemala es susceptible a sismos de diversas magnitudes, el objetivo primordial de la aplicación de las normativas es proteger la integridad física de los ocupantes de una estructura ante los efectos de la combinación de cargas gravitacionales y dinámicas.

El territorio de Guatemala se clasifica en zonas con un índice de sismicidad que varía desde $I_0=1$ a $I_0=4$, este índice representa el nivel de protección sísmica que necesita la estructura con el cual se selecciona el espectro sísmico de diseño y se describen en la tabla siguiente:

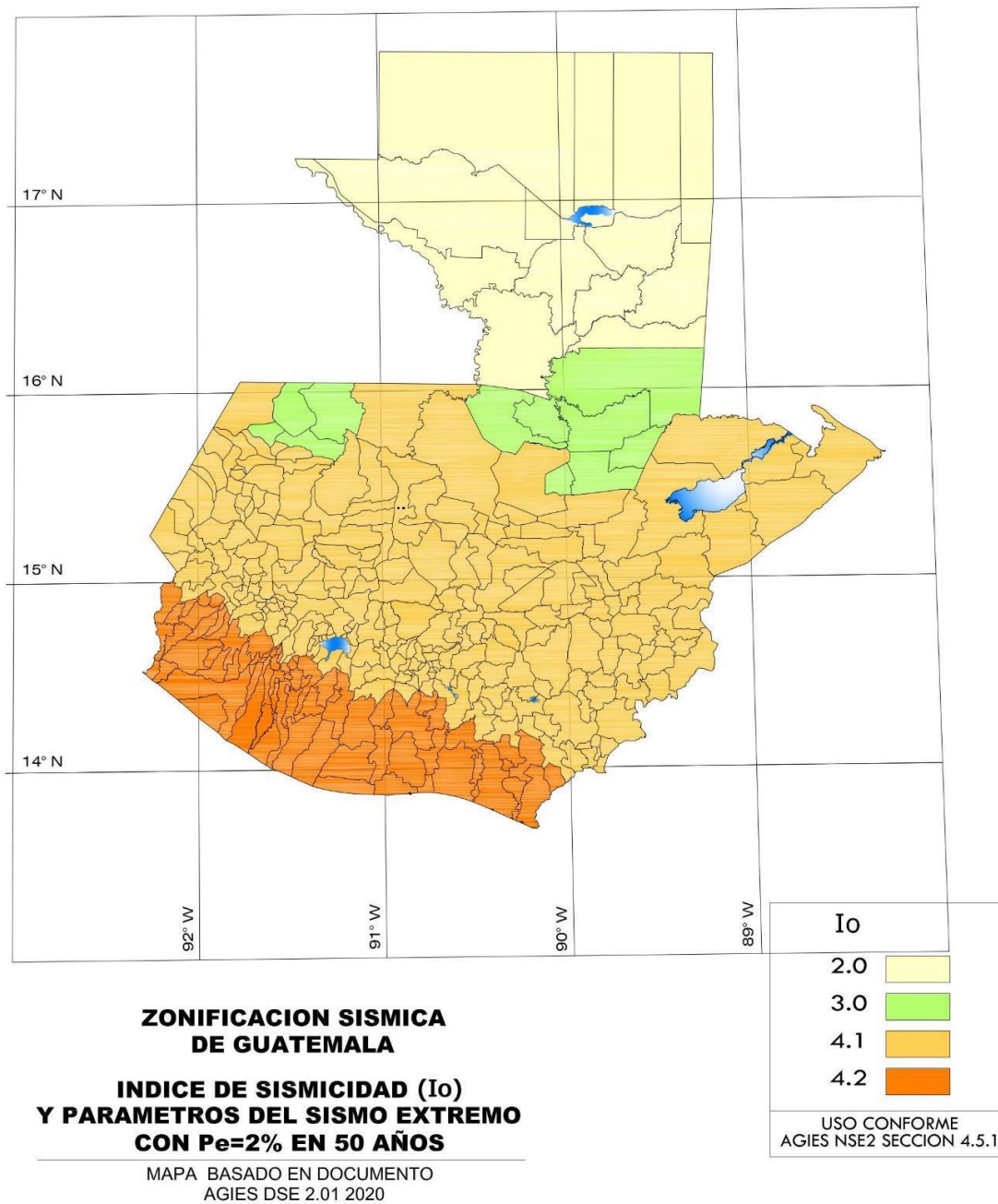
Tabla III. **Nivel de protección sísmica y probabilidad del sismo de diseño**

Índice de Sismicidad	Clase de obra			
	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
$I_0 = 4$	E	D	D	C
$I_0 = 3$	D	C	C	B
$I_0 = 2$	C	B	B	A
Probabilidad de exceder el sismo de diseño	5% en 50 años	5% en 50 años	10% en 50 años	Sismo mínimo

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

Los cinco niveles de protección: A, B, C, D y E, van de manera ascendente siendo el de mayor protección sísmica el nivel E. No se debe confundir esta clasificación con la clasificación de sitio, por su nomenclatura se clasifican desde la letra A hasta la F. Siendo AB perfiles rocosos, C y D perfiles firmes, E perfiles blandos y F perfiles complicados.

Figura 20. Mapa de zonificación sísmica de Guatemala



Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). Demandas estructurales y condiciones de sitio.

3.4.1. Espectro sísmico de respuesta

La ordenada espectral de periodo corto (0.20 s) S_{cr} y la ordenada espectral de período de 1 segundo S_{1r} son parámetros básicos para el espectro sísmico de respuesta. Estos valores están especificados para cada municipio, por lo que se extraen los valores del municipio de Jutiapa, Jutiapa y Guatemala, Guatemala.

Tabla IV. Amenaza sísmica para municipios

Municipio	Departamento	Io	Suelo Tipo B Jutiapa / Tipo D Guatemala		
			Scr	S1r	TL
Jutiapa	Jutiapa	4,10	1,43	0,52	2,14
Guatemala	Guatemala	4,10	1,43	0,88	3,26

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

Las ordenadas S_{cr} y S_{1r} deben ser ajustadas por la clase de sitio y por las intensidades incrementadas de vibración con las siguientes ecuaciones:

$$S_{cs} = S_{cr} \times F_a \times N_a \quad \text{Ecuación 3}$$

$$S_{1s} = S_{1r} \times F_v \times N_v \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

S_{cs} = ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto

S_{1s} = ordenada espectral correspondiente a períodos de vibración de 1 segundo

F_a = coeficiente de sitio para períodos de vibración cortos

F_v = coeficiente de sitio para períodos largos

N_a = proximidad sísmica para períodos de vibración corta

N_v = proximidad sísmica para períodos de vibración largos

Tras la actualización de las normativas de seguridad estructural en el año 2020 los coeficientes de sitio F_a y F_v para las clases de sitio, AB, C, D y E toman el valor de la constante 1, en las clase de sitio F se requiere una evaluación específica. Los valores de proximidad sísmica N_a y N_v para todos los casos siempre será la constante 1. Esto porque los valores de S_{cr} , S_{1r} y TL ya integran el ajuste por clase de sitio e intensidades incrementadas.

3.4.1.1. Período de vibración de transición

Para definir el espectro de diseño es necesario determinar los períodos de vibración de transición con las siguientes ecuaciones:

$$T_s = S_{1s}/S_{cs} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$T_0 = 0,20 T_s \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

T_s = período fundamental del suelo que separa los períodos cortos de los largos

T_0 = período que define el inicio de la meseta de períodos cortos del espectro

S_{cs} = ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto

S_{1s} = ordenada espectral correspondiente a períodos de vibración de 1 segundo

Estos períodos sirven como condicionantes para definir el comportamiento del espectro de diseño relacionándolos con el periodo de vibración T propio de la estructura a diseñar.

3.4.1.2. Fórmula empírica para período fundamental de vibración

El período empírico depende del sistema estructural y las características de su fachada, se obtiene a través de la ecuación siguiente:

$$T_a = k_T (h_n)^x \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- T_a = período fundamental de vibración
- h_n = altura total del edificio en metros
- k_T = factor de escala según tipología definido en tabla XII
- x = constante según tipología definido en tabla XII

Tabla V. Factores para período fundamental de vibración

Sistema estructural	Factores	
	K_t	α
Sistemas E2, E3, E4 o E5	0,049	0,75
Sistema E1 de concreto reforzado abiertos o con fachadas livianas	0,047	0,90
Sistema E1 de concreto reforzado con fachada rígida	0,047	0,85
Sistema E1 de acero que sean abiertos o con fachada liviana	0,072	0,80
Sistema E3 o E4 de acero rigidizado	0,072	0,075

Fuente: AGIES, NSE 3. (2018). *Diseño estructural de edificaciones*.

3.4.1.3. Coeficiente sísmico al límite de cedencia

El coeficiente se establece para cada dirección de análisis con los siguientes requerimientos:

$$C_s = \frac{S_a(T)}{R \cdot \beta_d} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$C_s \geq \frac{0,044 S_{cd} F_d}{\beta_d} \geq 1 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$F_d = \left[0,59 + \frac{4,77 S_{1d}}{S_{1d} T_{FR}} \right] \frac{S_a(T)}{R \cdot \beta_d} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

C_s = coeficiente sísmico al límite de cadencia

R = factor de reducción

$S_a(T)$ = demanda sísmica de diseño

- β_d = factor de amortiguamiento, para estructuras sin aislamiento en la base o amortiguamiento el valor será de 1
- T_F = período fundamental de vibración
- S_{cd} = ordenada espectral de período corto
- S_{1d} = ordenada espectral de período de 1 segundo

3.4.1.4. Probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño

El factor de escala K_d depende del tipo de obra siguiente: obras utilitarias con sismo mínimo, obras ordinarias con sismo ordinario, para estructuras importantes un sismo severo y para obras esenciales un sismo severo o extremo.

Tabla VI. **Factor K_d de acuerdo con el nivel de sismo**

Nivel de sismo	Factor K_d
Sismo ordinario — 10% probabilidad de ser excedido en 50 años	0,66
Sismo severo — 5% probabilidad de ser excedido en 50 años	0,80
Sismo extremo — 2% probabilidad de ser excedido en 50 años	1,00
Sismo mínimo — condición de excepción	0,55

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

Estos factores calibran los parámetros del espectro a través de las siguientes ecuaciones:

$$S_{cd} = K_d \cdot S_{cs} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$S_{1d} = K_d \cdot S_{1s} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

S_{cd} = ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto calibrada por escala de probabilidad de ocurrencia

S_{1d} = ordenada espectral correspondiente a períodos de vibración de 1 s calibrada por escala de probabilidad de ocurrencia

S_{cs} = ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto

S_{1s} = ordenada espectral correspondiente a períodos de vibración de 1 s

K_d = Factor de escala de probabilidad de ocurrencia

3.4.1.5. Espectros genéricos probables

Las ordenadas espectrales dependen del periodo de vibración natural de la edificación y los períodos de transición. Estos parámetros describen el comportamiento del sismo y poseen las siguientes condicionantes:

$$S_a(T) = S_{cd} \left[0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right] \quad \text{cuando } T < T_0 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$S_a(T) = S_{cd} \quad \text{cuando } T_0 \leq T \leq T_s \quad \text{Ecuación 14}$$

$$S_a(T) = \frac{S_{1d}}{T} \leq S_{cd} \quad \text{cuando } T_s < T < T_L \quad \text{Ecuación 15}$$

$$S_a(T) = \frac{S_{1d}}{(T^2)} \cdot T_L \quad \text{cuando } T_s \geq T_L \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

$S_a(T)$ = espectros genéricos probables

- S_{cd} = ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto calibrada por escala de probabilidad de ocurrencia
- S_{1d} = ordenada espectral correspondiente a períodos de vibración de 1 segundo calibrada por escala de probabilidad de ocurrencia
- T = período natural de vibración de la estructura
- T_s = período fundamental del suelo que separa los períodos cortos de los largos
- T_0 = período que define el inicio de la meseta de períodos cortos del espectro
- T_L = período de vibración donde el espectro se vuelve constante

3.4.1.6. Aceleración máxima del suelo

Cuando se requiere estimar una aceleración máxima del suelo con relación al sismo de diseño y su inicio en el periodo igual a 0 se calcula de la siguiente manera:

$$AMS_d = 0,40 S_{cd} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- AMS_d = espectros genéricos probables
- S_{cd} = ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto calibrada por escala de probabilidad de ocurrencia

3.4.1.7. Componente vertical del sismo de diseño

El valor del componente vertical del sismo de diseño S_{vd} es nominal y no es simultaneo con el componente horizontal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$S_{vd} = 0,20 S_{cd} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

S_{vd} = componente vertical del sismo de diseño

S_{cd} = ordenada espectral del sismo extremo en el sitio de interés para estructuras con periodo de vibración corto calibrada por escala de probabilidad de ocurrencia

3.5. Combinación de cargas

Para establecer las condiciones más desfavorables en el diseño estructural se realizan combinaciones, se utilizan dos tipos de combinaciones: 1. el método de resistencia y 2. combinaciones para dimensionar cimientos.

3.5.1. Combinación para el método de resistencia

El método de diseño por resistencia consiste en multiplicar las cargas por un factor de escala para producir una carga de diseño.

$$1,4 M \quad (\text{CR1}) \quad \text{Ecuación 19}$$

$$1,2 M + 1,6 V + 0,5 (V_t \text{ o } P_L \text{ o } A_R) \quad (\text{CR2}) \quad \text{Ecuación 20}$$

$$1,2 M + V + 1,6 (V_t \text{ o } P_L \text{ o } A_R) \quad (\text{CR3}) \quad \text{Ecuación 21}$$

$1,2 M + V + S_{vd} \pm S_{hd}$	(CR4)	Ecuación 22
$0,9 M - S_{vd} \pm S_{hd}$	(CR5)	Ecuación 23
$1,2 M + V + 1,3W + 0,5 (P_L \text{ o } V_t)$	(CR6)	Ecuación 24
$0,9 M \pm 1,3 W$	(CR7)	Ecuación 25

Donde:

M	= carga muerta
V	= carga viva
V_t	= carga viva de techo
P_L	= carga de lluvia
A_R	= carga de tefra volcánica
S_{vd}	= carga sísmica vertical
S_{hd}	= carga sísmica horizontal
W	= carga de viento

3.5.2. Combinación para dimensionar cimientos

Las combinaciones específicas para el suelo tienen la finalidad de que los cimientos cedan a flexión antes de que falle la masa de suelo por acciones de la zapata.

$M + V_p$	(CCS1)	Ecuación 26
$M + V + (V_t \text{ o } P_L \text{ o } A_R)$	(CCS2)	Ecuación 27
$M + V_p + 0,7 k_z S_v \pm 0,7 k_z S_h$	(CCS3)	Ecuación 28
$M \pm 0,7 k_z S_h$	(CCS4)	Ecuación 29
$M + V_p \pm W$	(CCS5)	Ecuación 30

$$M \pm W$$

(CCS6)

Ecuación 31

Donde:

M = carga muerta

V = carga viva

V_p = carga viva permanente

V_t = carga viva de techo

P_L = carga de lluvia

A_R = carga de tefra volcánica

S_v = carga sísmica vertical

S_h = carga sísmica horizontal

k_z = 1 para todos los suelos, 1,20 para suelos tipo C a F

W = carga de viento

3.6. Propiedades del sistema estructural

En el capítulo 4 se desarrolla el proceso de análisis y diseño de un edificio de oficinas de marcos simples de concreto y una nave industrial de estructuras metálicas por lo que se definirán sus propiedades respectivas.

3.6.1. Tipología estructural

Las estructuras se clasifican en cada sentido por las propiedades que dominan, en cada una de las clasificaciones difieren características como el límite de altura máxima, deriva permisible, factores de reducción, entre otros. Los marcos simples de concreto y las naves industriales se clasifican en los siguientes grupos:

3.6.1.1. Sistema E-1

Se le denomina sistema de marcos simples, los marcos se componen de columnas y vigas integrados por un diagrama de piso, estos elementos resisten las cargas verticales y horizontales. Esta tipología puede ser analizado y diseñado por ductilidad alta, media o baja.

3.6.1.2. Sistema E-3

Conocido como estructuras combinadas, consiste en un sistema de marcos y muros estructurales o marcos de acero con tramos arriostrados, todo conectado con losas que actúan como diafragmas. Esta tipología puede ser analizado y diseñado por ductilidad alta o baja.

3.6.2. Parámetros para modelar respuesta sísmica

Los factores sísmicos tienen como objetivo brindar una respuesta estructural que satisfaga los niveles de desempeño, estos factores dependerán de la tipología estructural y se definen para los sistemas que se desarrollan en el capítulo 4 en la tabla VII.

Tabla VII. **Coeficientes y factores para sistemas sismo-resistentes**

	Sistema estructural	Norma	R	ΩR	Cd	Nivel de protección			
						B	C	D	E
E-1	Ductilidad intermedia DI								
	De concreto reforzado	NSE 7.1	5,00	3,00	4,50	33,00	20,00	12,00	NP
	De acero estructural	NSE 7.5	4,50	3,00	4,00	55,00	33,00	20,00	NP
E1	Ductilidad Baja DB								
	Marcos DB	AISC 341-16 CAP E	3,50	3,00	3,00	NL	NL	20,00	NP
E3	Ductilidad alta AD								
	Riostras Concéntricas AD	AISC 341-16 CAP F	6,00	2,00	5,00	NL	NL	50,00	50,00

Fuente: AGIES, NSE 3. (2018). *Diseño estructural de edificaciones*.

Donde:

R = factor de modificación de respuesta sísmica

ΩR = factor de incremento de resistencia

Cd = factor de incremento del desplazamiento

NL = sin límite de altura

NP = no permitido

Debido a efectos geométricos o de respuesta estructural existen dos grupos de irregularidades, los cuales se definen en la tabla VIII y XIV.

Tabla VIII. Irregularidad en planta

Tipo de irregularidad	Descripción	Nivel de Protección al que aplica	referencia
H1-A	Irregularidad torsional: Existe irregularidad torsional cuando la deriva máxima del nivel en un extremo de la estructura, incluyendo la torsión accidental, es mayor a 1.20 veces el promedio de las derivas en ambos extremos de la estructura, en la dirección de análisis.	B, C, D, E	incrementar en 25% las fuerzas y esfuerzos de diseño de las conexiones
		C, D, E	análisis dinámico
H1-B	Irregularidad torsional extrema: Existe irregularidad torsional extrema cuando la deriva máxima del nivel en un extremo de la estructura, incluyendo la torsión accidental, es mayor a 1.40 veces el promedio de las derivas en ambos extremos de la estructura, en la dirección de análisis.	E	irregularidad prohibida
		B, C, D	incrementar en 25% las fuerzas y esfuerzos de diseño de las conexiones
		C, D, E	análisis dinámico
H2	Esquina entrante: Esta irregularidad existe cuando ambas proyecciones de la estructura en planta poseen un reentrante mayor al 15% de la dimensión.	C, D, E	análisis dinámico y requiere que la estructura se modele tridimensional cuando la estructura exceda 3 pisos
H3	Diafragma discontinuo: el diafragma tiene menos del 50% del área del rectángulo que circunscribe al piso o si cambia rigidez en más de 50% de un piso al siguiente	C, D, E	análisis dinámico
		B	incrementar en 25% las fuerzas y esfuerzos de diseño de las conexiones
		C, D, E	
H4	Desfase lateral: Existe cuando se produce una discontinuidad en la ruta de la carga del sistema de resistencia lateral, tal que al menos uno de sus elementos verticales se encuentra desfasados del plano de los elementos de los niveles superiores o inferiores.	B, C, D, E	requiere aplicar Ω_r
H5	Sistema no-paralelo: Esta irregularidad se presenta cuando los elementos verticales del sistema de resistencia lateral no son paralelos a los ejes principales de la estructura.	B, C, D, E	requiere que la estructura se modele tridimensional cuando la estructura exceda 3 pisos

Fuente: AGIES, NSE 3. (2018). *Diseño estructural de edificaciones*.

Tabla IX. Irregularidad vertical

Tipo de irregularidad	Descripción	Nivel de Protección al que aplica	referencia
V1 A	Piso flexible: La rigidez lateral de un piso es menos que 70% de la rigidez del piso de encima; o menos que 80% de la rigidez promedio de los 3 pisos encima.	D, E	el factor p será 1,05
V1 B	Piso flexible – caso extremo: La rigidez lateral de un piso es menos que 60% de la rigidez del piso de encima; o menos que 70% de la rigidez promedio de los 3 pisos encima.	D E	el factor p será 1,10 irregularidad prohibida
V2	Masa irregular verticalmente: el peso sísmico de un piso es más del 150% del peso sísmico de cualquier piso adyacente. No necesita considerarse un techo que es más liviano que su piso inferior.	C, D, E	Si aplica V1 A o V1 B el factor p' se multiplicará por 1,05
V3	Geometría vertical escalonada: Esta condición existe cuando la dimensión horizontal del sistema de resistencia lateral en cualquier nivel es un 130% de la dimensión horizontal de un nivel adyacente.	C, D, E	el factor p será 1,05
V4	Discontinuidad en el plano vertical: Existe cuando uno de los sistemas sismo-resistentes verticales sufre un desfase o reducción en su propio plano que resulta en demandas de volteo en los elementos estructurales que lo soportan.	B, C, D, E	requiere aplicar Ω_R
V5	Condiciones de potencial debilidad: Existe cuando un muro o tramo arriostrado superior se interrumpe y queda soportado en columnas	D,E	requiere aplicar Ω_R
V6	Discontinuidad en la resistencia lateral: Piso débil Existe cuando la resistencia lateral de un nivel es menor al 80% de la del nivel superior. La resistencia lateral del nivel es la resistencia lateral total de todos los elementos del sistema de resistencia lateral que resisten el cortante del nivel en la dirección en consideración.	C,D,E	el factor p' ya acumulado se multiplicará por 1,10
V7	Discontinuidad en la resistencia lateral: Piso extremadamente débil Existe cuando la resistencia lateral de un nivel es menor al 65% de la del nivel superior. La resistencia lateral del nivel, es la resistencia lateral total de todos los elementos del sistema de resistencia lateral que resisten el cortante del nivel en la dirección en consideración.	C,D,E	irregularidad prohibida

Fuente: AGIES, NSE 3. (2018). *Diseño estructural de edificaciones*.

3.6.2.1. Derivas tolerables

Al movimiento total de la estructura se le denomina desplazamiento absoluto para fines de tolerancia se deben hacer chequeos de desplazamientos relativos los cuales se les llaman derivas, según la tipología y la clasificación de obra las tolerancias son las siguientes:

Tabla X. Derivas últimas Δ_u máxima tolerable

Estructura	Clasificación de obra		
	Categoría II	Categoría III	Categoría IV
Mampostería Reforzada	0,007h _p	0,007h _p	0,007h _p
Concreto Reforzado con muros de baja ductilidad	0,010h _p	0,010h _p	0,010h _p
Edificaciones en general	0,020h _p	0,020h _p	0,015h _p
h _p es la altura del piso para el que se calcula la deriva			

Fuente: AGIES, NSE 3. (2018). *Diseño estructural de edificaciones*.

Tabla XI. Derivas últimas Δ_u máxima tolerable para edificaciones de acero

Estructura	Clasificación de obra		
	Categoría II	Categoría III	Categoría IV
Estructuras, que no sean muros de corte de mampostería, cuatro pisos o menos por encima de la base, con paredes interiores, divisiones, techos y sistemas de muros exteriores que han sido diseñados para acomodar las derivas de piso.	0,025h _{sx}	0,020h _{sx}	0,015h _{sx}
Estructuras de muros de corte de mampostería en voladizo.	0,010h _{sx}	0,010h _{sx}	0,010h _{sx}
Otras estructuras de muros de corte de mampostería	0,007h _{sx}	0,007h _{sx}	0,007h _{sx}
Todas las demás estructuras.	0,020h _{sx}	0,015h _{sx}	0,010h _{sx}
h _{sx} es la altura del piso para el que se calcula la deriva			

Fuente: AGIES, NSE 7.5. (2018). *Diseño de edificaciones de acero*.

La deriva debe cumplir con la ecuación siguiente:

$$\Delta_{cP} \leq \frac{\Delta_u}{C_d} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

Δ_{cP} = deriva de piso causada por sismo

Δ_u = deriva última de piso

C_d = factor de incremento del desplazamiento

Tras el cumplimiento de irregularidades, derivas, torsión y chequeos de elementos estructurales se procede a realizar el diseño estructural final teniendo en cuenta la no interferencia con el diseño arquitecto y de instalaciones para establecer la gestión del proyecto a desarrollar.

3.6.2.2. Efecto P-Delta

Son efectos incrementados del segundo orden que afectan a las estructuras esbeltas, se verifica a través del coeficiente de estabilidad definido en la siguiente ecuación:

$$\theta = \frac{P_x \Delta_{cx}}{V_x h_{px}} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde:

θ = coeficiente de estabilidad

P_x = carga gravitacional total encima del nivel

V_x = cortante del piso

Δ_{cx} = deriva elástica al límite de cedencia

h_{px} = altura del entrepiso

El coeficiente de estabilidad debe satisfacer la siguiente ecuación:

$$\theta \leq \theta_{max} = \frac{0,5}{\beta_x C_d} \leq 0,25 \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

θ = coeficiente de estabilidad

θ_{max} = coeficiente de estabilidad máximo

β_x = Relación entre la demanda cortante y la capacidad cortante
tomando el valor conservador de 1,00

C_d = factor de incremento del desplazamiento

Si $\theta \leq 0,10$ no es necesario introducir efectos incrementados y si $\theta > 0,10$ se debe replantear la estructura.

4. ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL CON LA METODOLOGÍA BIM

4.1. Concreto reforzado

Se le denomina concreto armado a la composición de concreto y acero de refuerzo. Las propiedades mecánicas de la combinación de estos elementos permiten que el concreto absorba las cargas a compresión y el acero las cargas a tensión y flexión, dentro del sector de la construcción es muy utilizado, por su versatilidad permite edificar obras con tipologías tales como: sistema de marcos simples, combinados, cajón, dual, péndulo invertido, entre otros.

Se desarrolla el análisis y diseño estructural de una edificación de concreto de marcos simples de ductilidad intermedia para los elementos estructurales principales con base en las normas internacionales ISO 19650 e ISO 16757 para el flujo BIM estructural adaptando a los requerimientos de diseño de las normativas nacionales de seguridad estructural (NSE) y la norma ACI 318.

4.1.1. Diseño arquitectónico

La edificación es un sistema de marcos simples con fachada rígida, posee 12,00 m de altura repartidos en 3 niveles. El primer nivel es un parqueo, los niveles siguientes oficinas y la terraza es sin acceso. Las dimensiones a ejes de planta son de 30,00 m x 21,90 m con luces que varían desde los 3,15 m hasta los 7,50 m.

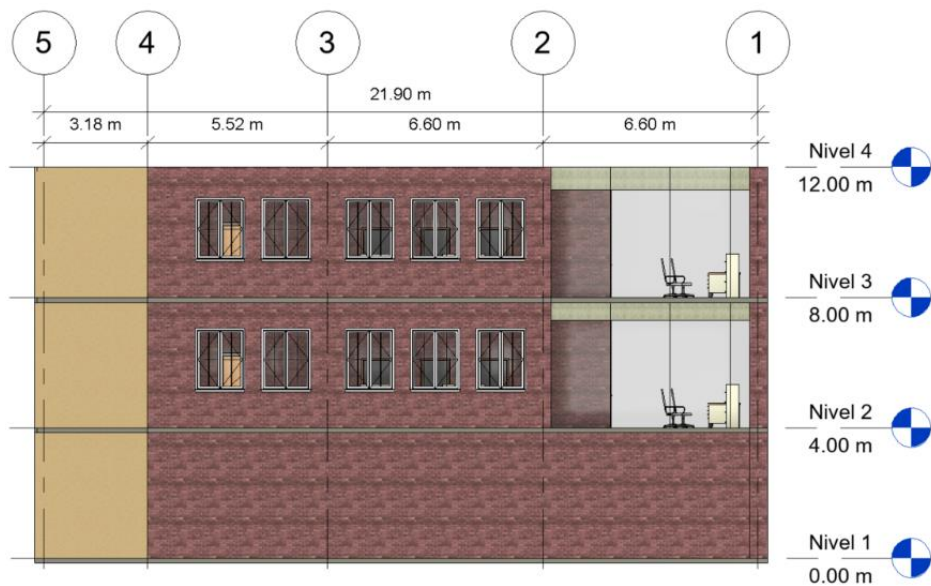
El diseño arquitectónico se muestra en las figuras siguientes:

Figura 21. **Isométrico estructural de oficinas**



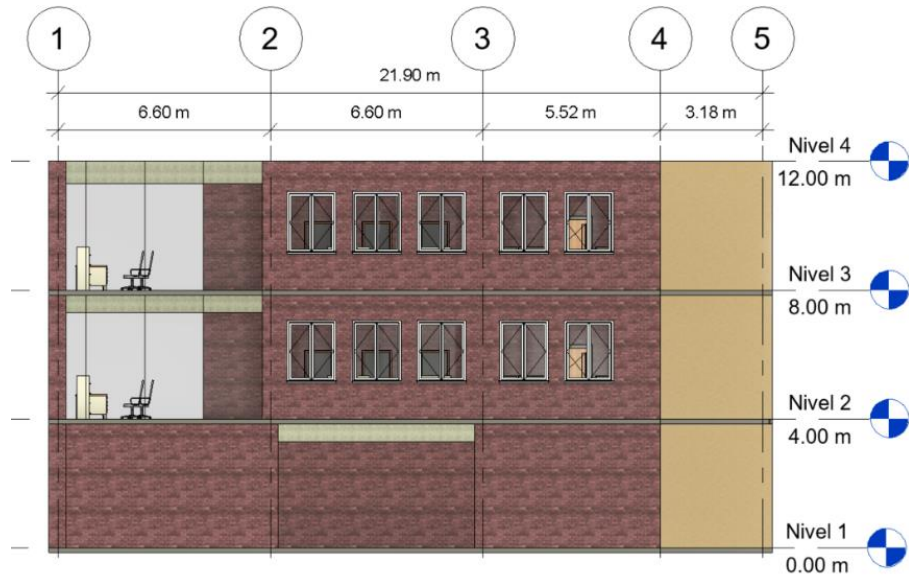
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 22. **Elevación oeste de estructura**



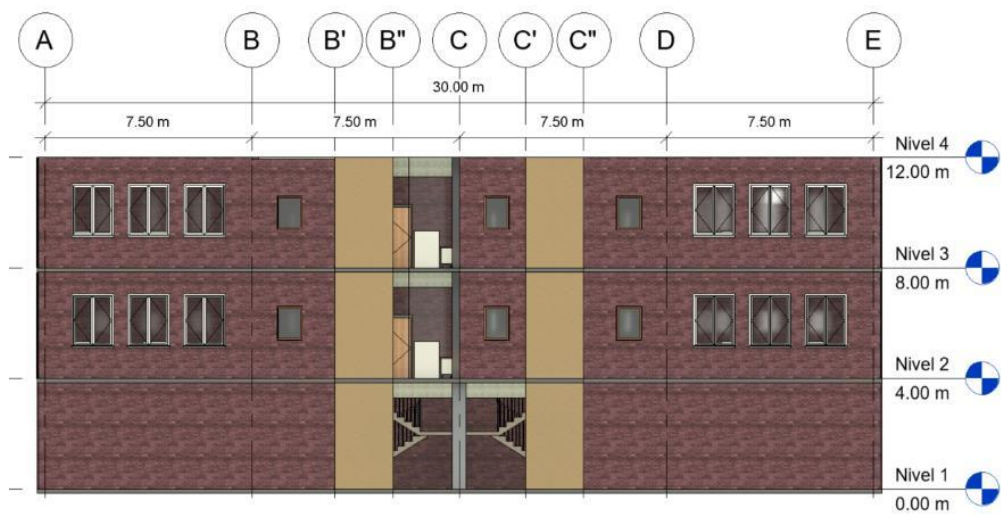
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 23. **Elevacion este de estructura**



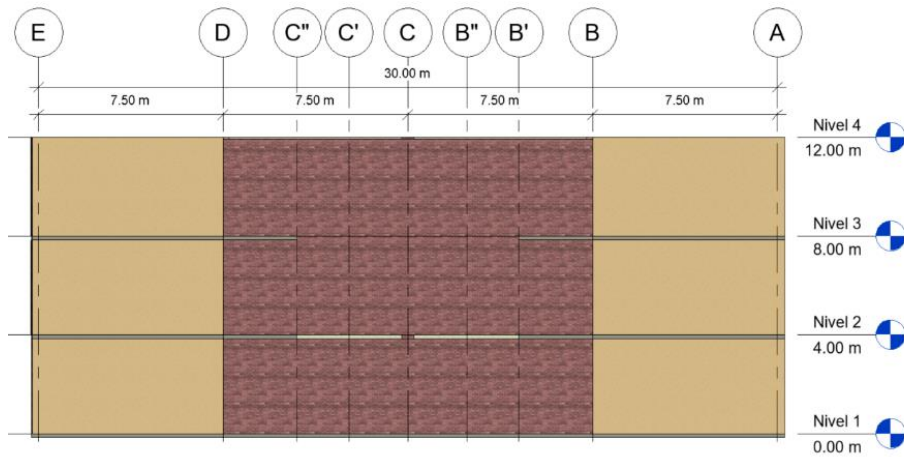
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 24. **Elevación sur de estructura**



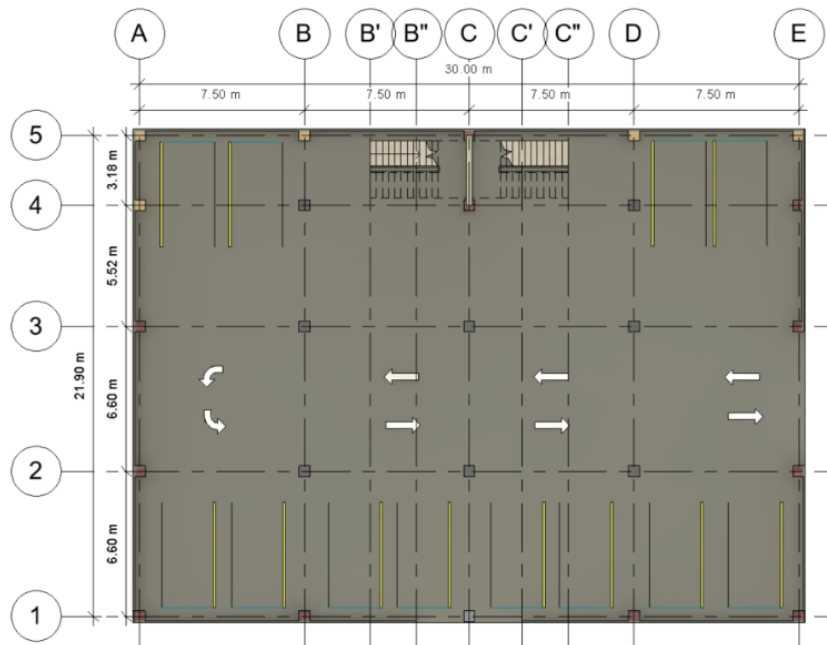
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 25. **Elevación norte de estructura**



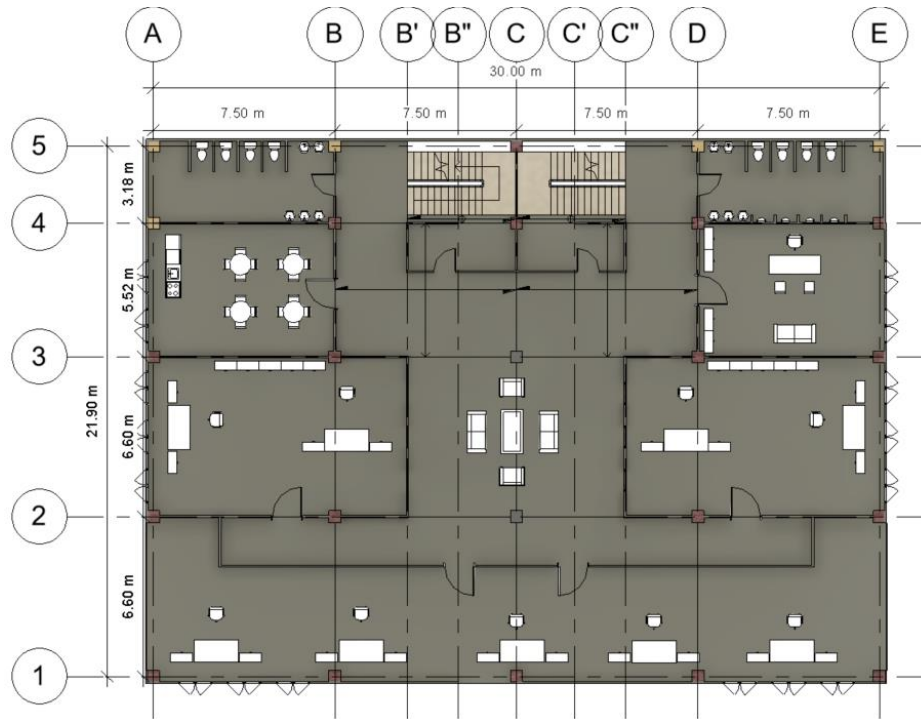
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 26. **Planta primer nivel de estructura**



Fuente: elaboración propia realizado con Revit 2021.

Figura 27. **Planta segundo y tercer nivel de estructura**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.2. Predimensionamiento estructural

Al definir el modelo arquitectónico es necesario que los elementos estructurales posean un dimensionamiento de partida, basándose en las dimensiones generales de la edificación y condiciones de carga a las que el elemento estructural este expuesto. El dimensionamiento varía en las diversas fases de análisis y diseño estructural en respuesta de las solicitaciones de las combinaciones de cargas o requerimientos de los códigos de diseño.

4.1.2.1. Cargas gravitacionales

Definidas conceptualmente en el capítulo 3, se dividen en dos grupos: 1. Las cargas muertas compuestas por pesos propios, cargas superpuestas y equipo anclado a la estructura. 2. Las cargas vivas específicas según ocupación o uso de la estructura. Las cargas a utilizar son las siguientes:

Tabla XII. Cargas gravitacionales y densidades

Descripción	Valor
Oficinas	250,00 kg/m ²
Pasillos y escaleras	300,00 kg/m ²
Áreas de cafetería	500,00 kg/m ²
Azotea sin acceso	100,00 kg/m ²
Postes de madera, 51 × 102	96,00 kg/m ²
Muros Tabiques de Mampostería	206,00 kg/m ²
Sobre carga	220,00 kg/m ²
Peso de concreto	2400,00 kg/m ³

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio.*

4.1.2.2. Columnas

El predimensionamiento de las columnas se obtiene a través de la relación de la resistencia del concreto y las cargas soportadas como se expresa en la siguiente ecuación:

$$P_u \leq 0,3A_g f'_c \text{ para } f'_c \leq 700 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

- P_u = fuerza axial mayorada
 A_g = Área bruta de la sección del concreto
 f'_c = Resistencia específica a la compresión del concreto

El predimensionamiento de las columnas al aplicar la ecuación 35 es el siguiente:

Tabla XIII. **Dimensión mínima de columna**

Columna	P_u (kgf)	f'_c(kgf/cm³)	A_g (cm²)	D (cm)
E-2	130254,01	280,00	1550,64	39,38
A-2	65127,01	280,00	775,32	27,84
A-1	32563,50	280,00	387,66	19,69

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

El capítulo ACI 318-14 capítulo 18 indica que para zonas sísmicas la dimensión mínima de una columna debe ser mayor o igual a 30,00 cm por lo que el valor inicial a utilizar será para una sección de 40,00 cm x 40,00 cm.

4.1.2.3. Vigas

El predimensionamiento de las vigas depende de las condiciones de apoyo y la luz libre entre columnas como se expresan en la siguiente tabla:

Tabla XIV. **Altura mínima de vigas no preesforzadas**

Condición de apoyo	Altura mínima, h
Simplemente apoyada	$l/16$
Con un extremo continuo	$l/18,5$
Ambos extremos continuos	$l/21$
En voladizo	$l/5$

Fuente: ACI 318-14. (2014). *American concrete institute*.

Donde:

h = altura mínima de viga

l = luz libre de la viga

Por lo que las dimensiones de las vigas según condiciones de apoyo son las siguientes:

Tabla XV. **Peralte mínimo de viga**

Condición de apoyo	Luz (m)	Peralte (m)	Luz (m)	Peralte (m)
Con un extremo continuo	7,50	0,41	6,60	0,36
Ambos extremos continuos	7,50	0,36	6,60	0,31

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

El ACI 318-14 capítulo 18 indica que para zonas sísmicas la base de la viga debe ser mayor o igual a 25,00 cm por lo que el valor inicial a utilizar para vigas principales será de 40 cm x 25 cm.

4.1.2.4. Losas

El espesor mínimo de losas en dos direcciones se define a través de la siguiente ecuación:

$$h = \frac{l_n(0,8 + \frac{f_y}{14000})}{36 + 9\beta} \quad \text{para } \alpha_{fm} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

- l_n = luz libre en dirección larga
- β = luz libre en dirección larga sobre luz libre en dirección corta
- f_y = resistencia especificada a la fluencia del refuerzo

Para una luz de 7,50 m con vigas intermedias y acero de refuerzo grado 60 se obtiene un espesor de losa de 6,71 cm.

El ACI 318-14 capítulo 8 indica que el espesor mínimo para losas de dos direcciones con vigas entre apoyos debe ser mayor o igual a 9,00 cm, por fines de facilidad constructiva se utilizara un espesor de losas de 10,00 cm.

4.1.2.5. Cimentaciones

Las dimensiones de la cimentación dependen de la capacidad soporte del suelo y chequeos como el punzonamiento por lo que en la fase posterior al diseño de elementos se interacciona según solicitaciones estructurales hasta obtener las dimensiones óptimas.

4.1.3. Interoperabilidad a plantilla estructural

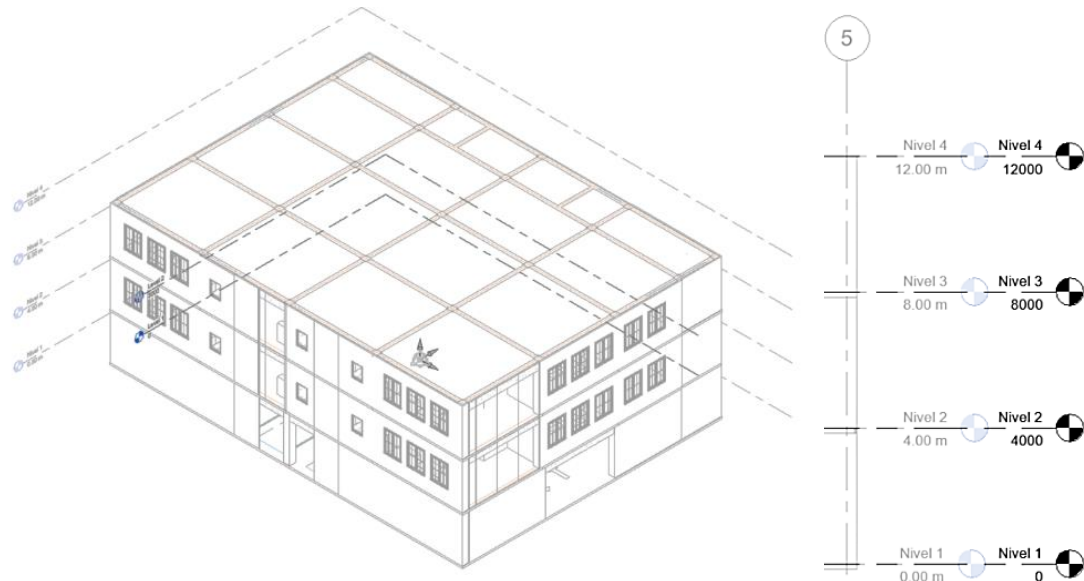
La finalidad de utilizar la metodología BIM es la de generar un modelo de información vinculado, en la cual diversos profesionales expertos en materias como la arquitectura, estructuras, instalaciones o cualquier particular con intereses en el proyecto a desarrollar pueda realizar un trabajo colaborativo que optimice el tiempo de diseño y reduzca errores de interferencia desde la fase de planificación.

4.1.3.1. Vinculación de proyecto arquitectónico

Vincular un proyecto arquitectónico a una plantilla estructural se basa en el siguiente orden lógico:

- Abrir un nuevo proyecto
- Seleccionar plantilla estructural
- Vincular el proyecto arquitectónico
- Posicionar archivo arquitectónico según coordenadas u origen
- Adecuar la visualización del proyecto arquitectónico
- Copiar y monitorear ejes y rejillas
- Generar planos asociados en la plantilla estructural

Figura 28. **Proyecto arquitectónico vinculado en plantilla estructural**



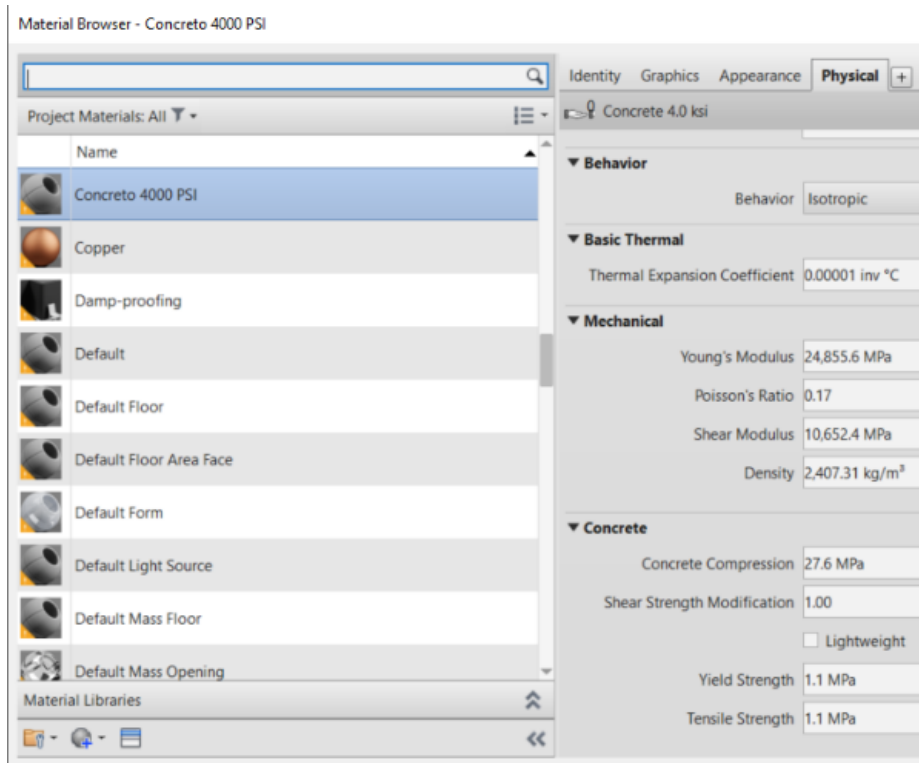
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.3.2. Creación de materiales

Al importar los elementos estructurales de una plantilla arquitectónica a una plantilla estructural de manera automática se generan las representaciones físicas y espaciales de los elementos. Para que el modelo estructural simule un comportamiento real se deben crear los elementos estructurales según medidas establecidas en el predimensionamiento y materiales con las propiedades mecánicas que se requieran, los materiales se crean de la siguiente manera:

- Gestionar > Materiales > Nuevo Materia > Propiedades Físicas de los materiales > Seleccionar material a utilizar > Aplicar.

Figura 29. Concreto 4,000 PSI



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

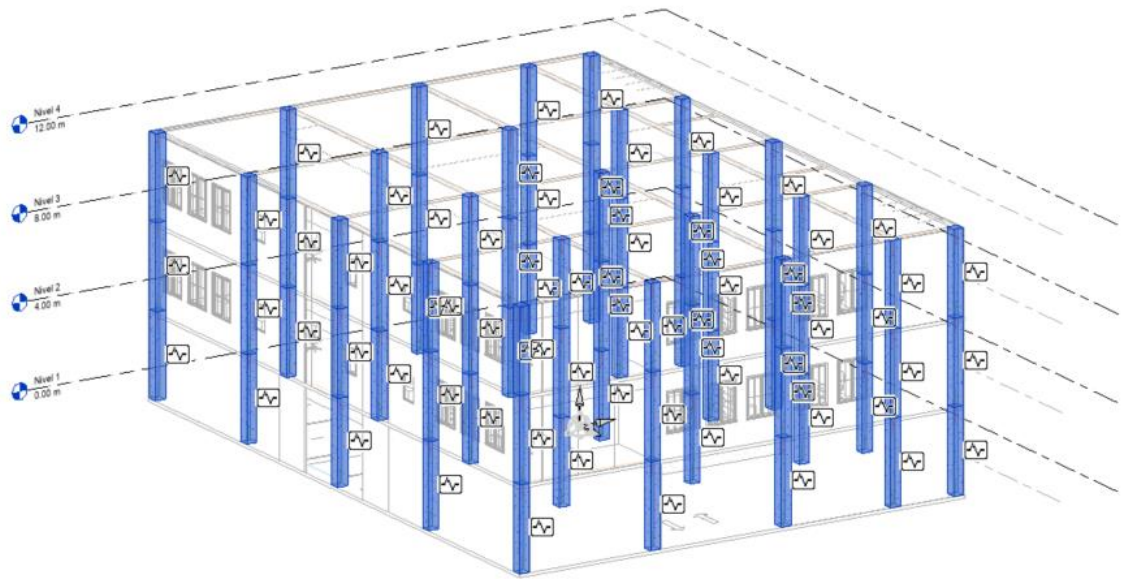
4.1.3.3. Vinculación de elementos estructurales

Las columnas y muros de carga se sincronizan desde el archivo arquitectónico, copiando y monitoreando sus propiedades espaciales, esta sincronización permite tener una supervisión de los cambios generados entre la base arquitectónica hacia el modelo estructural, el copiado y monitoreado se realiza de la manera siguiente:

- Importar columnas y muros estructurales a plantilla estructural: colaborar > Copiar y monitorear > Opciones > Seleccionar propiedades de columnas

creadas > Copiar > Seleccionar columnas en el modelo arquitectónico > Aplicar.

Figura 30. **Columnas monitoreadas en proyecto estructural**



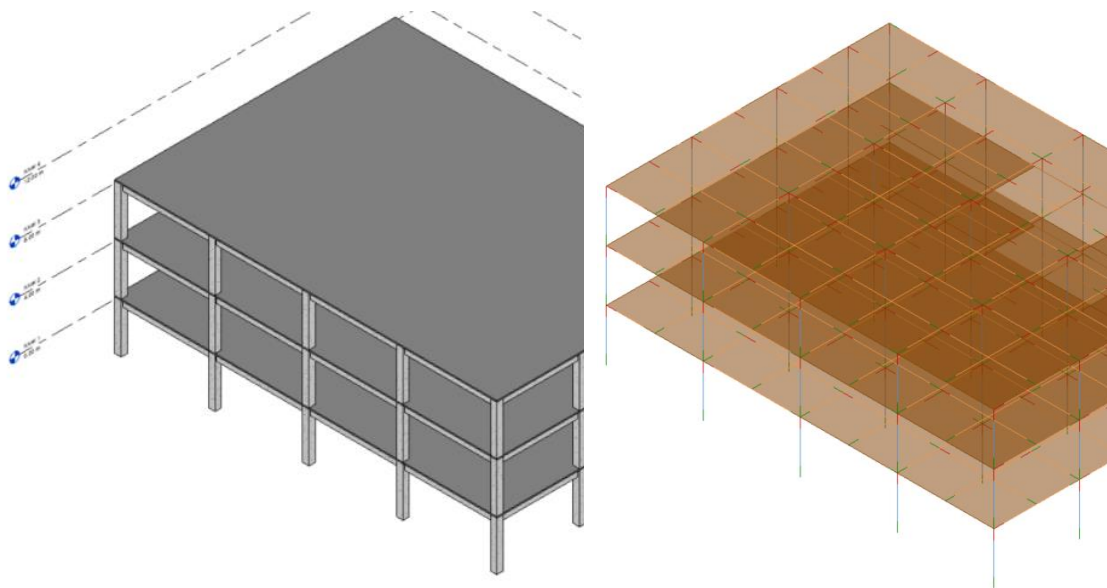
Fuente: elaboración propia realizado con Revit 2021.

No existe una compatibilidad absoluta entre softwares BIM por lo que se deben conocer las limitaciones de cada uno. Los softwares de modelado paramétricos permiten generar un modelo analítico con cargas asignadas, sin embargo, las cargas dinámicas como el sismo o el viento no se interpretan de la misma manera que en un software de análisis estructural, por lo que se realizan los siguientes pasos:

- Copiar y monitorear los elementos estructurales a la plantilla estructural.

- Asignar las sobrecargas en el modelo estructural o en el software de análisis y diseño estructural.
- Asignar las cargas dinámicas en el software de análisis y diseño estructural para evitar comportamientos erróneos en las solicitaciones de la edificación.
- Chequear que los nodos de los elementos estructurales en el modelo analítico coincidan entre si certificando la integridad en el modelo estructural.

Figura 31. **Modelo estructural y modelo analítico estructural**

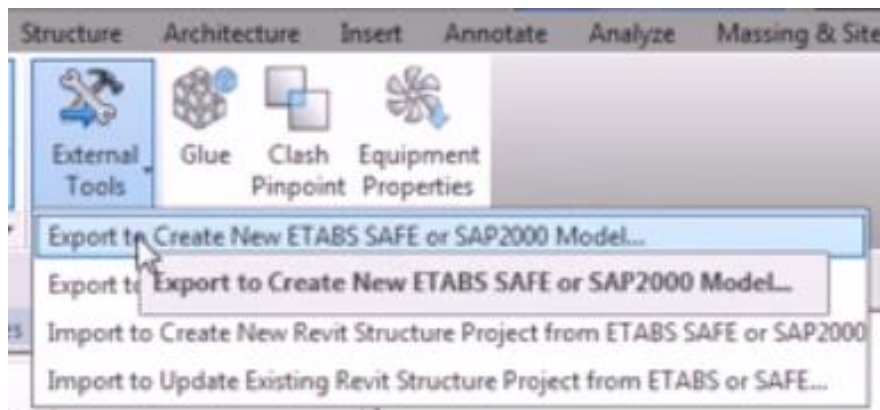


Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.4. Interoperabilidad a software Etabs

El modelo analítico creado en Revit se integra al programa Etabs utilizando un Plug-in llamado CSIXRevit, esta extensión permite importar y exportar los modelos de análisis de manera directa a los programas de CSI como se muestra a continuación:

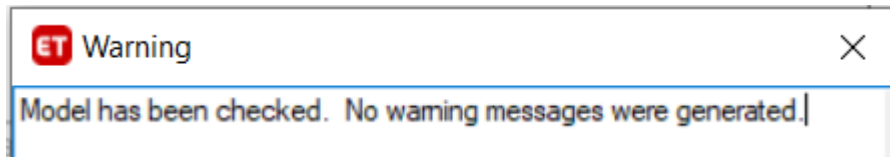
Figura 32. Exportación de modelo Revit a Etabs



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Al exportarlo se crea un archivo. exr que se debe abrir en Etabs como se desde la barra importar. Se debe comprobar que los nodos de los elementos estructurales estén acoplados de una manera adecuada, Etabs tiene la herramienta chequear modelo para comprobar la integridad estructural de manera automática.

Figura 33. **Chequeo conexión entre elementos estructurales**

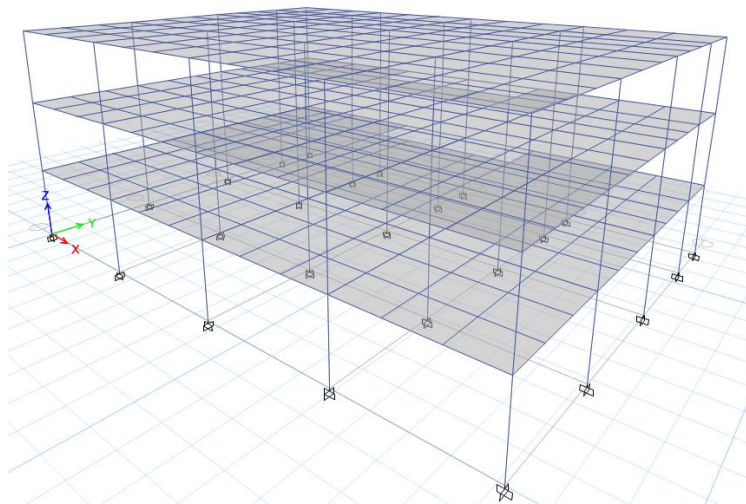


Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

4.1.5. **Análisis estructural**

Etabs interpreta la información del modelo analítico de la estructura copiando los ejes y niveles de referencia, añadiendo a su lista de elementos las propiedades físicas y mecánicas de los elementos estructurales. Se describe el proceso de análisis para un software específico, el orden lógico, concepto y la interpretación de resultados son similares para otros softwares de elementos finitos, variando específicamente en la interfaz del usuario.

Figura 34. **Modelo analítico importado en Etabs**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

4.1.5.1. Inercias fisuradas

Se modifican las inercias con un factor de agrietamiento para determinar la rigidez de los elementos estructurales antes de la falla, estos factores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XVI. Momentos de inercia fisurados

Miembro y condición		Momento de inercia	Área de la sección transversal
Columnas		$0.70I_g$	$1.0A_g$
Muros	No fisurados	$0.70I_g$	
	Fisurados	$0.35I_g$	
Vigas		$0.35I_g$	
Placas planas y losas planas		$0.35I_g$	

Fuente: ACI 318-14. (2014). *American concrete institute*.

Donde:

I_g = inercia gruesa

A_g = área gruesa

4.1.5.2. Cargas gravitacionales

Se utilizan las cargas indicadas para el cálculo del predimensionamiento, asignando de manera directa las sobrecargas y cargas vivas. Los pesos propios de cada elemento están incluidos como parte de las propiedades físicas y mecánicas del modelo importado de Revit.

4.1.5.3. Espectro sísmico de respuesta

Con base en los factores del apéndice 1, la obra se clasifica como ordinaria, ya que el cálculo de ocupación indica ser inferior a 350 personas, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla XVII. **Clasificación de obra según función**

	Área m ²	Factor ocupación	Ocupantes por nivel	Ocupantes para análisis
Nivel 1	657,00	11,00	59,73	119,45
Nivel 2	657,00	11,00	59,73	
Nivel 3	657,00	18,10	36,30	36,30

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

El cálculo del espectro sísmico de respuestas se describe en el capítulo 3, siendo para esta estructura el siguiente:

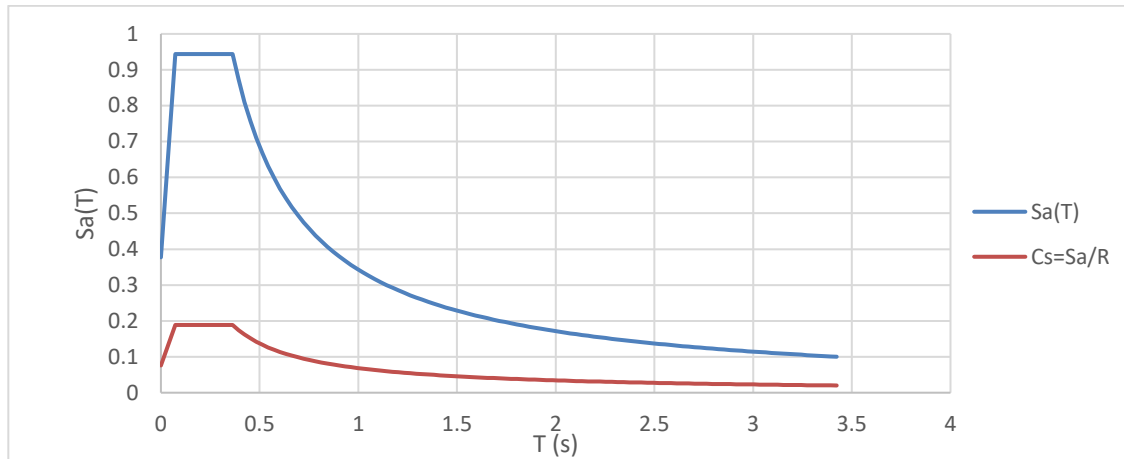
Tabla XVIII. **Cálculo espectro sísmico de respuesta**

Clasificación:	Ordinaria	
Ubicación:	Jutiapa, Jutiapa	
I_o :	4,10	Tabla V
S_{cr} :	1,43	Tabla V
S_{1r} :	0,52	Tabla V
T_L :	2,14	Tabla V
Clase de sitio:	B	
F_a :	1,00	Constante
F_v :	1,00	Constante
N_a :	1,00	Constante
N_v :	1,00	Constante
S_{cs} :	1,43	Ec. 3
S_{1s} :	0,52	Ec. 4
T_s :	0,36	Ec. 5
T_o :	0,07	Ec. 6
K_d :	0,66	Tabla VII
S_{cd} :	0,94	Ec. 11
S_{1d} :	0,34	Ec. 12
AMS_d :	0,38	Ec. 17
R:	5,00	Tabla VIII

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

El período natural de la estructura T es el tiempo en el cual la masa de la estructura participa en mayor porcentaje por efectos de cargas dinámicas. El factor R reduce la magnitud sísmica por la ductilidad de la tipología estructural a esta reducción se le denomina espectro sísmico de diseño.

Figura 35. **Espectro sísmico de respuesta y de diseño**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 365.

4.1.5.4. Fuente de masa

Se refiere al peso de la masa que actúa en cargas dinámicas, se incluye lo siguiente:

- Peso propio
- Sobrecarga
- Tabiques interiores
- Fachadas
- Peso de jardines
- Equipo con un peso superior a 1000,00 kg anclado a la estructura
- 25 % de las cargas vivas
- Se permite omitir la carga viva reducible
- Se permite omitir la carga viva en terrazas sin acceso

- Se permite omitir las cargas vivas en estacionamiento de vehículos de pasajeros
- Todas las cargas vivas con un peso superior a 1000,00 kg

4.1.5.5. Diafragmas

Los diafragmas son elementos horizontales o semi horizontales que tienen como objetivo transferir fuerzas laterales a los elementos verticales, sirven para dar integridad estructural brindando apoyo lateral a los elementos conectados y conformando un modelo tridimensional para su análisis.

Las losas macizas construidas en sitio son diafragmas que se consideran en el análisis y la evaluación de esfuerzos como rigideces finitas.

4.1.5.6. Condiciones de apoyo

Las columnas de concreto reforzado construidas monolíticamente con la cimentación actúan como apoyo empotrado, esta condición restringe las rotaciones y desplazamientos en la base, lo que permite calcular las cargas axiales y momentos que serán transmitidos a la cimentación.

4.1.5.7. Zona rígida

La zona de rigidez afecta el pandeo de los elementos estructurales. El no poseer esta rigidez genera las deflexiones más críticas y los momentos menos conservativos, una rigidez total no es recomendada al presentar las deflexiones más pequeñas y los momentos más altos. Los marcos de concreto reforzado por recomendación brindada en la base de información de Etabs se les debe asignar una rigidez donde no más del 50 % de los elementos son considerados rígidos.

4.1.5.8. Calibración de espectro sísmico de diseño

Los cortantes basales dinámico se deben calibrar para su utilización en el análisis y diseño estructural con base en los cortantes estáticos. Si la estructura no presenta irregularidades horizontales ni verticales su calibración puede ser del 85,00 %, en caso de no cumplir con este requisito será del 100,00 %.

Aplicando la ecuación 7 con las constantes indicadas en la tabla VI para estructuras E-1 con fachadas rigidez y una altura de 12,00 m se obtiene un periódico empírico de 0,39 s. Tras correr el diseño sin calibrar en Etabs se obtienen dos períodos dinámicos para el sentido X un período de 0,60 s para una participación de masa del 83,00 % y para el sentido Y un periodo de 0,57 s para una participación de masa del 86,00 %. El período estático y empírico cumplen las condicionantes de la ecuación 15 por lo que el factor de calibración es el siguiente:

Tabla XIX. Factor de calibración de sismo dinámico

		Cs			A diseñar	
Períodos Modales		Dinámica	Estático	85% Estático	Vd	F. Calibración
Dirección X	0,90	0,08	0,18	0,15	0,15	1,97
Dirección Y	0,80	0,09	0,18	0,15	0,15	1,75

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

C_s = coeficiente sísmico al lime de cedencia

V_d = cortante sísmico de diseño

4.1.5.9. Participación de masa

El método modal requiere que la estructura se analice y diseñe con el número suficiente de modos para que el 90,00 % de la masa participe. Los modos son los desplazamientos generalizados de la estructura que responden a sus grados de libertad. Los resultados de participación de masa para el sismo calibrado en Etabs donde se cumple la condición a partir del modo 5 son los siguientes:

Tabla XX. Participación de masa modal

Modo	T (s)	UX	UY	Sum UX	Sum UY
1	0,90	83,06%	0,00%	83,06%	0,00%
2	0,80	0,00%	85,72%	83,06%	85,72%
3	0,71	1,50%	0,00%	84,57%	85,72%
4	0,27	11,64%	0,00%	96,21%	85,72%
5	0,25	0,00%	11,29%	96,21%	97,01%
6	0,22	0,33%	0,00%	96,54%	97,01%
7	0,15	3,27%	0,00%	99,81%	97,01%
8	0,15	0,00%	2,99%	99,81%	100,00%
9	0,13	0,19%	0,00%	100,00%	100,00%

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

Modo = número de modo

T_s = período dinámico

UX = participación de masa en x

UY = participación de masa en y

$Sum UX$ = sumatoria de participación de masa en x

$Sum UY$ = sumatoria de participación de masa en y

4.1.5.10. Irregularidades

Con base en la geometría de la edificación se revisan las irregularidades horizontales (planta) descritas en la tabla IX e irregularidades verticales (elevaciones) descritas en la tabla X, obtienen los resultados siguientes:

Tabla XXI. Chequeo de irregularidades

Tipo	Condición crítica	Irregularidad
H1-A	Deriva máxima y: 3,36 cm; Deriva promedio y: 3,36 cm; Deriva máxima x: 4,46 cm; Deriva promedio x: 4,02 cm	No
H1-B	No aplica al no superar la condición H1-B	No
H2	No existe esquina entrante	No
H3	El diafragma discontinuo es menos al 50% del área de piso	No
H4	No existe desfase en elementos verticales	No
H5	No existen ejes no paralelos	No
V1-A	Las rigideces es pisos son iguales	No
V1-B	No aplica al no superar la condición V1-B	No
V2	No es necesario considerar el techo por lo que no aplica	No
V3	No hay geometría escalonada	No
V4	No existe discontinuidad en plano vertical	No
V5	No existe interrupción en muros o arriostres	No
V6	Los niveles tienen la misma resistencia latera	No
V7	No aplica al no superar la condición V6	No

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

4.1.5.11. Derivas tolerables

Con las definiciones, ecuaciones y límites de derivas descritas en el capítulo 3 se determina que la estructura no cumple con las condiciones tolerables, por lo que se itera hasta llegar al dimensionamiento óptimo incrementando las columnas hasta 50,00 cm x 50,00 cm, obteniendo así los siguientes resultados satisfactorios:

Tabla XXII. Derivas tolerables sismo en X

Nivel	δ Desplazamiento último (cm)	ΔU Deriva elástica (cm)	ΔU Deriva última (cm)	Altura de Nivel (cm)	ΔU Deriva última permisible (cm)
1,00	5,76	1,28	5,76	400,00	8,00
2,00	13,23	1,66	7,47	400,00	8,00
3,00	18,09	1,08	4,86	400,00	8,00

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Tabla XXIII. Derivas tolerables sismo en Y

Nivel	δ Desplazamiento último (cm)	ΔU Deriva elástica (cm)	ΔU Deriva última (cm)	Altura de Nivel cm	ΔU Deriva última permisible (cm)
1,00	5,09	1,13	5,09	400,00	8,00
2,00	11,30	1,38	6,21	400,00	8,00
3,00	15,12	0,85	3,83	400,00	8,00

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

4.1.5.12. Efecto P-Delta

Los efectos incrementales de segundo orden (P-Delta) se basan en el coeficiente de estabilidad estructural por lo que al aplicar la ecuación 33 obtenemos los resultados siguientes:

Tabla XXIV. Estabilidad en sentido X

Nivel	δc (Promedio) Desplazamiento elástico (cm)	ΔU Deriva elástica (cm)	Carga gravitacional Px (Ton)	Sismo en X Vx (Ton)	Altura de nivel (cm)	Coeficiente de estabilidad θ
1,00	1,28	1,28	2373,00	274,18	400,00	0,03
2,00	2,94	1,66	1505,93	214,79	400,00	0,03
3,00	4,02	1,08	638,00	134,45	400,00	0,01

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Tabla XXV. Estabilidad en sentido Y

Nivel	δc (Promedio) Desplazamiento elástico (cm)	ΔU Deriva elástica (cm)	Carga gravitacional Px (Ton)	Sismo en Y Vy (Ton)	Altura de nivel (cm)	Coeficiente de estabilidad θ
1,00	1,13	1,13	2373,00	274,82	400,00	0,02
2,00	2,51	1,38	1505,93	216,82	400,00	0,02
3,00	3,36	0,85	638,00	128,93	400,00	0,01

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

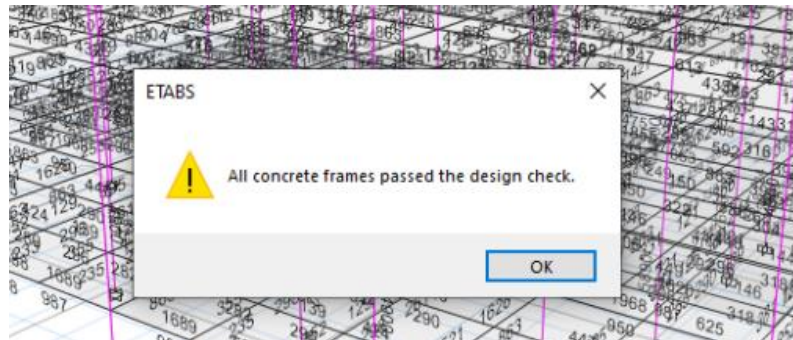
Conforme a lo descrito en el capítulo 3, no es necesario introducir efectos incrementados en las combinaciones de carga ya que el coeficiente de estabilidad es inferior a 0,10 en todos los casos.

4.1.6. Diseño de elementos estructurales

Al cumplir con los efectos P-Delta, derivas, torsión y aplicar las condiciones de irregularidad se realiza el diseño estructural. Se asignan las combinaciones por el método de resistencia definidas en el capítulo 3 y se configura el diseño estructural para cumplir con los requerimientos de ACI 318-14. Al correr el diseño estructural de concreto reforzado se verifica que los elementos estructurales cumplan las solicitaciones de la combinación de cargas, el criterio de columna fuerte/viga débil y el porcentaje de acero longitudinal de las columnas, de no satisfacer estos requerimientos se itera hasta encontrar las dimensiones adecuadas de los elementos estructurales o se reestructura el proyecto.

En la figura siguiente todos los elementos estructurales cumplen con las solicitaciones de la combinación de carga.

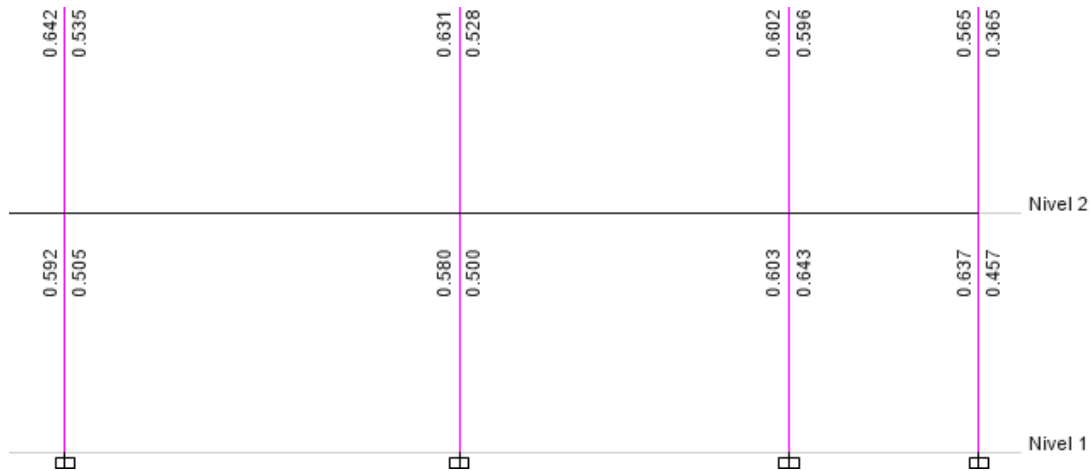
Figura 36. Chequeo de diseño para elementos estructurales



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Los miembros cumplen con capacidad columna/viga al obtener valores inferiores a 1,00 de la relación 6/5, esto asegura que la capacidad de la columna es como mínimo 1,20 mayor al de la viga.

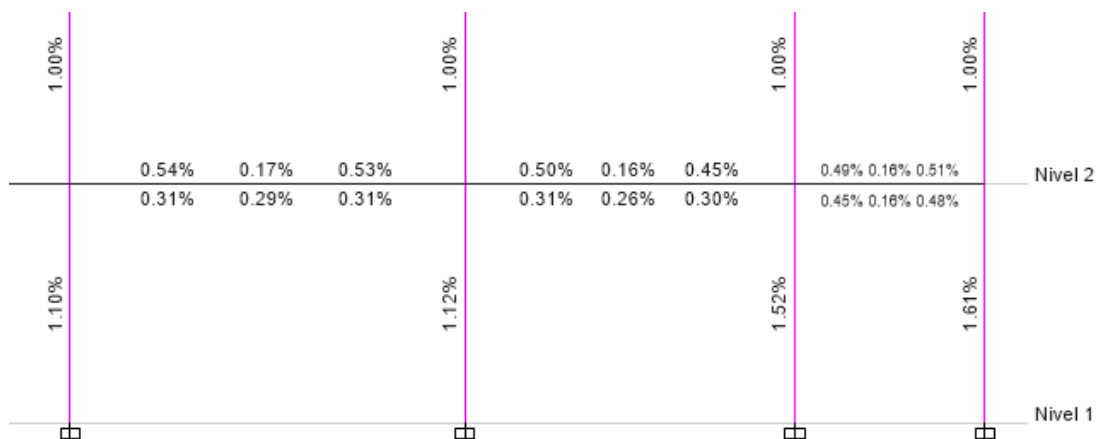
Figura 37. **Chequeo de capacidad Columna/Viga**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

El acero longitudinal cumple con la disposición de ACI 318-14 en el que se especifica un valor porcentual con respecto al área bruta de concreto entre el 1 % al 3 %.

Figura 38. **Porcentaje de acero longitudinal en elementos estructurales**

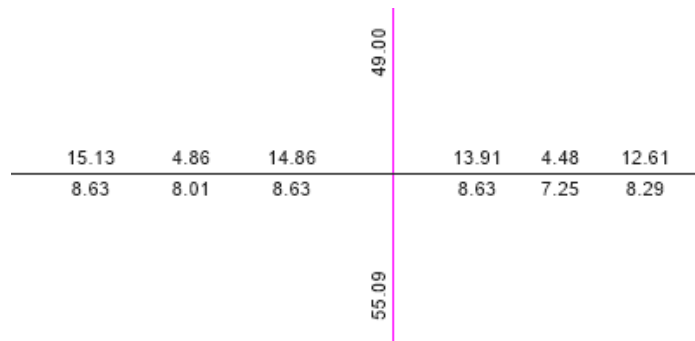


Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

4.1.6.1. Diseño de vigas

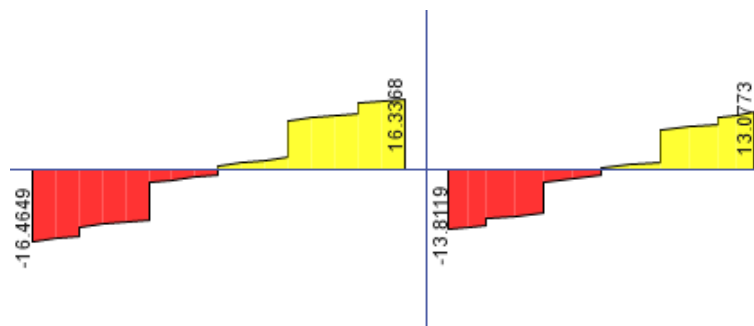
La cantidad de acero longitudinal necesario para que la viga satisfaga solicitudes de momentos la proporciona automáticamente Etabs, por lo cual se debe diseñar con base en este el acero requerido a cortante para las solicitudes de la combinación CR3 descrita en la ecuación 21.

Figura 39. **Acero longitudinal en cm^2 (Eje C-3 XX)**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Figura 40. **Cortantes en toneladas (Eje C-3 XX)**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Los esfuerzos a cortantes en los extremos de las vigas deben ser resistidos por refuerzos transversales que consiste en estribos de confinamiento, por lo que se diseña con base en la siguiente ecuación:

$$V_u = \frac{M_{nl} + M_{nr}}{l_n} + \frac{W_u l_n}{2} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

- V_u = resistencia nominal a cortante último
- M_{nl} = resistencia nominal a la flexión izquierda
- M_{nr} = resistencia nominal a la flexión derecha
- W_u = carga última resultante de ecuación 21

La resistencia nominal a la flexión se calcula con las suposiciones de diseño para el concreto definidas en ACI 138-14 capítulo 22, donde se expresa la siguiente ecuación:

$$M = \phi A_s \left(d - \frac{A_s f_y}{1.7 b f'_c} \right) \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

- M = momento actuante
- A_s = área de refuerzo longitudinal
- d = distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción
- b = ancho de la cara en compresión del miembro
- ϕ = factor de esfuerzo máximo 1

f_y = resistencia especificada a la fluencia del refuerzo
 f'_c = resistencia especificada a la compresión del concreto

El cortante de diseño es el valor máximo resultante de los esfuerzos en las vigas, al aplicar la ecuación 37 se obtienen los siguientes valores:

Tabla XXVI. **Cálculo de cortante para vigas**

Viga izquierda					
As superior (cm ²)	As inferior (cm ²)	M _{nl} (Ton-m)	M _{nr} (Ton-m)	V _{izq} (Ton)	V _{der} (Ton)
15,13	8,63	56,03	32,89	-1,40	31,41
14,86	8,63	-32,89	-55,10	-31,38	1,43
Viga derecha					
As superior (cm ²)	As inferior (cm ²)	M _{nl} (Ton-m)	M _{nr} (Ton-m)	V _{izq} (Ton)	V _{der} (Ton)
13,91	8,63	51,80	31,64	0,33	27,21
12,61	8,29	-32,89	-47,23	-27,39	-0,51

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

M = momento actuante
 A_s = área de refuerzo longitudinal
 V = cortante actuante

El cortante se diseña suponiendo que el concreto no aporta resistencia cuando satisface las siguientes condiciones:

$$V_c > 0,50V_d \quad \text{Ecuación 39}$$

$$P_u < \frac{A_g f'_c}{20} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

V_c = resistencia nominal a cortante proporcionada por el concreto

V_d = resistencia nominal a cortante de diseño

P_u = fuerza axial mayorada

A_g = área bruta de la sección del concreto

f'_c = resistencia especificada a la compresión del concreto

Las vigas con secciones de 0,80 cm x 0,35 cm tienen una resistencia nominal proporcionada por el concreto de $V_c= 17,70$ Ton, para la viga izquierda la resistencia nominal a cortante de diseño es $V_d= 31,41$ Ton, al no cumplir con las condicionantes de la ecuación 39 y 40 la resistencia nominal a corte de diseño será de $V_d= 13,71$ Ton. Para la viga derecha con una resistencia nominal a cortante de diseño $V_d= 27,39$ Ton la sección de concreto no aporta por lo que mantiene su valor. La separación requerida de estribos se determina con la siguiente ecuación:

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_d}{f_y d} \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

s = espaciamiento medido centro a centro de refuerzo

A_v = área de refuerzo de cortante con un espaciamiento s

V_d = resistencia nominal a cortante de diseño

f_y = resistencia especificada a la fluencia del refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tracción

La separación de estribos de confinamiento debe cumplir con el menor de los valores obtenidos a través de los siguientes requisitos:

- Separación requerida por ecuación 41.
- $d/4$ donde d es el peralte efectivo de la viga.
- 6 veces el diámetro del acero longitudinal.
- 15,00 cm.

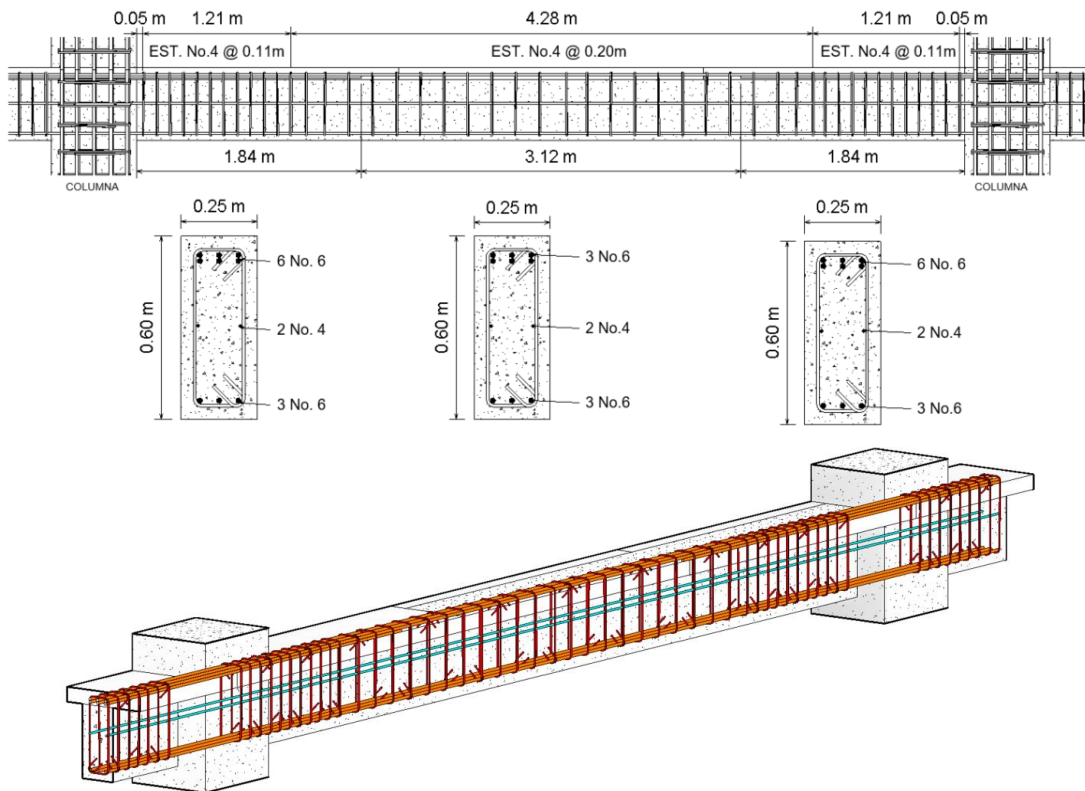
Tabla XXVII. **Separación de estribos de confinamiento en vigas**

	Φ estribo	S cm	$d/4$ (cm)	6Φ (cm)	15,00 (cm)	S a utilizar (cm)
Viga izquierda	0,95	23,66	18,75	11,46	15,00	11,46
Viga derecha	0,95	12,30	18,75	11,46	15,00	11,46

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Por norma el primer estribo se coloca a 5,00 cm de la cara en apoyos, los estribos de confinamiento se colocan con una separación de 11,00 cm a una distancia de dos veces el peralte de la viga en cada uno de sus extremos como se calcula en la tabla anterior y los restantes a una separación no mayor de la mitad del peralte de la viga. El acero longitudinal esta descrito en la figura 39.

Figura 41. **Detalles de armado de viga principal**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.6.2. **Diseño de columnas**

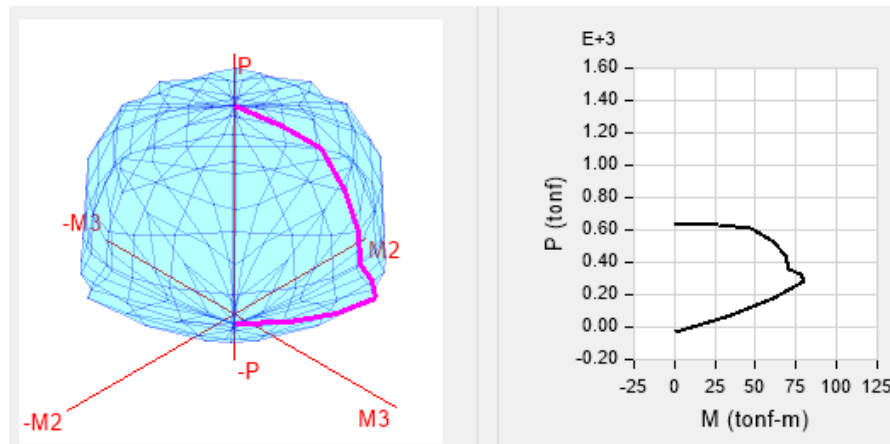
La resistencia requerida debe calcularse con base en la combinación de cargas críticas que afectan a las columnas, se deben considerar que las cargas y momentos últimos actúan simultáneamente. Por lo que sus valores se obtienen a través de curvas iterativas, se calcula la resistencia de los elementos con las condiciones siguientes:

- Curva de interacción con ϕ incluida

- Curva de interacción con ϕ excluida
- Curva de interacción con ϕ excluida y f_y aumentada

Phi (ϕ) es el factor de reducción de resistencia indicado en ACI 318-14 capítulo 21, para cargas axiales es una constante de 0,90. La resistencia a la fluencia aumentada se refiere a un incremento del 25 % de la resistencia. A través del diseñador de secciones en Etabs para una columna de 70,00 cm x 70,00 cm se obtienen los valores siguientes:

Figura 42. **Curvas de interacción para una columna (Eje C-3 XX)**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Las solicitaciones producidas por las combinaciones de carga deben estar dentro de los valores obtenidos de la curva de iteración donde predomina la resistencia probable a la flexión obtenida a través de la ecuación siguiente:

$$M_{pr} = \frac{1,25M_{max}}{\phi}$$

Ecuación 42

Donde:

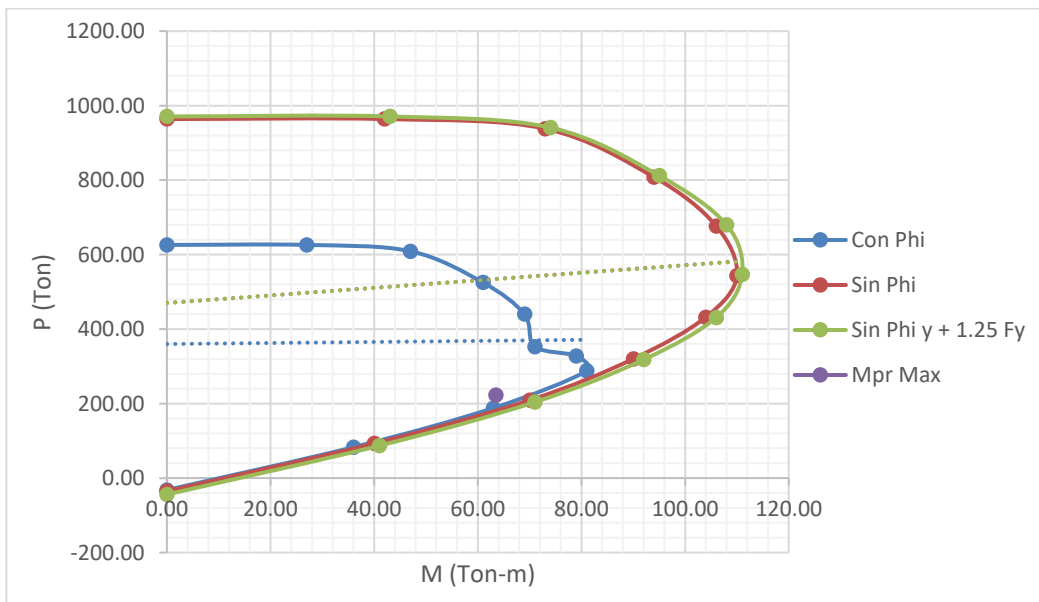
M_{pr} = resistencia probable a la flexión

M_{max} = momento máximo producido por combinaciones de carga

ϕ = factor de reducción de resistencia

Las curvas de iteración obtenidas para la columna satisfacen las resistencias probables a la flexión como se muestra en la figura siguiente:

Figura 43. **Curvas de interacción para columna (Eje C-3 XX)**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel 365.

Se obtiene un cortante de diseño $V_d=39,66$ Ton, con las ecuaciones 39 y 40 se determina que el concreto produce un $V_c= 29,76$ Ton por lo que no aporta resistencia a cortante, para determinar la separación y cantidad de refuerzos

transversales se deben satisfacer las condiciones de la ecuación 41 o la menor de las siguientes:

- 8 veces el diámetro de la barra longitudinal confinada de menor diámetro
- 24 veces el diámetro de la barra del estribo cerrado de confinamiento
- La mitad de la menor dimensión de la sección transversal de la columna
30 cm

Figura 44. **Separación de estribos de confinamiento en columna**

	Φ estribo	S cm	8 Φ cm	24 Φ cm	d/2 cm	30,00 cm	S a utilizar (cm)
Columna C3	1,29	26,25	20,32	30,48	35,00	30,00	20,32

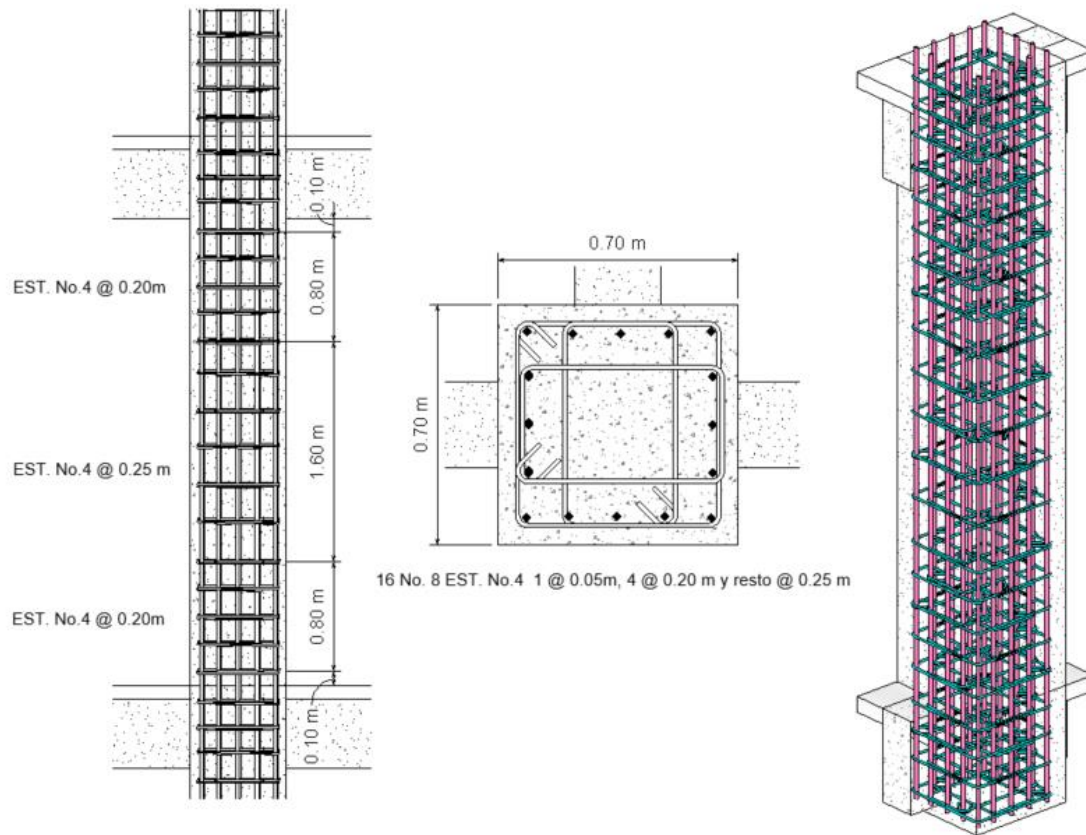
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

S = separación de estribos desde su centroide

Por norma el primer estribo se coloca a una separación no mayor de $S/2$ por lo que se utilizara una separación de 10,00 cm de la cara del nudo, los estribos de confinamiento se colocan con una separación de 20,00 cm a una distancia igual a la altura mayor de la sección transversal en cada uno de sus extremos y los restantes a una separación no mayor a la mitad del peralte de la viga. El acero longitudinal esta descrito en la figura 39.

Figura 45. **Detalles de armado de columna principal**



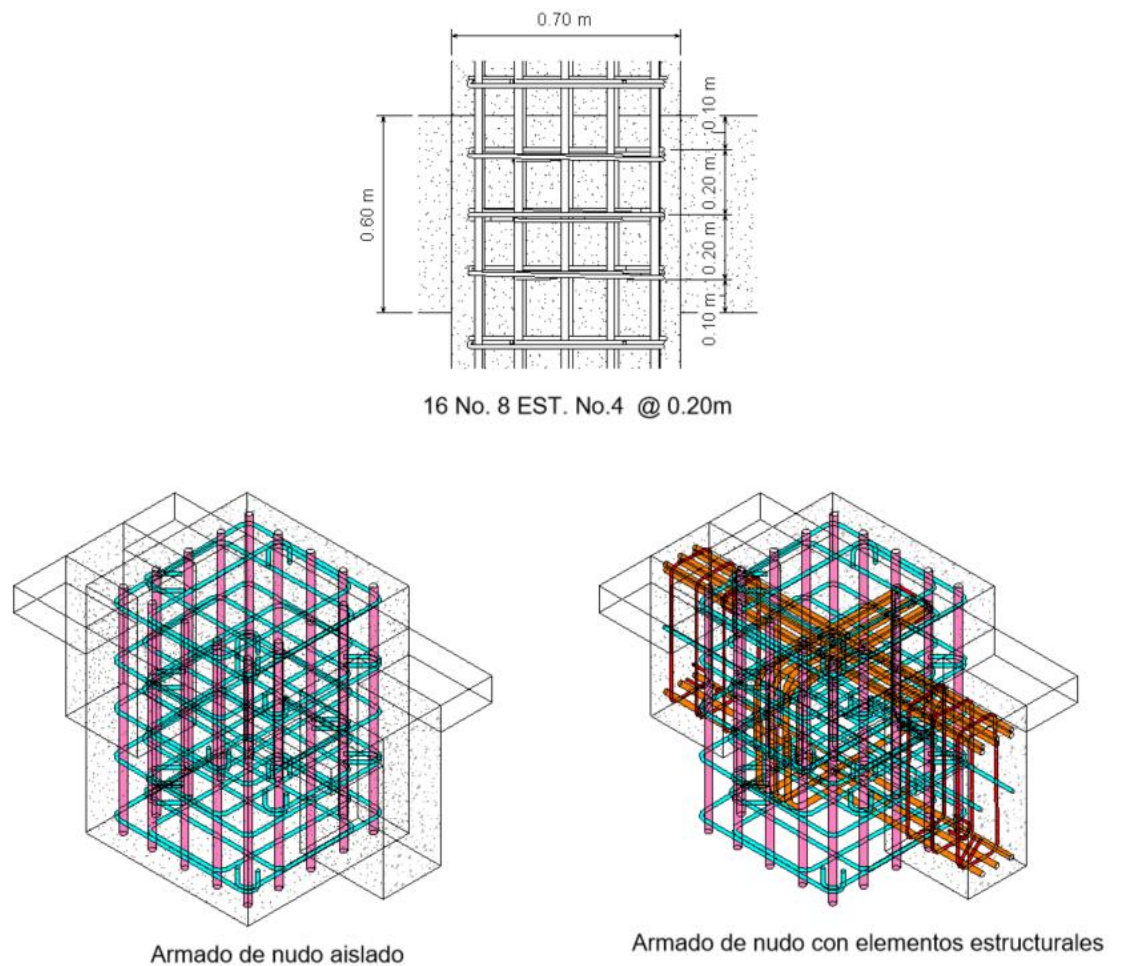
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.6.3. **Diseño de Nudos**

Para el sistema de pórticos intermedios los nudos deben cumplir con los requerimientos del ACI 318-14 capítulo 15. El nudo del eje C-3 está restringido en sus cuatro caras por vigas de similar altura y losas en sus cuatro direcciones por lo que debe cumplir los siguientes requisitos:

- El área de refuerzo transversal se distribuye a una altura no menor que a la del peralte de las vigas.
- El espaciamiento del refuerzo transversal no debe exceder la mitad de la altura de la menor de las vigas.

Figura 46. **Detalle de armado de Nudo**

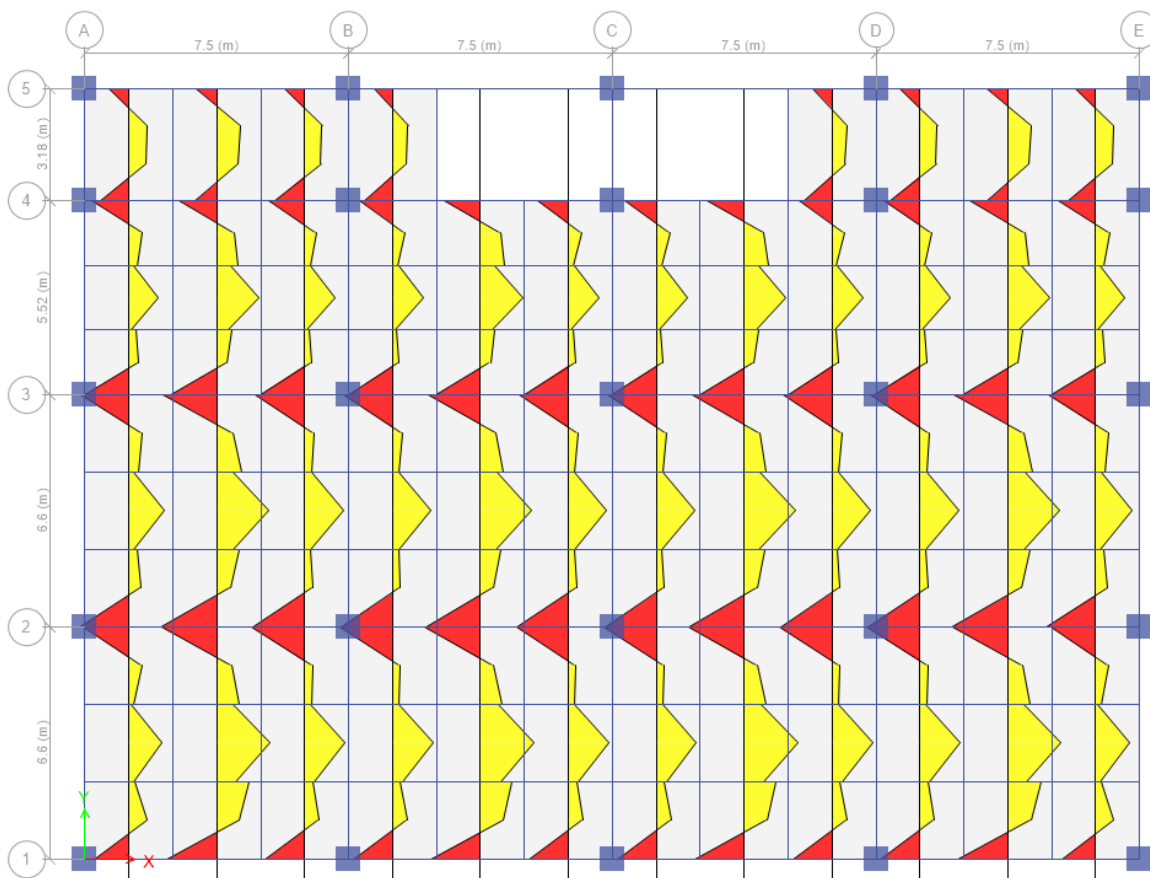


Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.6.4. Diseño de losas

Las losas se diseñan para soportar solicitaciones de la combinación de cargas gravitacionales. Para una fácil interpretación de resultados al modelo analítico se le agregan líneas de diseño con un ancho unitario de 1,00 m, al correr el análisis estructural se obtienen los momentos resultantes como se muestran en la siguiente figura:

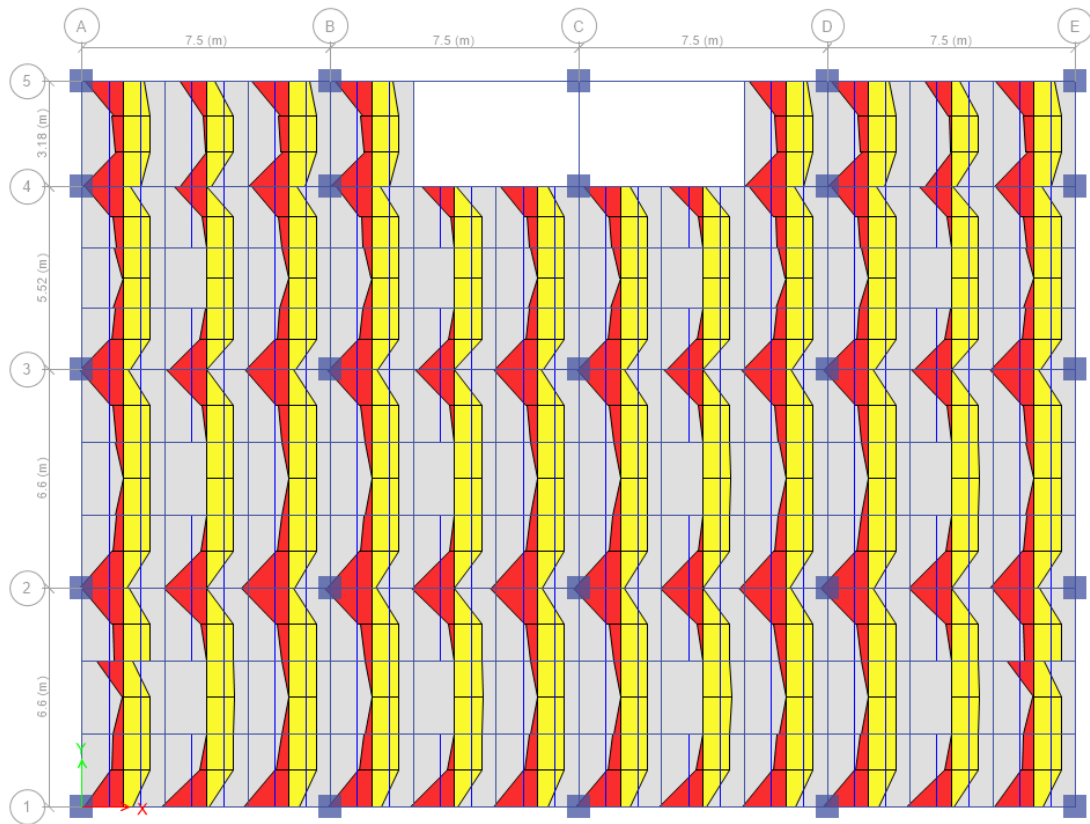
Figura 47. **Momentos en losas producidas por cargas gravitacionales**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

El diseño a partir de líneas de influencia permite obtener el área de acero requerido en ambas camas e iterar el diámetro de varilla y su separación hasta cumplir con el acero requerido.

Figura 48. Área de acero requerida en losas



Fuente: elaboración propia realizado con Etabs 18.

Se comprueba si los esfuerzos cortantes son resistidos por la sección de concreto al cumplir con la siguiente ecuación:

$$V_r > V_{max}$$

Ecuación 43

Donde:

V_r = cortante resistente de elemento

V_{max} = Cortante máximo

El refuerzo a cortante resistente se calcula de la siguiente manera:

$$V_r = 45 * \sqrt{f'_c} * t \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

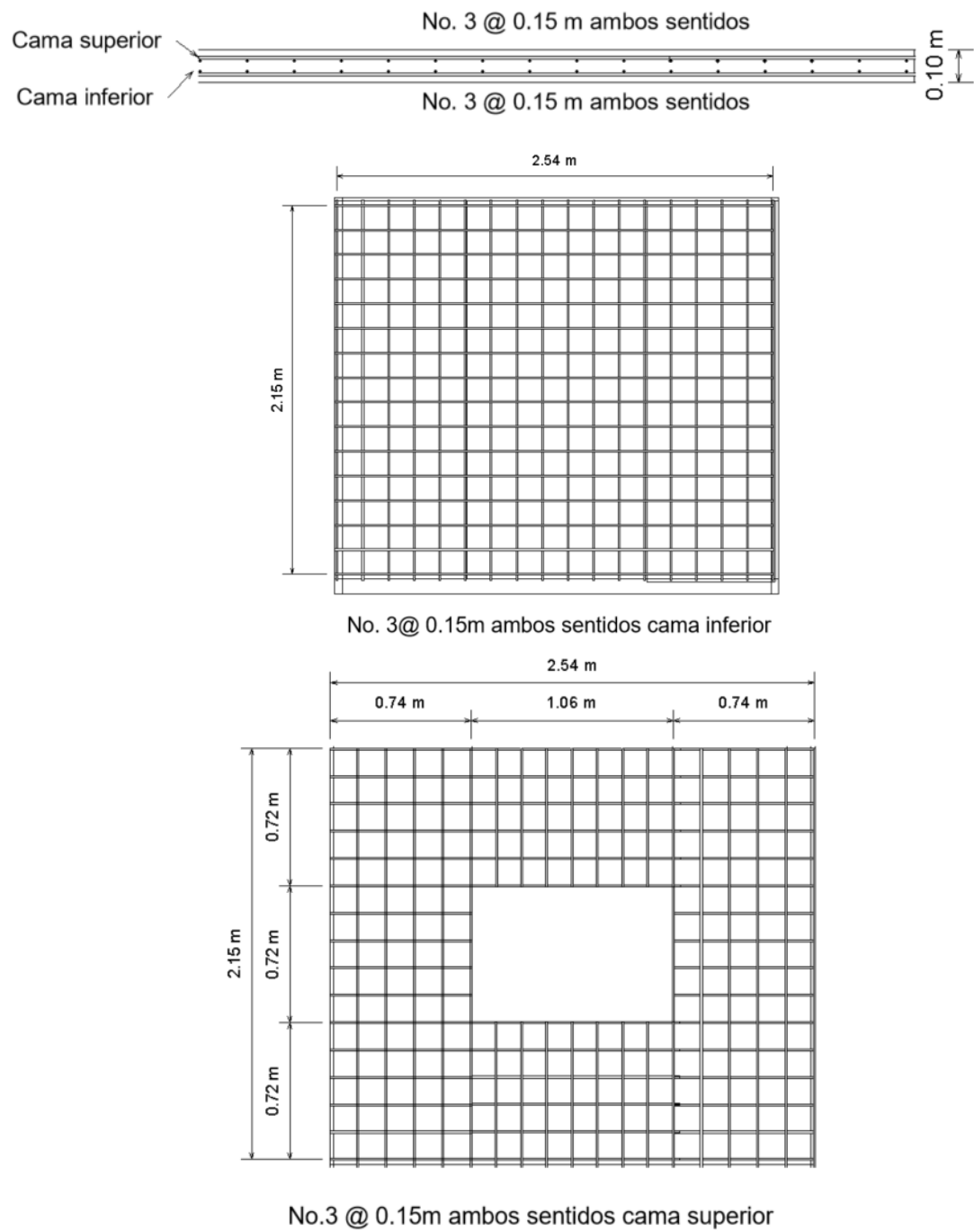
V_r = cortante resistente de elemento

f'_c = resistencia especificada a la compresión del concreto

t = espesor de losa

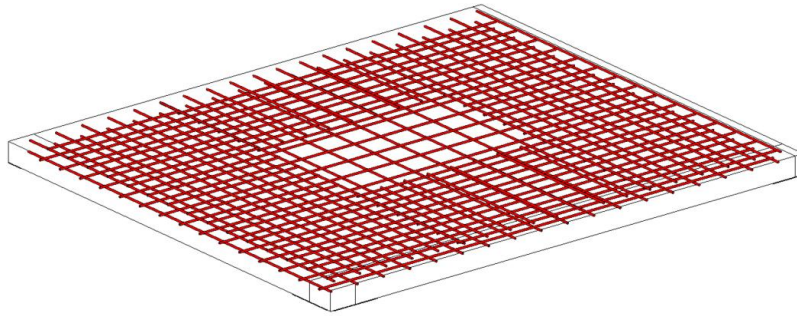
El cortante resistente para una sección de 10,00 cm es de $V_r = 7543,40$ kg y el cortante máximo según análisis de software es de $V_r = 5343,00$ kg por lo que la sección cumple con la ecuación 42, satisfaciendo condiciones de momento y cortante para un armado de varillas No. 3 a cada 15 cm.

Figura 49. **Detalle de armadura de losa**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Figura 50. **Detalle de armadura de losa 3D**

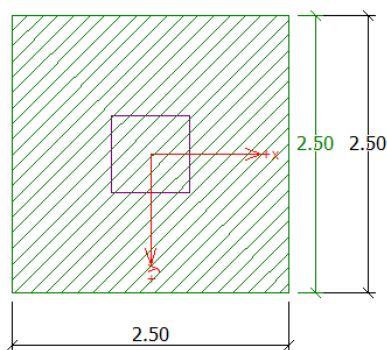


Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.6.5. **Diseño de cimentaciones**

Para el predimensionamiento de las zapatas se chequean aplastamiento y punzonamiento. Con ayuda del software GEO5 al asignarle la carga crítica de la columna C-3 de 202,00 Ton y las propiedades de un suelo arcilloso que permite esfuerzos admisibles de $3,00 \text{ kg/cm}^2$ según datos del apéndice 2, se obtiene la siguiente sección:

Figura 51. **Capacidad portante vertical**



Verificación de la capacidad portante VERTICAL

Forma de tensión de contacto : Rectángulo

Caso de carga más desfavorable Nro. 1. (Carga Nro. 1)

Diseño de la capacidad portante de la cimentación $R_d = 943.36 \text{ kPa}$

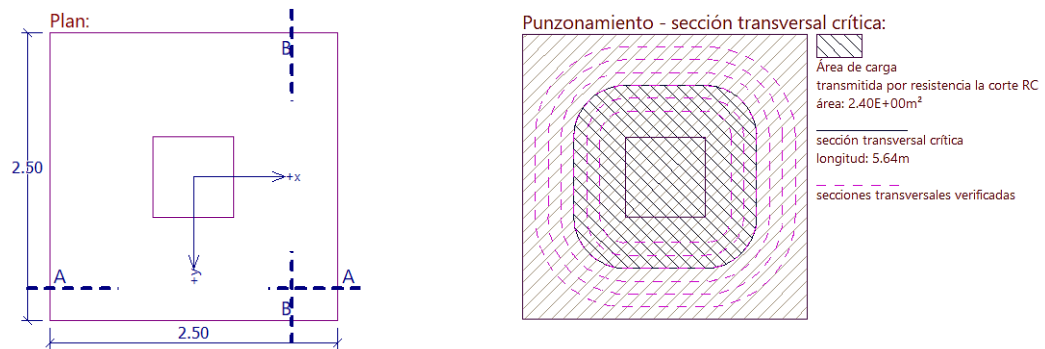
Tensión extrema de contacto $\sigma = 341.20 \text{ kPa}$

Factor de seguridad = $2.76 > 1.50$

Capacidad portante en la dirección vertical ES SATISFACTORIA

Fuente: elaboración propia, realizado con GEO5.

Figura 52. **Punzonamiento y longitudes**



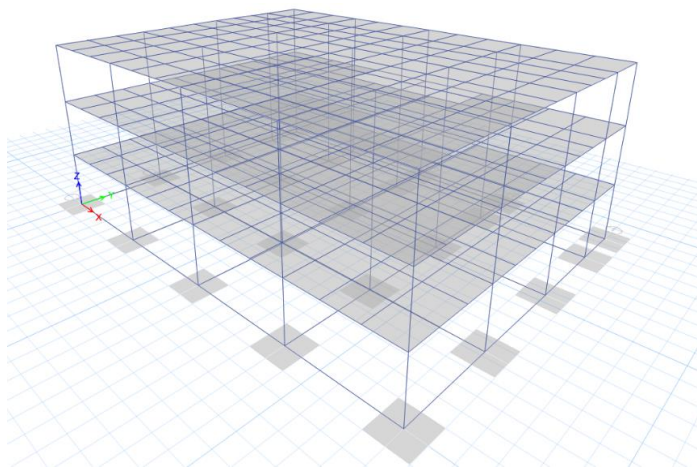
Fuente: elaboración propia, realizado con GEO5.

Al realizar el diseño de cimentaciones es recomendable guardar una copia como nuevo archivo y seguir el siguiente orden lógico:

- Definir secciones de cimentaciones con inercias agrietadas
- Modelar la cimentación
- Asignar módulo de subrasante (Apéndice 2)
- Restringir los desplazamientos laterales a la cimentación
- Asignar recubrimientos para cama superior e inferior
- Agregar combinaciones de cimentación (Capítulo 3)
- Definir envolvente para cargas de cimentación

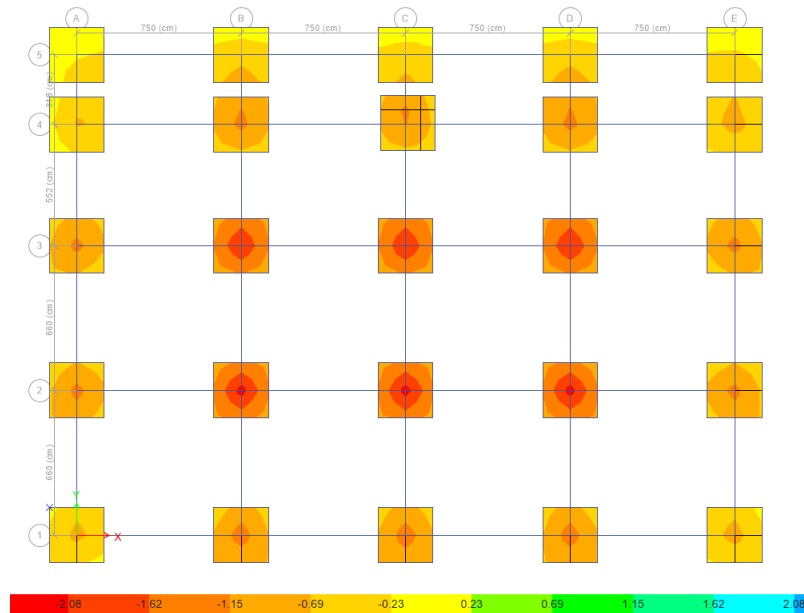
- Correr el diseño estructural
- Revisar cumplimiento de presiones admisibles
- Revisar cumplimiento de refuerzo

Figura 53. **Modelo analítico con cimentaciones**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

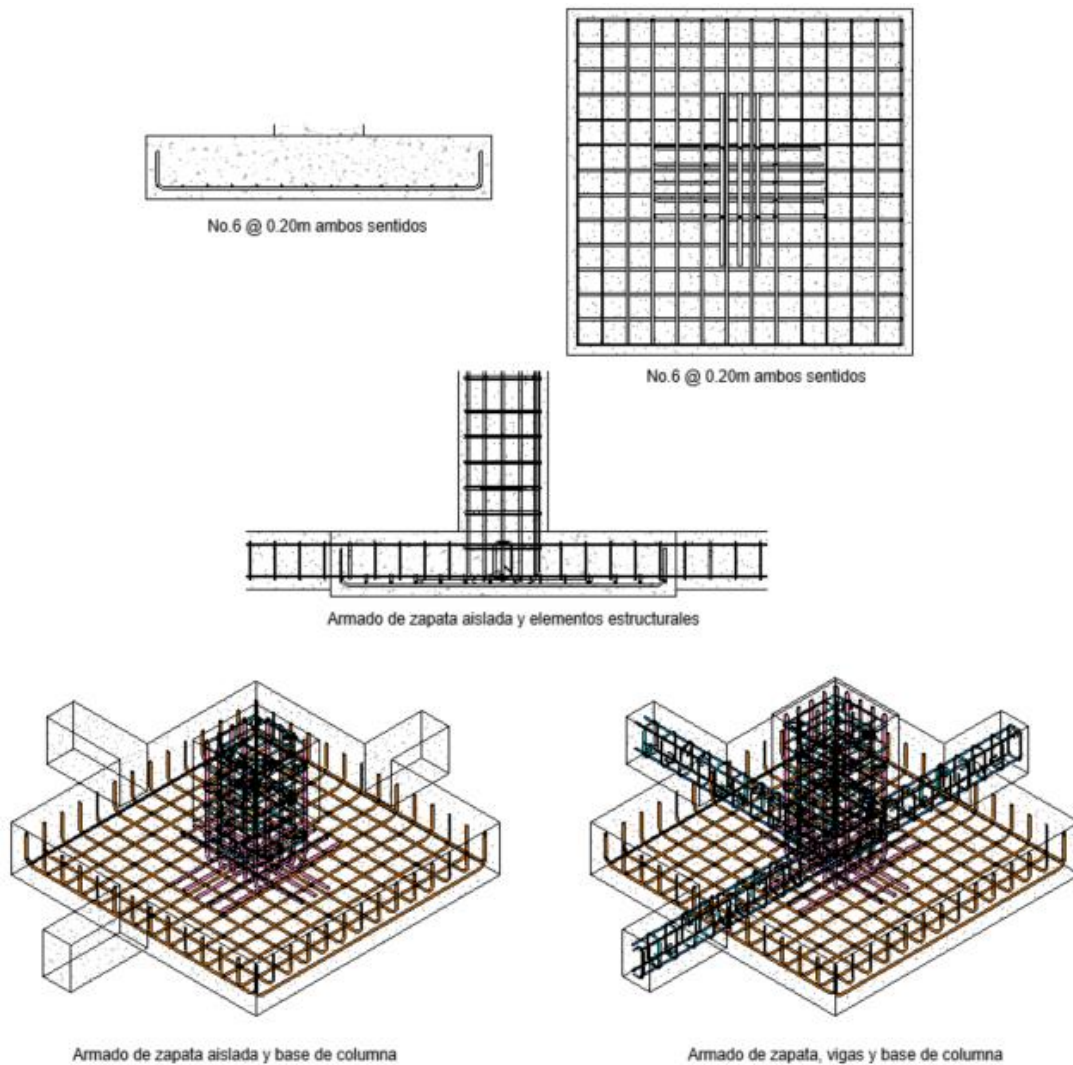
Figura 54. Presiones admisibles del suelo



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

El suelo arcilloso seleccionado del apéndice 2 permite esfuerzos admisibles de $3,00 \text{ kg/cm}^2$ siendo la sollicitación máxima para el diseño de cimentaciones de $2,08 \text{ kg/cm}^2$ con refuerzo No. 6 a cada $20,00 \text{ cm}$. Por lo que la zapata del eje C-3 cumple con un dimensionamiento de $2,70 \text{ m}$ por lado y un peralte de $0,50 \text{ m}$.

Figura 55. **Detalle de armado de Zapata**

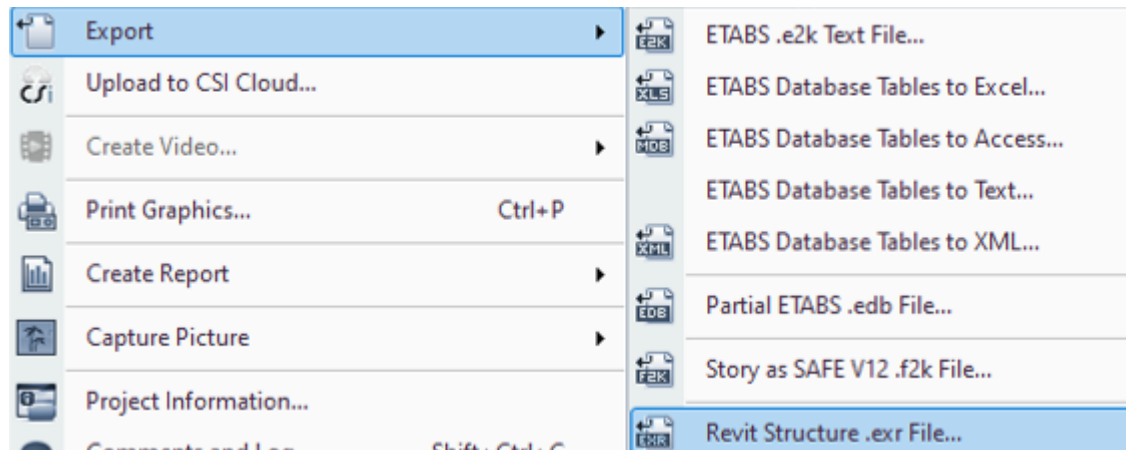


Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.1.7. Interoperabilidad a plantilla estructural

Al concluir el diseño de los elementos estructurales se exporta el modelo de Etabs hacia Revit de la manera siguiente:

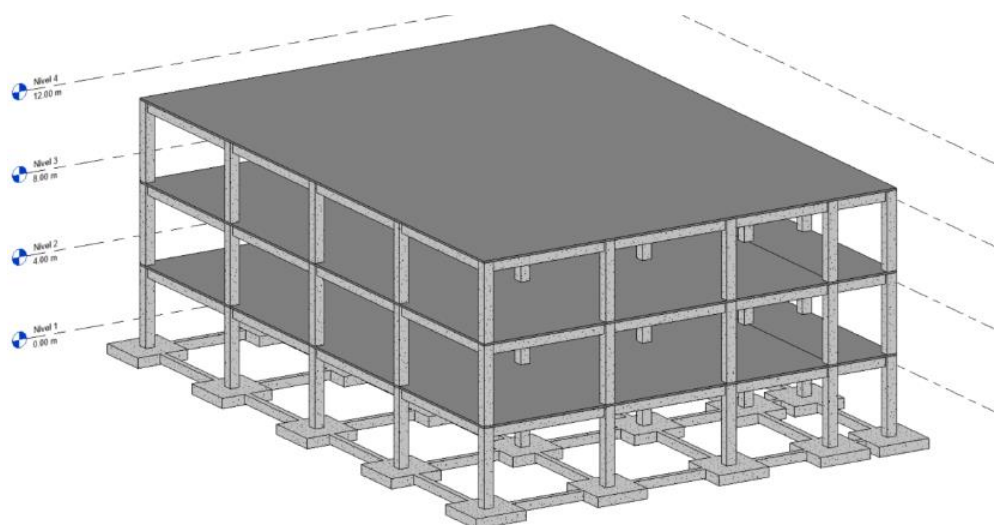
Figura 56. **Exportación de modelo Etabs a Revit**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

El modelo paramétrico se actualiza de manera instantánea generando las nuevas dimensiones y elementos estructurales.

Figura 57. **Exportación de modelo Etabs a Revit**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

4.2. Estructuras metálicas

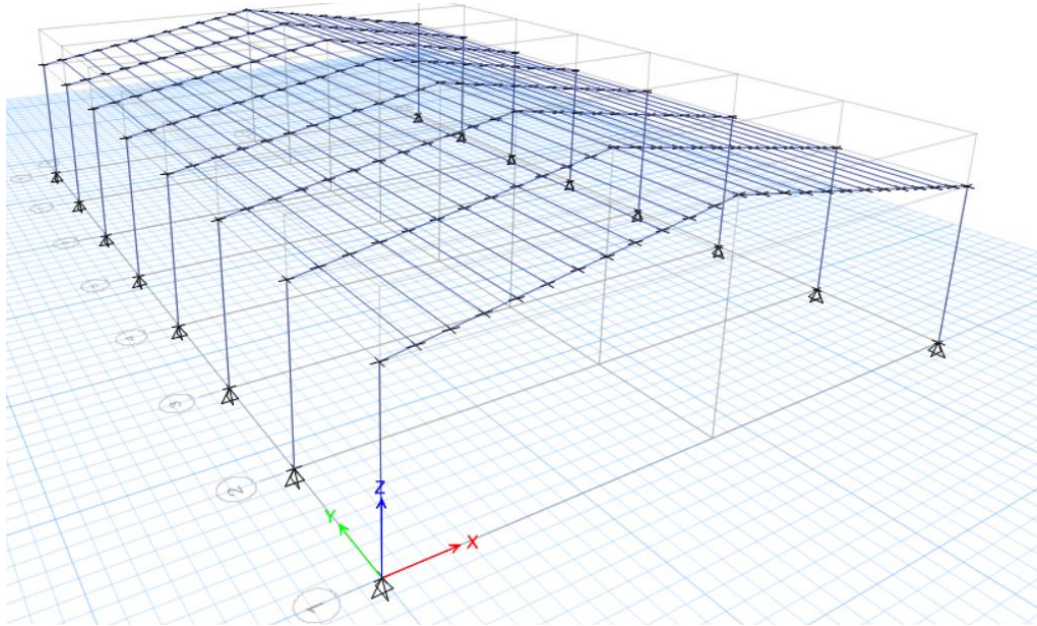
El acero estructural tiene propiedades físicas, químicas y mecánicas reguladas por estándares internacionales en la industria de la construcción, es un material que se utiliza ampliamente para estructuras como edificios, puentes, tanques elevados, rótulos, naves industriales, entre otros. Los elementos estructurales hechos con este material son resistentes, dúctiles y tenaces. Se desarrolla el análisis y diseño estructural de una nave industrial de marcos ordinarios resistentes a momentos en el sentido corto y marcos con arriostramiento ordinario concéntrico en el sentido largo para los elementos estructurales principales con base en las normas internacionales ISO 19650 e ISO 16757 para el flujo BIM estructural adaptando a los requerimientos de diseño de las normativas nacionales de seguridad estructural (NSE) y normas internacionales de diseño en acero.

4.2.1. Diseño arquitectónico

La nave industrial tiene como uso una plaza comercial, su tipología es de marcos ordinarios resistentes a momentos en el sentido corto de 27,00 m, marcos con arriostramiento ordinario concéntrico en el sentido largo de 42,00 m, altura al hombro de 7,00 m y una altura al centro de 9,20 m. Los marcos están conformados por secciones acarteladas y se complementan con cajas rigidizantes, costaneras, arriostramiento, bracones y templetes.

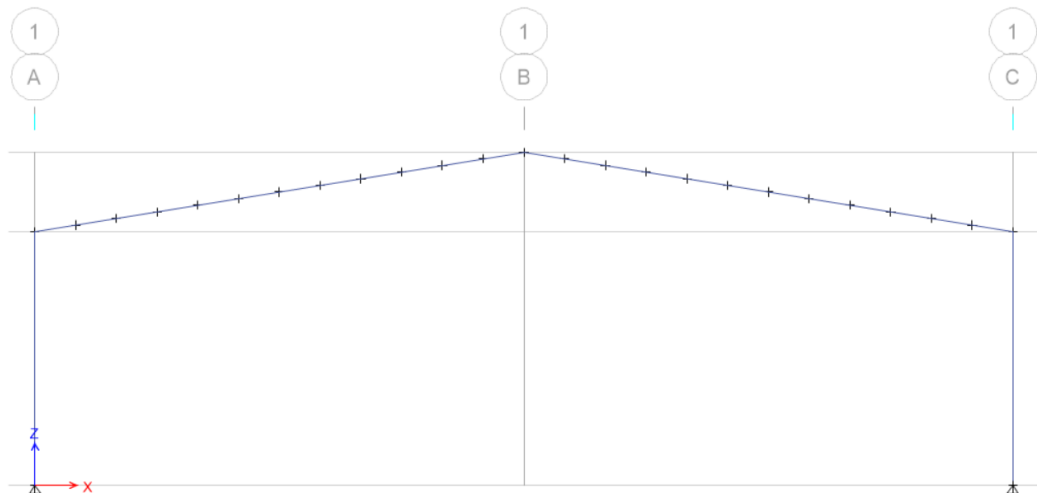
Al utilizar elementos variables que no se encuentran predefinidos en programas paramétricos, el modelo se inicia directamente en el programa de análisis y diseño estructural. El diseño arquitectónico se muestra en las figuras siguientes:

Figura 58. **Isométrico de nave industrial**



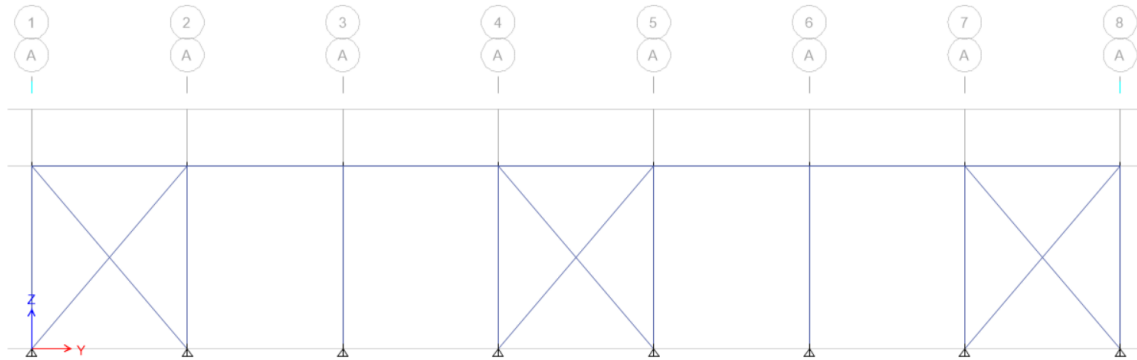
Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Figura 59. **Elevación sentido corto de nave industrial**



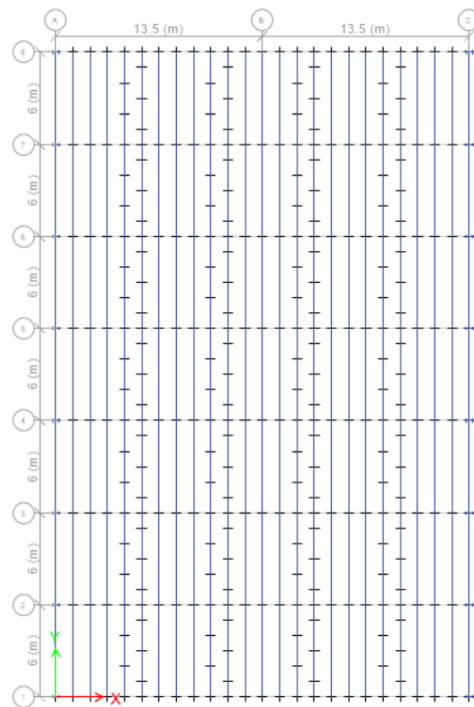
Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Figura 60. **Elevación sentido largo de nave industrial**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Figura 61. **Planta de nave industrial**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

4.2.2. Predimensionamiento

Al definir el modelo arquitectónico de la nave industrial es necesario que los elementos estructurales posean un dimensionamiento de partida, esto según dimensiones generales de la edificación, consideraciones de fabricantes y condiciones de carga. El dimensionamiento varío en las diversas fases de análisis y diseño estructural en respuesta de las solicitaciones de las combinaciones de cargas o requerimientos de los códigos de diseño.

4.2.2.1. Cargas gravitacionales

Definidas conceptualmente en el capítulo 3, se dividen en dos grupos: 1. Las cargas muertas compuestas por pesos propios, cargas superpuestas y equipo anclado a la estructura. 2. Las cargas vivas específicas según ocupación o uso de la estructura. Para estructuras livianas una de las cargas críticas en la de tefra (ceniza volcánica), para obras de categoría ordinaria con un foco a más de 15 km se utiliza una carga de 25,00 kg/m² (AGIES, NSE 2, 2018, pp. 56, NSE 2). Las cargas a utilizar son las siguientes:

Figura 62. Cargas gravitacionales

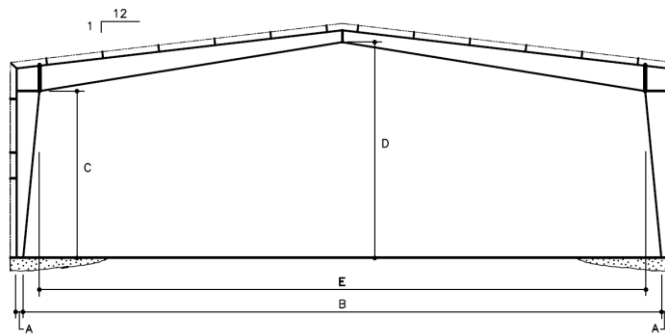
Descripción	Valor
Instalaciones	10,00 kg/m ²
Lamina	10,00 kg/m ²
Carga viva techo	50,00 kg/m ²
Carga de ceniza	25,00 kg/m ²
Carga de viento	80,00 kg/m ²

Fuente: AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas estructurales y condiciones de sitio*.

4.2.2.2. Columnas y vigas acarteladas

El predimensionamiento de las columnas y las vigas acarteladas se obtiene a través de información proporcionada por proveedores y chequeos de la guía de diseño 25 de AISC. Para una luz de 30,00 m con una carga viva de 50,00 kg/m². Los manuales de predimensionamiento (NUCOR, 2015) brindan los siguientes datos:

Figura 63. Esquema de nave industrial con elementos acartelados



Fuente: NUCOR. (2015). *Product and engineering manual: primary framing*.

Tabla XXVIII. Predimensionamiento de secciones acarteladas

Ancho de Estructura	Altura a Hombro	10 psf de Carga Viva				
		A	B	C	D	E
100'	10'	16"	96'-0	6'-6"	11'-2"	94'-4"
	12'	16"	96'-0	8'-6"	13'-2"	94'-4"
	16'	16"	96'-0	12'-6"	17'-2"	94'-4"
	20'	16"	96'-0	16'-6"	21'-2"	94'-4"
	24'	16"	96'-0	20'-6"	25'-2"	94'-4"
	28'	16"	96'-0	24'-6"	29'-2"	94'-4"
	30'	16"	96'-0	26'-6"	31'-2"	94'-4"

Fuente: NUCOR. (2015). *Product and engineering manual: primary framing*.

Las secciones acarteladas por su variabilidad deben satisfacer las condiciones estipuladas en AISC 25 (2011), estas son:

- Esfuerzo mínimo de fluencia especificado: $F_y < 55$ ksi
- Las secciones armadas deben ser homogéneas
- El acartelamiento es lineal
- El ángulo de acartelamiento se encuentra entre 0° y 15°
- El espesor de los patines es mayor que el espesor del alma
- La relación de los patines debe cumplir con:

$$\frac{b_f}{2 t_f} < 18 \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde:

b_f = ancho de patín

t_f = Espesor del patín

- El ancho de patines debe cumplir cada longitud no breizada con:

$$b_f \geq \frac{h}{7} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde:

b_f = ancho de patín

h = alto del alma

- La esbeltez del alma, sin o con rigidizante a $a/h > 1,50$, debe cumplir con:

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{0,40E}{f_y} \leq 260$$

Ecuación 47

Donde:

t_w = espesor de alma

h = alto del alma

E = módulo de elasticidad

f_y = resistencia especificada a la fluencia del refuerzo

- La esbeltez del alma, con rigidizante a $a/h < 1,50$, debe cumplir con:

$$\frac{h}{t_w} \leq 12 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Ecuación 48

Donde:

t_w = espesor de alma

h = alto del alma

E = módulo de elasticidad

f_y = resistencia especificada a la fluencia del refuerzo

Se aplican estas condiciones hasta encontrar la sección que cumpla para la viga y la columna por lo que se llegó al resultado siguiente:

Tabla XXIX. **Condiciones de diseño para elementos acartelados**

Columna										
Apoyo	L (in)	d (in)	h(in)	h/t _w	Ec. 45	Ec. 46	Ec. 47	Ec. 47	Ec. 48	Condición 5
Inicio	0	16	14 ,75	33,71	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
1/4 L	68,88	21,50	20,25	46,29	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
2/4 L	137,76	27,00	25,75	58,86	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
3/4 L	206,64	32,50	31,25	71,43	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
4/4 L	275,52	38,00	36,75	84,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Viga										
Apoyo	L (in)	d (in)	h(in)	h/t _w	Ec. 45	Ec. 46	Ec. 47	Ec. 47	Ec. 48	Condición 5
Inicio	0,00	16,00	15,00	60,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
1/4 L	132,84	21,50	20,50	82,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
2/4 L	265,68	27,00	26,00	104,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
3/4 L	398,52	32,50	31,50	126,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
4/4 L	531,36	38,00	37,00	148,00	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

- L = longitud del elemento estructural
- d = ancho de elemento estructural variable
- E = módulo de elasticidad

Siendo las dimensiones que cumplen las siguientes:

Tabla XXX. **Dimensiones de columnas y vigas acarteladas**

Columna			Viga		
Ancho inicial	16,00	in	Ancho final	16,00	in
Ancho final	38,00	in	Ancho inicial	38,00	in
Ancho de patín b_f	7,00	in	Ancho de patín b_f	5,50	in
Espesor de patín t_f	0,63	in	Espesor de patín t_f	0,50	in
Espesor del alma t_w	0,44	in	Espesor del alma t_w	0,25	in
θ cartela	4,57	grados	θ techo	9,26	grados

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

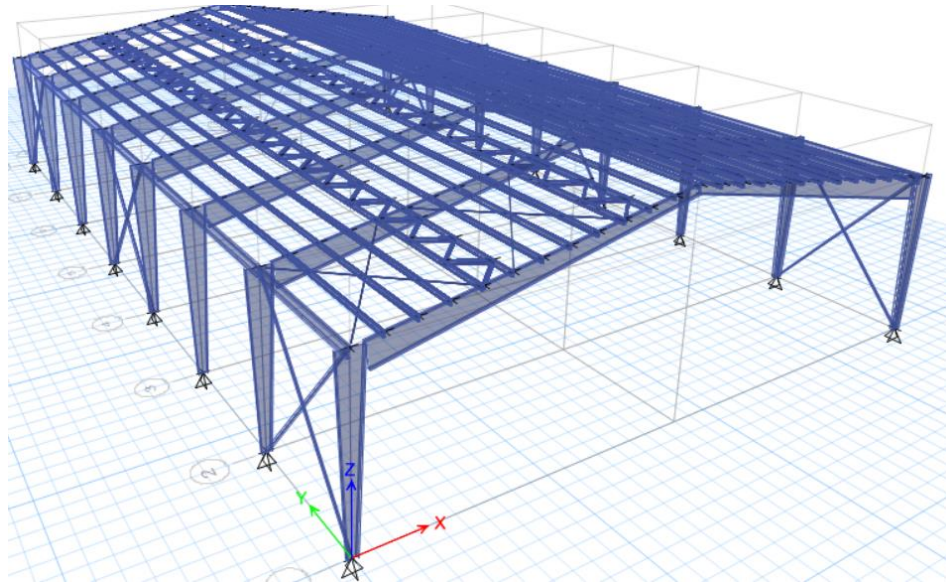
4.2.2.3. Costaneras

Las costaneras son perfiles conformados en frio, Etabs no realiza análisis para este tipo de elementos por lo que se debe realizar un cálculo conforme a lo estipulado en (AISI STANDARD, 2016) descrito en el apéndice. El perfil que cumple con los requisitos para la nave industrial es un C2"x8"x1/16".

4.2.3. Análisis estructural

Las naves industriales se caracterizan por ser estructuras livianas, permitir grandes luces y tener un fácil montaje/desmontaje. Este sistema posee dificultades en el control de derivas, baja capacidad de soporte de cargas en techo y problemas de adaptación a cambio de uso. Si bien se describe el proceso de análisis para un software específico, el orden lógico, concepto y la interpretación de resultados son similares para otros softwares de elementos finitos, variando en específicamente en la interfaz del usuario.

Figura 64. **Modelo analítico extruido de nave industrial**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

4.2.3.1. Cargas gravitacionales

Se utilizan las cargas indicadas para el cálculo del predimensionamiento, asignando de manera directa las sobrecargas y cargas vivas. Los pesos propios de cada elemento están incluidos como parte de las propiedades físicas y mecánicas del modelo importado de Revit.

4.2.3.2. Carga sísmica

Con base en los factores del apéndice 1, la obra se clasifica como ordinaria, ya que el cálculo de ocupación indica ser inferior a 350 personas, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla XXXI. **Clasificación de obra según función**

	Área m ²	Factor ocupación	Ocupantes por nivel	Ocupantes para análisis
Nivel 1	1134,00	5,00	226,80	226,80

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Las naves industriales presentan alta variabilidad con respecto a los cálculos de períodos empíricos y fuerzas sísmicas, por lo que aplicar una función de espectro sísmica de respuesta provoca resultados erróneos por a su falta de redundancia.

Para obtener resultados reales se toman los períodos naturales de la estructura directamente de Etabs y el sismo se calcula como estático distribuyendo su cortante por el número de ejes en ambos sentidos como se muestra tabla siguiente:

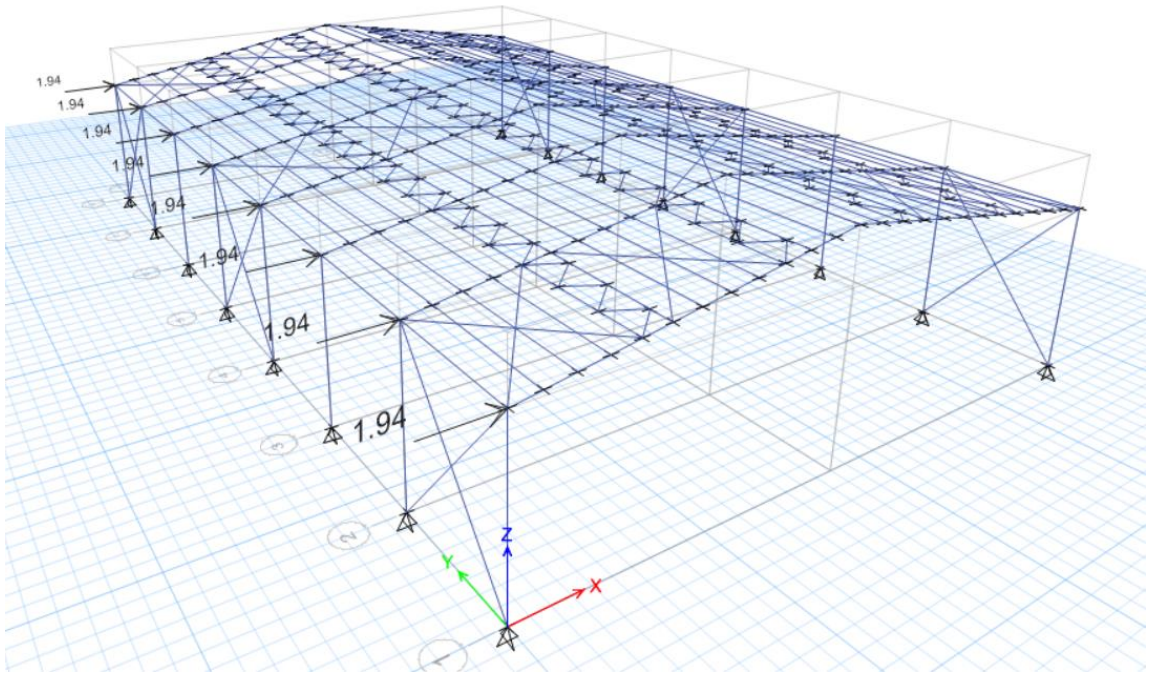
Tabla XXXII. **Cálculo de sismo estático**

Clasificación:	Ordinaria		
Ubicación:	Guatemala, Guatemala		
	Marcos ordinarios	Marcos Arriostrados	
I _o :	4,1	4,1	Tabla V
S _{cr} :	1,43	1,43	Tabla V
S _{1r} :	0,88	0,88	Tabla V
T _L :	3,26	3,26	Tabla V
Clase de sitio:	D	D	
F _a :	1,00	1,00	Constante
F _v :	1,00	1,00	Constante
N _a :	1,00	1,00	Constante
N _v :	1,00	1,00	Constante
S _{cs} :	1,43	1,43	Ec. 3
S _{1s} :	0,88	0,88	Ec. 4
T _s :	0,62	0,62	Ec. 5
T ₀ :	0,12	0,12	Ec. 6
K _d :	0,66	0,66	Tabla VII
S _{cd} :	0,94	0,94	Ec. 11
S _{1d} :	0,58	0,58	Ec. 12
AMS _d :	0,38	0,38	Ec. 17
R:	3,50	3,25	Tabla VIII
T _a :	0,26	0,34	Etabs 18
C _d :	3,00	3,25	Tabla VIII
C _s :	0,27	0,29	Ec. 13
W _s :	57,72 ton	57,72 ton	Etabs 18
V _b :	15,56 ton	16,76 ton	Cs*Ws

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Los resultados del cortante basal V_b, se distribuyen en los marcos como fuerzas puntuales por lo que para los marcos ordinarios se distribuye una fuerza de 1,94 Ton y en la dirección arriostrada 8,38 Ton.

Figura 65. **Distribución de cortante basal en marco ordinario**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

4.2.3.3. Fuente de masa

Se refiere al peso de la masa que actúa en cargas dinámicas, para las naves industriales las cargas vivas son reducibles por lo que se puede despreciar y la fuente la conforman el 100 % del peso propio y las sobrecargas.

4.2.3.4. Diafragmas

Las cubiertas livianas por su poca capacidad de transmitir fuerzas horizontales a elementos sísmicos principales se definen como diafragmas

flexibles. Está conformada por costaneras, cajas rigidizantes y tensores que no transmiten momentos a la estructura principal.

4.2.3.5. Arriostramiento

Tienen como finalidad controlar derivas, para estructuras ordinarias se pueden diseñar por el método no lineal (AISC 341-16, 2016).

4.2.3.6. Condiciones de apoyo

Los perfiles de acero que conforman las columnas descansan sobre pedestales de concreto armado, la base se articula para liberar acciones de momento y permitir acciones de desplazamiento.

4.2.3.7. Zona rígida

La zona de rigidez afecta el pandeo de los elementos estructuras, no sus esfuerzos axiales y torsionales. Para las estructuras de acero se recomienda el factor 0,00 el cual manifiesta las deflexiones más conservativas y los momentos menores.

4.2.3.8. Participación de masa

En el método modal se requiere que la estructura se analice y diseñe con el número suficiente de modos para que el 90,00 % de la masa participe. Los modos son los desplazamientos generalizados de la estructura que responden a sus grados de libertad. Los resultados de participación de masa para el sismo calibrado en Etabs donde se cumple la condición a partir del modo 7 son los siguientes:

Tabla XXXIII. **Participación de masa modal**

Modo	Periodo (s)	UX	UY	Sum UX	Sum UY
1	0,35	0,00%	71,12%	79,65%	0,00%
2	0,26	99,82%	0,00%	79,65%	98,08%
3	0,23	0,00%	0,00%	79,65%	98,08%
4	0,16	0,12%	0,00%	79,65%	98,24%
5	0,12	0,00%	0,00%	79,65%	98,24%
6	0,10	0,00%	0,00%	79,65%	98,24%
7	0,09	0,00%	24,91%	98,45%	98,24%
8	0,07	0,00%	0,00%	98,45%	98,24%
9	0,06	0,00%	0,00%	98,45%	98,24%

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

Modo = número de modo

T_s = período dinámico

UX = participación de masa en x

UY = participación de masa en y

Sum UX = sumatoria de participación de masa en x

Sum UY = sumatoria de participación de masa en y

4.2.3.9. Irregularidades

Con base en la geometría de la edificación se pueden revisar irregularidades horizontales (planta) descritas en la tabla IX e irregularidades verticales (elevaciones) descritas en la tabla X, obtienen los resultados siguientes:

Tabla XXXIV. **Chequeos de irregularidades**

Tipo de Irregularidad	Condición Crítica	Irregularidad
H1-A	Deriva máxima y: 3,00 cm; Deriva promedio y: 2,25 cm; Deriva máxima x: 2,24 cm; Deriva promedio x: 2,16 cm	Si
H1-B	Relación de deriva inferior a 1,40	No
H2	No existe esquina entrante	No
H3	El diafragma discontinuo es menos al 50% del área de piso	No
H4	No existe desfase en elementos verticales	No
H5	No existen ejes no paralelos	No
V1-A	Las rigideces es pisos son iguales	No
V1-B	No aplica al no superar la condición V1-B	No
V2	No es necesario considerar el techo por lo que no aplica	No
V3	No hay geometría escalonada	No
V4	No existe discontinuidad en plano vertical	No
V5	No existe interrupción en muros o arriostres	No
V6	Los niveles tienen la misma resistencia latera	No
V7	No aplica al no superar la condición V6	No

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

4.2.3.10. Derivas tolerables

Con las definiciones, ecuaciones y límites de derivas descritas en el capítulo 3 se determina que la estructura cumple con las condiciones tolerables con los perfiles predimensionados, obteniendo así los siguientes resultados satisfactorios:

Tabla XXXV. **Deriva tolerable de sismo en X y Y**

Nivel	δ Desplazamiento Ultimo (cm)	ΔU Deriva Elástica (cm)	ΔU Deriva Última (cm)	Altura de Nivel cm	ΔU Deriva Última Permisible (cm)
1 X	6,50	2,17	6,50	700,00	17,50
1 Y	7,30	2,25	7,30	700,00	17,50

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

4.2.3.11. Efecto P-Delta

Los efectos incrementales de segundo orden se basan en el coeficiente de estabilidad por lo que al aplicar la ecuación 33 obtenemos los siguientes resultados.

Tabla XXXVI. **Estabilidad en sentido X**

Nivel	δc (Promedio) Desplazamiento Elástico (cm)	ΔU Deriva Elástica (cm)	Carga gravitacional PX (Ton)	Sismo en X Vx(Ton)	Altura de nivel (cm)	Coeficiente De Estabilidad θ
1,00	2,17	2,17	57,72	15,55	700,00	0,01

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Tabla XXXVII. **Estabilidad en sentido Y**

NIVEL	δc (Promedio) Desplazamiento Elástico (cm)	ΔU Deriva Elástica (cm)	Carga gravitacional PX (Ton)	Sismo en Y Vx (Ton)	Altura de Nivel (cm)	Coeficiente De Estabilidad θ
1,00	1,13	1,13	57,72	16,80	700,00	0,01

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

4.2.4. Diseño de elementos estructurales

Al cumplir con los efectos P-Delta, derivas, torsión y aplicar las condiciones de irregularidad se realiza el diseño estructural. Se asignan las combinaciones por el método de resistencia definidas en el capítulo 3 y se configura el diseño estructural para cumplir con los requerimientos de AISC 341. Los marcos se dividen en marcos ordinarios en momentos (OMF) en el sentido corto y marcos ordinarios con arriostramiento concéntrico (OCBF) en el sentido largo, estos sistemas deben satisfacer condiciones específicas.

4.2.4.1. Diseño por resistencia ASCE-7

Las combinaciones sísmicas que se utilizan para determinar las solicitaciones que deben resistir los elementos estructurales integran factores de redundancia y amplificación sísmica para realizar el diseño de los elementos en las condiciones críticas, estas combinaciones son las siguientes:

$$(1,20 + 0,20S_{cd})D + \rho Q_E + 0,50L + 0,20S \quad \text{Ecuación 49}$$

$$(0,90 - 0,20S_{cd})D + \rho Q_E \quad \text{Ecuación 50}$$

$$(1,20 + 0,20S_{cd})D + \Omega Q_E + 0,50L + 0,20S \quad \text{Ecuación 51}$$

$$(0,90 - 0,20S_{cd})D + \Omega Q_E \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde:

S_{cd} = pseudo aceleración para periodo corto de diseño

D = peso propio y sobrecarga

ρ = factor de redundancia

Q_E = periodo natural de vibración de la estructura

- L = carga viva
 S = carga de nieve / ceniza volcánica
 Ω = factor de incremento de resistencia

4.2.4.2. Sistema de marcos ordinarios a momento (OMF)

Este sistema posee elementos y conexiones con capacidad reducida a deformación inelástica. No requiere que los miembros que conforman el marco cumplan con requerimiento de ductilidad y compactación sísmica. Las vigas y columnas deben satisfacer requerimientos de flexo compresión expresadas en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,00 \quad \text{cuando } \frac{P_r}{P_c} \geq 0,20 \quad \text{Ecuación 53}$$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,00 \quad \text{cuando } \frac{P_r}{P_c} < 0,20 \quad \text{Ecuación 54}$$

Donde:

- P_r = resistencia a la compresión axial requerida
 P_c = resistencia de compresión axial disponible
 M_r = resistencia a la flexión requerida
 M_r = resistencia a la flexión disponible
 x = Subíndice que indica flexión en torno al eje fuerte
 y = Subíndice que indica flexión en torno al eje débil

4.2.4.2.1. Diseño de columnas y vigas

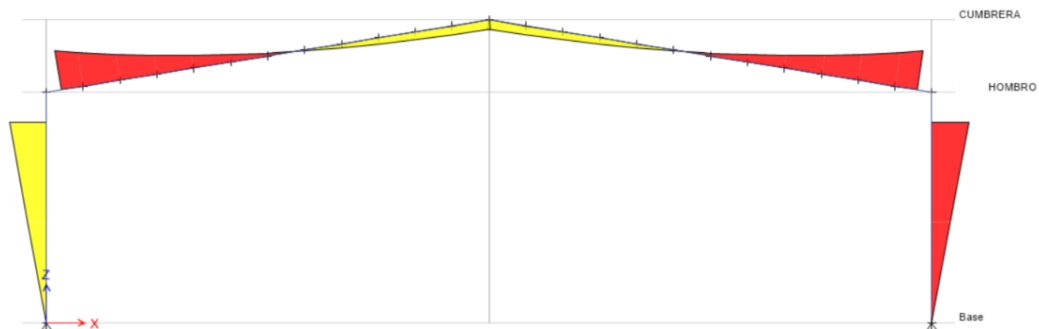
Las solicitaciones de las combinaciones de diseño de resistencia de ASCE-7 producen los resultados siguientes:

Figura 66. **Momento ultimo de vigas y columnas**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Figura 67. **Momentos de vigas y columnas**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Para vigas y columnas se debe chequear la flexo compresión con las ecuaciones 53 y 54. Se obtiene el siguiente resultado:

Tabla XXXVIII. **Diseño de columnas y vigas**

	Columna	Viga	
$M_u=$	222,44 kip-ft	241,15 kip-ft	Ec. 49 Etab
$V_u=$	11,00 kip	12,30 kip	Ec. 49 Etab
$P_u=$	20,00 kip	12,60 kip	Ec. 49 y 51 Etab
$\phi M_n=$	492,62 kip-ft	445,00 kip-ft	Ec. 49 Etab
$\phi V_n=$	268,00 kip	51,28 kip	Ec. 49 Etab
$\phi P_n=$	141,69 kip	165,76 kip	Ec. 50 Etab
$\phi T_n=$	804,00 kip	477,90 kip	Ec. 50 Etab
Flexo compresión	52%	52%	Ec. 53
Flexo compresión	50%	54%	Ec. 54
Flexo compresión	50%	54%	Ok

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

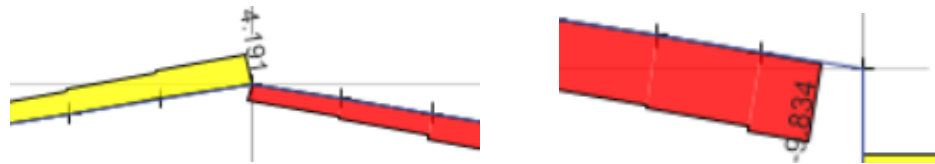
Donde:

- M_u = resistencia a la flexión última
- V_u = resistencia al cortante último
- P_u = resistencia de compresión axial última
- M_n = resistencia a la flexión nominal
- V_n = resistencia al cortante ultimo nominal
- P_n = resistencia de compresión axial nominal
- T_n = resistencia a la tensión nominal

4.2.4.2.2. Diseño de conexión a hombro y cumbrera

La sección variable y unión entre diversos elementos produce acciones de corte variadas, por lo que se debe asegurar que los elementos resistan las solicitaciones.

Figura 68. Cortante último en cumbrera y hombro (kip-ft)



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Al determinar la capacidad la resistencia a cortante de los elementos se observa que ambos cumplen con la reacción de cortante producida como se muestra a continuación:

Tabla XXXIX. Chequeo de conexión a hombro y cumbrera

Diseño de Conexión a hombro y cumbrera			
	Hombro	Cumbrera	
$M_p=$	494,44 kip-ft	146,12 kip-ft	Ec. 49 Etabs
$M_u=$	815,83 kip-ft	241,10 kip-ft	1.1 Ry M_p
$L=$	44,88 ft	44,88 ft	Longitud
$V_{cm}=$	5,40 kip	0,46 kip	Ec. 49 Etabs
$V_{cvt}=$	7,85 kip	0,57 kip	Ec. 49 Etabs
$V_{eq}=$	36,36 kip	10,74 kip	2 (1.1 Ry M_p) / Lcf
$V_u=$	47,84 kip	11,68 kip	Ec. 49 Etabs

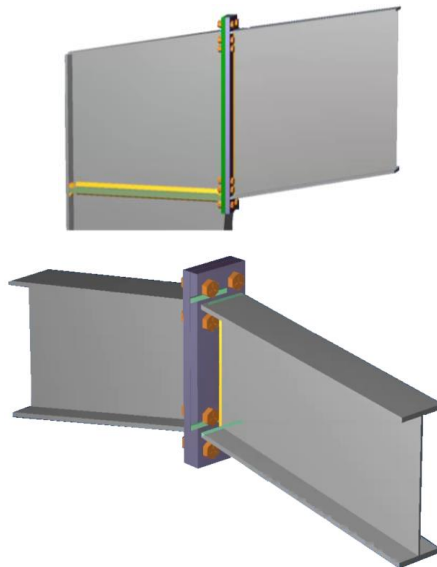
Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

- M_p = resistencia a la flexión permisible
- M_u = resistencia a la flexión última
- V_{cm} = resistencia al cortante por carga muerta
- V_{cvt} = resistencia al cortante por carga viva
- V_{eq} = resistencia al cortante equivalente
- V_u = resistencia al cortante último

Las resistencias obtenidas en el análisis se exportan a un software especializado en conexiones para poder generar de manera semi automática el dimensionamiento óptimo de los elementos que las conforman. El diseño de las conexiones sobrepasa el alcance del presente documento, por lo que se representan gráficamente con ayuda de un software automatizado de diseño.

Figura 69. **Conexión a hombro y a cumbrera**



Fuente: elaboración propia, realizado con RAM *Connection* 11.

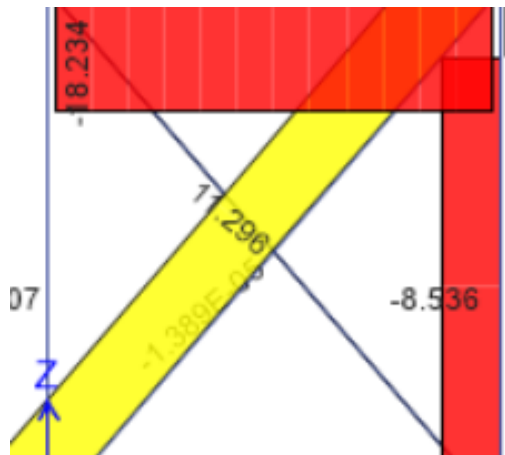
4.2.4.3. Sistema de marcos ordinarios con arriostramiento concéntrico (OCBF)

Permite el diseño de riostras solo a tensión, las cuales resisten fuerzas laterales y controlan los desplazamientos de las estructuras. Los miembros deben cumplir con ser moderadamente dúctiles.

4.2.4.4. Diseño de riostras

El arriostramiento debe ser esbelto y no deben satisfacer los criterios de ductilidad moderada. Los resultados son los siguientes:

Figura 70. Tensión última en riostra



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Al determinar la capacidad la resistencia a la tensión se determina que las secciones cumplen como se observa en la tabla siguiente:

Tabla XL. **Chequeo de riostras**

Sección=	L3X3X1/4	
L=	363,00 in	Longitud
L _z =	181,50 in	0,50L
K=	0,85	
KL _z /r _z =	263,72	
Ag=	0,93 in ²	in ²
φT _n =	30,00 kip	0,9AgF _y
φM _n =	5,71 kip-ft	Ec. 49 Etab
T _u =	11,30 kip	Ec. 49 Etab
M _u =	0,08 kip-ft	Ec. 49 Etab
D/C=	0,39	Ok

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

k = factor de reducción para angulares a tensión

A_g = área de perfil de acero

T_n = resistencia a la tensión nominal

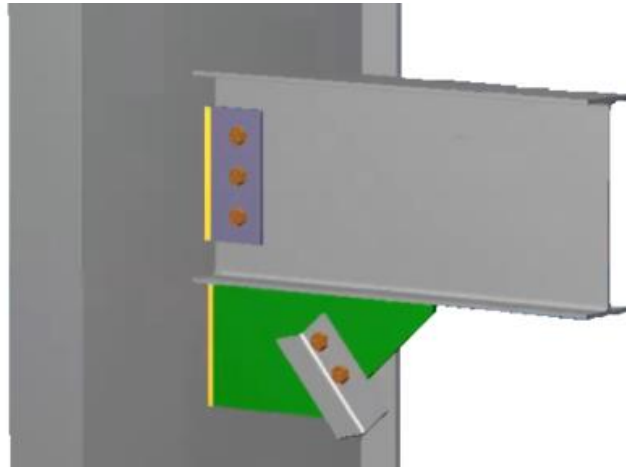
T_u = resistencia a la tensión última

M_n = resistencia a la flexión nominal

M_u = resistencia a la flexión última

Las resistencias o obtenidas en el análisis se exportan a un software especializado en conexiones para poder generar de manera semi automática el dimensionamiento óptimo de los elementos que las conforman, el diseño de las conexiones sobrepasa el alcance del presente documento, por lo que se representan gráficamente con ayuda de un software automatizado de diseño.

Figura 71. **Conexión de arriostramientos**

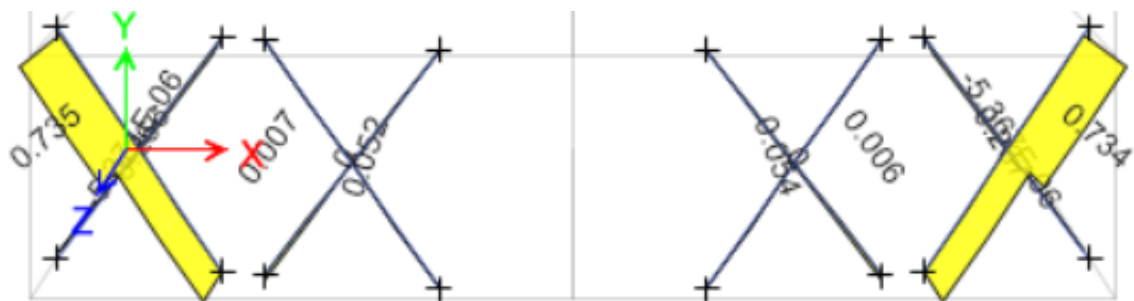


Fuente: elaboración propia, realizado con RAM Connection 11.

4.2.4.4.1. **Diseño de tensores**

Los tensores del techo brindan integridad al diafragma, para estos elementos no se permite utilizar cables por lo que habitualmente se utilizan las varillas de acero de grado 60.

Figura 72. **Carga axial última en tensores**



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Al determinar la capacidad la resistencia a la tensión se determina que las secciones cumplen como muestra la tabla siguiente:

Tabla XLI. **Chequeo de tensores**

Diseño tensor		
$F_y=$	60,00 kis	
Diámetro=	0,75 in	
$A_g=$	0,44 in ²	
$P_u=$	0,74 kip	Ec. 49 Etabs
$\phi F_y A_g=$	23,86 kip	
D/C=	4%	Ok

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

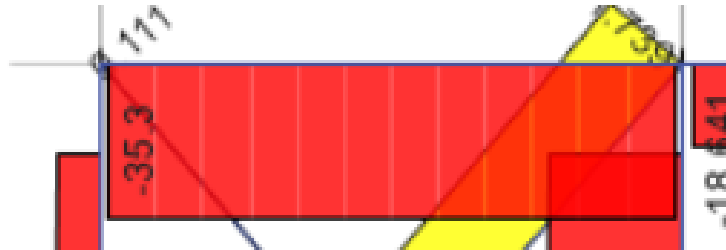
A_g = área de perfil de acero

P_u = resistencia de compresión axial última

4.2.4.4.2. **Diseño de vigas**

Las vigas que conforman los marcos OCBF soportan cargas con factor de mayoración descritos en la ecuación 51. Los resultados de Etabs son los siguientes:

Figura 73. Carga axial última de viga



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Al determinar la capacidad la resistencia axial, de momento y cortante se determina que la sección W16x26 de la viga cumplen como muestra la tabla siguiente:

Tabla XLII. Chequeo de viga

Sección=	W16X26	
P_u =	35,30 kip	Ec. 51 Etabs
M_u =	3,30 kip-ft	Ec. 51 Etabs
V_u =	1,00 kip	Ec. 51 Etabs
ϕP_n =	41,23 kip	Ec. 51 Etabs
ϕM_n =	81,88 kip-ft	Ec. 51 Etabs
D/C=	91%	Ok

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

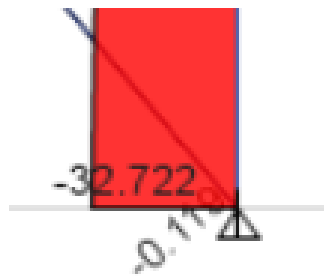
- M_u = resistencia a la flexión última
- V_u = resistencia al cortante último
- P_u = resistencia de compresión axial última
- M_n = resistencia a la flexión nominal

P_n = resistencia de compresión axial nominal

4.2.4.4.3. Diseño de columnas

Las cargas axiales que deben soportar las columnas contienen efectos de sismo mayorados expresados en la ecuación 51.

Figura 74. Carga axial última de columna



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Al determinar la capacidad la resistencia axial se determina que las secciones de la columna cumplen como muestra la tabla siguiente:

Tabla XLIII. Diseño de columnas

Diseño columna		
Peq=	8,54 kip	Ec. 49 Etabs
Pcm=	8,40 kip	Ec. 49 Etabs
Pcvt=	10,00 kip	Ec. 49 Etabs
Pu=	32,72 kip	Ec. 51 Etabs
ϕP_n =	141,69 kip	Ec. 51 Etabs
D/C=	24%	Ok

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Donde:

- P_{eq} = resistencia de compresión de carga sísmica
- P_{cm} = resistencia de compresión axial de carga muerta
- P_{cvt} = resistencia de compresión axial de carga viva
- P_u = resistencia de compresión axial última
- P_n = resistencia de compresión axial nominal

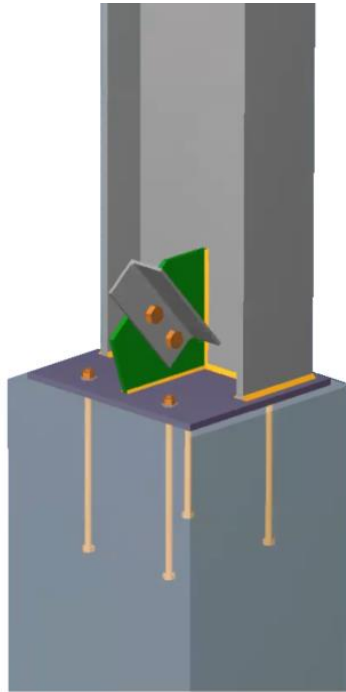
4.2.4.5. Diseño de cimentaciones

Las cimentaciones para estructuras de acero constan de platina, pedestal y zapata.

4.2.4.5.1. Diseño de platina

Las platinas calculan con la sobre resistencia transmitida por las columnas y las breizas. Debe tener el ancho suficiente para que reposen los elementos estructurales. Para su cálculo estructural con la metodología BIM las solicitaciones se exportan a un software especializado en conexiones donde de manera semiautomática se iteran diferentes secciones hasta obtener los elementos óptimos. El diseño de las conexiones sobrepasa el alcance del presente documento, por lo que se representan gráficamente con ayuda de un software automatizado de diseño.

Figura 75. **Conexión a pedestal**

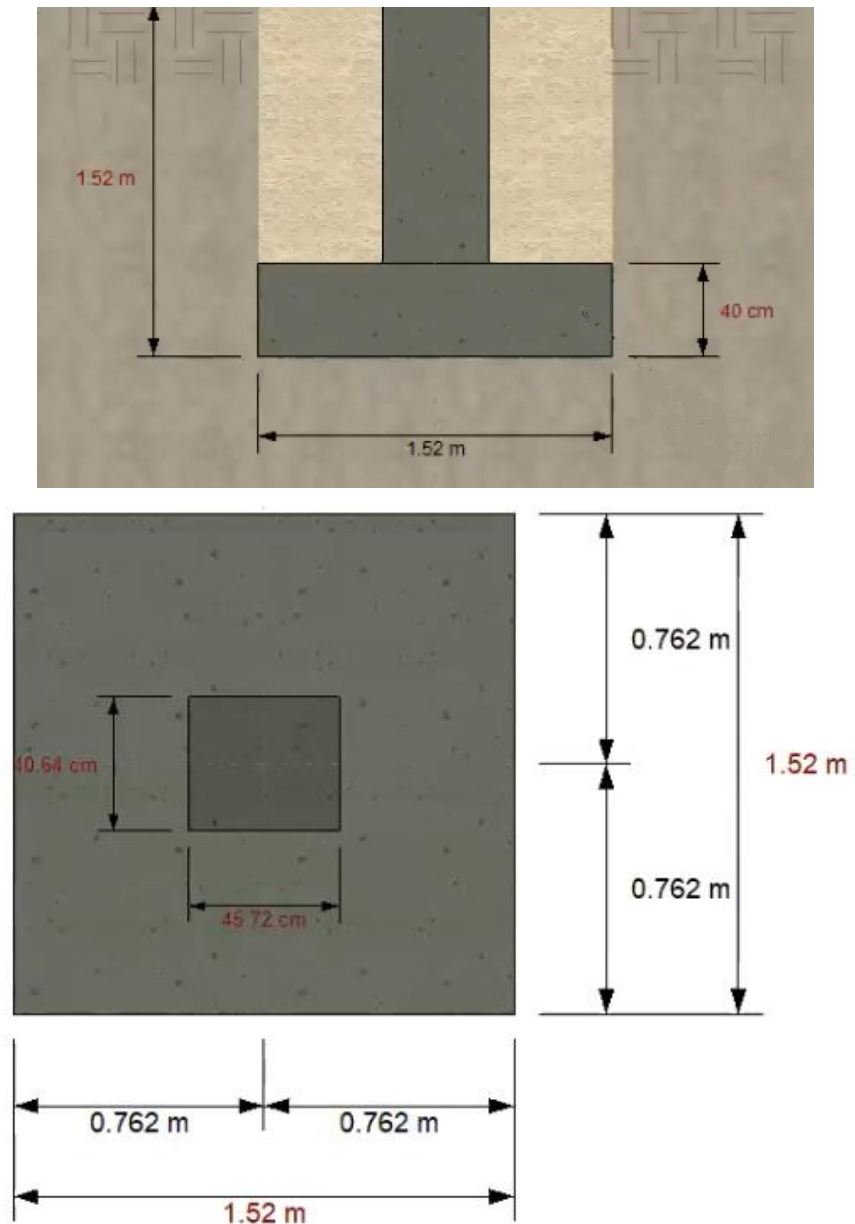


Fuente: elaboración propia, realizado con RAM Connection 11.

4.2.4.5.2. Diseño de pedestal y zapata

Para el diseño de zapatas se debe asignar al suelo un módulo de subrasante (Apéndice 3) al utilizar un programa especializado en cimentaciones como RAM Foundation las componentes inerciales y restricción de desplazamientos se crean por defecto. Para el diseño de cimentaciones se le debe asignar las combinaciones para cimentaciones definidas en el capítulo 3. El dimensionamiento de zapata y pilar es el siguiente:

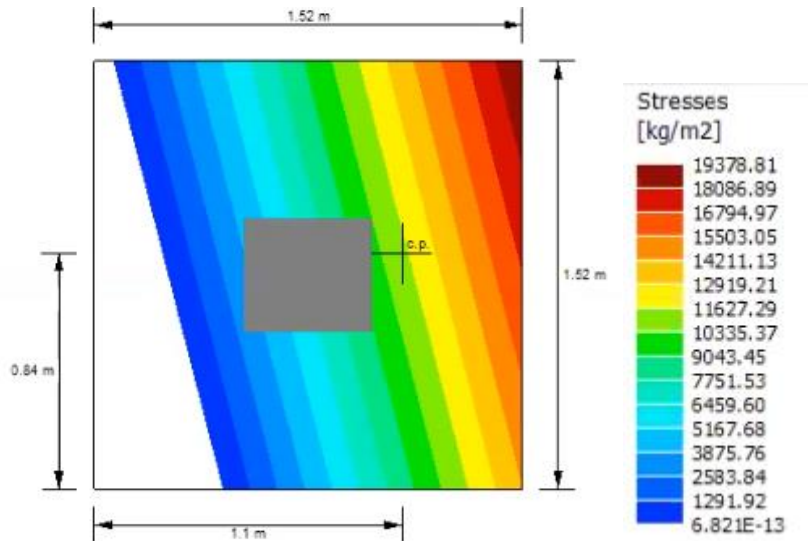
Figura 76. Dimensionamiento de pedestal y zapata



Fuente: elaboración propia, realizado con RAM Foundation.

Al correr el análisis se obtienen las solicitaciones siguientes:

Figura 77. **Solicitaciones del suelo**



Fuente: elaboración propia, realizado con RAM Foundation.

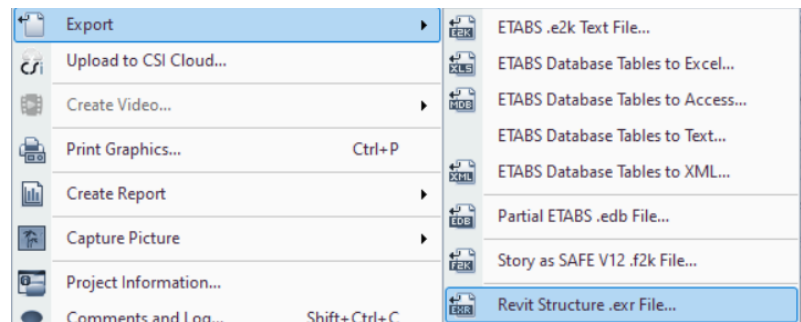
El suelo arcilloso seleccionado del apéndice 3 permite esfuerzos admisibles de $3,00 \text{ kg/cm}^2$ siendo la sollicitación máxima para el diseño de cimentaciones de $1,94 \text{ kg/cm}^2$ con refuerzo No. 6 a cada $20,00 \text{ cm}$. Por lo que las zapatas cumplen con un dimensionamiento de $1,52 \text{ m}$ por lado y un peralte de $0,50 \text{ m}$.

4.2.5. Interoperabilidad a programa paramétrico

Al tener el análisis estructural del proyecto se exporta el modelo Etabs hasta el software paramétrico especializado en estructuras de acero, si bien Revit puede ser uno de estos softwares en el particular caso de las secciones acarteladas se tienen conflictos de exportación debido a problemas de entendimiento con elementos que cambian de dimensión en un mismo plano. Por

lo que el software que será utilizado para el modelado de la nave industrial es Advance Steel el cual se exporta de la siguiente manera:

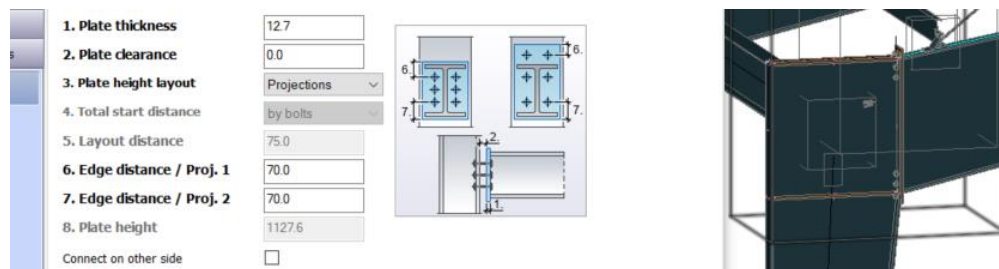
Figura 78. **Exportación de modelo Etabas a Advance Steel**



Fuente: elaboración propia realizado con Etabas 18.

Etabas genera las representaciones físicas de los elementos estructurales principales como las columnas, vigas, costaneras, tensores, entre otros. Sin embargo, no genera conexiones entre estos elementos, por lo que se deben asignar con el software de modelado según los parámetros que dio el resultado del diseño estructural.

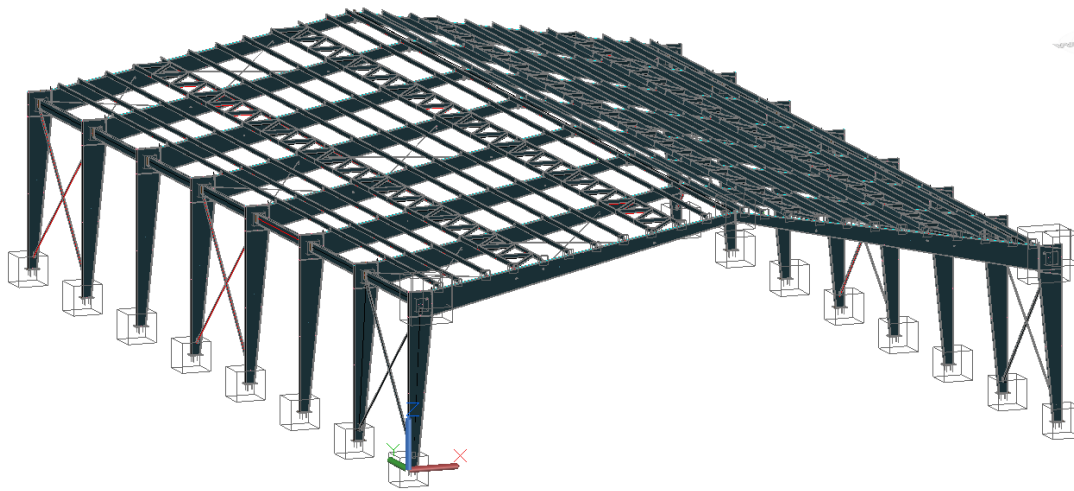
Figura 79. **Asignación de conexiones entre elementos**



Fuente: elaboración propia, realizado con Advance Steel 2021.

El modelo paramétrico se puede exportar a otros softwares como Revit o puede utilizarse directamente desde Advance Steel para sincronizarlo en la nube y detectar si existen interferencias entre los elementos.

Figura 80. **Modelo Estructural de Nave Industrial**



Fuente: elaboración propia, realizado con Advance Steel 2021.

5. GESTIÓN DE PROYECTOS BIM

5.1. Gestión de proyectos

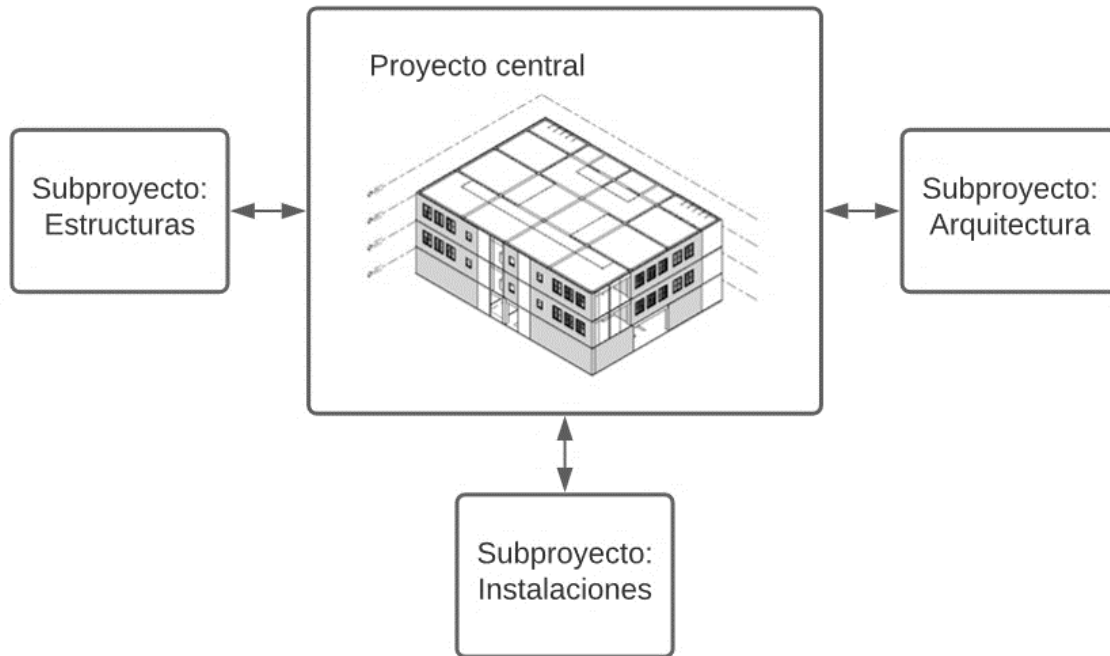
En el trabajo colaborativo, la gestión de proyectos implica una estructura ordenada en la que cada miembro del equipo cumple con roles específicos durante el ciclo de vida del proyecto, en las diversas fases de planificación se deben sincronizar y actualizar constantemente los modelos, archivos, documentos, fotos, cronogramas, entre otros.

Dentro de la metodología BIM existen dos entornos de trabajo colaborativo posibles. El primero sucede cuando los miembros del equipo pertenecen a una misma red local. El segundo sucede cuando empresas terceras o miembros del equipo se encuentran fuera de la red local por lo que se necesita administrar proyectos a través de la nube.

El objetivo del trabajo colaborativo es crear un modelo central donde se administre la información generada por los diferentes actores que participan en el desarrollo del proyecto, teniendo la facultad del intercambio continuo de avances en las distintas disciplinas que lo conforman permitiendo detectar errores o interferencias entre elementos estructurales, arquitectónicos y de instalaciones.

El modelo central recopila la información proporcionada por las diferentes especialidades a través de subproyectos, pueden existir diversos subproyectos siendo un esquema general el siguiente:

Figura 81. **Esquema general de un proyecto central**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

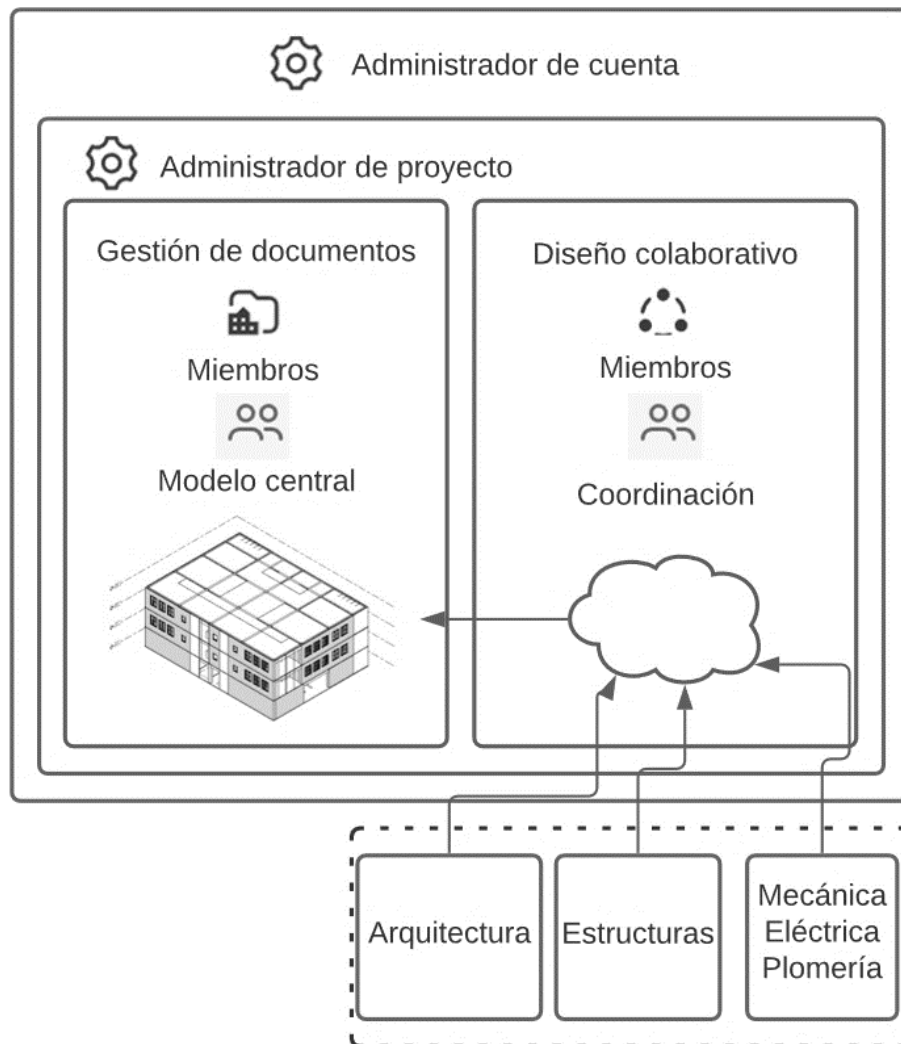
Existen diferentes plataformas virtuales en las cuales se administran proyectos BIM, al haber creado los modelos paramétricos en Revit se utiliza el software Autodesk *Construction Cloud* que pertenece al mismo desarrollador y admite formatos universales como el IFC para su interpolación con softwares de terceros.

5.1.1. Administradores y usuarios

El administrador de usuario es la persona que posee el privilegio de asignar miembros, empresas y funciones a los proyectos. Al crear un proyecto asigna administradores de proyectos creando dos servicios. El primero llamado documentos de gestión donde se tiene un registro de archivos, revisiones,

informes e incidencias dentro del proyecto. El segundo llamado diseño colaborativo donde se le da el seguimiento al estado del proyecto programando reuniones, administrando cambios y coordinando avances de las múltiples disciplinas que conforman el proyecto. A cada uno de los servicios se le asignan administradores de proyectos y usuarios comunes.

Figura 82. **Jerarquía de usuarios**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

5.1.2. Equipo de trabajo

El administrador del proyecto asigna roles (ingenieros, arquitectos, administradores, consultores, entre otros). a los miembros que conforman el trabajo. Para interactuar con el modelo en la nube cada miembro posee un nivel de permiso, estos niveles son:

- Primer nivel: visualización
- Segundo nivel: creación de elementos
- Tercer nivel: edición de elementos
- Cuarto nivel: administración

Los miembros según su rol se agrupan en equipos, al crearlos se generan automáticamente carpetas asociadas que permiten el ordenamiento de la información según su disciplina.

Figura 83. **Equipos de trabajo y carpetas asociadas**

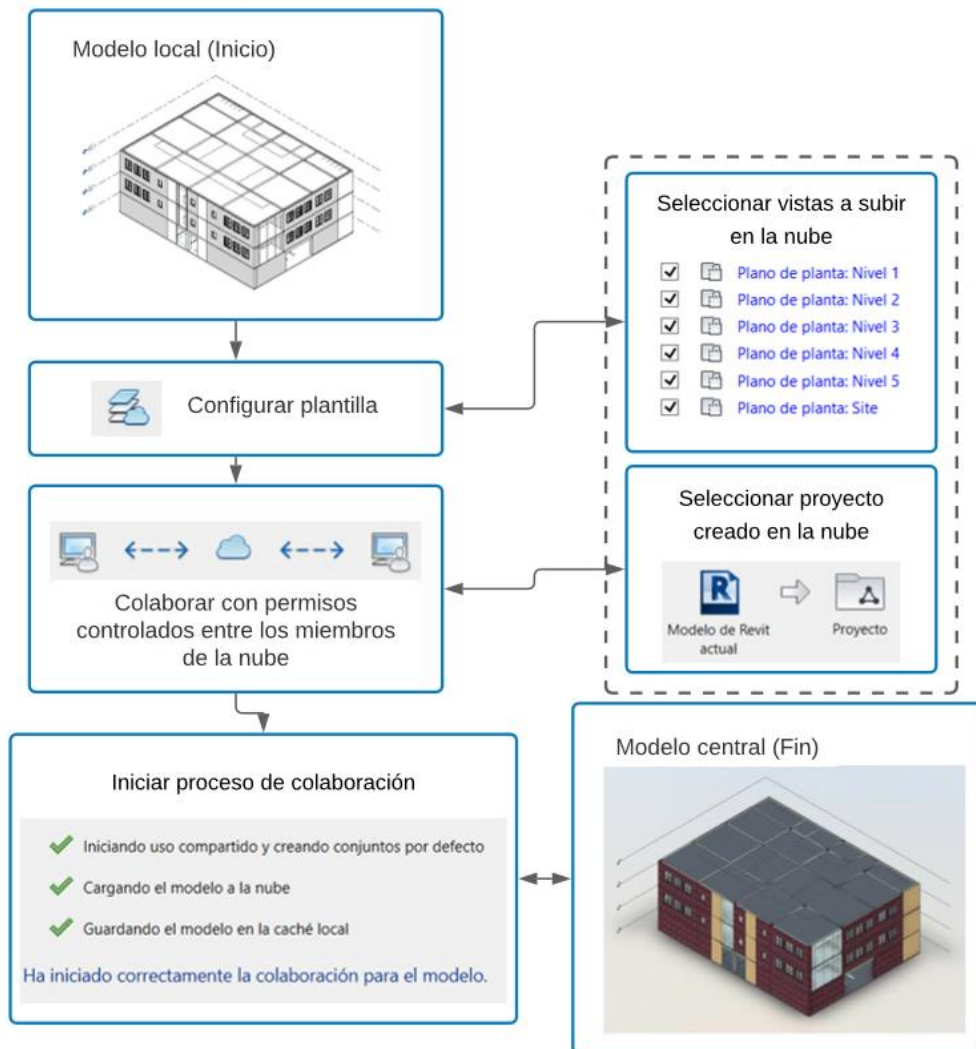
Equipo		Project Files	
	Arquitectura BIM 	>	 Arquitectura BIM
	Estructural BIM 	>	 Estructural BIM
	Instalaciones BIM 	>	 Instalaciones BIM
		>	 Shared

Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk 360.

5.1.3. Modelo central

Los modelos creados desde el equipo (modelo local) permiten activar la colaboración en la nube para que varias personas trabajen simultáneamente en el modelo central (modelo en la nube) siguiendo la ruta descrita a continuación:

Figura 84. Diagrama de flujo para crear el modelo central



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

5.1.4. Sincronización del modelo

La sincronización no se refiere únicamente al modelo central sino también a las buenas prácticas de los equipos de trabajo, al establecerse metas, tiempos,

horarios y cualquier elemento de buena práctica que genere armonía en el desarrollo de los proyectos.

La sincronización consiste en la actualización de elementos durante las fases del ciclo de vida del proyecto, para ejemplificar en proyecto de concreto armado se estableció que las dimensiones de columna según el predimensionamiento eran de 50,00 cm x 50,00 cm sin embargo en la fase de diseño la sección mínima establecida fue de 70,00 cm x 70,00 cm, una buena práctica para el registro de los cambios es dejar comentarios en cada sincronización.

Figura 85. **Comentario de cambios en modelo**

Ubicación de modelo central:

BIM 360://Oficinas/Arquitectura BIM CLOUD.rvt Examinar...

☐ Compactar modelo central (lento)

Después de sincronizar, ceder los siguientes subproyectos y elementos:

☐ Subproyectos de normas de proyecto ☐ Subproyectos de vista

☐ Subproyectos de familia ☐ Subproyectos creados por el usuario

☒ Elementos prestados

Comentario:

Aumento de sección de columnas principales

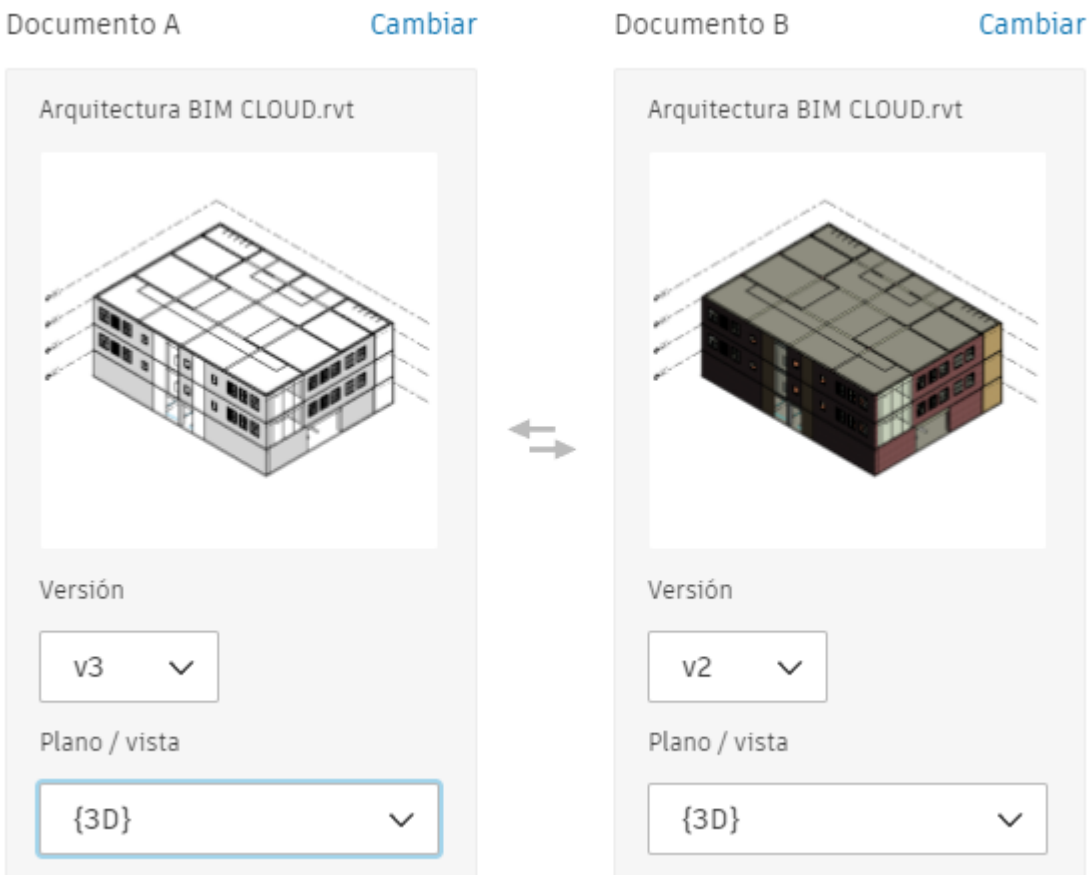
☒ Guardar archivo local antes y después de sincronizar con archivo central

Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

La actualización del modelo y su sincronización se ve reflejado en el modelo local por lo que se necesita realizar la publicación para que el modelo central se actualice en la nube creando de manera automática una nueva versión

del modelo, esta sirve como referencia para comparar las modificaciones a las que se ha sometido el modelo.

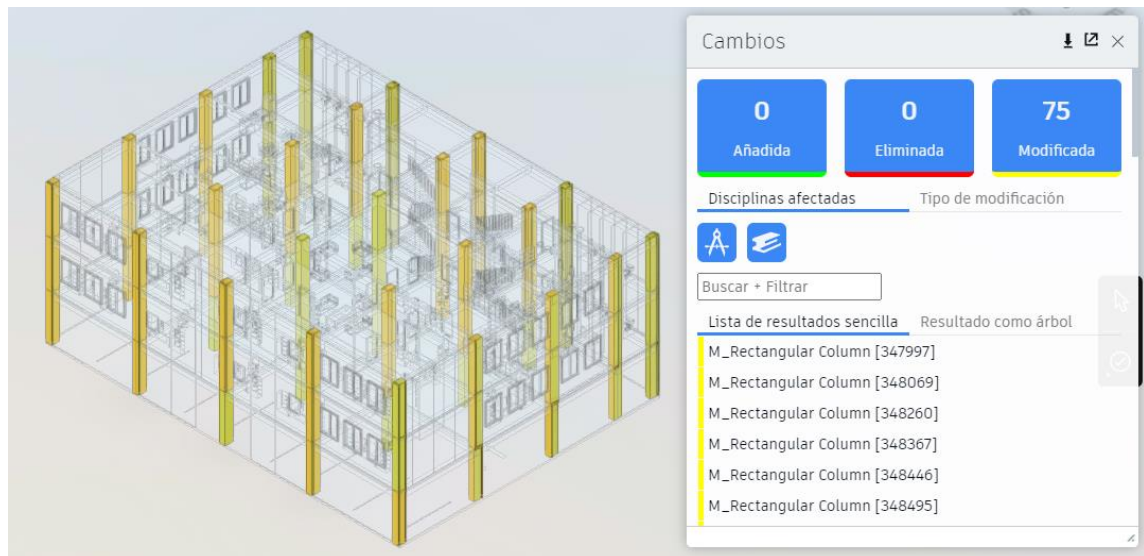
Figura 86. **Comparación entre versiones del modelo**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

La comparación de elementos permite determinar cuáles fueron los cambios realizados. En una escala de colores los elementos de color verde son los añadidos, los elementos en color rojo son los eliminados y los elementos en color amarillo son los que sufrieron alguna modificación.

Figura 87. Elementos modificados en la nueva versión

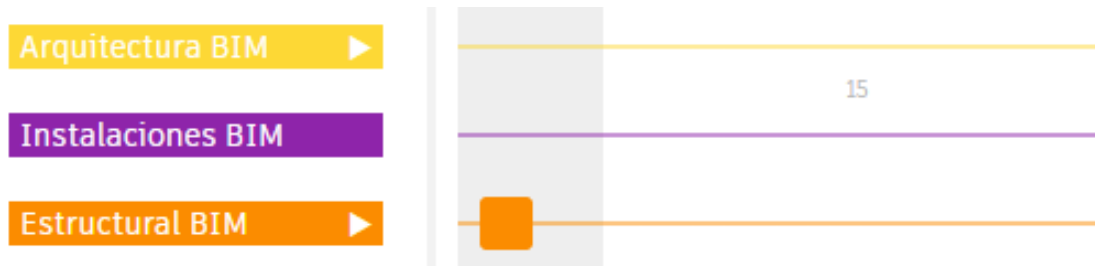


Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk 360.

5.1.5. Paquetes

Los paquetes son capturas de los modelos en una fase establecida que se guarda para poder comparar el avance en las distintas disciplinas en el paso del tiempo. Estos se representan en una línea del tiempo para cada disciplina.

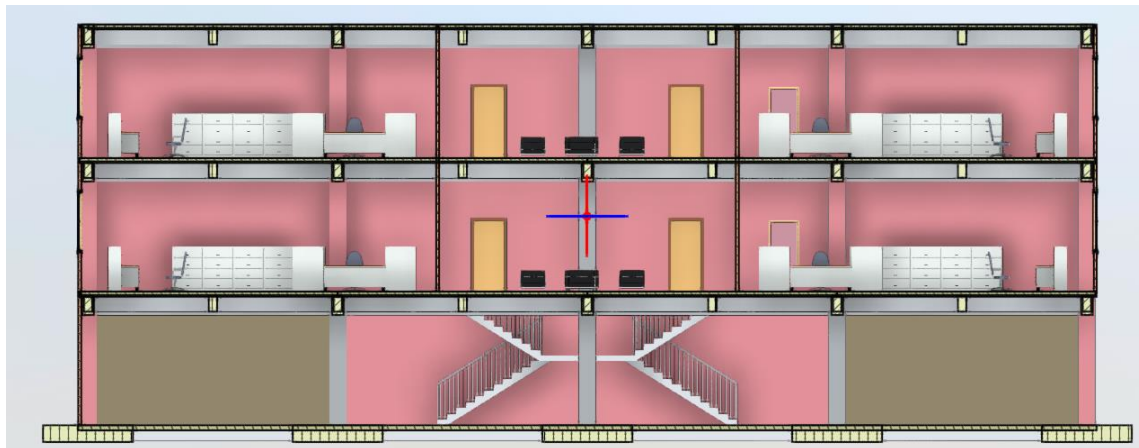
Figura 88. **Lineal del tiempo de paquetes**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk 360.

Al igual que en la sincronización de los modelos permite comparar los cambios que se han dado en el modelo a través de las versiones, pero también permite superponer las diferentes especialidades para determinar si hay intersección entre los modelos locales.

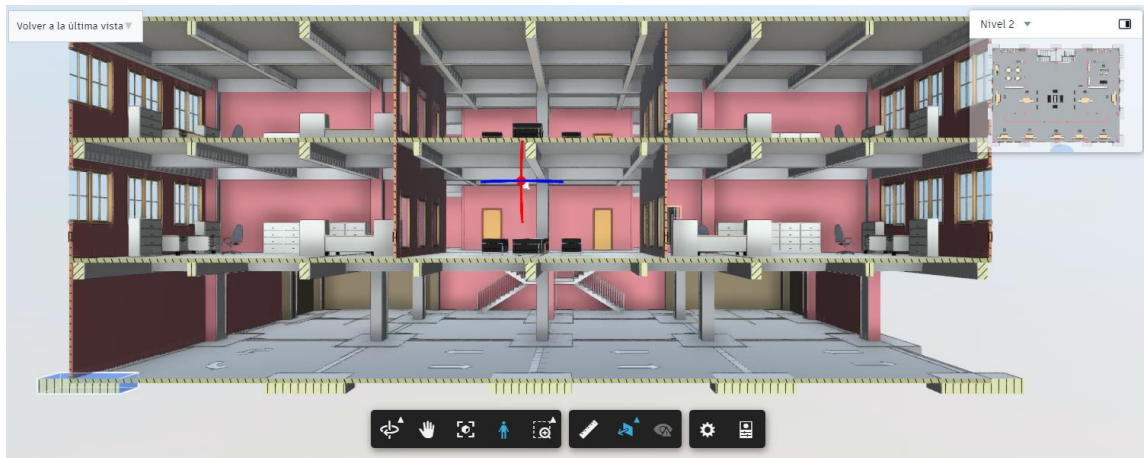
Figura 89. **Superposición de arquitectura y estructuras**



Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk 360.

Permite realizar recorridos virtuales chequeando las dimensiones de los elementos, materiales, cortes y así evitar desde una fase temprana los posibles errores contractivos que aumentan el costo de la obra total.

Figura 90. **Recorrido virtual superpuesto de arquitectura y estructuras**

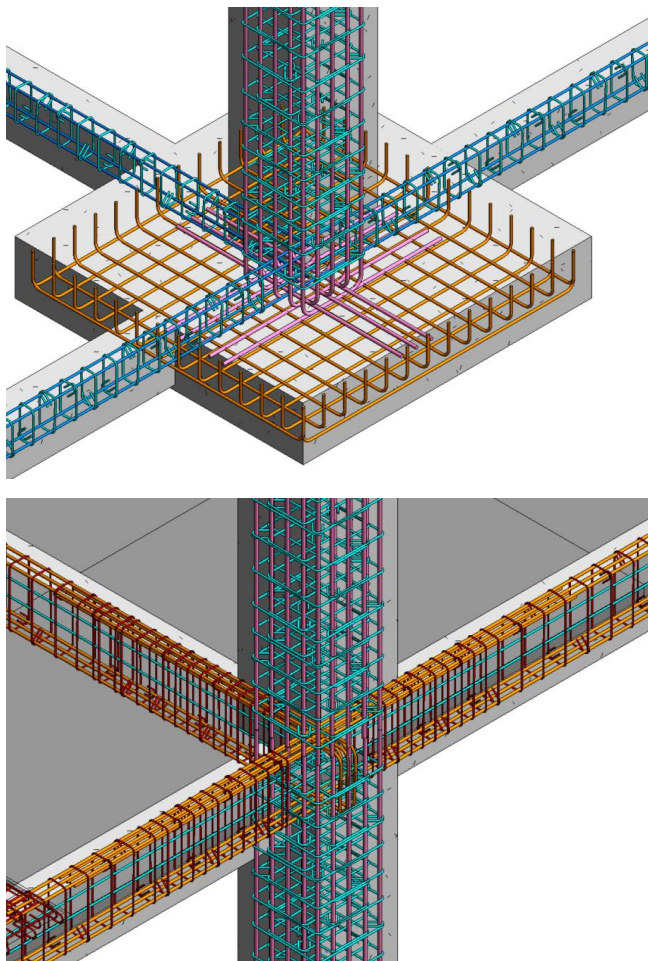


Fuente: elaboración propia, realizado con Autodesk 360.

5.1.6. Detección de Interferencias

En las estructuras de concreto armado permite solventar problemas entre la interacción de elementos. Detectando de manera grafica si los elementos de armadura o estructuras complementaria son posibles realizarlas en campo para una construcción real y así asegurar que no abra una saturación de elementos que no permitan una longitud de desarrollo adecuada, un vaciado correcto de concreto o un costo innecesario en elementos especiales.

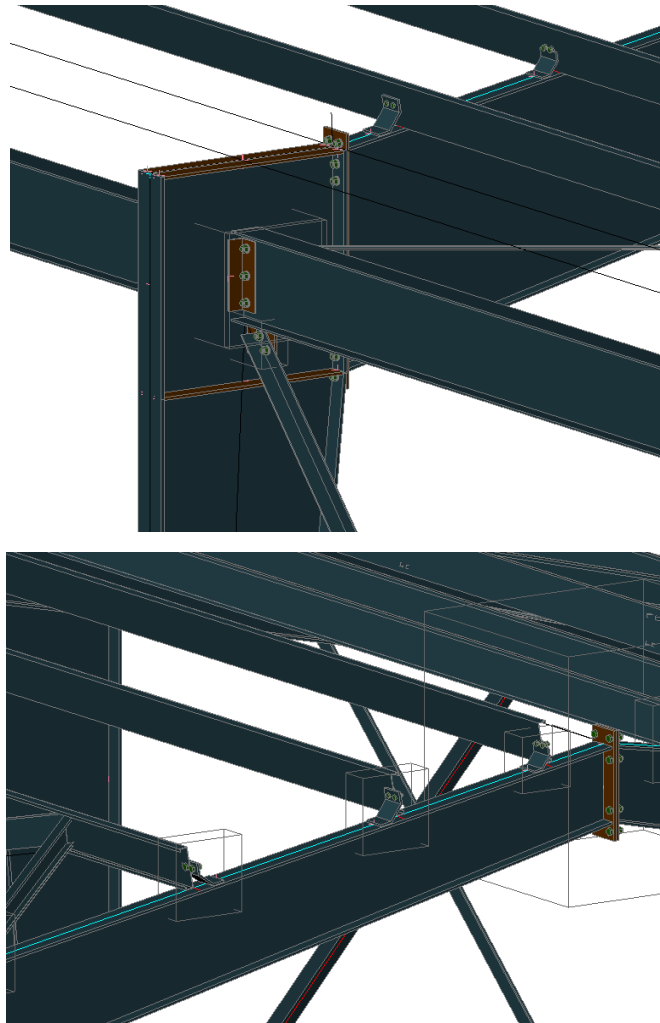
Figura 91. **Detección de interferencias en armado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

En las estructuras de acero un modelo paramétrico permite detectar si existe saturación de elementos que no permitan una adecuada continuidad de elementos estructurales. En las conexiones metálicas detecta si su dimensionamiento permite que los elementos como pernos puedan colocarse sin interrupciones.

Figura 92. **Detección de interferencias en acero**



Fuente: elaboración propia, realizado con Advance Steel 2021.

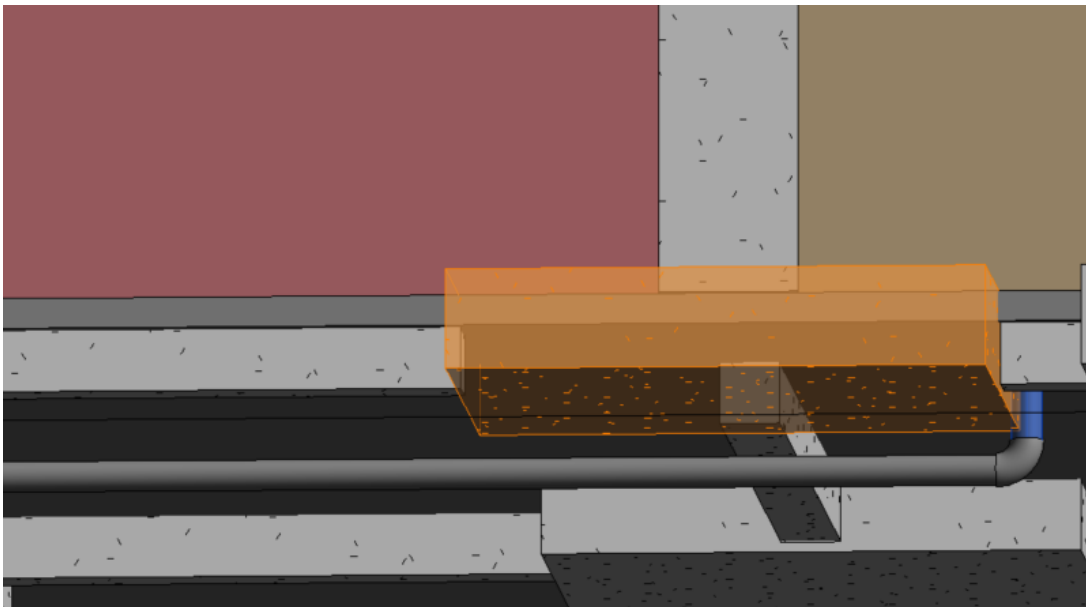
Una de las principales ventajas de la metodología BIM para la toma de decisiones en conjunto es la vinculación entre distintas especializaciones en un mismo entorno. La vinculación posee el siguiente orden lógico:

- Abrir la disciplina base del proyecto a comparar (Estructuras)

- Insertar vinculo Revit
- Seleccionar las disciplinas a comparar (Arquitectura e Instalaciones)
- En colaborar seleccionar detección de interferencias

Al realizar esa acción de manera grafica se obtienen resultados de interferencias entre las distintas especialidades. Como se observa en la siguiente figura. La zapata se encuentra sobre una tubería de drenaje lo que puede provocar aplastamiento y generar una fuga de aguas negras que conlleva a una reducción de resistencia de suelo y podría generar un asentamiento en dicha zona.

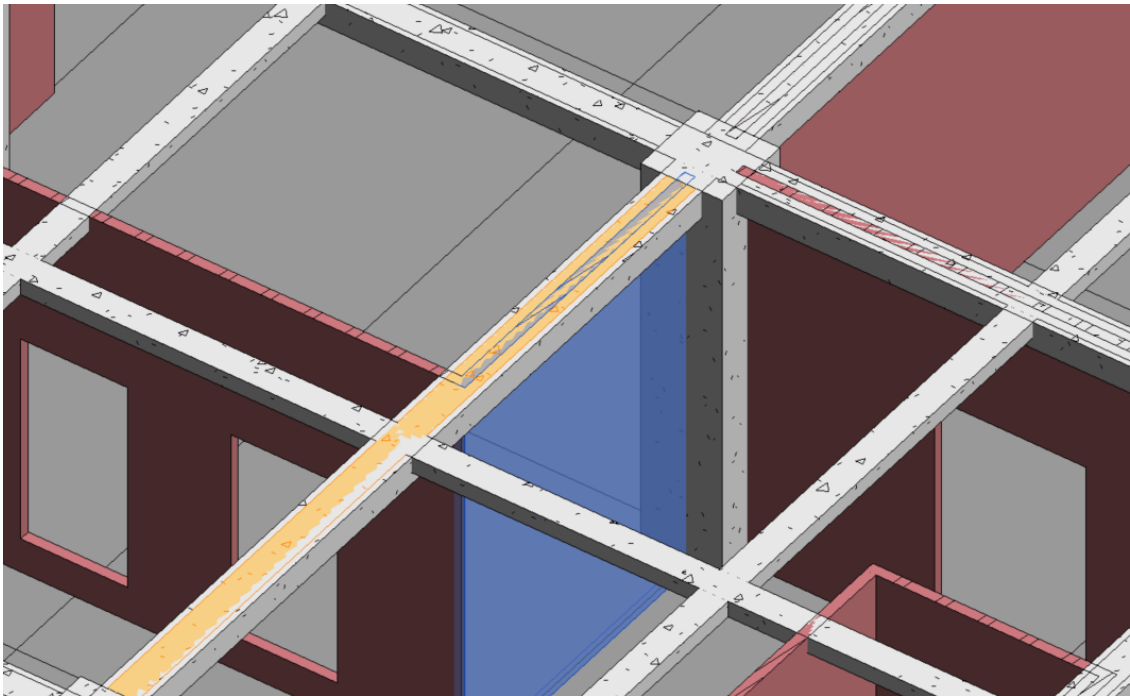
Figura 93. **Interferencia entre cimentaciones e instalaciones**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Otro de los errores más comunes es la interrupción entre elementos estructurales y arquitectónicos. Como se muestra en la siguiente figura. Los muros tabiques fueron modelados a una altura que se introducen en las vigas, problema generado debido al modelado arquitectónico con base en el predimensionamiento. Lo cual se debe reacondicionar debido a que los elementos estructurales no deben ser debilitados por elementos no estructurales.

Figura 94. Interferencia entre viga y muro



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

Esta detección de interferencias permite que la toma de decisiones entre distintos especialistas sea más efectiva. Al ser un proyecto vinculado cuando un equipo de trabajo realice los cambios para evitar interferencias, esto se coordinará con los otros equipos de manera automática.

6. RESULTADOS

6.1. Flujo de trabajo estructural

Con base en las normas ISO 19650, ISO 16757 y las normativas seguridad estructural se determinó un flujo de trabajo BIM con el cual el modelo de información virtual de resultados adecuados en el análisis y diseño estructural.

El flujo inicia con la idea conceptual del proyecto que se plasma con un boceto virtual al cual se le denomina modelo central. Este modelo se transforma en la base de sincronización de la rama estructural en la que se predimensionan las estructuras y se le asignan las propiedades de los materiales. Al asignar los materiales a los elementos estructurales estos generan información en relación a su geometría como lo son el peso propio y los volúmenes.

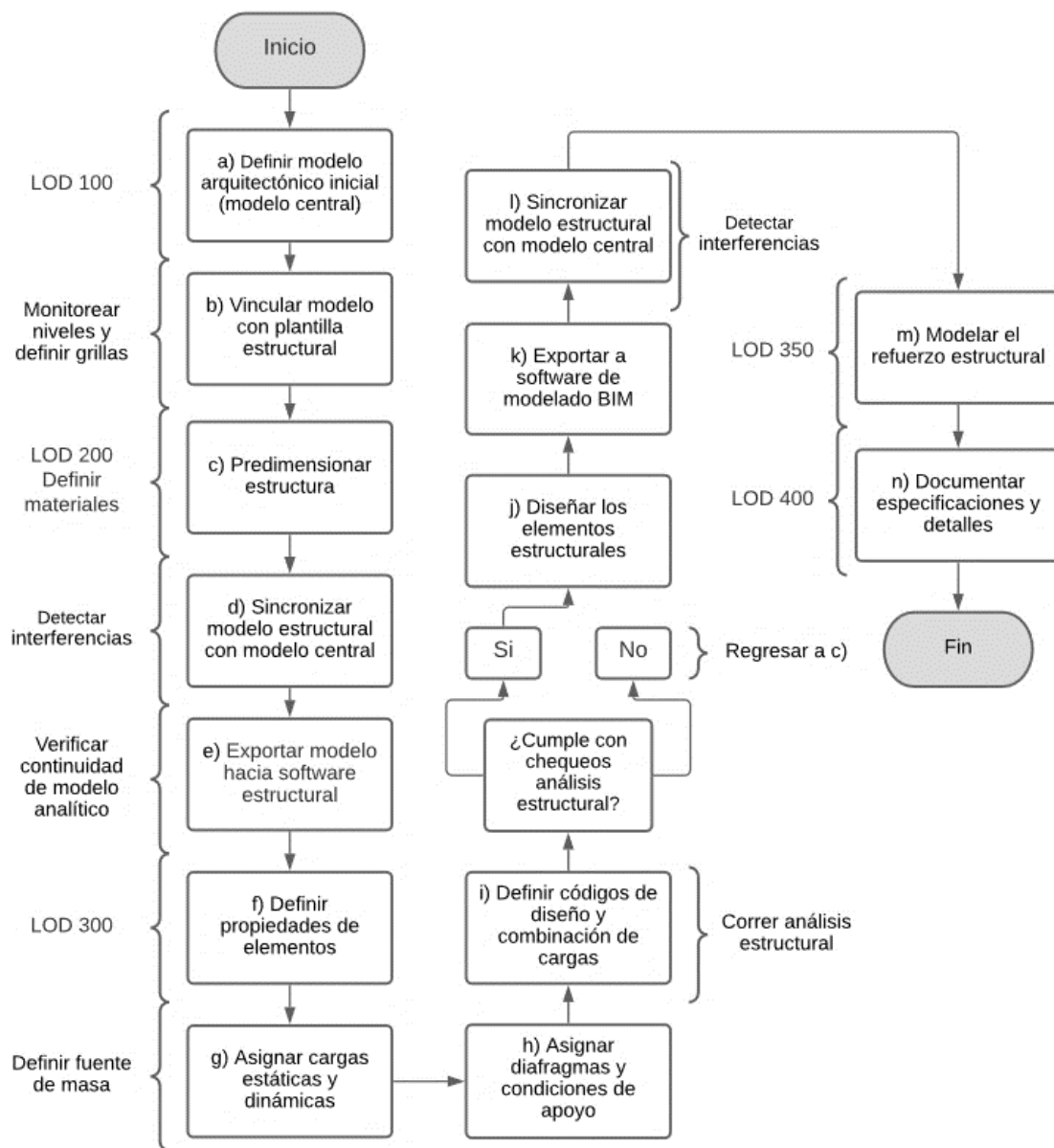
Tras determinar que la estructura modelada es adecuada se exporta el modelo virtual a un software de análisis y diseño estructural, en el que se asignan las cargas dinámicas y estáticas, así como condiciones según códigos de diseño.

Para el análisis estructural se chequean los cumplimientos principales de derivas, participación de masa, estabilidad estructural y los que sean requeridos, tras cumplir de manera satisfactoria estos requerimientos se realiza el diseño de los elementos estructurales.

Tras definir los dimensionamientos de los elementos estructurales se realiza el detallado de elementos según el nivel de alcance requerido por el

proyectista. De una manera grafica el flujo de trabajo BIM estructural adaptando los códigos de diseño nacionales se definen como el siguiente:

Figura 95. **Flujo de trabajo BIM estructural**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

6.2. Resultados del análisis estructural BIM vs CAD

Para confrontar los resultados de la metodología BIM es necesario compararlo con la metodología tradicional CAD que utiliza los softwares como herramientas de dibujo digital. Dentro del marco conceptual las diferencias son las siguientes:

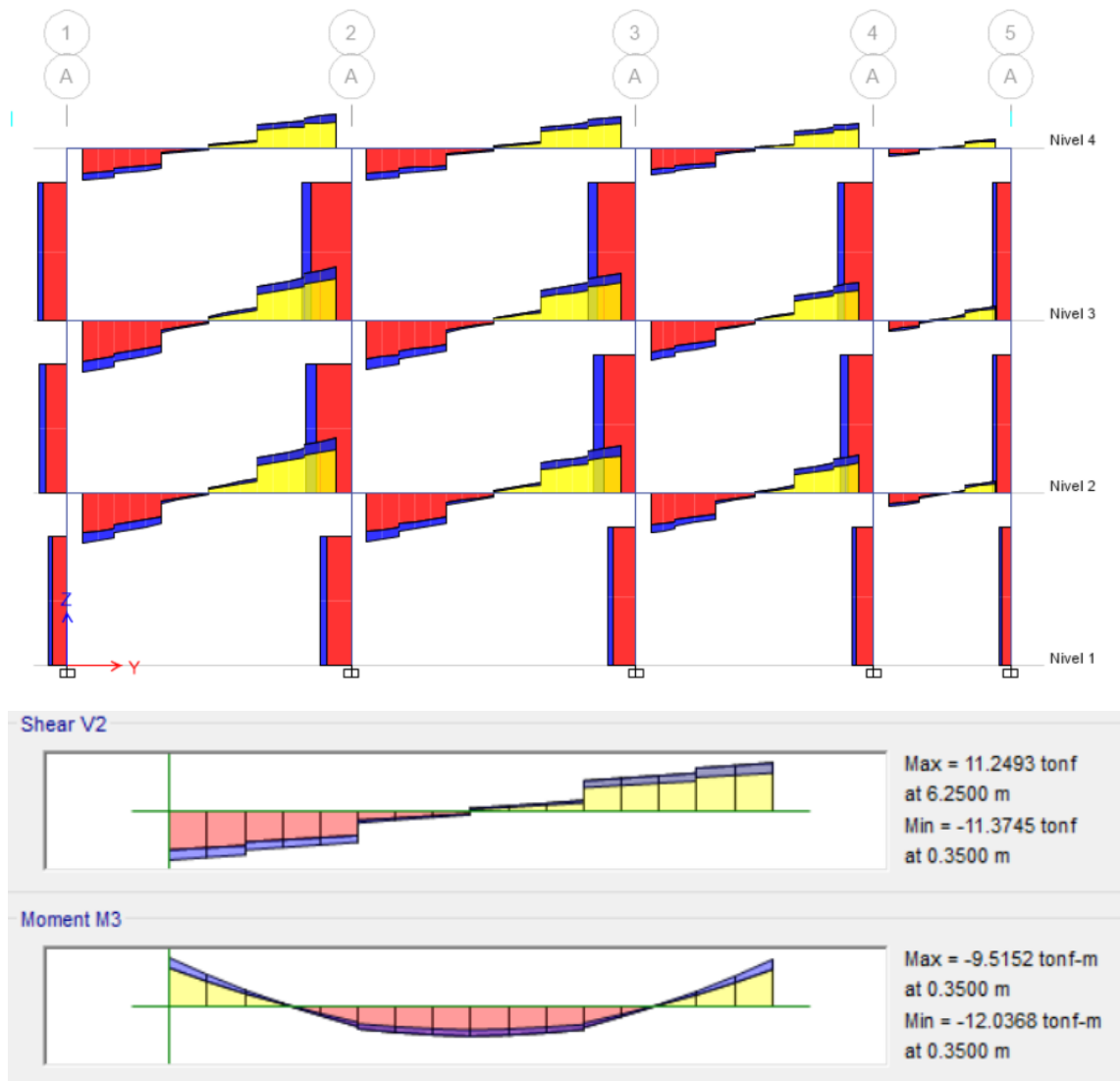
Tabla XLIV. Comparación entre metodologías de trabajo

Metodología BIM	Metodología tradicional CAD
Es una metodología que permite generar información unificada durante el ciclo de vida del proyecto.	Son softwares utilizados para crear representaciones bidimensionales y tridimensionales.
Genera modelos paramétricos que permiten sincronizar y reflejar los cambios en todos los modelos.	Genera modelos individuales que al realizar cambios en alguno de los archivos se deben modificar de manera manual los demás.
Los equipos de trabajo pueden trabajar al mismo tiempo sobre un mismo modelo realizando un trabajo colaborativo.	Los equipos de trabajo realizan avances de manera individual, por lo que el trabajo colaborativo se realiza cuando hay avances significativos en las disciplinas.
Posee un flujo de trabajo intenso en las etapas tempranas de la planificación reduciéndose significativamente con el paso del tiempo.	Posee un flujo de trabajo bajo en las etapas tempranas de la planificación incrementado significativamente con el paso del tiempo.
Permite detectar interferencias o conflictos entre arquitectura, estructura e instalaciones de manera automatizada.	Los conflictos o interferencias se detectan hasta fases avanzadas de la planificación y se deben corregir de manera
Apresura la generación de documentación ya que al crear elementos estos aparecen en todas las vistas aplicables.	Los planos se deben hacer de manera individual utilizando métodos de dibujo convencionales.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

Para la comparación con la metodología CAD se realiza un análisis estructural modelando la estructura directamente desde el software Etabs. Obteniendo los resultados siguientes:

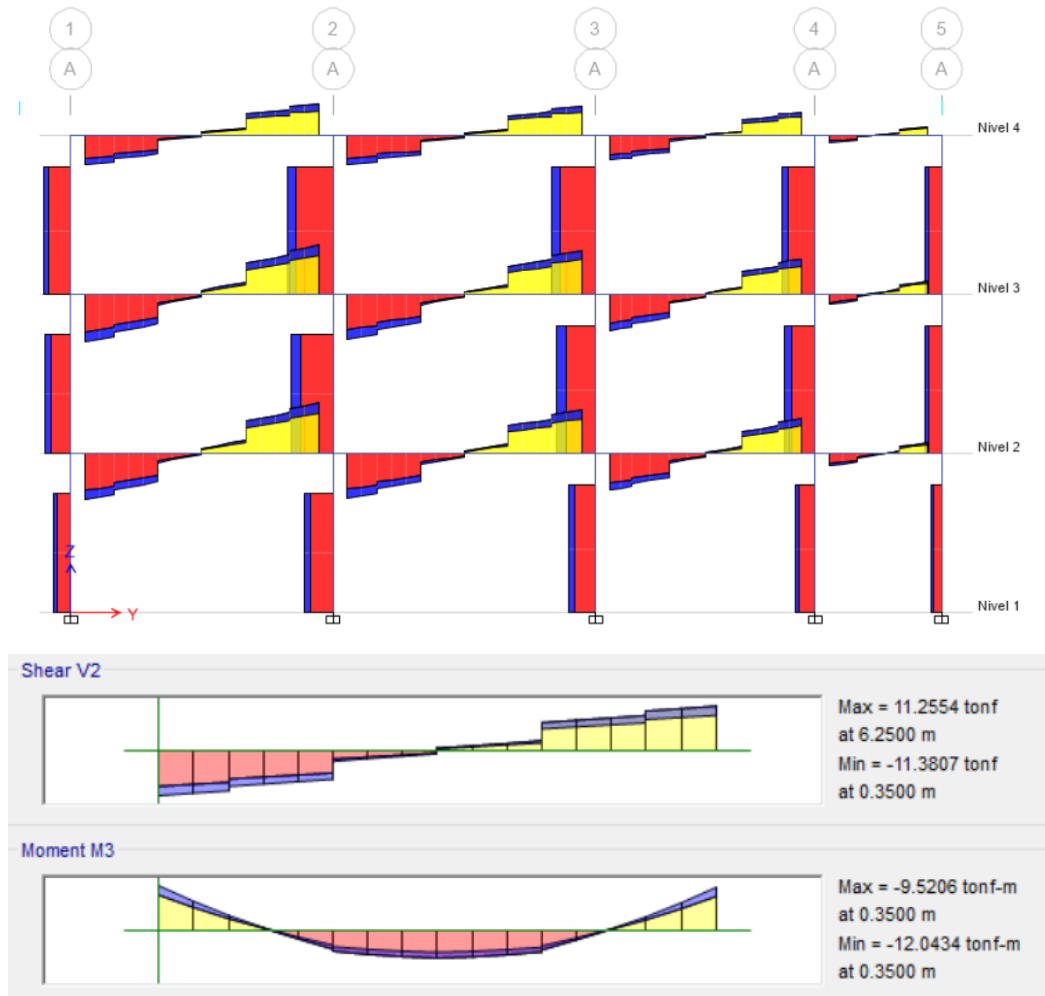
Figura 96. Momentos y cortantes en viga con CAD



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

Desplegando la misma sección para el modelo analítico obtenido con la metodología BIM se obtienen los siguientes resultados:

Figura 97. Momentos y cortantes en viga con metodología BIM



Fuente: elaboración propia, realizado con Etabs 18.

La variabilidad de los resultados entre ambas metodologías es inferior al 1 %, esta variación es debido a diferencia de decimales en las propiedades de los materiales que afectan directamente el peso propio de la estructura. En la estructura metálica desarrollada en el capítulo 4 se inició la metodología directamente en el software de análisis estructural por lo que los resultados son los mismos para ambas metodologías.

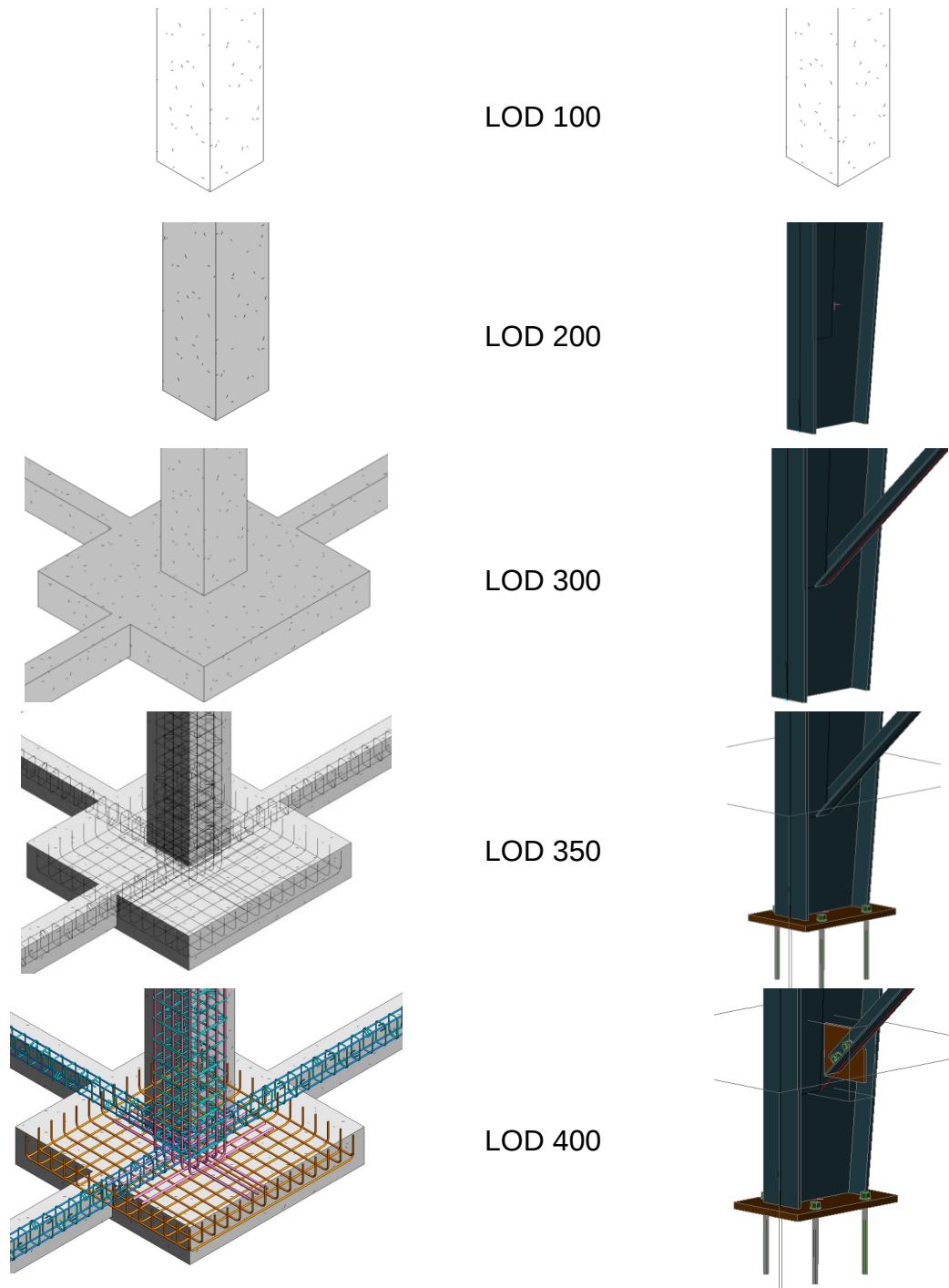
6.3. Información obtenida según nivel de desarrollo

Los niveles de desarrollo de los proyectos consisten en la información que contiene el modelo virtual, siendo para la ingeniería estructural lo siguiente:

- LOD 100: define el posicionamiento bidimensional de los elementos estructurales como idea conceptual sin contener información adicional, este nivel da origen al modelo central.
- LOD 200: establece la tipología estructural de los elementos proporcionando además de un posicionamiento una representación geométrica de los elementos como su volumen o localización en el espacio físico. Para el flujo de trabajo esta fase establece las propiedades mecánicas de los materiales, así como el peso propio de los elementos.
- LOD 300: los elementos ya son sistemas específicos que contienen parámetros según códigos de diseño como, por ejemplo: condiciones de apoyo, rigidez, participaciones de masa, combinaciones de carga. En el flujo de trabajo asignan las cargas estáticas y dinámicas del proyecto.
- LOD 350: la geometría y armado de los elementos ya se encuentran definidos, a nivel grafico la estructura representa de una manera simple el detallado.
- LOD 400: los elementos estructurales cuentan con un alto detalle por lo que se establece un modelo de construcción virtual real.

De una manera gráfica el nivel de desarrollo de los elementos estructurales se pueden establecer como en la siguiente figura:

Figura 98. Niveles de desarrollo de modelos



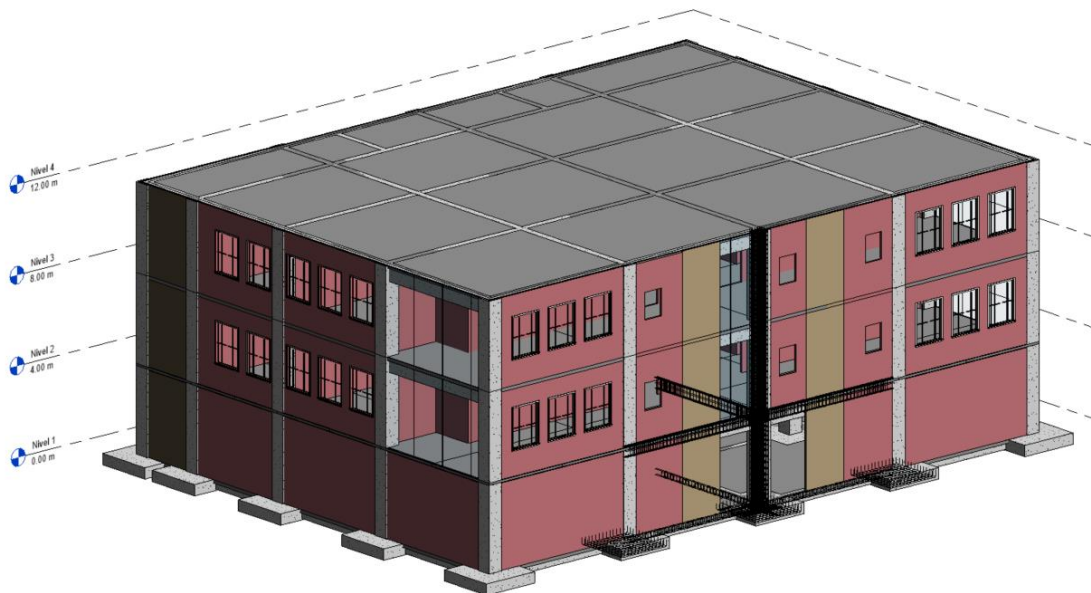
Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

6.4. Gestión de modelo en la nube

Un modelo centralizado en la nube permite que equipos multidisciplinarios sincronicen avances, detectando de manera temprana interferencias entre las especializaciones que da oportunidad de solventar estos problemas desde fase iniciales de la planificación. Un modelo virtual facilita el trabajo remoto de la ingeniería estructural permitiéndonos definir de manera adecuada los dimensionamientos estructurales y sus armados no interfieran con su funcionalidad arquitectónica.

De puede definir este modelo virtual como una construcción antes de la construcción lo cual permite reducir tiempos de ejecución al solventar las problemáticas desde la planificación y no tener retrasos durante su ejecución.

Figura 99. **Modelo sincronizado**



Fuente: elaboración propia, realizado con Revit 2021.

6.5. Discusión de resultados

El flujo de trabajo basado en las normas ISO 19650, ISO 16757 adaptando las normativas seguridad estructural utilizadas en Guatemala establecen el proceso adecuado para la Inter operatividad de la metodología BIM permitiendo tener respuestas adecuadas de la edificación para su análisis, diseño y documentación estructural comparándolo con los resultados de la metodología tradicional.

Utilizar la metodología BIM en el diseño estructural de edificaciones permite actualizar de manera automática la información generada por los diferentes equipos de trabajo del proyecto, mejorando la colaboración entre distintos especialistas en un único modelo de información que permite reducir el tiempo de la planificación y evitar errores en fases avanzadas donde un cambio o modificación afectan en gran medida el costo final del proyecto. Por lo que se obtienen estructuras optimizadas desde fases tempranas de planificación.

CONCLUSIONES

1. El beneficio principal de la implementación de la metodología BIM en el diseño estructural es la coordinación remota con equipos multidisciplinarios que permiten definir maneras eficientes de solucionar problemas de interferencia, saturación o armado de elementos estructurales.
2. El inconveniente principal de la implementación de la metodología BIM en el diseño estructural es que conforme la información del proyecto aumenta en su nivel de desarrollo el modelo se vuelve más pesado y difícil de manejar.
3. Se determinó un flujo de trabajo para la creación de modelos BIM con parámetros de diseño en Guatemala, adaptando los esquemas de las normativas ISO 19650 e ISO 16757 con normas de diseño nacionales e internacionales.
4. El diseño estructural con la metodología BIM tiene resultados con una variabilidad del 1 % de la metodología CAD con respecto a respuesta estructural, lo que define un nivel alto de confianza en adoptar esta metodología para Guatemala.
5. Para el diseño de elementos estructurales es necesario un nivel de desarrollo LOD 300 donde los elementos poseen condiciones asignadas de comportamiento mientras que para documentación es necesario llegar

a un LOD 400 donde los elementos contienen un mayor nivel de detalle que facilita el proceso de ejecución del proyecto.

6. Los modelos de gestión en la nube permiten tener acceso al modelo principal para determinar si los avances de cada especialista se realizan en armonía con otros colaboradores permitiendo detectar de manera remota interferencias entre elementos para establecer los alcances de cada equipo de trabajo.

RECOMENDACIONES

1. En la asignación de cargas del modelo de construcción virtual, el peso propio de los elementos se establece desde el LOD 200, con la asignación de los materiales, al interpolar el modelo al programa de análisis estructural se le asignan las cargas estáticas y dinámicas para tener resultados satisfactorios.
2. Al igual que en la metodología tradicional CAD, se debe asegurar que los elementos del modelo matemático se encuentren conectados de manera continua para que los resultados del análisis estructural no generen error.
3. Para evitar que un modelo con nivel de desarrollo LOD 400 genere una limitada fluidez de trabajo, se deben realizar detalles complejos únicamente en elementos estructurales base para disminuir el peso del archivo digital.
4. En el caso de proyectos no solo nacionales sino también internacionales la utilización de modelos en la nube permiten desarrollar un trabajo profesional sin la necesidad de estar de manera presencial con el resto de las personas que desarrollan el proyecto.

REFERENCIAS

1. ACI 318-14. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. Michigan, USA: American Concrete Institute.
2. AGIES, NSE 1. (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión*. Guatemala, Guatemala : Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
3. AGIES, NSE 2. (2018). *Demandas Estructurales y condiciones de carga*. Guatemala, Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
4. AGIES, NSE 3. (2018). *Diseño estructural de edificaciones*. Guatemala, Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
5. AGIES, NSE 7.1. (2018). *Diseño de concreto reforzado*. Guatemala, Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
6. AGIES, NSE 7.5. (2018). *Diseño de estructuras de acero*. Guatemala, Guatemala: Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
7. AISC 25. (2011). *Frame Design Using Web-Tapered Members*. Georgia, USA: American Institute of Steel Construction.

8. AISC 341-16. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Illinois, USA: American Institute of Steel Construction.
9. AISC 360-16. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*. Illinois, USA: American Institute of Steel Construction.
10. AISI STANDARD. (2016). *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. Misuri, USA: American Iron and Steel Institute.
11. ASCE 7-16. (2016). *Minimum design loads for building and other structures*. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers.
12. Bazjanac, V. (2006). *Virtual building environments*. California, USA: Universidad de California. Recuperado de <https://escholarship.org/content/qt0wp0n585/qt0wp0n585.pdf>.
13. BIM Forum. (2019). *Level of Development (LOD) Specification*. Illinois, USA: American Institute of Steel Construction. Recuperado de <https://bimforum.org/resource/%EF%BF%BC%EF%BF%BClevel-of-development-specification/>.
14. Building SMART. (2019). *Introducción a la Serie EN-ISO 19650 Partes 1 y 2*. España: Building Smart Spain. Recuperado de <https://www.buildingsmart.es/recursos/en-iso-19650/>.
15. Cámara Argentina de la Construcción. (2020). *Primeros Pasos en BIM*. Buenos Aires, Argentina: Dorrego S.R.L.

16. Eastman, C. (1999). *Building product models: Computer environments*. Florida, USA: Supporting design and construction.
17. Eastman, C. (2008). *BIM handbook: A guide to building information Modeling*. Nueva York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
18. Eseverri, A. E. (2020). *Trabajo Colaborativo [en BIM]*. Navarra, España: Espacio BIM.
19. Gajendran, T. (2012). *Building Information Modelling (BIM): an Introduction and International*. Newcastle, Australia: Universidad de Newcastle, Australia.
20. Hardin, B. (2009). *BIM and construction management*. Indiana, USA: John Wiley & Sons, Inc.
21. Kemp, A. (2019). *Information Management according to BS EN ISO 19650*. Reino Unido: UK BIM Alliance.
22. Nielsen, A. (2010). *Structural Modelling and Analysis Using BIM Tools*. Aalborg, Dinamarca: Universidad de Aalborg.
23. NUCOR, B. S. (2015). *Product and Engineering Manual: Primary Framing*. Carolina del Norte, Estados Unidos: Nucor Corporation.
24. UNE. (2018). *Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil que utilizan BIM. Gestión de la información al utilizar BIM. Parte 1: Conceptos y principios. (ISO*

1650-1:2018). Madrid, España: Asociación Española de Normalización.

25. UNE. (2018). *Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil que utilizan BIM. Gestión de la información al utilizar BIM. Parte 2: Fase de desarrollo de los activos. (ISO 19650-2:2018)*. Madrid, España: Asociación Española de Normalización.

APÉNDICES

Cálculo conforme a lo estipulado en AISC (2016) para una sección de 2"x8"x1/16.

Apéndice 1. Capacidad a momento

Luz (m)	L, in	Cb	σ_t , ksi	σ_{ey} , ksi	Fe, ksi	Fc, ksi (cond. 1)	Fc, ksi (cond. 2)	Fc, ksi (condq. 3)	Fc, ksi	ϕM_n , kip-in
Ninguno	236,16	1,14	4,45	2,49	5,62	33,00	0,00	-23,12	0,00	8,92
1/2 L	118,08	1,30	13,65	9,94	22,47	33,00	0,00	21,71	1,00	34,43
1/3 L	78,72	1,45	29,00	22,37	54,79	33,00	0,00	30,53	1,00	48,42
1/4 L	59,04	1,52	50,49	39,77	101,05	33,00	1,00	33,34	0,00	52,33

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Capacidad a corte

Vn	Aw Fv
Aw	h t
h	7,50 in
T	0,06 in
Aw	0,47 in ²
h/t	120,00
kv	5,34
$\sqrt{E}k_v/F_y$	69,09
$1.51\sqrt{E}k_v/F_y$	104,33
μ	0,30
Fv, usar	9,89 ksi
ϕ	0,95
ϕV_n	4,40 kips

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Cargas actuantes en costaneras

Sobrecarga	4,00	psf	0,00003	ksi	20,00	kg/m ²
Carga viva	10,00	psf	0,00007	ksi	50,00	kg/m ²
Carga ceniza	5,00	psf	0,00003	ksi	25,00	kg/m ²
Carga viento	16,00	psf	0,00011	ksi	80,00	kg/m ²

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Combinación de cargas

CR1	CR2	CR2	CR3	CR3	CR6	CR7
0,0022	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018	0,0014
0,0000	0,0016	0,0000	0,0052	0,0000	0,0016	0,0000
0,0000	0,0000	0,0008	0,0000	0,0026	0,0000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0068	-0,0068

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Revisión de resistencia a la costanera

W_u (max)	0,00709	kip/in
W_u (min)	-0,00544	kip/in
M_u (max)	49,43	kip-in
M_u (min)	-37,93	kip-in
V_u (max)	0,84	kip
V_u (min)	-0,64	kip

Fuente: elaboración propia.

La sección de 2"x8"x1/16 cumple con solicitaciones de momento y cortante.

Apéndice 6. Revisión de deflexión de la costanera

wcm	0,0015	kip/in
wcvt	0,0033	kip/in
wcvt+cm	0,0048	kip/in
lx	7,05	ln ⁴
δcv	0,64	in
δcv+cm	0,94	in

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word 365.

La sección de 2"x8"x1/16 cumple con solicitudes de deflexión.

ANEXOS

Anexo 1. Clasificación de obra por función y carga de ocupación

USO	CLASIFICACIÓN MÍNIMA ^[1]	FACTOR DE CARGA DE OCUPACIÓN (m ² /persona) ^[2]
Áreas de reunión		
Salones con asiento fijo ^[5]	Ordinario	3.15
Salones sin asiento fijo	Ordinario	1.6
Pistas de baile, estadios, graderíos ^[5]	Ordinario	3.15
Edificios educativos ^[4]		
Aulas	Importante	2.35
Salones para almacenar útiles	Importante	31
Talleres en colegios e institutos vocacionales	Importante	5
Salas de lectura de bibliotecas	Importante	5
Otras áreas	Importante	5.2
Atención médica		
Hospitales sanatorios, centros de salud sin quirófano o de atención de día	Importante	8.25
Hospitales con quirófano	Esencial	8.25
Vivienda y habitación		
Hoteles y apartamentos	Ordinario	21
Complejos habitacionales (Casas)	Ordinario	28
Orfanatos y hogares de ancianos	Ordinario	8.25
Comercio		
Cocinas comerciales	Ordinario	21
Centros comerciales	Ordinario	5
Tiendas y salas de ventas	Ordinario	5
Varios		
Fábricas	Ordinario	19.5
Guarderías	Importante	4
Oficinas	Ordinario	11
Juzgados	Ordinario	4.15
Dormitorios	Ordinario	5
Salones para hacer ejercicio	Ordinario	5

Fuente: AGIES, NSE 1. (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Anexo 2. Clasificación de obra por función y carga de ocupación

USO	CLASIFICACIÓN MÍNIMA ^[1]	FACTOR DE CARGA DE OCUPACIÓN (m ² /persona) ^[2]
Varios (continuación)		
Estacionamientos ^[3]	Ordinario	18.5
Pistas de patinaje	Ordinario	5
Piscinas	Ordinario	5
Bodegas	Ordinario	45
Hangares de aviación (sin área para reparaciones)	Ordinario	45
Salones para subastas	Ordinario	0.8
Todos los demás	Ordinario	10.5

[1] La clasificación mínima indica la categoría más baja que puede aplicarse a la edificación. Dentro de una edificación de uso múltiple, la categoría que indique más personas regirá para toda la estructura.

[2] Para determinar la carga de ocupación, el "factor de carga de ocupación" indica los metros cuadrados nominales que una persona utiliza en ese tipo de ocupación. Este factor se aplicará sobre el área bruta, es decir sobre el área total en planta incluyendo áreas de circulación y vestíbulos.

[3] El área de estacionamientos es un segundo factor a revisar, las personas que usan los estacionamientos son las mismas que utilizan el resto del edificio. Por lo anterior debe de calcularse la carga de ocupación para los estacionamientos independientemente del resto de la edificación y utilizar el valor mayor aplicado a todo el conjunto. Aunque usualmente la carga de ocupación de los estacionamientos no resulte ser la crítica, puede darse el caso de un complejo de varios edificios con un estacionamiento en común, en el cual debe entonces calcularse la carga de ocupación de todo el estacionamiento y esta al ser mayor que la carga de cada edificio regirá el diseño del conjunto.

[4] Los edificios educativos tendrán que clasificarse, como mínimo, como importantes por lo sensitivo de los ocupantes y por su eventual uso como alberges después de un evento sísmico.

[5] Alternativamente se podrá calcular por número de asientos, siempre que este cálculo se respalde con un plano donde se muestre la distribución y número de asientos.

Fuente: AGIES, NSE 1. (2018). *Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.*

Anexo 3. Módulo de reacción del suelo

MODULO DE REACCION DEL SUELO (SUELO ARCILLOSO) DATOS PARA SAFE					
Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)	Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)	Esf Adm (Kg/Cm ²)	Winkler (Kg/Cm ³)
0.25	0.65	1.55	3.19	2.85	5.70
0.30	0.78	1.60	3.28	2.90	5.80
0.35	0.91	1.65	3.37	2.95	5.90
0.40	1.04	1.70	3.46	3.00	6.00
0.45	1.17	1.75	3.55	3.05	6.10
0.50	1.30	1.80	3.64	3.10	6.20
0.55	1.39	1.85	3.73	3.15	6.30
0.60	1.48	1.90	3.82	3.20	6.40
0.65	1.57	1.95	3.91	3.25	6.50
0.70	1.66	2.00	4.00	3.30	6.60
0.75	1.75	2.05	4.10	3.35	6.70
0.80	1.84	2.10	4.20	3.40	6.80
0.85	1.93	2.15	4.30	3.45	6.90
0.90	2.02	2.20	4.40	3.50	7.00
0.95	2.11	2.25	4.50	3.55	7.10
1.00	2.20	2.30	4.60	3.60	7.20
1.05	2.29	2.35	4.70	3.65	7.30
1.10	2.38	2.40	4.80	3.70	7.40
1.15	2.47	2.45	4.90	3.75	7.50
1.20	2.56	2.50	5.00	3.80	7.60
1.25	2.65	2.55	5.10	3.85	7.70
1.30	2.74	2.60	5.20	3.90	7.80
1.35	2.83	2.65	5.30	3.95	7.90
1.40	2.92	2.70	5.40	4.00	8.00
1.45	3.01	2.75	5.50		
1.50	3.10	2.80	5.60		

Fuente: Morrison. (1993). *Interacción suelo estructuras: semi-espacio de winkler*.

Anexo 4. Esfuerzos permisibles para cargas de compresión

Table 4-11 (continued)													
Available Strength in													
Axial Compression, kips													
Concentrically Loaded Single Angles													
F _y = 36 ksi													
													
L3													
Shape		L3×3×											
		1/2		7/16		3/8		5/16		1/4		3/16 ^c	
lb/ft		9.40		8.30		7.20		6.10		4.90		3.71	
Design		P _n /Ω _c	φ _c P _n	P _n /Ω _c	φ _c P _n	P _n /Ω _c	φ _c P _n	P _n /Ω _c	φ _c P _n	P _n /Ω _c	φ _c P _n	P _n /Ω _c	φ _c P _n
		ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
Effective length, KL (ft), with respect to least radius of gyration, r _z	0	59.5	89.4	52.4	78.7	45.5	68.4	38.4	57.7	31.0	46.7	21.4	32.2
	1	58.2	87.4	51.2	77.0	44.5	66.8	37.5	56.4	30.4	45.6	21.0	31.6
	2	54.4	81.7	47.9	71.9	41.6	62.5	35.1	52.7	28.4	42.7	19.8	29.7
	3	48.6	73.0	42.8	64.3	37.2	55.9	31.4	47.2	25.4	38.2	17.9	26.9
	4	41.5	62.4	36.5	54.9	31.8	47.7	26.9	40.4	21.8	32.7	15.5	23.3
	5	33.9	50.9	29.8	44.8	25.9	39.0	22.0	33.0	17.8	26.8	13.0	19.5
	6	26.4	39.7	23.3	35.0	20.3	30.5	17.2	25.8	14.0	21.0	10.4	15.6
	7	19.8	29.7	17.4	26.2	15.2	22.8	12.9	19.4	10.5	15.8	7.97	12.0
	8	15.1	22.8	13.3	20.0	11.6	17.5	9.87	14.8	8.04	12.1	6.10	9.18
	9	12.0	18.0	10.5	15.8	9.18	13.8	7.80	11.7	6.35	9.54	4.82	7.25
Properties													
A _g , in. ²		2.76		2.43		2.11		1.78		1.44		1.09	
r _z , in.		0.580		0.580		0.581		0.583		0.585		0.586	
ASD		LRFD											
Ω _c = 1.67		φ _c = 0.90											
Note: Heavy line indicates KL/r _z equal to or greater than 200.													

Fuente: AISC 360-16. (2016). Spectation for structural steel buildings.