



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Estructuras

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO HOSPITAL PEDRO
DE BETHANCOURT, ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ CON EL MÉTODO DEL
ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)**

Ing. Alberto José Orozco Orellana

Asesorado por el MSc Ing. José Humberto Rosal Paz

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO HOSPITAL PEDRO
DE BETHANCOURT, ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ CON EL MÉTODO DEL
ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. ALBERTO JOSÉ OROZCO ORELLANA
ASESORADO POR EL MSC ING. JOSÉ HUMBERTO ROSAL PAZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

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 Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Francisco Eduardo Arrecis Sosa
SECRETARIO	Mtro. 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:

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO HOSPITAL PEDRO DE BETHANCOURT, ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ CON EL MÉTODO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 09 de febrero de 2019.

Ing. Alberto José Orozco Orellana



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101 - 24189102

DTG. 626.2021

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 Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO HOSPITAL PEDRO DE BETHANCOURT, ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ CON EL MÉTODO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)**, presentado por el **Ingeniero Alberto José Orozco Orellana**, estudiante de la **Maestría en ciencias en Estructuras**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021.

AACE/cc



Guatemala, noviembre de 2021

LNG.EEP.OI.080.2021

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:

“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO HOSPITAL PEDRO DE BETHANCOURT, ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ CON EL MÉTODO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)”

presentado por **Alberto José Orozco Orellana** quien se identifica con carné **200730511** 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, 08 de junio 2021

M.Sc. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.Sc. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL** del trabajo de graduación titulado: **“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO HOSPITAL PEDRO DE BETHANCOURT, ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ CON EL MÉTODO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)”** del estudiante **ALBERTO JOSÉ OROZCO ORELLANA** quien se identifica con número de carné 200730511 del programa de **MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he 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 cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

M.Sc. Ing. ARMANDO FUENTES ROCA
Coordinador
Maestría en Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC

Guatemala, 28 de mayo de 2021

Ingeniero MSc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor de trabajo de graduación del estudiante ALBERTO JOSÉ OROZCO ORELLANA, Carné número 200730511, cuyo título es "**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO HOSPITAL PEDRO DE BETHANCOURT, ANTIGUA GUATEMALA, SACATEPÉQUEZ CON EL MÉTODO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER).**", para optar al grado académico de Maestro en ESTRUCTURAS, he procedido a la revisión del mismo.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante OROZCO ORELLANA, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



José Humberto Rosal Paz
INGENIERO CIVIL
MSc. INGENIERIA ESTRUCTURAL
COLEGIADO No. 5869

JOSÉ HUMBERTO ROSAL PAZ
Ingeniero civil
MSc. Ingeniería Estructural
Colegiado No. 5869
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la vida, salud y sabiduría a lo largo del estudio de la Maestría.
Mi esposa	Ana Lucía Arango Marroquín. Su ayuda ha sido fundamental, ha estado conmigo incluso en los momentos más turbulentos. Este proyecto no fue fácil, pero estuvo motivándome y ayudándome hasta donde sus alcances lo permitían.
Mis hijos	Natalia Lucía y Emilio Alberto Orozco, por ser la herencia que Jehová me ha dado.
Mis padres	Rudy Rocael Orozco Vásquez y Edelma Noemí Orellana Paiz. Por su amor, dedicación y esfuerzo, quiero que sientan que el objetivo logrado también es de ustedes.
Mis hermanos	Daniel Antonio y Luis Eduardo Orozco Orellana, que este momento sea un aliciente para alcanzar nuevas metas.
Mis suegros	Mario Luis Arango Custodio y Dora María Marroquín escobar con mucho cariño.

Mis abuelos

Alberto Felipe Orozco López, María Andrea Vásquez Miranda (q.d.e.p.), José María Orellana Veliz (q.d.ep.) y Blanca Isabel Paiz Betancourt (q.d.e.p.).

A mis tíos y primos

Con mucho cariño.

**Mis cuñados y
concuños**

Con gran aprecio.

**Iglesia evangélica
Misión Vida, San
Marcos e iglesia
evangélica
Centroamericana
NAZARETH, San
Marcos**

Especialmente a Daniel Corrado y familia.

**Municipio de San
Marcos**

Tierra bendita por Dios, que como profesional pueda enaltecer su nombre.

Mi patria Guatemala

País de la eterna primavera.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

En especial a la Facultad de Ingeniería. Por formarme profesionalmente en sus aulas.

**Autoridades y personal
del Hospital Pedro de
Bethancourt**

Por todo el apoyo y la información compartida para desarrollar el presente trabajo.

**MSc Ing. José Humberto
Rosal Paz**

Por la asesoría brindada.

**Mis docentes de la
Escuela de Postgrado**

Quienes me impartieron su conocimiento.

**Ing. José Víctor Ibarra
Corrales**

Por el apoyo incondicional brindado a lo largo de esta etapa.

**A todos mis amigos en
general**

Por todos esos momentos que hemos compartido a lo largo de nuestras vidas, la amistad y el apoyo que me han brindado.

Todas aquellas personas que me han apoyado incondicionalmente y que no menciono, un agradecimiento especial, que Dios los Bendiga.

ÍNDICE DE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXIII
HIPÓTESIS.....	XXV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Generalidades	4
1.2.1. Procedimientos de análisis sísmico de estructuras ..	4
1.2.2. Principios del análisis lineal y no lineal	5
1.3. Análisis Estático no lineal, método push-over	6
1.3.1. Definición	6
1.3.2. Evolución de las principales normativas enfocadas en el diseño por desempeño sísmico	9
1.3.2.1. ATC 40: seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (Nov. 1996)	9
1.3.2.2. FEMA 273 y 274: NEHRP guidelines and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (Oct. 1997).....	9

	1.3.2.3.	FEMA 356: prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (Nov 2000).....	10
	1.3.2.4.	FEMA 440: improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (Jun. 2005)	10
	1.3.2.5.	ASCE/SEI 41-13: seismic evaluation and retrofit of existing buildings (2014)...	10
1.4.		Niveles de desempeño.....	10
	1.4.1.	Niveles de desempeño del edificio	13
	1.4.2.	Nivel de amenaza sísmica.....	15
	1.4.2.1.	Propuesta del ATC-40	15
	1.4.2.2.	Normativa guatemalteca.....	16
1.5.		Definición de términos básicos.....	17
	1.5.1.	Capacidad	17
	1.5.2.	Demanda.....	17
	1.5.3.	Nivel de desempeño.....	18
	1.5.4.	Curva de capacidad	18
	1.5.5.	Punto de desempeño	18
	1.5.6.	Desempeño sísmico.....	18
2.		GENERALIDADES DEL HOSPITAL NACIONAL PEDRO DE BETHANCOURT.....	19
2.1.		Contextualización del área de estudio.....	19
	2.1.1.	Caracterización	19
	2.1.2.	Historia	20
	2.1.3.	Cobertura de atención de salud	20
2.2.		Localización	22
2.3.		Revisión de planos estructurales	24

2.3.1.	Descripción de la estructura	26
2.3.2.	Uso de la estructura.....	27
2.3.3.	Características de los materiales.....	27
2.3.4.	Propiedades del suelo	28
2.3.5.	Reglamentos de diseño	29
2.4.	Inspección visual	29
2.4.1.	Revisión de las condiciones existentes del edificio.	29
2.4.1.1.	Análisis de daños del diseño estructural	34
2.4.1.2.	Evaluación y cuantificación de daños	34
3.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	35
3.1.	Características del estudio	35
3.1.1.	Enfoque del estudio	35
3.1.1.1.	Descriptivo	35
3.1.1.2.	Explicativo.....	35
3.1.2.	Diseño del estudio	36
3.1.3.	Alcance del estudio.....	36
3.2.	Unidad de análisis	36
3.3.	Variables.....	37
3.4.	Metodología de la investigación a desarrollar.....	38
3.5.	Procesamiento de la información	38
3.5.1.	Creación del modelo computacional de la estructura.....	39
3.5.2.	Características no lineales de los materiales.....	40
3.5.3.	Análisis sísmico de la estructura.....	42
3.5.3.1.	Obtención del espectro de respuesta	42
3.5.3.2.	Selección de la demanda sísmica	44
3.5.4.	Análisis de cargas de servicio.....	45
3.5.5.	Combinaciones de cargas	46

3.5.5.1.	Notación por utilizar	47
3.5.5.2.	Sismo vertical (Sv).....	47
3.5.5.3.	Combinaciones de carga para vigas y columnas	48
3.5.6.	Asignación cargas laterales.....	49
3.5.7.	Asignación de casos de carga.....	49
3.5.8.	Nodo de control	51
3.5.9.	Diagramas momento-curvatura y momento-giro	52
3.5.10.	Rotulas plásticas	53
3.5.10.1.	Asignación de rótulas plásticas a vigas y columnas	53
3.6.	Proceso modal de la estructura.....	54
3.7.	Definición de los patrones de carga lateral	55
3.7.1.	Fuerza cortante del edificio	55
3.7.1.1.	Patrón de cargas propuesto por AGIES	56
4.	APLICACIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER) ...	57
4.1.	Establecimiento del objetivo de desempeño	57
4.2.	Análisis Pushover.....	57
4.2.1.	Secuencia de falla	58
4.2.1.1.	Secuencia de carga 1 (Step 1)	58
4.2.1.2.	Secuencia de carga 2 (Step 2)	59
4.2.1.3.	Secuencia de carga 3 (Step 3)	59
4.2.1.4.	Secuencia de carga 4 (Step 4)	60
4.2.1.5.	Secuencia de carga 5 (Step 5)	61
4.2.1.6.	Secuencia de carga 6 (Step 6)	62
4.2.1.7.	Secuencia de carga 7 (Step 7)	63
4.2.1.8.	Secuencia de carga 8 (Step 8)	64
4.2.1.9.	Secuencia de carga 9 (Step 9)	65

4.2.1.10.	Secuencia de carga 10 (Step 10)	66
4.2.2.	Curvas de capacidad de la estructura	67
4.2.2.1.	Push X	68
4.2.2.2.	Push Y	68
4.2.2.1.	Determinación del desplazamiento objetivo	69
4.2.2.2.	Representación bilineal de la curva de capacidad	70
4.2.2.3.	Desplazamiento objetivo.....	72
4.2.3.	Determinación del punto de desempeño	76
4.3.	Nivel de desempeño.....	77
4.3.1.	Formación de rótulas plásticas	79
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
5.1.	Establecimiento del objetivo de desempeño.....	89
5.2.	Análisis Pushover	89
5.2.1.	Análisis del comportamiento	89
5.2.2.	Curvas de capacidad de la estructura y Desplazamiento objetivo.....	90
5.2.3.	Desplazamiento objetivo.....	90
5.3.	Nivel de desempeño	91
5.3.1.	Formación de rótulas plásticas	92
	CONCLUSIONES	97
	RECOMENDACIONES	99
	REFERENCIAS	101
	APÉNDICES	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfico esfuerzo-deformación de estructuras de concreto reforzado.....	6
2.	Esquema del proceso del análisis estático no lineal	8
3.	Mapa de ubicación y localización No.1	23
4.	Mapa de ubicación y localización de fallas y amenazas sísmicas	24
5.	Planos constructivos del Hospital Pedro de Bethancourt.....	25
6.	Vista general del edificio Hospital Pedro de Bethancourt.....	26
7.	Collage de fotografías de primer nivel.....	30
8.	Collage de fotografías de primer nivel.....	31
9.	Collage de fotografías de tercer nivel.....	32
10.	Collage de fotografías de cuarto nivel	33
11.	Modelo computacional de Hospital Pedro de Bethancourt.....	40
12.	Gráfica de espectro de respuesta	44
13.	Asignación de nodo de control	52
14.	Diagrama de momento-curvatura.....	53
15.	Peso de la edificación por cada nivel	55
16.	Fuerza vertical distribuida	56
17.	Análisis pushover	57
18.	Secuencia de carga 1 (step1)	58
19.	Secuencia de carga 2 (step 2)	59
20.	Secuencia de carga 3 (step 3)	60
21.	Secuencia de carga 4 (step 4)	61
22.	Secuencia de carga 5 (step 5)	62
23.	Secuencia de carga 6 (step 6)	63

24.	Secuencia de carga 7 (step 7)	64
25.	Secuencia de carga 8 (step 8)	65
26.	Secuencia de carga 9 (step 9)	66
27.	Secuencia de carga 10 (step 10)	67
28.	Curva de capacidad dirección x-x	68
29.	Curva de capacidad dirección y-y	69
30.	Representación bilineal de la curva de capacidad	71
31.	Desplazamiento objetivo	73
32.	Punto de desempeño	77
33.	Esquema de primer nivel	79
34.	Esquema de segundo nivel	80
35.	Esquema de tercer nivel	80
36.	Esquema de cuarto nivel	81
37.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 1x	81
38.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 2x	81
39.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 3x	82
40.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 4x	82
41.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 5x	83
42.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 6x	83
43.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 1y	83
44.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 2y	84
45.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 3y	84
46.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 4y	85
47.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 5y	85
48.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 6y	86
49.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 7y	86
50.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 8y	87
51.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 9y	87
52.	Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 10y	88

53. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 11y.....	88
---	----

TABLAS

I. Niveles de desempeño de un edificio	13
II. Nivel de amenaza sísmica, propuesta del ATC-40	16
III. Nivel de amenaza sísmica, propuesta del AGIES.....	17
IV. Uso de la edificación para cada nivel	27
V. Materiales utilizados en construcción de edificio	28
VI. Propiedades del suelo	29
VII. Identificación de daños	34
VIII. Variables de la investigación	37
IX. Carga muerta.....	45
X. Integración de carga muerta	46
XI. Carga viva.....	46
XII. Notación por utilizar	47
XIII. Combinaciones de carga para vigas y columnas a utilizar	48
XIV. Factores de participación de la masa	54
XV. Modos y periodos de vibración de la estructura.....	54
XVI. Resultados de las curvas de capacidad.....	70
XVII. Valores de C_0 según FEMA 356	74
XVIII. Límites de deformación propuestos por la ATC-40.....	78
XIX. Límites de deformación calculados.....	78
XX. Resumen de vigas que incursionaron en el rango inelástico	92
XXI. Resumen de columnas que incursionaron en el rango inelástico	94

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
SA	Aceleración espectral
AMSd	Aceleración máxima del suelo
Fa y Fv	Ajuste por clase de sitio (AGIES)
Na y Nv	Ajuste por intensidades sísmicas especiales
Hn	Altura del edificio
ϵ	Capacidad a la compresión / deformación
Fu	Capacidad última del acero
AR	Carga de arena volcánica
CM	Carga muerta
CV	Carga viva
CVT	Carga viva de Techo
fy	Cedencia del acero
Cs	Coefficiente sísmico al límite de cedencia
Svd	Componente vertical del sismo de diseño
V	Corte basal
Δp	Deriva sísmica
Δu	Deriva ultima permisible
δ	Desplazamiento
SD	Desplazamiento espectral
S1d	Espectro calibrado al nivel de diseño requerido con periodo de 1 segundo

Scd	Espectro calibrado al nivel de diseño requerido en de periodo corto
Cd	Factor de amplificación de desplazamiento post-elástico
Kd	Factor de escala
R	Factor genérico de reducción de respuesta sísmica
Ω_r	Factor de Sobre-Resistencia
F	Fuerza lateral en cada nivel normalizada
GDL	Grado de libertad
g	Gravedad (9.81 m/s ²)
Io	Índice de sismicidad
E	Módulo de elasticidad
ν	Módulo de Poisson's
E1-DA	Nomenclatura para identificar al Sistema Estructural de sistema de marcos/ Marcos tipo A
S1r	Ordenada espectral con periodo de 1 segundo
Scr	Ordenada espectral de periodo corto
T	Periodo de retorno de un sismo
To	Período que define el inicio de la meseta de períodos cortos del espectro
Ts	Período que separa los períodos cortos de los largos
γ	Peso específico
f'm	Resistencia de la mampostería
f'c	Resistencia del concreto
UX	Sentido X

UY

Sentido Y

EQX

Sismo en X

EQY

Sismo en Y

GLOSARIO

ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano del Concreto).
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
Análisis Estructural	Refiere al uso de las ecuaciones de la resistencia de materiales.
ASCE	American Society of civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles).
ATC	Applied Technology Council (Consejo de Tecnología Aplicado).
Cargas	Fuerzas u otras acciones resultantes del peso de los materiales, la ocupación y sus pertenencias, efectos ambientales, movimientos diferenciales y restricciones a la deformación.
CGNL	Carga gravitacional no lineal.
Combinación de cargas	Combinación de las fuerzas y cargas afectadas por factores.

FEMA	Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal para la Gestión de Emergencias).
Rótula plástica	Estado plástico que alcanzan todas las fibras de un elemento estructural al producirse una articulación en la sección transversal del mismo. También llamada articulación plástica.
SAP2000® v 21	Programa de Análisis Estructural (Structural Analysis Program), Programa comercial de cálculo de estructuras basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF).
SCM	Sobre carga muerta.
FEMA	Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal para la Gestión de Emergencias).

RESUMEN

La protección de los elementos estructurales de los hospitales frente a sismos severos es fundamental para preservar la seguridad de las personas, minimizar los costos de reparación y permitir la continuidad operacional. Ante esto y a la alta recurrencia sísmica a la que están expuestas las edificaciones en Guatemala, se hace necesaria la revisión de las estructuras existentes.

Esta investigación consiste estudiar el desempeño sísmico estructural del edificio que ocupa el Hospital Nacional Pedro de Bethancourt, el cual forma parte de la red de Hospitales Públicos de Guatemala. Ubicado en la aldea San Felipe de Jesús del municipio de Antigua Guatemala, Sacatepéquez, este edificio está conformado por cuatro niveles con un sistema estructural de marcos (E1) y fue construido durante los años 1987 y 1988. El desempeño se determinó mediante los criterios de las normas que rigen el Análisis No Lineal FEMA 356 y ATC 40. La estructura se modeló utilizando el software SAP2000®. Se realizó el análisis estático no lineal (Pushover) donde se determinaron las fuerzas cortantes y los desplazamientos; se describen las secuencias de falla mediante ciclos de carga para los sentidos X-X y Y-Y hasta la formación de rotulas plásticas y mediante la curva de capacidad de la estructura se determinaron los desplazamientos de fluencia y de colapso, para compararlos con los niveles de desempeño.

De acuerdo con los resultados obtenidos se observa que la Dirección Y-Y presenta mayor desplazamiento y menor capacidad de cortante respecto a la Dirección X-X. La estructura se encuentra en un nivel Seguridad de Vida (LS) frente a una demanda sísmica del 5 % de probabilidad de ocurrencia en 50 años (sismo severo).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchos hospitales públicos construidos en Guatemala en zonas de elevada amenaza sísmica no han considerado medidas de protección en su diseño contra la vulnerabilidad sísmica a la que serán sujetos durante su operación.

En Guatemala no se han realizado estudios concernientes al desempeño sísmico de las edificaciones hospitalarias públicas que existen; dichas construcciones, cada vez presentan una mayor demanda de servicio; por lo que es de suma importancia, como un caso de estudio, realizar esta investigación, la cual servirá para evaluar el desempeño del edificio del Hospital Pedro de Bethancourt ante la ocurrencia de un evento sísmico, considerando que se trata de una estructura tipo esencial, misma que debe garantizar la seguridad y mantener su funcionamiento durante todo el tiempo, considerando que actualmente este hospital atiende a más de 13,000 pacientes mensuales y alberga a 587 trabajadores entre personal administrativo, médicos, enfermeras y personal que labora en esta institución.

El hospital Pedro de Bethancourt se ubica en la aldea San Felipe de Jesús, del municipio de Antigua Guatemala, del departamento de Sacatepéquez, territorio de mucha actividad sísmica, relacionado con su posición en relación a las placas tectónicas cercanas y los volcanes que rodean la ciudad los cuales son: Agua, Fuego (activo) y Acatenango, de acuerdo a fallas geológicas locales, se ubica a una distancia aproximada de 700 metros y de acuerdo a isointensidades registradas en el terremoto de 1,976 se ubica a una distancia aproximada 1,350 mts.

Este hospital fue construido entre los años 1987 y 1988. Debido a la creciente demanda en los servicios que se prestan, se prevén cambios en su uso o bien el aumento de estos, además, a la fecha ha soportado incontables eventos sísmicos, entre ellos el registrado en junio de 2017, que alcanzó los 6.7 grados en la escala de Richter, lo que genera cierta preocupación e incertidumbre a las autoridades del Hospital, sobre el desempeño sísmico del edificio ante nuevos eventos sísmicos de igual o mayor magnitud.

Mediante la presente investigación se pretende determinar la evolución del comportamiento sísmico de la estructura del edificio que ocupa el Hospital Pedro de Bethancourt, aplicando el análisis estático no-lineal mediante la metodología que presenta el ATC-40/FEMA-356 y así establecer las debilidades y fortalezas y con esto garantizar el eficiente nivel de seguridad estructural.

Con respecto a lo anterior se plantean las siguientes preguntas:

Pregunta Principal

- ¿Cuál es el nivel de desempeño sísmico del edificio que ocupa el hospital Pedro de Bethancourt frente a un movimiento sísmico de gran magnitud?

Preguntas Secundarias

- ¿Qué elementos estructurales requieren medidas correctivas de acuerdo con el nivel de desempeño sísmico del Edificio, para garantizar la seguridad estructural del mismo y así minimizar los riesgos ante la ocurrencia de eventos sísmicos?
- ¿Cuál es el nivel de daño del edificio ante la posible afectación de sismos?
- ¿Cuál es la vulnerabilidad y riesgo sísmico para el hospital Pedro de

Bethancourt?

- ¿Cuáles criterios dados por la metodología que presenta el ATC-40/FEMA-356 tienen los elementos suficientes para ser aplicados al ámbito de Guatemala?

Delimitación temporal

El desarrollo del presente estudio se realizó desde el mes de marzo de 2019 hasta septiembre de 2020 (19 meses).

Delimitación espacial

El proyecto en estudio se realizará al edificio principal del Hospital Pedro de Betancourt, ubicado en la aldea San Felipe de Jesús del municipio de Antigua Guatemala, departamento de Sacatepéquez.

Delimitación de contenido

- La metodología de la cual está basado este trabajo es aplicada únicamente para marcos de concreto reforzado.
- No se considera el efecto de la interacción suelo-estructura, solamente se establecerá la capacidad portante del suelo.
- Dadas la naturaleza de la investigación, ésta se enfocará únicamente en determinar la capacidad estructural de la edificación mediante un análisis estático no lineal.
- No se considerará el problema de filtraciones que la cimentación de la edificación posee.
- La interpretación de los resultados será aplicada únicamente al edificio principal del hospital Pedro de Bethancourt.

- En Guatemala ninguna norma muestra los lineamientos para realizar un análisis estático no lineal (Pushover), por lo que la investigación se realizará mediante el uso de documentación y estándares vigentes en el ámbito internacional.

OBJETIVOS

General

Analizar el desempeño sísmico estructural del edificio que ocupa el Hospital Pedro de Bethancourt mediante el método del análisis estático no lineal (Pushover), a fin de evaluar su capacidad estructural e identificar el nivel de desempeño sísmico.

Específicos

- Evaluar el estado actual de la edificación para determinar si presenta daños estructurales y encontrar las causas fundamentales que originaron dichos daños.
- Determinar la curva de capacidad de carga de la estructura.
- Establecer el nivel de desempeño estructural que podría alcanzar la estructura en análisis para las condiciones existentes.
- Analizar la vulnerabilidad y riesgo sísmico para el hospital.
- Derivar conclusiones sobre la necesidad de reforzamiento de la estructura según el nivel de daño esperado, en el análisis, debido a la demanda sísmica.

HIPÓTESIS

La evaluación del desempeño sísmico estructural del edificio del Hospital Pedro de Bethancourt mediante el método del análisis estático no lineal (pushover) conllevará a la detección oportuna de las zonas “débiles” de la estructura y así poder tomar medidas preventivas y/o correctivas, para minimizar los riesgos ante la ocurrencia de eventos sísmicos.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La metodología de la investigación se basó en un enfoque cuantitativo siendo este el que predominó, sin dejar de lado lo cualitativo, debido a que es un proceso riguroso, cuidadoso y sistematizado en el que se buscó resolver problemas de manera organizada, garantizando la producción de conocimiento o de alternativas de solución viables además de buscar encontrar las explicaciones científicas de los hechos en estudio. Se usó la recolección de datos para la verificación de la hipótesis, con base en la medición numérica, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

Las variables estudiadas fueron:

- Características estructurales
- Solicitaciones sísmicas
- Análisis estructural
- Magnitud de daño

El desarrollo del trabajo de investigación propuesto se realizó de acuerdo con los siguientes pasos:

- Búsqueda de información relacionada con la temática en desarrollo.
- Planteamiento de marco teórico relacionado con la investigación.
- Evaluación del desempeño sísmico estructural a partir del análisis estático no lineal (Pushover) utilizando software especializado (SAP2000).
- Análisis y presentación de resultados.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se desarrolla bajo la línea de Investigación de evaluación del riesgo sísmico y desempeño estructural de la Maestría de Estructuras de la Escuela de Estudios de Postgrados de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Guatemala es uno de los países que se ubican en una zona de actividad sísmica, situada en una triple unión de placas tectónicas; además de ser atravesada por una cadena de volcanes activos y un complejo sistema de fallas geológicas que pueden activarse en cualquier momento, provocando sismos de diversas magnitudes, intensidades y profundidades. Por lo anterior, las estructuras presentes y futuras deben ser diseñadas y evaluadas de manera rigurosa, además, las normas de diseño sismorresistente que les son aplicables deben ser incluidas en los análisis estructurales de las mismas.

Los hospitales en general están catalogados como obras esenciales porque son imprescindibles para la atención y preservación de vidas humanas. La asignación de esta importancia es independiente de su tipología estructural y se basa en el uso que se le da a la estructura. Para las Normas de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES), AGIES NSE 1-18, las edificaciones de categoría “esencial” son aquella que deben permanecer esencialmente operativas durante y después de un desastre o evento.

Debido a que las infraestructuras que albergan los servicios de salud deben mantener su función y operatividad después de un fuerte sismo o terremoto, surge la necesidad de estudiar y evaluar su comportamiento post fenómeno. El

hospital Pedro de Bethancourt ubicado en la aldea San Felipe de Jesús, del municipio de Antigua Guatemala, del departamento de Sacatepéquez, forma parte de la red de hospitales públicos de Guatemala, por lo cual este estudio está basado en su desempeño sísmico, mediante el análisis estático no lineal. La edificación es de 4 niveles, con un sistema estructural de marcos rígidos y representa un patrimonio económico y social de gran importancia.

En el capítulo 1 se presenta el marco teórico, el cual está dividido en cinco partes: la primera y segunda parte consiste en la presentación de los antecedentes y las generalidades del procedimiento del análisis estático no lineal; la tercera se tratan las diferentes definiciones e historia de la evolución del método Pushover; la cuarta las bases teóricas de los niveles de desempeño y niveles de amenaza sísmica y la quinta en la definición de términos básicos.

En el capítulo 2 se exponen las generalidades del área y objeto de estudio. En primer lugar, se contextualiza el área de estudio, luego se describe la localización de la investigación y se da una breve descripción de la edificación y sus componentes estructurales. Se menciona también los resultados de la revisión de planos estructurales e inspecciones visuales realizadas.

En el capítulo 3 se presenta los materiales y métodos usados, describiendo el procedimiento que se ha realizado en esta investigación, presentando el tratamiento utilizado a los datos recopilados.

En el capítulo 4 se detalla la aplicación del análisis estático no lineal (Pushover) con todos los detalles de la investigación.

En el capítulo 5 se presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

“Entre los desastres de inicio repentino, las inundaciones y los terremotos son los que causan más víctimas en todo el mundo. En el caso de terremotos, sobre el 75 % de las muertes son causadas por derrumbes de edificio” (Coburn, Pomonis y Spence 1999, pág. 15).

Según la opinión de Lou, “Los centros hospitalarios son estructuras de servicios básicos para la población de un territorio, por lo tanto, garantizar la seguridad y continuidad del servicio es una tarea prioritaria para las autoridades competentes” (Lou, 2011, pág. 8).

El 22 de abril de 2009 se realizó el comunicado por parte de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), donde mencionaba la estrategia de Hospitales Seguros, cuya campaña “busca promover en todo el mundo el reforzamiento o construcción de instalaciones de salud -urbanas o rurales, grandes o pequeñas- para que sean resistentes a las catástrofes y permanezcan accesibles y funcionando a su máxima capacidad y en su misma infraestructura para atender la demanda de atención médica de los pobladores” (OPS, 2009, pág. 15); por lo que regularizó la metodología para determinar el Índice de Seguridad Hospitalaria mediante un documento teórico y metodológico, dos formularios y orientaciones sobre el cálculo del índice de seguridad publicados en la “Guía del evaluador de hospitales seguros” (OPS, 2008, pág. 9).

Ante ello, en el hospital Pedro de Bethancourt, la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, realizó el estudio del índice de seguridad hospitalaria, para lo que Flores *et al.*, (2010) concluyen que: Ante un desastre debido a su ubicación geográfica, un valor de 56 %, considerándose alto ya que presenta amenazas sísmicas, volcánicas, por deslizamiento, por huracanes, por lluvias torrenciales y el nivel de seguridad estructural que ofrece ante un desastre, el 64 % corresponde a un nivel alto de seguridad, el 36 % corresponde a un nivel medio de seguridad y una ausencia al rango de seguridad baja (p.55).

Sin embargo, la metodología utilizada no aporta cálculos, ni análisis estructurales.

Para solventar esta necesidad de determinar estructuralmente el nivel de desempeño sísmico en el que se encuentra el edificio del hospital Pedro de Bethancourt se propone la utilización de métodos de análisis estructural que vayan más allá del rango elástico, por lo que se opta por el análisis estático no lineal (Pushover) que de acuerdo a Kallaby (2007) “es un procedimiento de análisis sísmico paso a paso que imita las deformaciones inelásticas progresivas en una estructura hasta su falla total” (p.14).

En Guatemala cualquier tipo de estructura debe regirse a las normas de la AGIES, quienes desarrollan los parámetros de sismoresistencia de una estructura, sin embargo, el reglamento es relativamente nuevo por lo que aún no se contemplan metodologías del uso del análisis estático no lineal, ya que únicamente se establecen diseños utilizando análisis lineal estático y el análisis lineal dinámico (AGIES, 2018), por lo que se debe recurrir a normativos y códigos internacionales, los publicados por los principales comités internacionales que impulsan el desarrollo de estos conceptos para América

destacan los presentados por Applied Technology Council (ATC) en 1996 y los estudios más recientes los de la Federal Emergency Management (FEMA) del 2002; y para el continente europeo el Eurocode-8 (EC8) (Martinez, Portillo y Rodriguez 2011).

Este análisis sísmico a edificaciones existentes en Guatemala no ha sido explorado en estudios de trabajos de graduación de la facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, sin embargo, en diversas universidades del mundo se han realizado estudios de estructuras utilizando esta metodología de evaluación. La investigación realizada por Carrillo de la Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, titulada *Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica de Estructuras Utilizando un Diseño por Desempeño* en donde Carrillo (2007) concluye y recomienda. “Debido a los cambios recientes de los reglamentos de diseño sísmico, gran parte de las estructuras deben ser revisadas para demandas” (p.101).

Hernández Morales de la Universidad de La Salle, Bogotá en su trabajo “Estudio Comparativo de dos Alternativas de Reforzamiento Estructural para el Edificio Maternal del Liceo Francés Louis Pasteur, Utilizando el Método de Análisis Lineal Dinámico y un Método no lineal estático (Pushover) con el objetivo de simular la respuesta estructural ante diferentes estados de sollicitaciones (Hernandez, 2009).

También se han desarrollados evaluaciones para infraestructuras hospitalarias, como la realizada por Peralta Álvarez (2012), *Análisis Estático No Lineal y Análisis Dinámico No Lineal del Hospital de Vielha* cuyo objetivo es “comparar el método estático no lineal, con el análisis dinámico no lineal en la estructura del hospital de Vielha” (p.2); Navarro (2014) en su estudio *Evaluación del Desempeño Sísmico del Edificio Hospital Privado Jaén de La Ciudad de Jaén*

Cajamarca, quien se propone “evaluar el desempeño sísmico del edificio hospital privado Jaén, edificio de 05 niveles con un sistema estructural consistente en placas y pórticos, construido el 2011” (p.2); y Ferj Vargas *Evaluación del Desempeño Sísmico de Hospitales Aislados y Convencionales a Través de un Análisis de Fragilidad* el objetivo del estudio de acuerdo a Ferj Vargas (2016) es “procurar realizar un análisis comparativo que involucre las propiedades resultantes del diseño, la evolución de la demanda a distintas intensidades sísmicas sobre sistemas de aislación, elementos estructurales y no estructurales” (p.5).

1.2. Generalidades

El análisis estático no lineal es uno de los procedimientos de análisis sísmico utilizado para el cálculo de estructuras, el cual utiliza principios del análisis lineal y no lineal.

1.2.1. Procedimientos de análisis sísmico de estructuras

Existe una jerarquía de cuatro niveles de análisis estructural apropiado para la evaluación de edificios. Cada procedimiento proporciona un modelo más preciso y real del rendimiento de un edificio sometido a cargas sísmicas, pero requiere un mayor esfuerzo en términos de tiempo de preparación de datos y esfuerzo computacional (Trevor, 2014).

Estos niveles son:

- El procedimiento estático lineal o estático equivalente (rango elástico).
- El procedimiento dinámico lineal o espectro de respuesta (rango elástico).

- El procedimiento estático no lineal o análisis de Pushover (más allá del rango elástico).
- El procedimiento dinámico no lineal o historial de tiempo (respuesta inelástica).

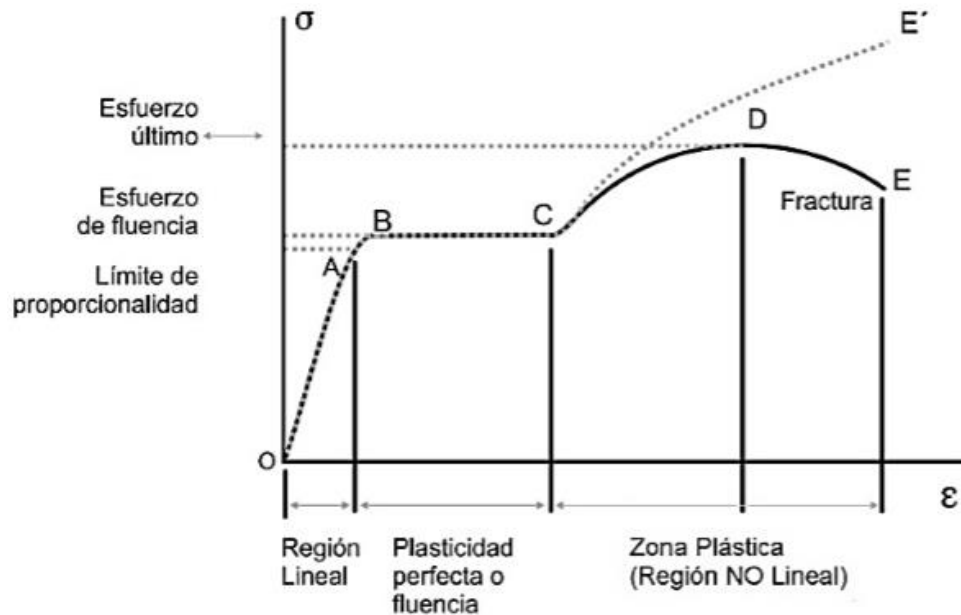
1.2.2. Principios del análisis lineal y no lineal

Al analizar una estructura basada en respuestas esfuerzo-deformación, de acuerdo con el estudio de Duarte, Martínez, y Santamaria (2017) se pueden observar los siguientes comportamientos: (a) lineal,

En el cual la deformación es proporcional a los esfuerzos que se están generando en la estructura y (b) no lineal, en donde cuando se observa un aumento en el esfuerzo, la respuesta del desplazamiento no se genera de forma proporcional ya que los materiales que conforman la estructura alcanzan el estado de fluencia (p.19).

Gráficamente los comportamientos lineales y no lineales se representan de la siguiente manera:

Figura 1. **Gráfico Esfuerzo-Deformación de estructuras de concreto reforzado**



Fuente: Duarte, Martínez y Santamaria. (2017). *Análisis estático no lineal (Pushover) del cuerpo central del edificio de la facultad de medicina de la Universidad de El Salvador.*

1.3. Análisis Estático no lineal, método push-over

Dentro del análisis sísmico que se presenta para esta investigación se centra en el análisis por Pushover.

1.3.1. Definición

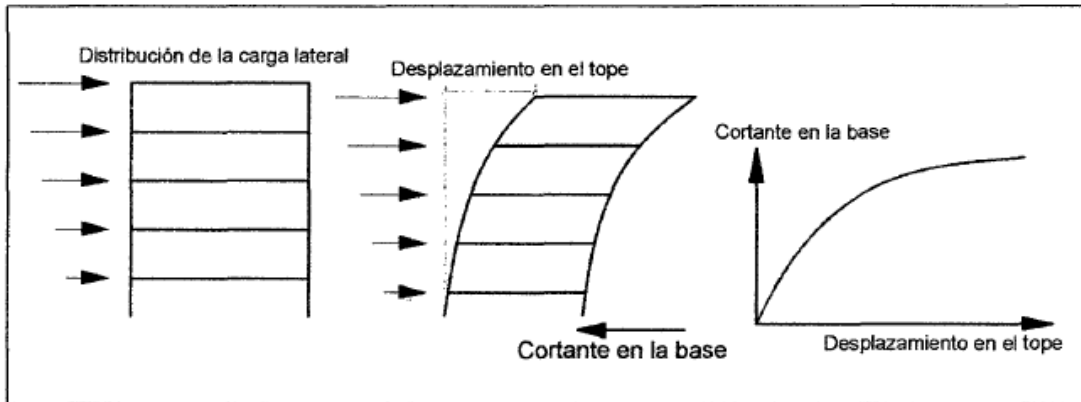
El término Pushover se traduce como hacer caer o colapso, que puede entenderse como el proceso de provocar en una estructura un eventual colapso determinando las condiciones en las que eventualmente esto podría ocurrir. Este método permite estimar la demanda sísmica y verificar el desempeño de una estructura para sismos severos, fue desarrollada por los investigadores A. K.

Chopra y R. K. Goel (Kallaby, 2007). Es aplicable principalmente a edificios existentes.

El método Pushover también es conocido como Análisis de Empuje, porque implica la aplicación de un conjunto de cargas y desplazamientos de forma incremental en una dirección hasta que ocurre una falla. Las cargas son generalmente proporcionales a la primera forma de modo de la estructura, aunque hay variaciones para intentar dar cuenta de los efectos de modo más altos (Trevor, 2014).

De acuerdo con la publicación 356 realizada por la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias o FEMA (por sus siglas en inglés de Federal Emergency Management Agency), el método Pushover para FEMA (2000) consiste en “aplicar una distribución vertical de carga lateral a la estructura la cual debe incrementarse monótonamente hasta que la estructura alcance el máximo desplazamiento, mediante la gráfica del cortante en la base y el desplazamiento en el tope de la estructura” (p.45). De acuerdo con Navarro (2014) “utilizando este procedimiento, es posible identificar la secuencia del agrietamiento, fluencia y fallo de los componentes, los estados límites de servicio y la historia de deformaciones y cortes en la estructura que corresponde a la curva de capacidad” (p.23). Gráficamente la metodología Pushover es en términos generales se muestra en la siguiente figura.

Figura 2. **Esquema del proceso del análisis estático no lineal**



Fuente: Navarro. (2014). *Evaluación del desempeño sísmico del edificio Hospital Privado Jaén de la Ciudad de Jaén Cajamarca.*

Para realizar este análisis se puede utilizar las metodologías propuestas por el ATC 40 y FEMA 356, ambos métodos se basan en tres pasos principales, siendo estos:

- Definición de patrones de carga que se aplicarán al edificio,
- Determinación y generación de la curva de capacidad de carga y
- Análisis de los posibles modos de falla y conocimiento de sus ubicaciones dentro de los elementos.

Por otra parte, la información necesaria para realizar este análisis mínimamente es la siguiente:

- Características de los materiales
- Geometría de los elementos estructurales
- Detalle del acero de refuerzo.
- Las acciones gravitacionales (cargas permanentes y variables).

- La resistencia de las vigas y las columnas.
- Ubicación de posibles rótulas plásticas en los miembros estructurales.
- Cargas laterales.

1.3.2. Evolución de las principales normativas enfocadas en el diseño por desempeño sísmico

La normativa enfocada al diseño por desempeño sísmico ha evolucionado a través del tiempo de las siguientes normas:

1.3.2.1. ATC 40: seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (Nov. 1996)

Desarrollado por el Consejo de Tecnología Aplicado (ATC, por sus siglas en inglés), también conocido como SSC-96-01, creada con el propósito de mejorar los criterios de adecuación sísmica en edificios públicos. (Hernandez, 2018).

1.3.2.2. FEMA 273 y 274: NEHRP guidelines and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (Oct. 1997)

Desarrollado por la Agencia para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés), se refiere a la rehabilitación sísmica de edificaciones. (Hernandez, 2018).

1.3.2.3. FEMA 356: prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (Nov 2000)

Desarrollado por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés), siendo la sustitución de FEMA 273 y FEMA 274. La incorporación del FEMA 356 contribuyó a organizar y difundir de una mejor manera todos los procedimientos, especificaciones y recomendaciones descritas en el FEMA 274, consideró prácticas de diseño y construcción en los Estados Unidos (Hernandez, 2018).

1.3.2.4. FEMA 440: improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (Jun. 2005)

Presenta correcciones y mejoras a los métodos FEMA 356 y ATC-40 para que conduzcan a resultados similares a pesar de los procedimientos diferentes de cada una (Hernandez, 2018).

1.3.2.5. ASCE/SEI 41-13: seismic evaluation and retrofit of existing buildings (2014)

Actualiza y reemplaza normativas previas con el propósito de contar con un documento completo de evaluación sísmica y adecuación de edificaciones (Hernandez, 2018).

1.4. Niveles de desempeño

El ATC (1996) define nivel de desempeño como la condición límite de daño que puede ser considerada satisfactoria para un edificio ante un evento sísmico (p.47). La condición límite está descrita por: “(a) los daños físicos en el edificio

(b) la amenaza a la seguridad de vida de los ocupantes del edificio y (c) el funcionamiento de este posterior al evento sísmico” (ATC, 1996, pág. 50).

El ATC (1996) sugiere que el nivel de desempeño para cualquier edificación se determine tomando como parámetros principales la funcionalidad y preservación deseada de la misma, costo de la estructura y políticas y reglamentos de seguridad vigentes para cada localidad.

El nivel de desempeño de acuerdo con la propuesta del comité ATC-40 / FEMA 273-356, define de manera independiente los niveles de desempeño de los elementos estructurales y no estructurales.

Los niveles para los elementos estructurales se identifican por la nomenclatura SP-n, siendo SP las siglas de Structural Performance (desempeño estructural) y n un número que varía entre 1 y 6” (ATC, 1996, pág. 48).

1. SP-1. Ocupación Inmediata: los daños que se presentan son muy limitados por lo que el funcionamiento de la edificación no se ve afectado.
2. SP-2. Daño controlado: este estado se utiliza para discriminar entre los niveles de ocupación inmediata y seguridad de vida, los ocupantes de la edificación están expuestos a un peligro moderado.
3. SP-3. Seguridad de vida: los daños en la estructura son significativos, existe posibilidad de requerir reparaciones estructurales.
4. SP-4. Seguridad limitada: este estado de daño se utiliza para discriminar entre los niveles de seguridad de vida y estabilidad estructural, los ocupantes de la edificación están expuestos a un peligro moderado alto.

5. SP-5. Estabilidad estructural: la seguridad estructural de la edificación está en el límite del colapso parcial o total, el sistema estructural presenta degradaciones de rigidez. Las reparaciones estructurales por realizar son necesarias y significativas.
6. SP-6. No considerado: este estado sugiere enfocar el desempeño a los elementos no estructurales (ATC, 1996, pág. 50).

De los estados anteriormente descritos, los estados SP-1 ocupación inmediata, SP-3 seguridad y SP-5 estabilidad estructural son catalogados como principales ya que de estos se obtienen los criterios de evaluación y rehabilitación, por consiguiente, los estados SP-6 daño controlado y SP-4 seguridad limitada se establecen como rangos intermedios, estos permiten discriminar el nivel de desempeño de la estructura (Bonnett Díaz, 2003).

Los niveles para los elementos no estructurales se representan con La nomenclatura NP-n, siendo NP las siglas de Nonstructural Performance (Desempeño no estructural) y n una letra que toma valores entre A y E. (ATC, 1996).

1. **NP-A. Operacional:** No se presentan daños y todo permanece en su sitio, no hay interrupciones.
2. **NP-B. Ocupación Inmediata:** Hay daños menores y todo permanece en su lugar, se presentan pequeñas interrupciones.
3. **NP-C. Seguridad;** Se contempla daños considerables, pero sin colapso.
4. **NP-D. Amenaza reducida:** Hay daños importantes, sin embargo, los elementos grandes y pesados capaces de generar lesiones a los ocupantes aún no colapsan.

5. **NP-E. No considerado:** Este estado sugiere enfocar el desempeño a los elementos estructurales. (ATC, 1996, pág. 12)

1.4.1. Niveles de desempeño del edificio

El ATC-40 presenta la siguiente Tabla para las posibles combinaciones.

Tabla I. **Niveles de desempeño de un edificio**

Niveles de desempeño no estructurales	Niveles de desempeño estructurales					
	SP-1. Ocupación Inmediata	SP-2. Daño controlado	SP-3. Seguridad de vida	SP-4. Seguridad limitada	SP-5. Estabilidad estructural	SP-6. No considerado
NP-A. Operacional	1-A Operacional	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B. Ocupación Inmediata	1-B Ocupación Inmediata	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C. Seguridad	1-C	2-C	3-C Seguridad de vida	4-C	5-C	6-C
NP-D. Amenaza reducida	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E. No considerado	NR	NR	3-E	4-E	5-E Estabilidad estructural	No aplicable
	Niveles de rendimiento de edificios comúnmente referenciados. (SP-NP)					
	Otras posibles combinaciones de SP-NP					
	Combinaciones no recomendadas de SP-NP					

Fuente ATC. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied Technology Council.*

Existen cuatro niveles fundamentales los cuales son: operacional (1-A), ocupación inmediata (1-B), seguridad de vida (3-C) y estabilidad estructural (5-E). Las demás combinaciones pueden ser consultadas en el ATC-40.

1-A Operacional: “Relacionado con la funcionabilidad, el daño estructural y no estructural del edificio es menor, por lo que no se cuestiona la seguridad. Las reparaciones necesarias son menores y se pueden llevar a cabo sin interrupciones significativas para los ocupantes” (ATC, 1996, pág. 52).

1-B Ocupación inmediata: este nivel corresponde a los criterios más utilizados para instalaciones esenciales. “Se mantiene la seguridad de los ocupantes, sin embargo, a pesar de que pueden ocurrir algunos daños en los contenidos se espera que los espacios y sistemas del edificio puedan ser razonablemente utilizables después del sismo” (ATC, 1996, pág. 52).

3-C Seguridad de vida: este nivel está destinado a “lograr un estado de daño que presenta una probabilidad extremadamente baja de las amenazas a la seguridad de vida, ya sea desde mediante el daño estructural o por la caída y desprendimientos de elementos no estructurales” (ATC, 1996, pág. 52).

5-E Estabilidad estructural: este estado de conservación se dirige solo al marco principal de la construcción.

La seguridad del sistema resistente de cargas laterales se encuentra prácticamente al límite y la probabilidad del colapso ante la ocurrencia de posibles réplicas es bastante alta, el sistema de cargas verticales continúa garantizando la estabilidad del edificio. Los daños no estructurales no se evalúan debido al elevado nivel de daños en los elementos estructurales. No se garantiza la seguridad de los ocupantes ni transeúntes, por lo que es

recomendable desalojar y, en algunos casos, demoler la estructura (ATC, 1996, pág. 52).

1.4.2. Nivel de amenaza sísmica

“El desempeño esperado está ligado al nivel de amenaza sísmica que puede ser expresado en forma probabilística o determinística. El enfoque probabilístico considera la probabilidad de ocurrencia y el enfoque determinista en términos del movimiento máximo esperado” (Safina, 2003, pág. 70).

1.4.2.1. Propuesta del ATC-40

El ATC-40 utiliza tres niveles de movimientos sísmicos para el diseño de estructuras: sismo de servicio, sismo de diseño y sismo máximo. A continuación, el detalle:

Tabla II. Nivel de amenaza sísmica, propuesta del ATC-40

SISMO DE SERVICIO (SE)	SISMO DE DISEÑO (DE)	SISMO MÁXIMO (ME)
Nivel del movimiento del terreno con 50 % de probabilidad de excedencia en un periodo de 50 años. Periodo de retorno: T= 75 años. Se considera como un sismo frecuente, ya que puede ocurrir más de una vez durante la vida útil de la estructura.	Nivel del movimiento del terreno con 10 % de probabilidad de excedencia en un periodo de 50 años. Periodo de retorno: T = 475 años. Representa un movimiento sísmico poco frecuente de intensidad entre moderada y severa, se considera que puede ocurrir al menos una vez durante la vida de la estructura.	Nivel del movimiento del terreno con entre 2 % y 5 % de probabilidad de excedencia en un periodo de 50 años. Periodo de retorno: T= entre 975 y 2475 años. Corresponde al máximo movimiento del terreno que puede ser esperado en el sitio donde se encuentra localizada la estructura. Es utilizado para el diseño de estructuras esenciales.

Fuente ATC. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied Technology Council.*

1.4.2.2. Normativa guatemalteca

La Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES) ha desarrollado las Normas de Seguridad Estructural de Edificaciones y Obras de Infraestructura para la República de Guatemala, en las cuales se definen los niveles de sismo para diseño estructural, estas se incluyen en el documento NSE 2-18, Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección.

Se muestra en la tabla a continuación los cuatro movimientos sísmicos de diseño considerados por el AGIES.

Tabla III. Nivel de Amenaza Sísmica, propuesta del AGIES

MOVIMIENTO SÍSMICO DE DISEÑO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA
Básico / Ordinario	10 % en 50 años
Severo	5 % en 50 años
Extremo	2 % en 50 años
Mínimo	No aplica (Condición de excepción)

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

1.5. Definición de términos básicos

Se presentan las definiciones de los términos más utilizados.

1.5.1. Capacidad

El ATC (1996) define el término capacidad como “la fuerza en el punto de rendimiento del elemento o la curva de la capacidad de estructura” (p.25).

Gallego (2003) afirma. “La capacidad estructural puede ser representada a través de una curva de capacidad, la cual relaciona las fuerzas en la base de la estructura (cortante basal, V) y los desplazamientos en el nivel superior de la misma” (p.38).

1.5.2. Demanda

FEMA (2000) define demanda como “la cantidad de fuerza o deformación impuesta en un elemento o componente” (p.80).

Crisafulli y Villafañe (2002) afirman. “La demanda sísmica es generalmente representada por medio de un espectro de respuesta, este presenta la respuesta máxima de sistemas de un grado de libertad (1 GDL) como una función de sus frecuencias” (p.34).

1.5.3. Nivel de desempeño

El ATC (1996) define el nivel de desempeño de un edificio como “la combinación del nivel de desempeño estructural y el nivel de desempeño no estructural” (p.52).

1.5.4. Curva de capacidad

López, Solórzano, y Pérez (2017) definen la curva de capacidad como “la representación de la capacidad dada por la relación entre la fuerza cortante basal y el desplazamiento lateral del techo” (p.46).

1.5.5. Punto de desempeño

El ATC (1996) define el punto de desempeño como “la intersección del espectro de capacidad con el apropiado espectro de demanda en el método del espectro de capacidad (el desplazamiento del punto de desempeño es equivalente al desplazamiento tope en el método de coeficiente)” (p.23).

1.5.6. Desempeño sísmico

De acuerdo con el ATC (1996) el desempeño sísmico “representa una condición límite o tolerable establecida en función de los posibles daños físicos sobre la edificación, la amenaza sobre la seguridad de los ocupantes y la funcionalidad de la edificación posterior al terremoto” (p.25)

2. GENERALIDADES DEL HOSPITAL NACIONAL PEDRO DE BETHANCOURT

2.1. Contextualización del área de estudio

A continuación, se presenta la caracterización del Hospital Pedro de Bethancourt.

2.1.1. Caracterización

Antigua Guatemala es la cabecera del departamento de Sacatepéquez, rodeada por tres volcanes: de Fuego, Agua y Acatenango, cuenta con una población de 45669 habitantes, el clima es templado con una temperatura máxima de 25 grados y una mínima de 13 grados, la época lluviosa ocurre entre los meses de mayo a octubre, con un promedio de entre 1057 y 1600 mm anuales (INE, 2010).

Se ubica aproximadamente a 38 kilómetros al oeste de la capital de la República de Guatemala a una altitud de 1470 msnm, fue fundada en el año de 1776 (INE, 2010).

La ciudad está expuesta a tres fenómenos naturales: Erupciones del Volcán de Fuego, Inundaciones del río Pensativo y Terremotos (INE, 2010).

2.1.2. Historia

La historia del hospital Pedro de Bethancourt se puede resumir de la siguiente manera:

Cuando se realiza el traslado de la ciudad de Guatemala del Valle de Almolonga al Valle de Panchoy (actualmente La Antigua Guatemala), se inicia el proyecto para la creación del hospital a cargo de la iglesia, en el año de 1663 inician sus funciones a cargo de Antonio Álvarez de la Vega y los religiosos de San Juan de Dios, con el terremoto de 1773 se dañan varias instalaciones, y el hospital se ve obligado a cumplir la demanda, surge el proyecto de aumentar la infraestructura del mismo, en 1865 la administración se traslada a la organización de las hermanas capuchinas, para el año 1869 las hermanas capuchinas fueron sustituidas por las hermanas de la caridad, congregación fundada por San Vicente de Paúl.. Desde ese entonces se le conoce al establecimiento con el nombre de Hospital Nacional Pedro de Bethancourt. (Flores, Girón, Hernández y Soza, 2010, pág. 7)

La estructura por analizar en el presente estudio fue construida entre los años de 1987 y 1988, con lo que se supone que fue construido bajo estándares apropiados de seguridad que incluyen normas sismo resistentes, la estructura original no ha sido reparada, las remodelaciones realizadas no afectan el comportamiento estructural en gran magnitud.

2.1.3. Cobertura de atención de salud

El hospital Pedro de Bethancourt forma parte de la red de hospitales públicos de Guatemala y toma un papel muy importante en la organización del

sistema de salud nacional, debido a sus características, corresponde al nivel de atención III. Entre sus funciones, se encarga de solucionar problemas de pacientes referidos por el primer nivel de atención y de atender a todas las personas que asistan demandando atención médica incluyendo emergencias. El hospital presta servicios de consulta externa, encamamiento y emergencia de especialidades de medicina interna, cirugía general, pediatría y gineco-obstetricia; también cuenta con las subespecialidades de traumatología, ortopedia y salud mental. Además, se llevan a cabo programas de promoción, prevención, rehabilitación y recuperación de la salud; se brinda atención médico-hospitalaria y servicios de rayos x, laboratorio, banco de sangre y la reciente implementación del banco de leche.

El recurso humano con que cuenta el hospital son médicos generales, especialistas de las distintas ramas (medicina interna, cirugía, traumatología y ortopedia, anestesiología, pediatría, ginecología y obstetricia, radiología, entre otros), otros profesionales, tales como químicos farmacéuticos, químicos biólogos, psicólogos, trabajadores sociales, enfermeras profesionales, auxiliares de enfermería y otros profesionales y técnicos de salud.

El hospital atiende a personas originarias de Sacatepéquez y de departamentos aledaños entre los que se menciona a Chimaltenango, Escuintla, y parte de oriente y occidente.

Se considera que actualmente este hospital atiende a más de 13,000 pacientes mensuales y alberga a 587 trabajadores entre personal administrativo, médicos, enfermeras y personal que labora en esta institución.

2.2. Localización

La presente investigación determinó el nivel de desempeño sísmico del edificio principal del hospital Pedro de Bethancourt, ubicada en la aldea San Felipe de Jesús, del municipio de Antigua Guatemala, departamento de Sacatepéquez.

Las condiciones ambientales, climáticas y sísmicas del lugar son las siguientes:

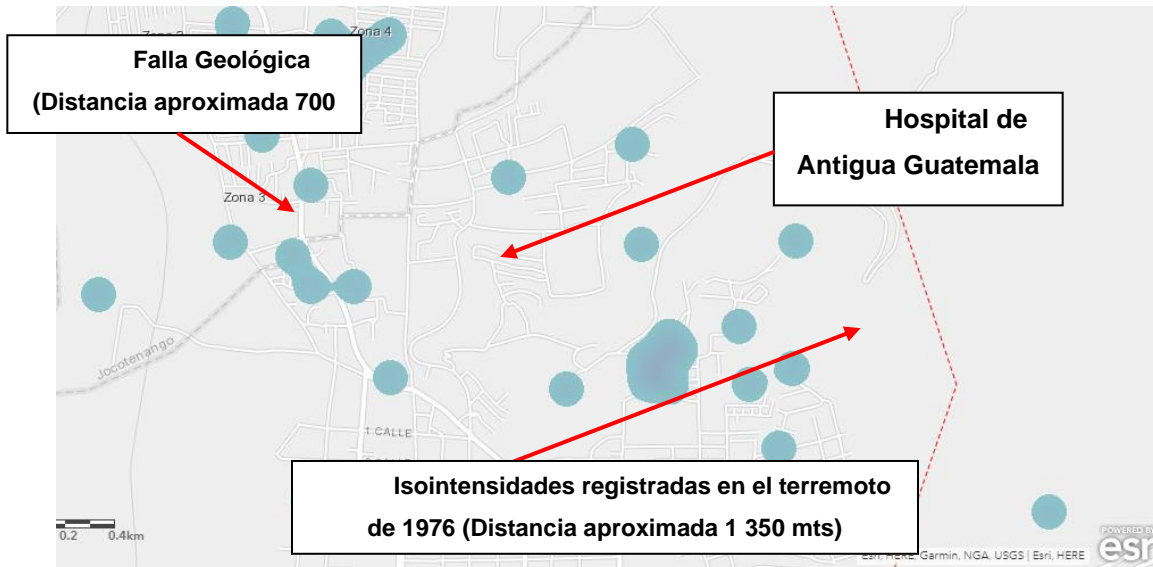
- Coordenadas: 14°34'13.6"N, 90°43'54.3"W
- Altitud sobre el nivel del Mar: 1,470 msnm
- Temperatura Ambiente: 13°/25°
- Amenaza Sísmica (NSE 2-18): Índice Sísmico, $I_0 = 4.2$; Ordenada espectral de periodo corto, $S_{cr} = 1.50g$; Ordenada espectral con periodo de 1 segundo; $S_{1r} = 0.55g$.

Figura 3. Mapa de ubicación y localización No.1



Fuente: Google. (2020). *Google Maps*. Consultado el el 14 abril de 2020. Recuperado de <https://www.google.com.mx/maps/place/Antigua+Guatemala/@14.5700281,-90.7404098,1314m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x85890e74b0250b15:0xf786ba2b2903723d!8m2!3d14.5572969!4d-90.7332233>.

Figura 4. **Mapa de ubicación y localización de fallas y amenazas sísmicas**

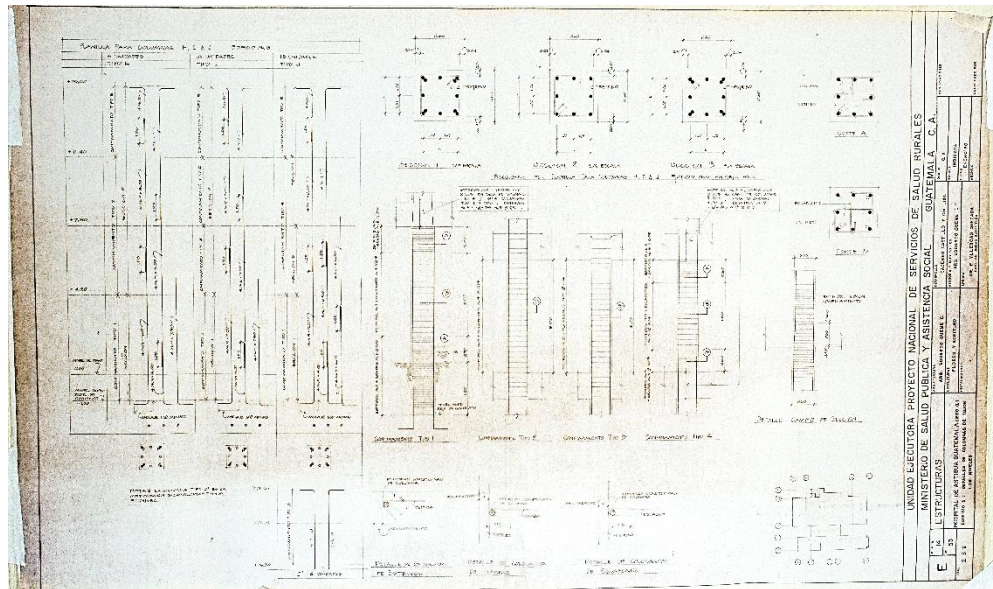
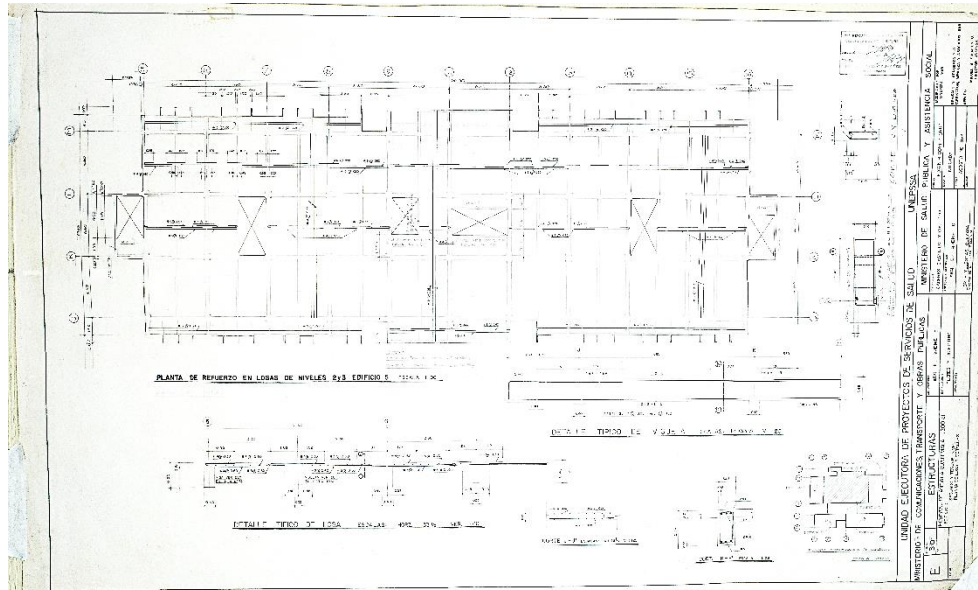


Fuente: elaboración propia, realizado con ArcGis.

2.3. Revisión de planos estructurales

Se realizó la revisión de los planos estructurales para conocer las características y configuración del edificio, estos fueron obtenidos a través del Departamento de Mantenimiento del hospital Pedro de Bethancourt.

Figura 5. Planos constructivos del hospital Pedro de Bethancourt



Fuente: UNEPSSA. (1980). Planos constructivos.

2.3.1. Descripción de la estructura

La estructura que se ha evaluado corresponde al edificio principal del Hospital Pedro de Bethancourt, construida durante los años 1987 y 1988. Es una estructura de cuatro niveles principales y un quinto nivel utilizado como cuarto de máquinas de los elevadores, con un sistema estructural de marcos (E1). Los entrepisos están constituidos por losas macizas armadas en dos direcciones de espesor de 10 cm, la conexión entre niveles es mediante tres módulos de gradas de concreto armado en forma de "U" (dos exteriores de emergencia y uno central) y cuatro ascensores cuya caja es de concreto armado.

Figura 6. **Vista general del edificio hospital Pedro de Bethancourt**



Fuente: [Fotografía de Alberto Orozco]. (Hospital Pedro de Bethancourt. 2020). Colección personal. Guatemala.

2.3.2. Uso de la estructura

El uso del edificio por nivel se distribuye de la siguiente manera.

Tabla IV. **Uso de la edificación para cada nivel**

Nivel 1	Esterilización, cirugía (quirófanos), farmacia, admisión hospitalaria, laboratorio, archivo clínico, rayos X Cafetería y Cocina
Nivel 2	Clínicas y encamamientos de Gineco-obstetricia y Pediatría, incluye pasillos.
Nivel 3	Servicios médicos y cuidados intensivos, incluye pasillos.
Nivel 4	Encamamientos y hospitalización de cirugía, incluye pasillos.
Nivel 5	Techo con acceso

Fuente: elaboración propia.

La categoría de la estructura, se considera que la estructura es una edificación esencial y nivel de protección sísmica E, de acuerdo con la norma AGIES NSE 2-18, puesto que es un edificio que brinda servicios de salud y debe permanecer en servicio antes, durante y después de un sismo o cualquier desastre.

2.3.3. Características de los materiales

En la siguiente tabla se muestran las características de los materiales utilizados en la construcción del edificio, las cuales son consideradas en el modelo analítico realizado en el programa SAP2000® v 21.

Tabla V. **Materiales utilizados en construcción de edificio**

<p>Concreto Armado (ASTM A-615) $E = 15,100\sqrt{f'c}$</p>	<p>$f'c = 4,000 \text{ lbs/plg}^2$ (280 kgs/cm²) $y = 2,4 \text{ Ton/m}^3$ (150 lbs/pie³)</p>
<p>Acero de refuerzo (A615-G60)</p>	<p>$f_y = 60,000 \text{ lbs/plg}^2$ (4,200kg/cm²) $y = 7,85 \text{ ton/m}^3$</p>
<p>Mampostería reforzada de soga</p>	<p>$f'm = 65 \text{ kg/cm}^2$ $y = 1,8 \text{ ton/m}^3$ (60 lbs/pie³)</p>
<p>Mortero para levantado</p>	<p>(proporciones en volumen) 1 cemento: ¼ cal hidratada: 3 arena de río</p>
<p>Resistencia a la compresión de Vigas, columnas</p>	<p>$f'c = 4,000 \text{ lbs/plg}^2$ (280 kgs/cm²)</p>
<p>Resistencia a la compresión de losas</p>	<p>$f'c = 4,000 \text{ lbs/plg}^2$ (280 kgs/cm²)</p>
<p>Resistencia a la compresión de módulo de gradas</p>	<p>$f'c = 4,000 \text{ lbs/plg}^2$ (280 kgs/cm²)</p>
<p>Resistencia a la compresión de fundición de mampostería</p>	<p>$f'c = 3,000 \text{ lbs/plg}^2$ (210 kgs/cm²)</p>

Fuente: elaboración propia.

2.3.4. Propiedades del suelo

En la siguiente las propiedades del suelo las utilizadas para el diseño original de la estructura, sin embargo, en el presente estudio no se analizará la interacción suelo-estructura.

Tabla VI. **Propiedades del suelo**

Capacidad soporte	3 kips/pie ² (15 tons/m ²)
Periodo del suelo estimado	Ts = 0.96 seg.

Fuente: elaboración propia.

2.3.5. Reglamentos de diseño

Para el diseño original del edificio se consideraron los siguientes normativos:

- ACI 318-77
- SEACC -75
- UBC 76
- AISC-73
- Recomendaciones de construcción FHA

2.4. Inspección visual

Se realizó una inspección visual al edificio del hospital Pedro de Bethancourt con el objetivo verificar si existen daños representativos en sus elementos estructurales.

2.4.1. Revisión de las condiciones existentes del edificio

A continuación, se describe la situación actual de los elementos estructurales del edificio hospital Pedro de Bethancourt.

Primer nivel: se realizó un recorrido por todos los ambientes, no se observaron daños en columnas, vigas. uniones viga-columna, losas ni muros de mampostería.

Figura 7. Collage de fotografías de primer nivel



Fuente: [Fotografía de Alberto Orozco]. (Hospital Pedro de Bethancourt. 2020). Colección personal. Guatemala.

Segundo nivel: se realizó un recorrido por todos los ambientes, no se observaron daños en columnas, vigas, uniones viga-columna, losas ni muros de mampostería.

Figura 8. Collage de fotografías de primer nivel

Pasillo a clínicas



Losas y vigas



Pasillo principal



Muros de mampostería



Fuente: [Fotografía de Alberto Orozco]. (Hospital Pedro de Bethancourt. 2020). Colección personal. Guatemala.

Tercer nivel: se realizó un recorrido por todos los ambientes, no se observaron daños en columnas, vigas, uniones viga-columna, losas ni muros de mampostería.

Figura 9. Collage de fotografías de tercer nivel



Fuente: [Fotografía de Alberto Orozco]. (Hospital Pedro de Bethancourt. 2020). Colección personal. Guatemala.

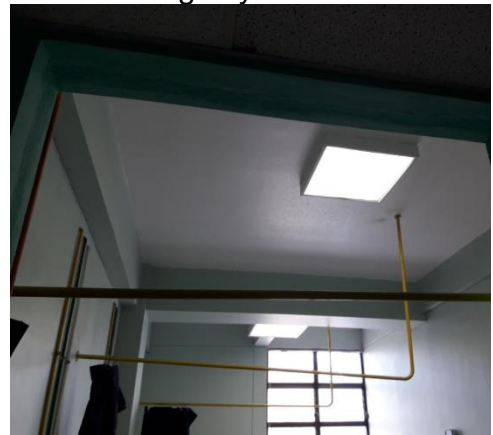
Cuarto nivel: se realizó un recorrido por todos los ambientes, no se observaron daños en columnas, vigas, uniones viga-columna, losas ni muros de mampostería.

Figura 10. Collage de fotografías de cuarto nivel

Muros de mampostería



Vigas y losas



Pasillo principal



Muros de mampostería



Fuente: [Fotografía de Alberto Orozco]. (Hospital Pedro de Bethancourt. 2020). Colección personal. Guatemala.

2.4.1.1. Análisis de daños del diseño estructural

Se presentan a continuación de manera general los daños encontrados.

Tabla VII. **Identificación de daños**

ELEMENTO	TIPO DE DAÑO
COLUMNAS	No se observaron
VIGAS	No se observaron
UNIÓN VIGA-COLUMNA	No se observaron
SISTEMA DE LOSAS	No se observaron
MUROS DE MAMPOSTERÍA	No se observaron

Fuente: elaboración propia.

2.4.1.2. Evaluación y cuantificación de daños

No se encontraron daños estructurales, únicamente se observaron daños en los muros de mampostería, por lo que no existe peligro latente a usuarios y personal.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. Características del estudio

Se describen las características generales del estudio a continuación.

3.1.1. Enfoque del estudio

La investigación se basó en un enfoque cuantitativo. Se realizó la recolección de datos para la verificación de la hipótesis, con base en la medición numérica, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.

3.1.1.1. Descriptivo

La investigación tuvo este carácter debido a que se necesitó del conocimiento suficiente para el análisis del comportamiento de la estructura y posteriormente para la interpretación de resultados.

3.1.1.2. Explicativo

Definidos los procedimientos necesarios, se plantea una solución correcta y sujeta a la realidad.

3.1.2. Diseño del estudio

La propuesta de investigación presentada corresponde al tipo de metodología experimental debido a la manipulación deliberadamente más de una variable.

3.1.3. Alcance del estudio

El alcance del presente trabajo está orientado, únicamente, a entender cuál sería el posible comportamiento de la estructura del edificio que ocupa el hospital nacional Pedro de Bethancourt, ubicado en el municipio de Antigua Guatemala, Sacatepéquez, en caso de ser sometida a un evento sísmico determinado. Para esto se utilizó un método de análisis estructural no lineal (pushover) que determine el posible mecanismo de falla y el nivel de daños que se pudiera alcanzar.

La respuesta de los elementos no estructurales y la interacción suelo-estructura no están contemplados en los alcances de este trabajo. mediante la aplicación de un análisis estático.

3.2. Unidad de análisis

El estudio de la presente investigación se realizó para la evaluación estructural del edificio que ocupa el hospital nacional Pedro de Bethancourt, ubicado en el municipio de Antigua Guatemala, Sacatepéquez.

3.3. Variables

Las variables utilizadas para la presente investigación se presentan en la siguiente tabla:

Tabla VIII. Variables de la investigación

Campo	Variable	Tipo	Definición Teórica	Definición operativa	Indicadores
Evaluación del riesgo sísmico y desempeño estructural	Características estructurales	Cualitativa	Describir el sistema estructural	De acuerdo con el sistema estructural de la edificación de determinará como se analizará la infraestructura	Rigidez
					Desplazamientos
	Solicitaciones sísmicas	Cualitativa	Tipo de sismo	Eventos sísmicos de diferente intensidad	Sismos débiles
					Sismos fuertes
	Análisis estructural	Cualitativa	Proceder de una estructura antes de las solicitaciones externas	Determinación del tipo de análisis estructural a utilizar	Rango elástico
					Rango inelástico
	Magnitud de daño	Cuantitativo	Determinación de daño estructural	Estados de daño y niveles de desempeño	ATC-40/FEMA 356

Fuente: elaboración propia

3.4. Metodología de la investigación a desarrollar

El desarrollo del trabajo de investigación propuesto se realizó de acuerdo con los siguientes pasos:

- Búsqueda de información relacionada con la temática en desarrollo: se realizaron las consultas bibliográficas y publicaciones nacionales y extranjeras.
- Planteamiento de marco teórico relacionado con la investigación: posterior a la recolección de la información, se plantearon los conceptos básicos que rigieron la investigación y se definió la terminología empleada a lo largo de la investigación, con el propósito de sustentar la base de todos los cálculos y procesos que se plantearon y desarrollaron.
- Evaluación del desempeño sísmico estructural a partir del análisis estático no lineal (Pushover) utilizando software especializado (SAP2000): se realizó el análisis estructural del edificio utilizando modelos tridimensionales por medio de programas de computadora.
- Análisis y presentación de resultados: finalizados los análisis se presentan las conclusiones y recomendaciones.

3.5. Procesamiento de la información

De manera muy general el procedimiento fue de la siguiente manera:

- Creación del modelo computacional de la estructura.
- Definición de rotulas plásticas
- Definición de casos de cargas del análisis pushover
- Realización del análisis pushover

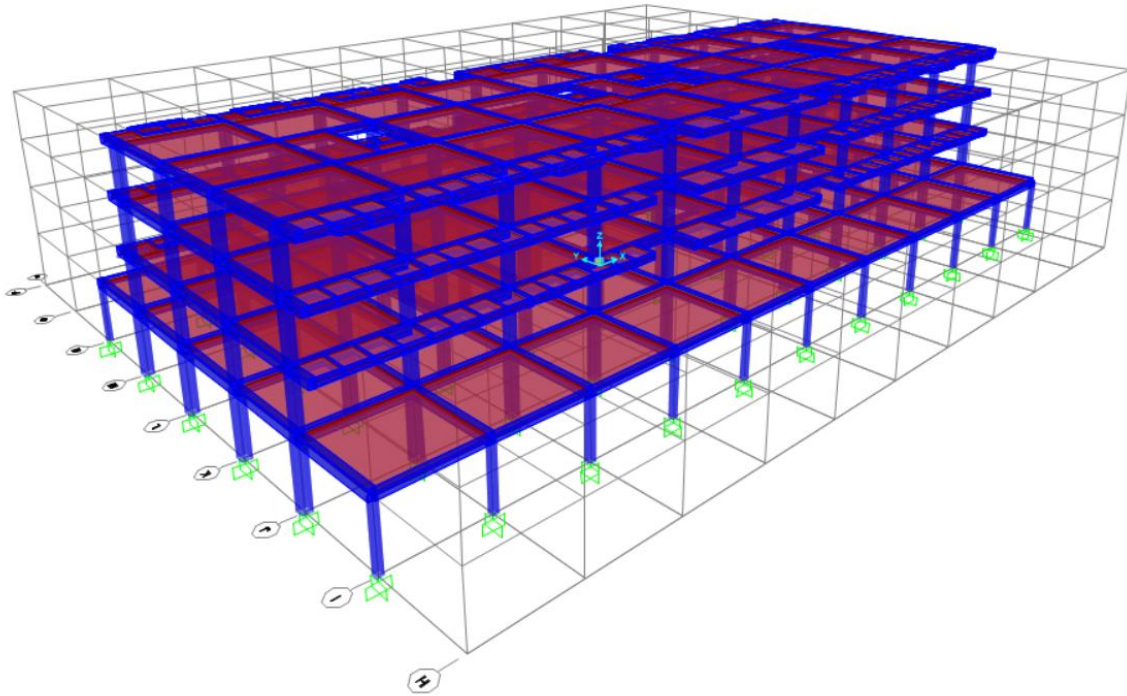
3.5.1. Creación del modelo computacional de la estructura

Corresponde a la idealización del edificio, con respecto a las dimensiones de todos sus elementos estructurales básicos: vigas, columnas y losas, tomando en cuenta la cantidad y características del acero de refuerzo, además de considerar las cargas actuantes sobre la estructura según el uso y categoría del edificio. Para la creación del modelo computacional del edificio en estudio, fue necesario utilizar un software de análisis y diseño estructural, para lo cual se realizó mediante el software SAP2000® v 21.

Las vigas, columnas y losas fueron generadas como elementos "frame", la mediante el empotramiento a la base del edificio se simuló la cimentación, los muros existentes se consideraron como elementos no estructurales y agregados como sobre carga muerta, distribuyéndola uniformemente sobre vigas y losas.

En la siguiente figura se muestra el modelo isométrico de la edificación, con las diferentes columnas y vigas determinadas en los planos estructurales.

Figura 11. **Modelo computacional de hospital Pedro de Bethancourt**



Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®.

3.5.2. Características no lineales de los materiales

La utilización de modelos no lineales para los materiales debe utilizarse cuando las cargas son tan elevadas que se provocan deformaciones permanentes, o bien si las deformaciones unitarias son muy elevadas.

Cuando se analizan estructuras existentes con el objetivo de realizar reparaciones o rehabilitaciones, el cálculo no lineal es absolutamente necesario, ya que el diseño ha superado ciertos estados límites, hay cambio en las rigideces de diseño a consecuencia de fisuras y deformaciones.

Las características no lineales del concreto fueron determinadas por la gráfica esfuerzo - deformación estipulada por Mander y en la curva de histéresis de concreto se puede apreciar el comportamiento de fluencia, a partir de la degradación de la rigidez.

Para el acero se utilizó la gráfica de esfuerzo – deformación estipulada por Park y la curva de Histéresis de Kinematic, que son indispensables para medir su comportamiento, además que están dadas según consideraciones de las normas ASTM.

En el programa SAP2000® se definieron los materiales correspondientes a la estructura y se configuraron las propiedades no-lineales de cada uno de ellos, utilizando las siguientes características:

Concreto

- Resistencia del concreto a usar $f'c=280$ kg/cm²
- $\epsilon=0.0022$ (para la máxima capacidad a la compresión)
- Módulo de Elasticidad $E = 2\,509,980$ kg/cm²
- $\gamma=2,400$ kg/m³ (peso específico)
- Poisson´s $\nu= 0.20$

Acero de refuerzo

- Cedencia del acero $f_y = 4,200$ kg/cm²
- Capacidad última $F_u = 5,600$ kg/cm²
- Módulo de Elasticidad $E = 2\,100,000$ kg/cm²
- Poisson´s $\nu = 0.30$
- $\epsilon = 0.0022$ (deformación)
- $\gamma = 7,850$ kg/m³ (peso específico)

3.5.3. Análisis sísmico de la estructura

Posterior a la creación del modelo computacional, el cual representa la distribución de los elementos estructurales y rigideces de la estructura, se procedió a analizar sísmicamente la estructura.

3.5.3.1. Obtención del espectro de respuesta

El espectro de respuesta se obtuvo utilizando fórmulas, factores y coeficientes de sitio dados en el documento “NSE-2-18, Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección” de la Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.

Datos por considerar:

- Ubicación del proyecto
Municipio: Sacatepéquez
Departamento: Antigua Guatemala
- Clase de obra
Categoría: Esencial
- Parámetros
Índice de sismicidad (I_0): 4.2
Ordenada espectral de periodo corto (S_{cr}): 1.50g
Ordenada espectral con periodo de 1 segundo (S_{1r}): 0.55g
Nivel de protección sísmica: E
Clase de sitio (C_s): C
Tipo de fuente sísmica: A
Distancia horizontal cercana a la fuente sísmica: 10 km

Probabilidad de exceder un sismo de diseño: 5% en 50 años

Tipo de sismo: Severo

Factor de escala: $K_d = 0.8$

- Ajuste por clase de sitio

$$F_a = 1.20; S_{cs} = S_{cr} * F_a = 1.800 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.1}]$$

$$F_v = 1.40; S_{1s} = S_{1r} * F_v = 0.770 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.2}]$$

- Ajuste por intensidades sísmicas especiales

$$N_a = 1.00; S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a = 1.800 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.3}]$$

$$N_v = 1.10; S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v = 0.847 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.4}]$$

- Períodos de vibración de transición

$T_s = S_{1s} / S_{cs} = 0.4706 \text{ seg}$ (Período T_s que separa los períodos cortos de los largos) [Ecc.3.5]

$T_o = 0.2 T_s = 0.0941 \text{ seg}$ (Período T_o que define el inicio de la meseta de períodos cortos del espectro) [Ecc.3.6]

- Espectro calibrado al nivel de diseño requerido

$$S_{cd} = K_d * S_{cs} = 1.44 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.7}]$$

$$S_{1d} = K_d * S_{1s} = 0.68 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.8}]$$

$$\text{Aceleración máxima del suelo, AMS) = } 0.40 * S_{cd} = 0.5760 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.9}]$$

$$\text{Componente vertical del sismo de diseño, } S_{vd} = 0.20 * S_{cd} = 0.288 \text{ g} \quad [\text{Ecc.3.10}]$$

- Tipo de estructura

Sistema Estructural: E1-DA (sistema de marcos/ Marcos tipo A de reforzado)

Norma: NSE 7.1

Factor genérico de reducción de respuesta sísmica (R): 8

Factor de Sobre-Resistencia (Ω_r): 3

Factor de amplificación de desplazamiento post-elástico (C_d): 5.5

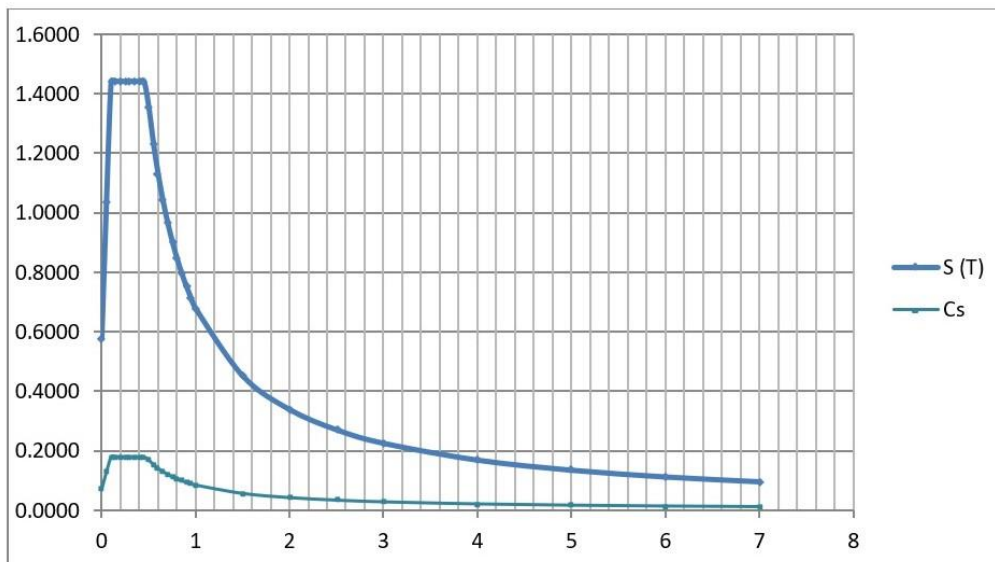
- Coeficiente sísmico al límite de cedencia C_s

Altura del edificio $h_n = 14.95$ m; $K_t = 0.047$; $X = 0.85$

Período fundamental de vibración: $T_a = K_t(h_n)^x = 0.4683$ seg [Ecc.3.11]

El coeficiente sísmico: $C_s = \frac{S_a(T)}{R} = 0.18$ [Ecc.3.12]

Figura 12. **Gráfica de espectro de respuesta**



Fuente: elaboración propia.

3.5.3.2. Selección de la demanda sísmica

De acuerdo con lo desarrollado en el inciso anterior, se estableció un sismo con 5 % de probabilidad de ser excedido en 50 años, el cual equivale al sismo

máximo (ME) de la metodología ATC-40, al ser su período de retorno $T= 975$ años.

3.5.4. Análisis de cargas de servicio

Se verificó que no se exceda el estado límite de servicio utilizando las posibles combinaciones de carga (cargas muertas, cargas vivas y sismo en las direcciones “X” y “Y”) que actúan simultáneamente en la edificación.

Las tablas X, XI y XII presentan los valores de cargas de servicios considerados para el análisis.

Tabla IX. **Carga muerta**

Elemento	Carga
Concreto reforzado	2,400 Kg/m ³
Tabiques livianos	75 kg/m ²
Piso + mezlón	120 kg/m ²
Ductos + Cielo falso	60.0 Kg/m ²
Acabados en losa	25 kg/m ²
Impermeabilizante	10 kg/m ²
Desniveles en losa final	100 kg/m ²
Peso del Suelo	1,600 Kg/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Integración de carga muerta**

Elemento	Carga
Carga muerta superimpuesta entepiso	280 Kg/m ²
Carga muerta superimpuesta techo final	195 Kg/m ²

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Carga viva**

Elemento	kg/m²
Arena Volcánica (1,800 Kg/m ³) (0.08 m de espesor)	144
Techos con acceso	200
Techos sin acceso	100
Pasillos	500
Clínicas y encamamientos	250
Servicios médicos y laboratorio	350
Escaleras*	500

Fuente: AGIES. (2018). *NSE 2-18, Tabla 3.7.1-1.*

3.5.5. Combinaciones de cargas

Se utilizaron las combinaciones dadas por *AGIES NSE 2-18: capítulo 8.*

3.5.5.1. Notación por utilizar

Se presentan a continuación las notaciones a utilizar.

Tabla XII. **Notación por utilizar**

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
CM	Carga muerta. Peso propio de los elementos estructurales.
SCM	Sobre carga muerta. Peso de los acabados
CV	Carga viva. Producidas por el uso y la ocupación de la edificación
CVT	Carga viva de Techo. Correspondiente a las producidas por el uso y la ocupación del techo de la estructura.
AR	Carga de arena volcánica. Producida por la caída de ceniza o arena volcánica.
EQX	Sismo en X. Cargas sísmicas horizontal y vertical en plano X.
EQY	Sismo en Y. Cargas sísmicas horizontal vertical en plano Y.

Fuente: AGIES. (2018). *NSE 2-18*.

3.5.5.2. Sismo vertical (Sv)

De acuerdo con la norma AGIES NSE 3-18 sección 4.1.2.2, se consideró el 20 % del factor S_{cd} , de la construcción del espectro de respuesta. El efecto del sismo vertical fue incluido en los factores de carga para las combinaciones indicadas en NSE 2-18 sección 8.2.2, de la siguiente manera:

- Para diseño de vigas:
 - $1.20 + 0.20 S_{cd}$ (CR4)
 - $1.20 + (0.20) \cdot (1.44) = 1.488$
 - $0.90 - 0.20 S_{cd}$
 - $0.90 - (0.20) \cdot (1.44) = 0.612$

- Para diseño de columnas:
 - $1.00 - 0.20 S_{cd}$
 - $1.00 - (0.20) \cdot (1.44) = 0.712$

3.5.5.3. Combinaciones de carga para vigas y columnas

Las combinaciones de acuerdo *AGIES NSE 2-18* son:

Tabla XIII. **Combinaciones de carga para vigas y columnas a utilizar**

Z>	Combinación
CR1	1.4 CM + 1.4 SCM [Ecc.3.13]
CR2	1.2 CM + 1.2 SCM + 1.6 CV + 0.5 (CVT ó AR) [Ecc.3.14]
CR 2.a	1.2 CM + 1.2 SCM + 1.6 CV + 0.5 CVT
CR 2.b	1.2 CM + 1.2 SCM + 1.6 CV + 0.5 AR
CR3	1.2 CM + 1.2 SCM + 1.0 CV + 1.6 (CVT ó AR) [Ecc.3.15]
CR 3.a	1.2 CM + 1.2 SCM + 1.0 CV + 1.6 CVT
CR 3.b	1.2 CM + 1.2 SCM + 1.0 CV + 1.6 AR
CR 4	1.2 CM + 1.20 SCM + CV + Sv ± Sh [Ecc.3.16]
CR 4.a	1.488 CM + 1.488 SCM + CV ± EQX ± 0.30 EQY
CR 4.b	1.488 CM + 1.398 SCM + CV ± 0.30 EQX ± EQY
CR 5 (Vigas)	0.90 CM + 0.90 SCM – Sv ± Sh [Ecc.3.17]
CR 5.a	0.612 CM + 0.612 SCM ± EQX ± 0.30 EQY
CR 5.b	0.612CM + 0.612 SCM ± 0.30 EQX ± EQY
CR 5 (Columnas)	1.0 CM + 1.0 SCM – Sv ± Sh [Ecc.3.18]
CR 5.c	0.712 CM + 0.712 SCM ± EQX ± 0.30 EQY
CR 5.d	0.802 CM + 0.802 SCM ± 0.30 EQX ± EQY

Fuente: elaboración propia.

3.5.6. Asignación cargas laterales

Se aplicó la distribución de carga lateral de acuerdo con el patrón modal utilizando una distribución vertical proporcional a la forma del modo fundamental de vibración en la dirección de análisis.

Se asignaron las cargas en forma triangular invertida, para este caso se colocaron las cargas calculadas de acuerdo con el AGIES y se asignaron sobre los nodos del primer pórtico ortogonal al eje X y Y.

3.5.7. Asignación de casos de carga

Se definieron los siguientes casos de carga:

Cargas lineales:

- Modal (MODAL)
- Carga muerta (DEAD).
- Carga viva (LIVE).
- Sobre carga muerta (SDL).
- Carga viva de Techo (CVT).
- Carga de arena volcánica (AR).
- Pushover X y Pushover Y.

Espectro de respuesta:

- Sismo en X (EQX) y Sismo en Y (EQY).

Cargas no lineales:

- Carga de gravedad no lineales en el sentido X y Y (CGNL X y CGNL Y).
- Empuje lateral en el sentido X y Y (PUSH X y PUSH Y).

Para los casos de carga gravitatorias no lineales se introdujeron en el programa SAP2000® teniendo los siguientes criterios:

- Al estado de carga inicial se le asignó un valor igual a 0 (cero).
- Se monitoreó el desplazamiento en el eje de aplicación de las cargas y se determinó un nodo de control.
- Se utilizaron las pautas dadas por FEMA 356 utilizando factores multiplicadores de “1.1 para cargas muertas (CM y SCM) y 0,25 para cargas vivas (CV y CVT)” (FEMA, 2000, pág. 126).
- Solo se guardaron los resultados para el estado final.
- En cuanto a los parámetros no lineales para el análisis se utilizaron los contenidos en el programa por defecto.

Para los casos de carga que analizaron el empuje lateral de igual manera se introdujeron en el programa SAP2000® bajo los siguientes criterios:

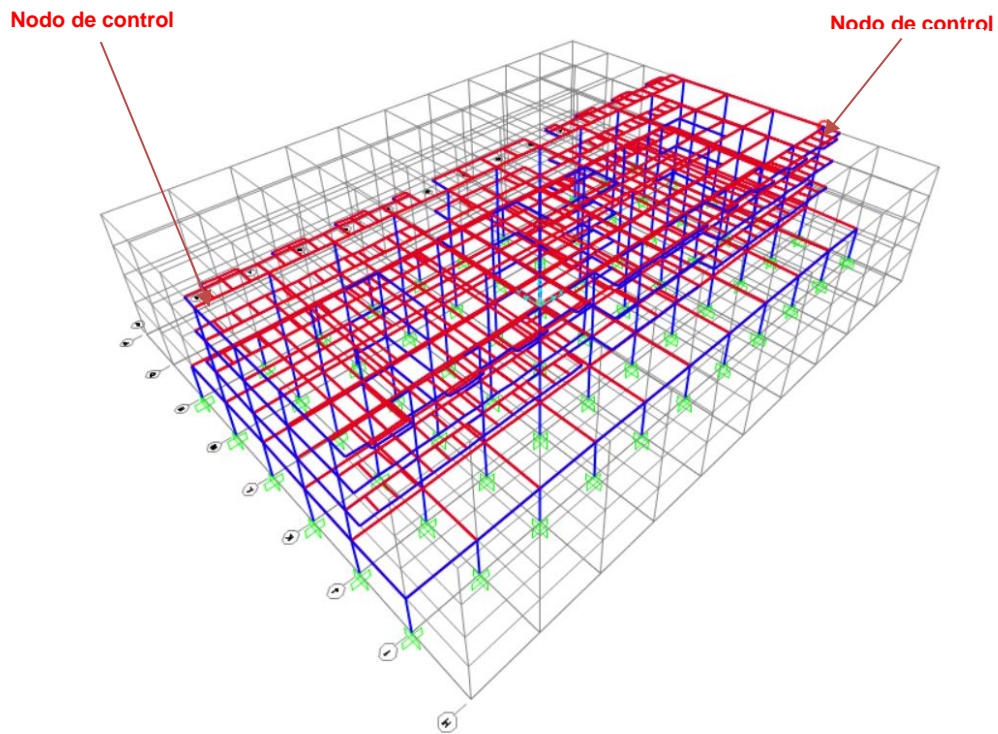
- El estado de carga fue continuo después del estado de carga gravitatorio no lineales.
- Para los estados “PUSH X y PUSH Y” se aplicó el patrón PUSHOVER X y Y con un factor multiplicador de 1.
- Se mantuvo control de desplazamiento para los casos de cargas laterales.
- Se monitoreó el desplazamiento en el eje de aplicación de las cargas y se determinó un nodo de control.

- Se utilizó 0.5 como valor de desplazamiento máximo a monitorear en el cual SAP2000® detendría su análisis.
- Para varios ciclos de carga lateral se almacenaron datos de múltiples estados de carga.
- En cuanto a los parámetros no lineales para el análisis se utilizaron los contenidos en el programa por defecto.

3.5.8. Nodo de control

Es un punto de coordenadas conocidas dentro la edificación, formado por la intersección de vigas y columnas, el cual se asigna para estar monitoreando los desplazamientos que ocurren al momento de un sismo (Duarte, Martínez y Santamaria, 2017, pág. 46). Los nodos de control se ubicaron en el techo del primer pódico ortogonal al eje X y Y, debido a que las secciones que son de borde están expuestas a mayores cargas internas.

Figura 13. **Asignación de nodo de control**

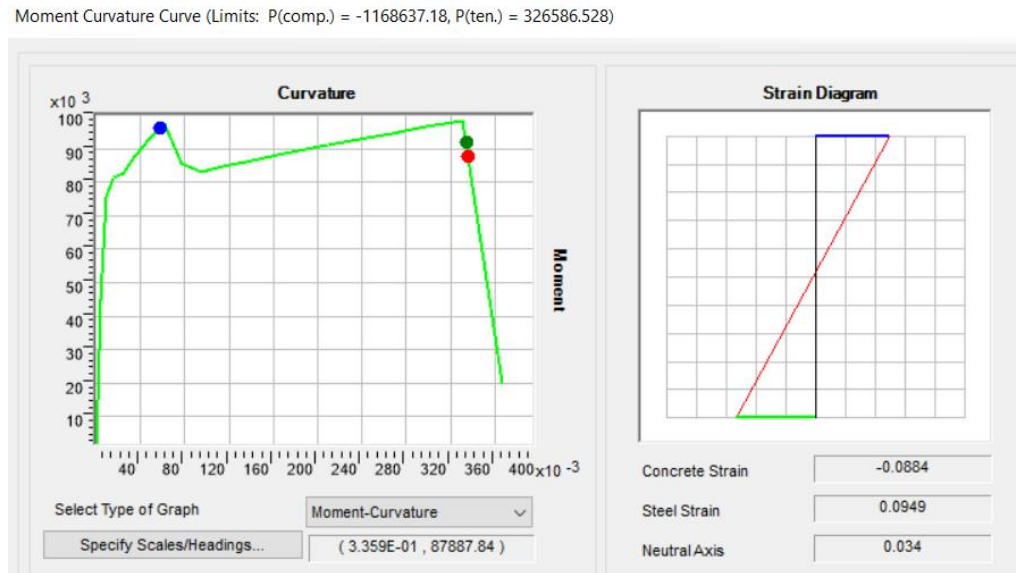


Fuente: elaboración propia, realizado con el Software SAP2000®.

3.5.9. Diagramas momento-curvatura y momento-giro

El programa computacional SAP2000® permite la generación de estos diagramas mediante el módulo Section Designer.

Figura 14. Diagrama de momento-curvatura



Fuente: elaboración propia, realizado con el Software SAP2000®.

3.5.10. Rotulas plásticas

Las rótulas plásticas para vigas se calcularon mediante los diagramas de momento-curvatura de la sección 3.5.9 de este documento y para las columnas, fueron extraídos del programa computacional SAP2000®.

3.5.10.1. Asignación de rótulas plásticas a vigas y columnas

Se asignaron posibles mecanismos de rotulas plásticas a las columnas y vigas, estas rótulas se asignaron a 5 % y 95 % de la longitud de los elementos, para las rotulas plásticas en vigas se definió un solo tipo de articulación plástica, la que predomina a flexión (M3), para vigas en el eje X se carga el estado CGNL X, de igual forma se cargaron las rótulas de las vigas sobre ejes Y con CGNL Y.

Para las rotulas plásticas en columnas se definió un solo tipo de articulación plástica, correspondiente a flexocompresión (P-M2-M3).

3.6. Proceso modal de la estructura

Se verificó la participación de masa total para comprobar que esta sobrepase el 90 % y posteriormente se analiza cada uno de los modos de vibración.

Tabla XIV. **Factores de participación de la masa**

PARTICIPACIÓN DE MASA		
Sentido	Porcentaje estático	Porcentaje dinámico
UX	99.8120 %	93.3088 %
UY	99.7579 %	92.3367 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Modos y periodos de vibración de la estructura**

Modo de Vibración	Periodo (seg)
1	0.79737
2	0.76748
3	0.74517
4	0.26514
5	0.25301
6	0.24998

Fuente: elaboración propia.

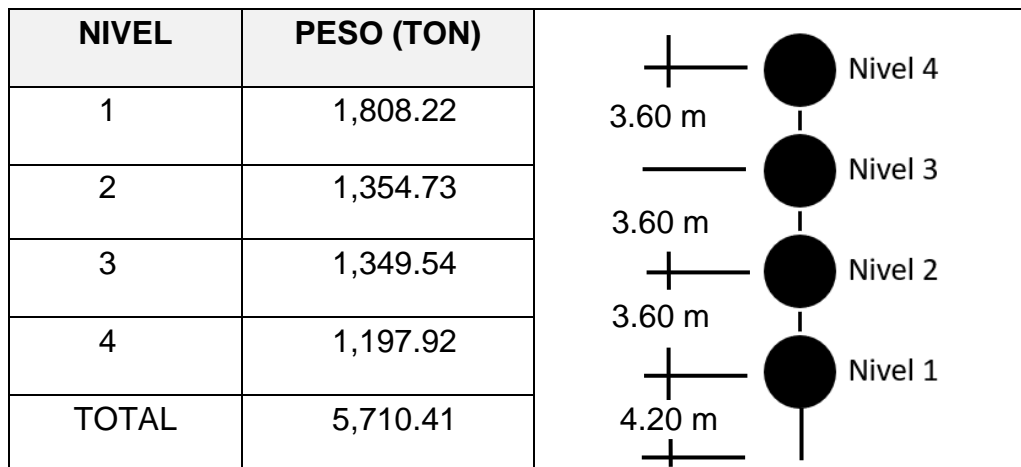
3.7. Definición de los patrones de carga lateral

Se describe a continuación los procedimientos para determinar los patrones de carga lateral de la estructura.

3.7.1. Fuerza cortante del edificio

Las fuerzas sísmicas equivalentes se representan a través del corte basal, este se calcula utilizando la siguiente expresión dada por la norma NSE 3-2018 del AGIES, $VB = Cs Ws$ [Ecc.3.20]. Donde: VB = Corte basal; Ws = Peso sísmico ($Ws =$ Peso propio + sobrecarga + 25% de la carga viva) [Ecc.3.20] y Cs = Coeficiente sísmico. Se calcularon los pesos sísmicos de la estructura por cada nivel y se generó un sistema de 4 Grados de Libertad (GDL) simplificado como se muestra.

Figura 15. **Peso de la edificación por cada nivel**



Fuente: elaboración propia.

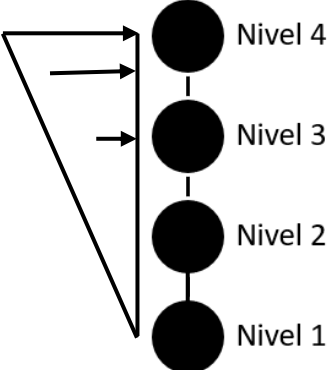
El coeficiente sísmico de diseño se determinó a través de la expresión $\frac{S(T)}{R}$, calculado en el Inciso i de la sección 3.2.3.1 de este documento, siendo 0.18, por lo que el valor del cortante base es de $VB = 0.18 \times 5,710.41 = 1,027.87$ ton.

3.7.1.1. Patrón de cargas propuesto por AGIES

En la figura 16 se muestran los valores de la fuerza lateral normalizada para cada nivel calculada mediante el cortante basal.

Figura 16. Fuerza vertical distribuida

ID	PESO (Ton)	Hi (m)	Hx (m)	Fx (Ton)	F Normalizada
W1	1,808.22	4.20	4.20	1,027.87	0.10
W2	1,354.73	3.60	7.80	2,033.32	0.20
W3	1,349.54	3.60	11.40	3,051.16	0.30
W4	1,197.92	3.60	15.00	4,068.11	0.40
WT	5,710.41			10,180.47	1.00



Fuente: elaboración propia.

4. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)

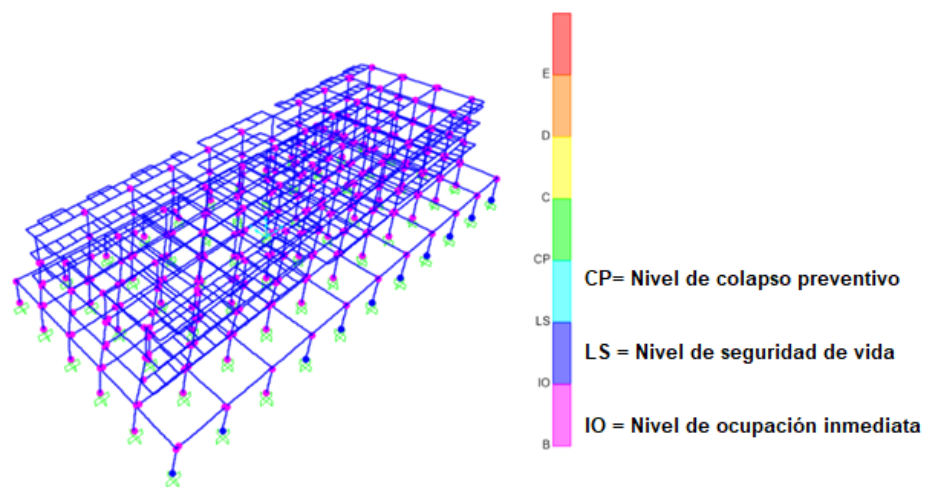
4.1. Establecimiento del objetivo de desempeño

El objetivo de desempeño que se establecerá debe estar en función de la ocupación inmediata (1-B), ya que se debe garantizar la seguridad de sus ocupantes y el edificio deberá ser utilizable después de un sismo.

4.2. Análisis Pushover

El análisis estático no lineal “Pushover” a la estructura del Hospital Pedro de Bethancourt se realizó a través del programa computacional SAP2000® en donde por medio de una escala de colores se puede visualizar la formación de las rótulas plásticas con los niveles de desempeño establecidos en ATC 40 y FEMA 356.

Figura 17. Análisis Pushover



Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

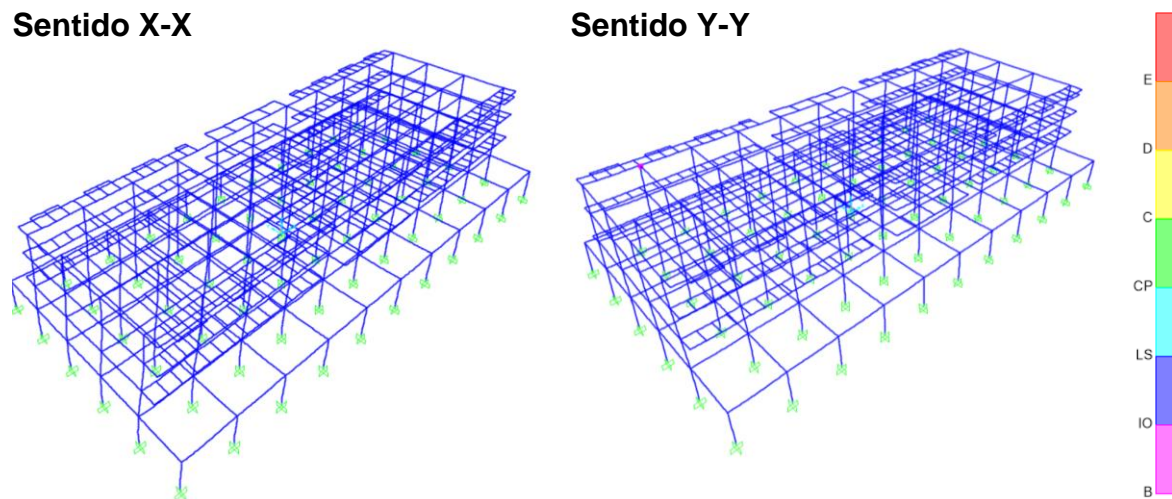
4.2.1. Secuencia de falla

Se evaluó la secuencia de los ciclos de carga para los sentidos X-X y Y-Y de la estructura y conforme se avanzaba se visualizó la formación de rótulas plásticas en los elementos estructurales horizontales y verticales de la siguiente manera:

4.2.1.1. Secuencia de carga 1 (Step 1)

- Sentido X-X: No se presentan rótulas plásticas en columnas ni vigas.
- Sentido Y-Y: No se presentan rótulas plásticas en columnas ni vigas.

Figura 18. **Secuencia de carga 1 (Step1)**

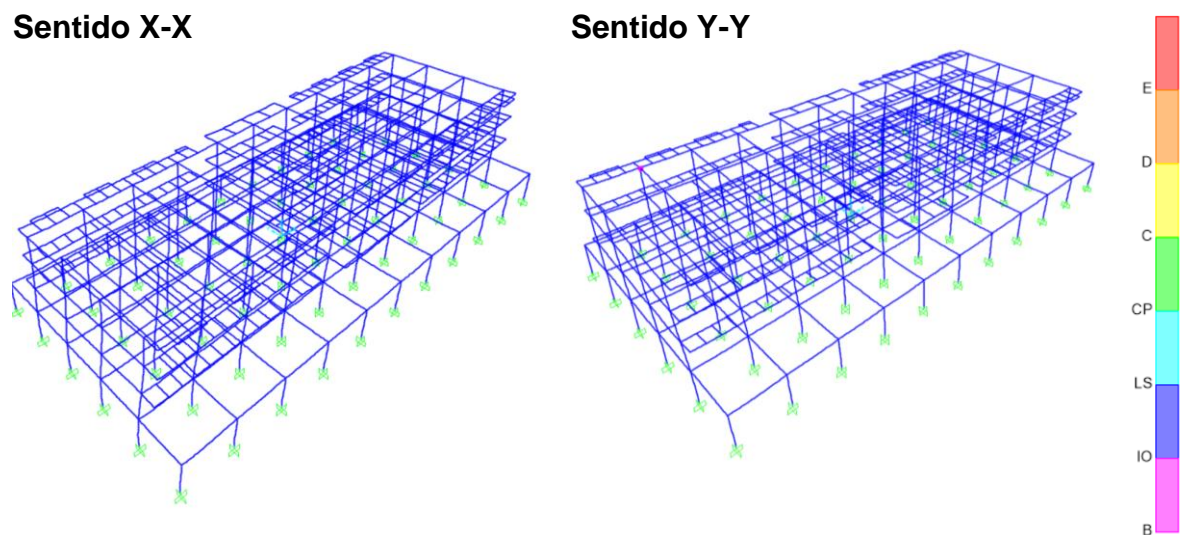


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.2. Secuencia de carga 2 (Step 2)

- Sentido X-X : Siguen sin presentarse rótulas plásticas en columnas y vigas.
- Sentido Y-Y: Siguen sin presentarse rótulas plásticas en columnas y vigas.

Figura 19. Secuencia de carga 2 (Step 2)

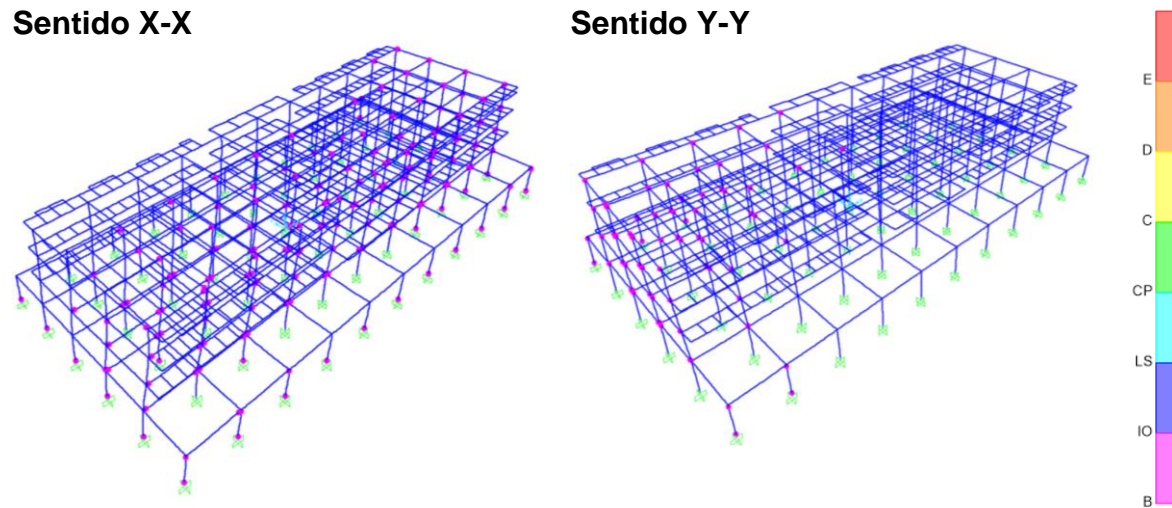


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.3. Secuencia de carga 3 (Step 3)

- Sentido X-X : Siguen sin presentarse rótulas plásticas en columnas y vigas.
- Sentido Y-Y : Se forman las primeras rótulas plásticas en vigas, las columnas aún no presentan rótulas plásticas.

Figura 20. **Secuencia de carga 3 (Step 3)**

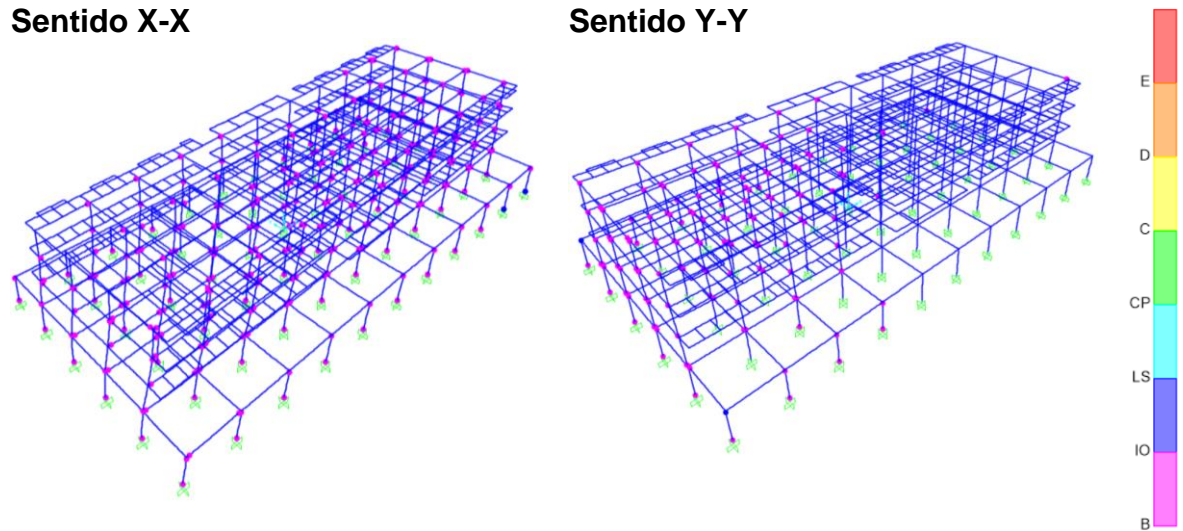


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.4. **Secuencia de carga 4 (Step 4)**

- Sentido X-X : Se forman las primeras rótulas plásticas en vigas, las columnas aún no presentan rótulas plásticas.
- Sentido Y-Y : Se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas. Inician a formarse las primeras rótulas plásticas en columnas.

Figura 21. **Secuencia de carga 4 (Step 4)**



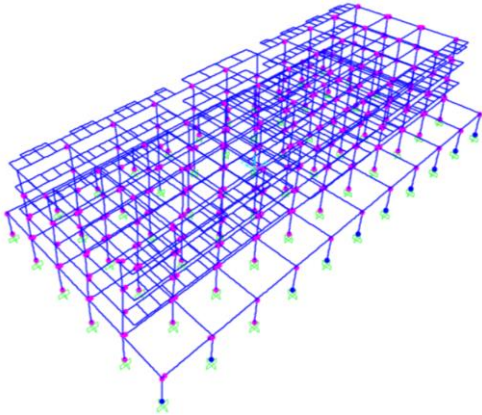
Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.5. **Secuencia de carga 5 (Step 5)**

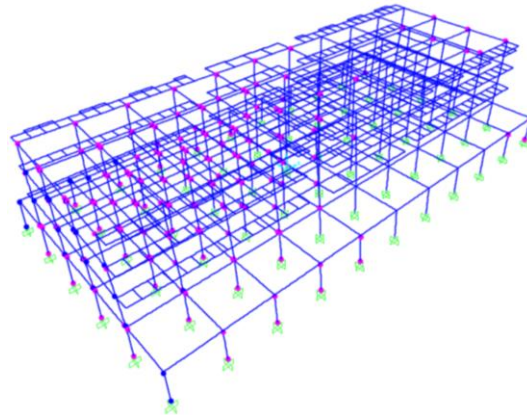
- Sentido X-X : se continua con la formación de rótulas plásticas en vigas, las columnas aún no presentan rótulas plásticas.
- Sentido Y-Y : se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas, estas empiezan a comportarse a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO). Se continua con la formación de rótulas plásticas en columnas.

Figura 22. **Secuencia de carga 5 (Step 5)**

Sentido X-X



Sentido Y-Y

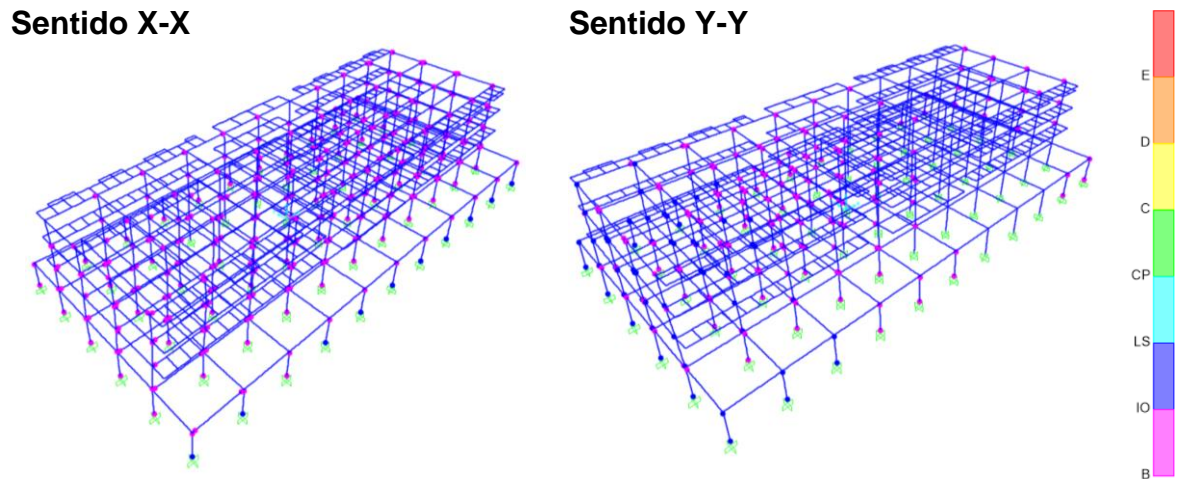


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.6. Secuencia de carga 6 (Step 6)

- Sentido X-X : se continua con la formación de rótulas plásticas en vigas, las columnas aún no presentan rótulas plásticas.
- Sentido Y-Y : se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas, estas continúan comportándose a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO). Se continua con la formación de rótulas plásticas en columnas, estas empiezan a comportarse a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO).

Figura 23. **Secuencia de carga 6 (Step 6)**

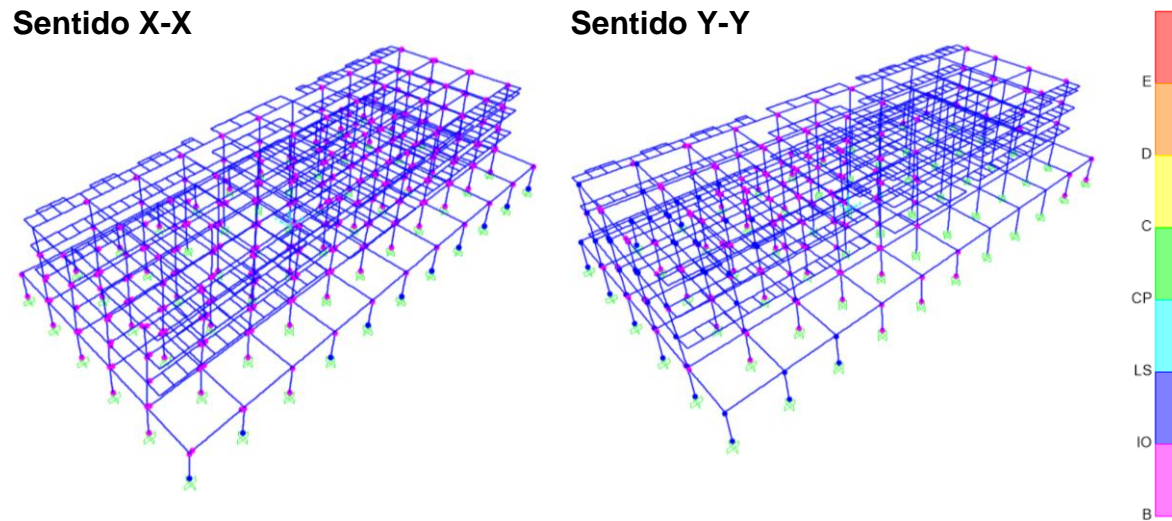


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.7. **Secuencia de carga 7 (Step 7)**

- Sentido X-X : se continua con la formación de rótulas plásticas en vigas, las columnas aún no presentan rótulas plásticas.
- Sentido Y-Y : se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas y columnas, ambas ya se comportan a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO).

Figura 24. **Secuencia de carga 7 (Step 7)**

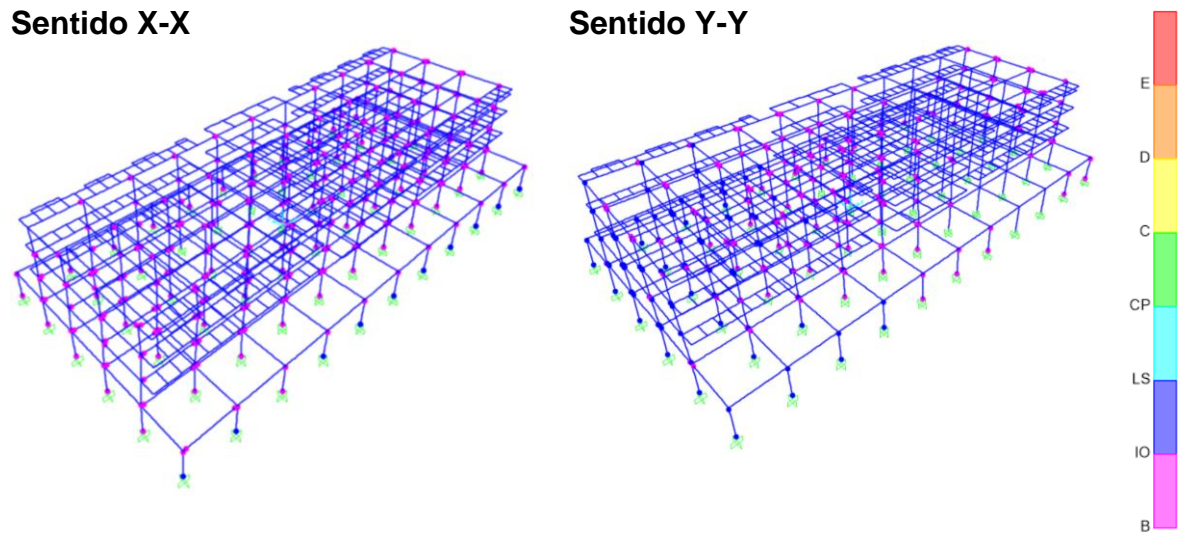


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.8. **Secuencia de carga 8 (Step 8)**

- Sentido X-X : se continua con la formación de rótulas plásticas en vigas, las columnas presentan las primeras rótulas plásticas.
- Sentido Y-Y : se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas, estas ya empiezan a sobrepasar el criterio de un nivel de ocupación inmediata (IO). Las columnas continúan comportándose a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO).

Figura 25. **Secuencia de carga 8 (Step 8)**

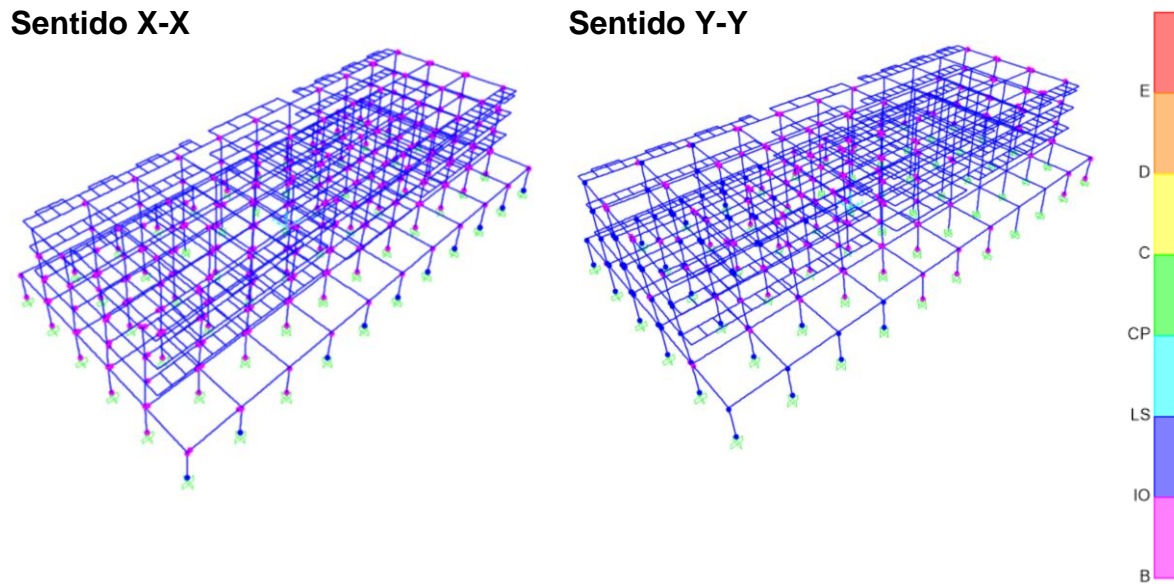


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.9. **Secuencia de carga 9 (Step 9)**

- Sentido X-X : se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas, estas empiezan a comportarse a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO). se continua con la formación de rótulas plásticas en columnas.
- Sentido Y-Y : se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas, estas ya inician a comportarse a criterios de seguridad de vida (LS). Las columnas ya empiezan a sobrepasar el criterio de un nivel de ocupación inmediata (IO).

Figura 26. **Secuencia de carga 9 (Step 9)**

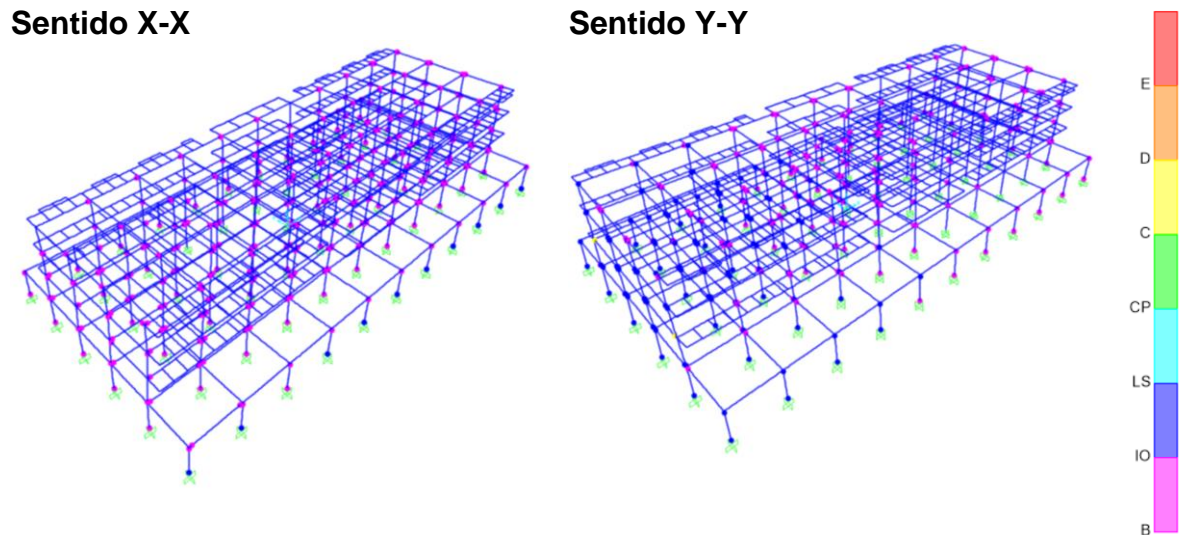


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.1.10. **Secuencia de carga 10 (Step 10)**

- Sentido X-X : se continúa con la formación de rótulas plásticas en vigas, estas continúan comportándose a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO). Se continúa con la formación de rótulas plásticas en columnas, estas empiezan a comportarse a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO).
- Sentido Y-Y : vigas y columnas ya se comportan a criterios de seguridad de vida (LS).

Figura 27. **Secuencia de carga 10 (Step 10)**



Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.2. Curvas de capacidad de la estructura

Con los criterios definidos en capítulo 3 de este documento, a través del programa computacional SAP2000® v 21 se obtuvieron dos curvas de capacidad para el patrón de carga propuesto por AGIES, una para cada sentido del sismo (dirección X-X y dirección Y-Y).

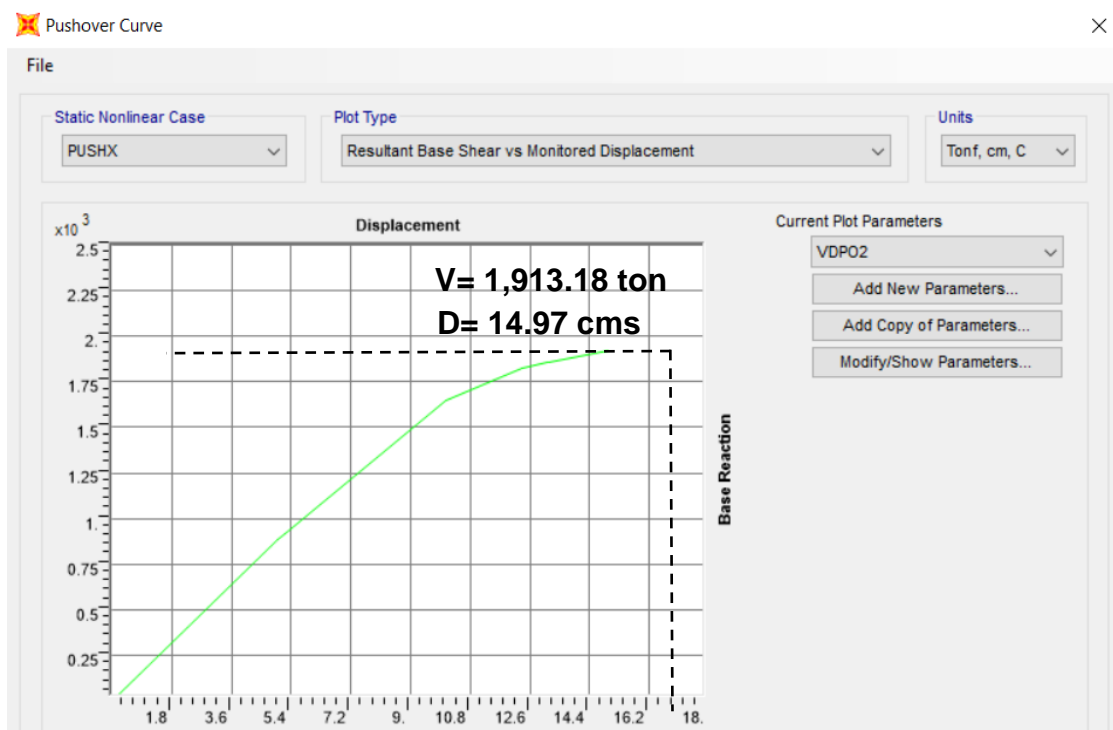
Las curvas de capacidad se denominan de la siguiente manera:

- PUSH X: curva de capacidad en la dirección X-X de acuerdo con el patrón de cargas laterales basado en las normas de Seguridad Estructural (NSE) de AGIES.
- PUSH Y: curva de capacidad en la dirección Y-Y de acuerdo con el patrón de cargas laterales basado en las normas de Seguridad Estructural (NSE) de AGIES.

4.2.2.1. Push X

La curva de capacidad en la dirección X-X obtiene una cortante de 1,913.18 toneladas y un desplazamiento de 14.97 centímetros, gráficamente se representa de la siguiente manera:

Figura 28. Curva de capacidad dirección X-X

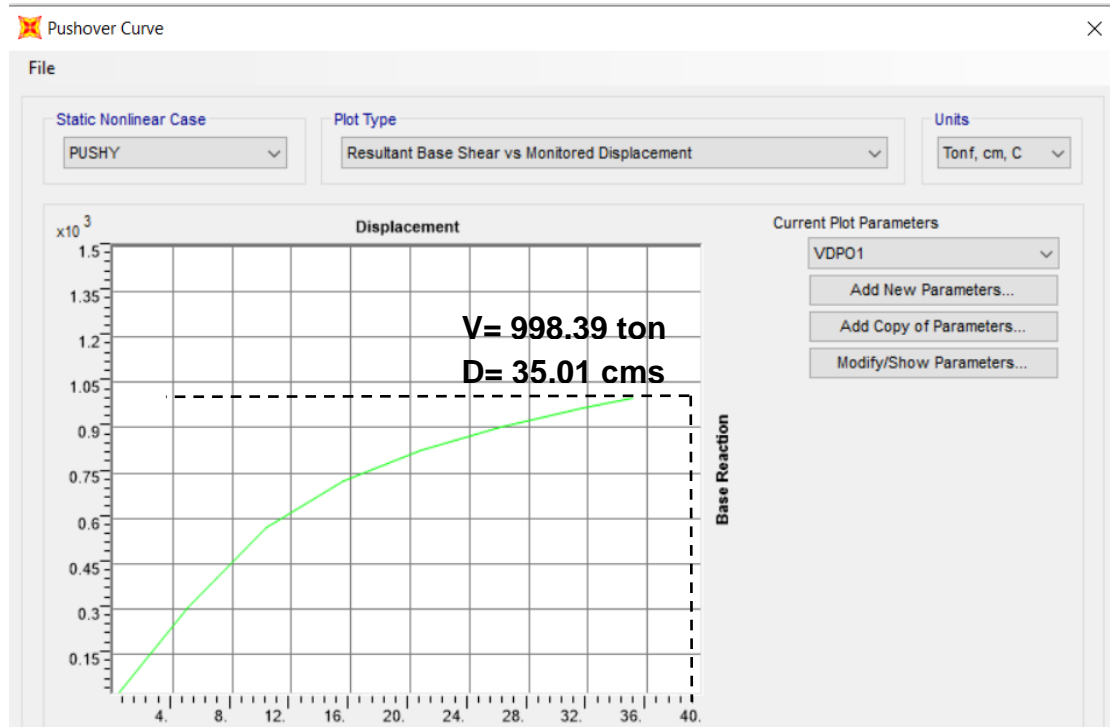


Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.2.2. Push Y

La curva de capacidad en la dirección Y-Y obtiene una cortante de 998.39 toneladas y un desplazamiento de 35.01 centímetros, gráficamente se representa de la siguiente manera:

Figura 29. Curva de capacidad dirección Y-Y



Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.2.2.1. Determinación del desplazamiento objetivo

Con los resultados del análisis pushover en las direcciones X-X y Y-Y se obtuvieron los resultados del desplazamiento máximo esperados en punto más alto del edificio (nivel 4), siendo los siguientes:

Tabla XVI. **Resultados de las curvas de capacidad**

Curva de capacidad	Desplazamiento (máxima)	Cortante (máxima)
PUSH X	14.97 cms	1,913.18 tons
PUSH Y	35.01 cms	998.39 tons

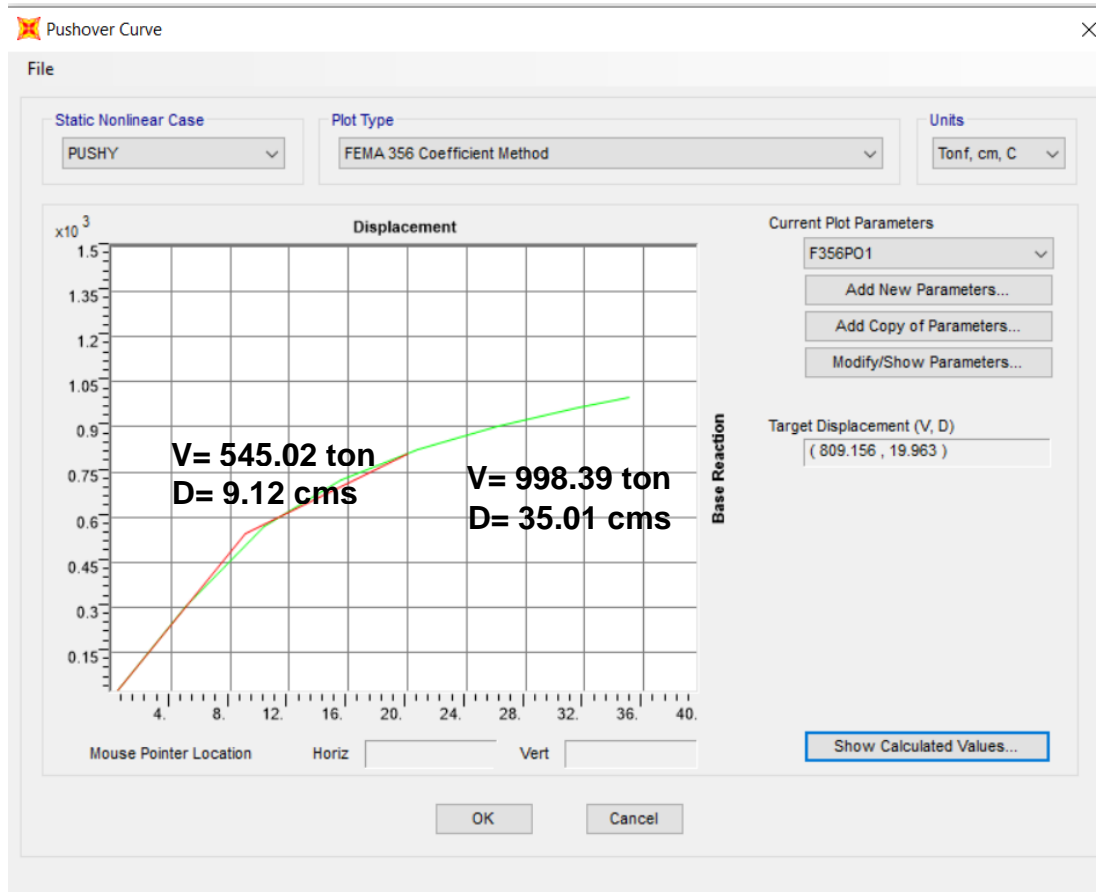
Fuente: elaboración propia

Se selecciona la curva denominada *push Y*, ya que ésta posee el valor más pequeño de capacidad de cortante (998.39 ton) y teóricamente representará el punto de desempeño más desfavorable.

4.2.2.2. Representación bilineal de la curva de capacidad

Se obtiene una representación idealizada de la curva de capacidad *push Y* a través de un modelo bilineal.

Figura 30. Representación bilineal de la curva de capacidad



Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

A continuación, se calculan los valores de la rigidez inicial (k_e), la rigidez efectiva (K_e) y la rigidez post-fluencia (K_p), estos se obtendrán utilizando los datos obtenidos en el modelo bilineal.

Rigidez inicial (K_i): corresponde a la pendiente de la curva de capacidad resistente en el rango elástico (Duarte, Martínez y Santamaria, 2017).

$$k_i = \frac{V_y}{D_y} = \frac{545.02}{9.12} = 59.76 \text{ Ton/cm} \quad [\text{Ecc.4.1}]$$

Rigidez efectiva (Ke): Corresponde a la pendiente de la curva de capacidad bilineal en el rango elástico (Duarte, Martínez y Santamaria Diaz, 2017):

$$k_e = \frac{V_i}{D_i} = \frac{572.35}{10.29} = 55.62 \text{ Ton/cm} \quad [\text{Ecc.4.2}]$$

Rigidez post-fluencia (Kp): corresponde a la pendiente de la curva de capacidad bilineal en el rango de fluencia (Duarte, Martínez y Santamaria 2017).

$$k_p = \frac{V_u}{D_u} = \frac{998.39}{35.01} = 28.52 \text{ Ton/cm} \quad [\text{Ecc.4.3}]$$

Con los datos K_i , K_e , y K_p se calcula el periodo fundamental efectivo. La expresión T_i , representa el periodo fundamental de vibración de la estructura y se obtiene del primer modo de vibración en el análisis modal.

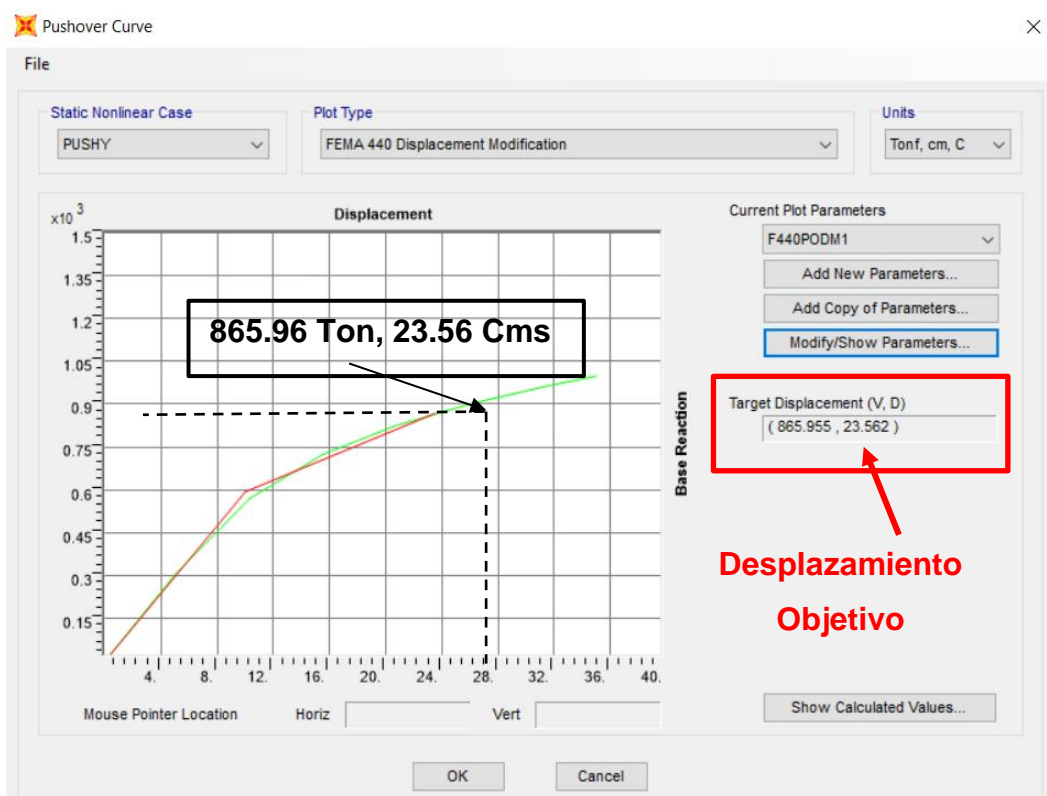
$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = (0.6738) \sqrt{\frac{59.76}{55.62}} = 0.6984 \quad [\text{Ecc.4.4}]$$

4.2.2.3. Desplazamiento objetivo

Utilizando el método de los coeficientes de desplazamiento del FEMA 356 a través del programa computacional SAP2000®, se calcula el desplazamiento que la estructura experimentará bajo la acción de la demanda sísmica seleccionada para la estructura del Hospital Pedro de Bethancourt. Este

desplazamiento se comparará con el desplazamiento permisible para el criterio de Nivel de ocupación inmediata (IO).

Figura 31. Desplazamiento objetivo



Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

El desplazamiento objetivo calculado con el programa computacional SAP2000® es de 23.56 cms, sin embargo, se realizará una corroboración de este valor manualmente con la fórmula dada por FEMA 356 y ATC 40:

$$\delta t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T e^2}{4\pi^2} \right) (g) \quad [\text{Ecc.4.5}]$$

Donde:

- C_0 : De acuerdo con (FEMA, 2000), este coeficiente de modificación “relaciona el desplazamiento espectral y el desplazamiento último del edificio”. Este coeficiente se obtiene utilizando la Tabla 3.2 del FEMA 356:

Tabla XVII. **Valores de C_0 según FEMA 356**

Nº DE PISOS	VALOR DE C_0
1	1.0
2	1.2
3	1.3
5	1.4
10 o más	1.5

Fuente: FEMA. (2000). *FEMA-356 - Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings*

El edificio del Hospital Pedro de Bethancourt consta de 4 pisos por lo que interpolando lineal se obtiene el valor de C_0 :

$$\begin{array}{lcl} 3 & \rightarrow & 1.3 \\ 4 & \rightarrow & C_0 \\ 5 & \rightarrow & 1.4 \end{array}$$
$$\frac{5 - 3}{4 - 3} = \frac{1.4 - 1.3}{C_0 - 1.3}, \quad C_0 = 1.35$$

Por lo tanto, $C_0 = 1.35$.

- C_1 : De acuerdo con FEMA (2000) este coeficiente de modificación “relaciona el desplazamiento inelástico máximo esperado con el

desplazamiento calculado para la respuesta elástica lineal” (p. 46). Para calcular este coeficiente FEMA 356 recomienda lo siguiente:

$$C_1 = 1.0 \text{ para } T_e \geq T_s$$

$$C_1 = 1.5 \text{ para } T_e < 0.1\text{seg}$$

Con los datos ya calculados en la sección 3.5.3.1. de este documento se tiene que: $T_s = 0.4706$ y $T_e = 0.8265$ por lo tanto cumple la condición $T_e \geq T_s$ ($0.8265 > 0.4706$). Por lo tanto, $C_1 = 1.0$

- C_2 : De acuerdo con (FEMA, 2000), este coeficiente de modificación representa “los efectos de degradación de rigidez, pérdida de resistencia y el estrangulamiento de los ciclos histeréticos, en la respuesta del desplazamiento máximo”. De acuerdo con las recomendaciones de FEMA por tratarse de procesos no lineales el valor de C_2 será de 1.0. Por lo tanto, $C_2 = 1.0$.
- C_3 : De acuerdo con (FEMA, 2000), este coeficiente de modificación es “el incremento de desplazamiento por el efecto P- Δ ”. FEMA recomienda se asigne el valor de 1.0 al coeficiente C_3 si las estructura en análisis cuenta con una rigidez post-fluencia mayor del 5% de la rigidez elástica (α).

$$\alpha = \frac{K_p}{K_e} = \frac{28.52}{55.62} = 0.5127 = 51.27\%, \text{ Por lo tanto, } \mathbf{C_3 = 1.0} \quad [\text{Ecc.4.6}]$$

- S_a : Es la aceleración espectral elástica calculado en la sección 3.5.3.1 se deduce el valor de S_a tiene un valor de 1.44. Por lo tanto, $S_a = 1.44$.
- g : Es la aceleración de la gravedad, $g = 981 \text{ cm/seg}^2$.

Con los coeficientes y constantes obtenidos, se calcula el desplazamiento objetivo:

$$\delta t = (1.35)(1.0)(1.0)(1.0)(1.44) \left(\frac{0.6984^2}{4\pi^2} \right) (981) \approx 23.56 \text{ cms}$$

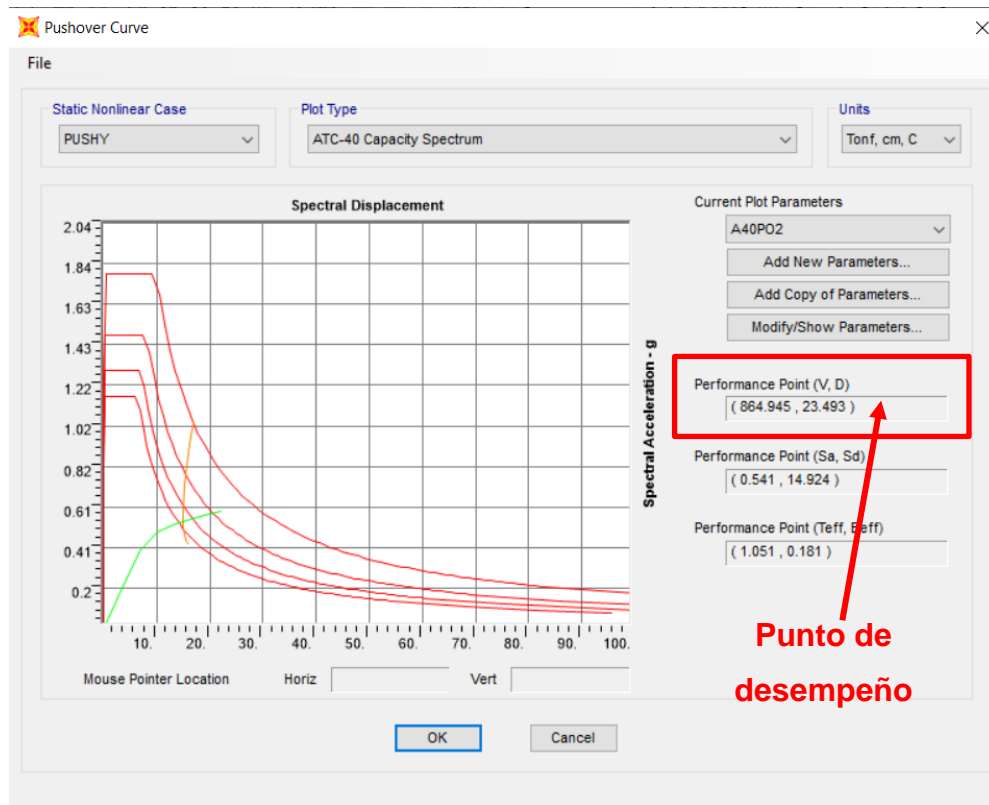
Con el resultado obtenido, se deduce que el valor del desplazamiento objetivo calculado manualmente es semejante al calculado con el programa computacional SAP2000®.

Por lo tanto, el desplazamiento máximo esperado en la azotea del edificio en la dirección “Y” (dirección débil) será de 23.56 cm.

4.2.3. Determinación del punto de desempeño

Utilizando el proceso iterativo del método de “Espectro de Capacidad” propuesto por el ATC 40, se calculó el punto de desempeño (punto óptimo) de la estructura. Para esto se utilizó el programa computacional SAP2000® v 21.

Figura 32. Punto de desempeño



Fuente: elaboración propia, realizado con el software SAP2000®

4.3. Nivel de desempeño

Para determinar los límites de deformaciones laterales se utilizó la Tabla 11-2 del ATC-40, esta tabla proporciona valores adimensionales los cuales se multiplicarán por la altura del edificio en estudio.

Tabla XVIII. Límites de deformación propuestos por la ATC-40

Límites de deriva de entrepiso	Nivel de desempeño			
	Ocupación Inmediata	Control de daños	Seguridad de vida	Estabilidad estructural
Deriva total máxima	0.01H	0.01H-0.02H	0.02H	$0.33 \frac{V_i}{P_i}$

Donde: H es la altura del edificio.

Fuente: ATC. (1996). *ATC-40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Applied Technology Council.

Considerando que la altura del edificio del Hospital Pedro de Bethancourt es de 15.00 metros, se obtiene lo siguiente:

Tabla XIX. Límites de deformación calculados

Límites de deriva de entrepiso	Nivel de desempeño			
	Ocupación Inmediata	Control de daños	Seguridad de vida	Estabilidad estructural
Deriva total máxima	0.15 m	0.15m – 0.30m	0.30 m	$0.33 \frac{V_i}{P_i}$

Fuente: elaboración propia.

Considerando que de acuerdo con la sección de este documento 4.1.4.2. el desplazamiento esperado en punto más alto del edificio es de 23.56 cm y los datos calculados en la tabla anterior se tiene lo siguiente:

$$15 \text{ cm} < 23.56 < 30 \text{ cms}$$

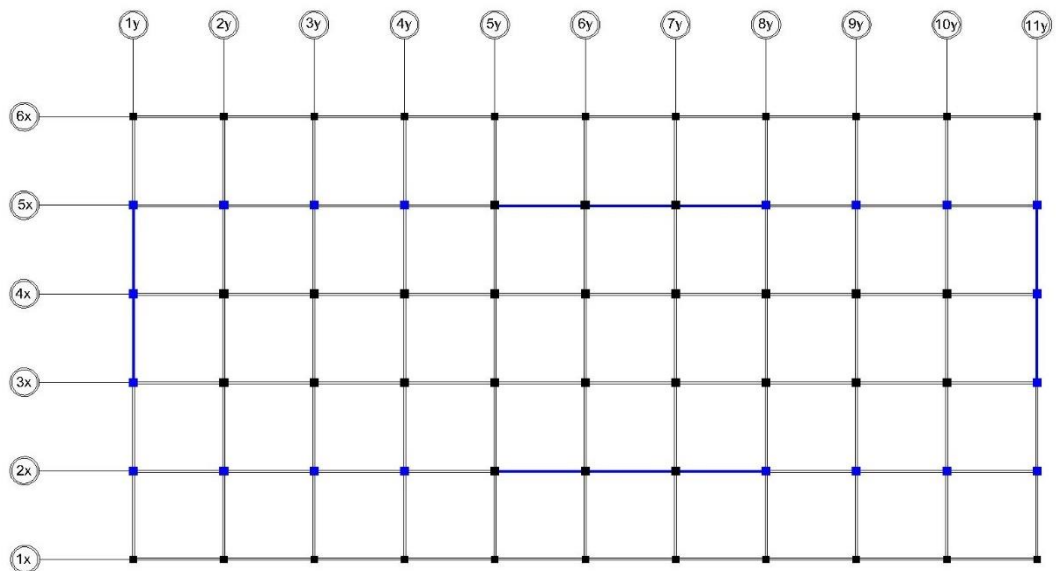
Por lo tanto, la edificación se encuentra en el nivel de desempeño estructural para el estado de Seguridad de Vida (LS).

4.3.1. Formación de rótulas plásticas

A continuación, se presentan las plantas de los niveles 1, 2, 3 y 4 y todos los ejes de elevación del edificio del Hospital Pedro de Bethancourt, esto con el objetivo de visualizar el comportamiento de las vigas y columnas.

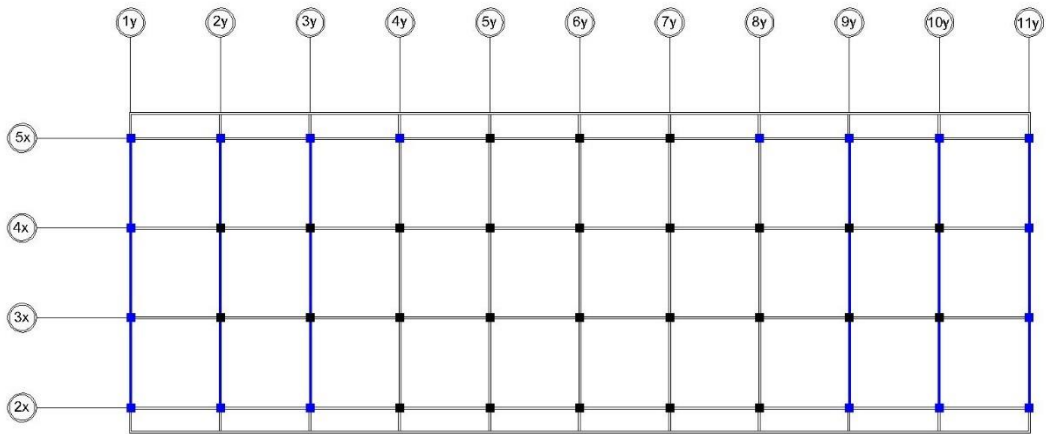
Para cada esquema se resaltan los elementos que se espera sobrepasen el límite de ocupación inmediata y por lo tanto incurrieren en el rango inelástico.

Figura 33. Esquema de primer nivel



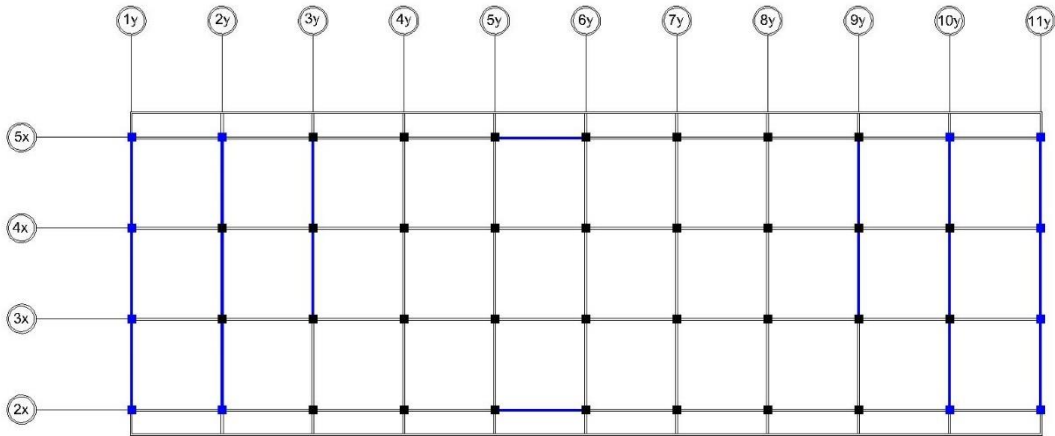
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 34. Esquema de segundo nivel



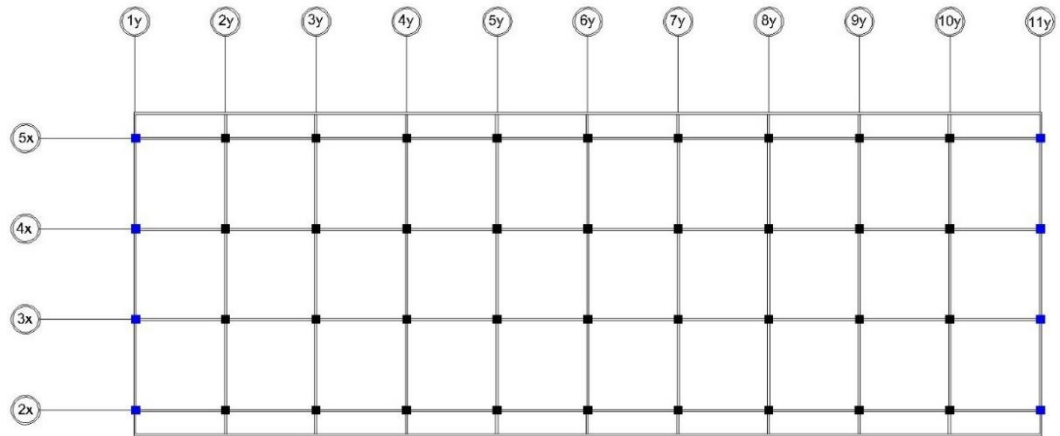
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 35. Esquema de tercer nivel



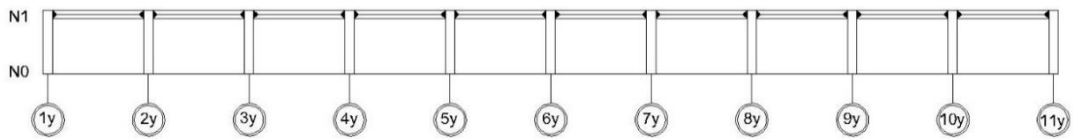
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 36. Esquema de cuarto nivel



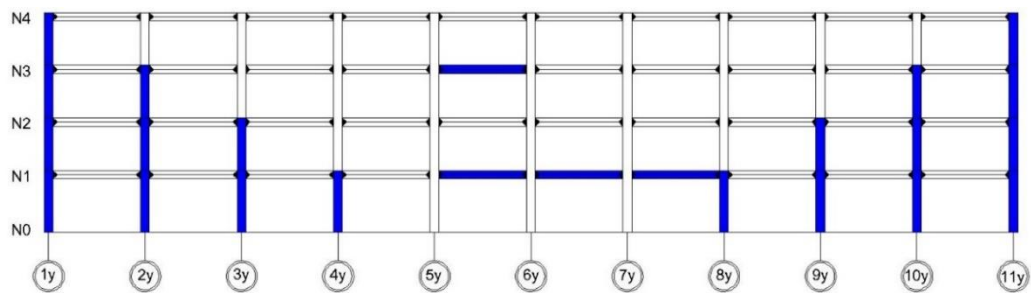
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 37. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 1x



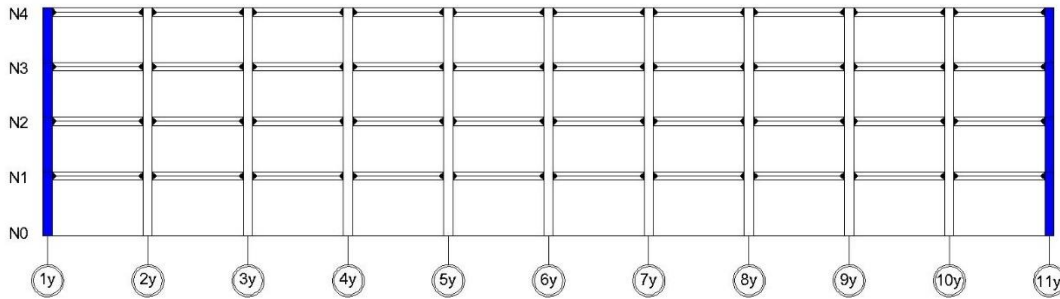
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 38. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 2x



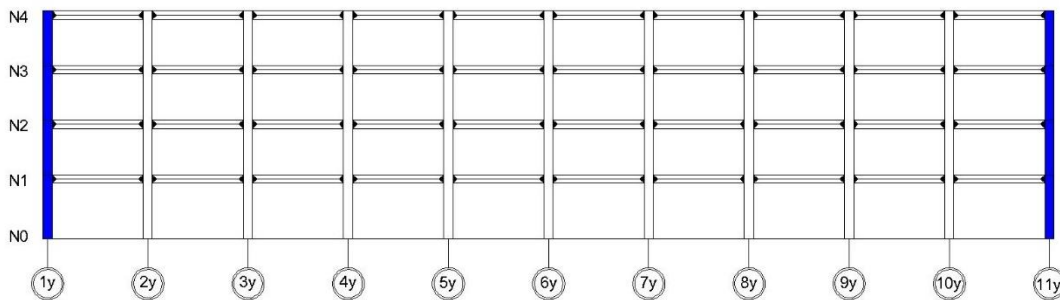
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 39. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 3x



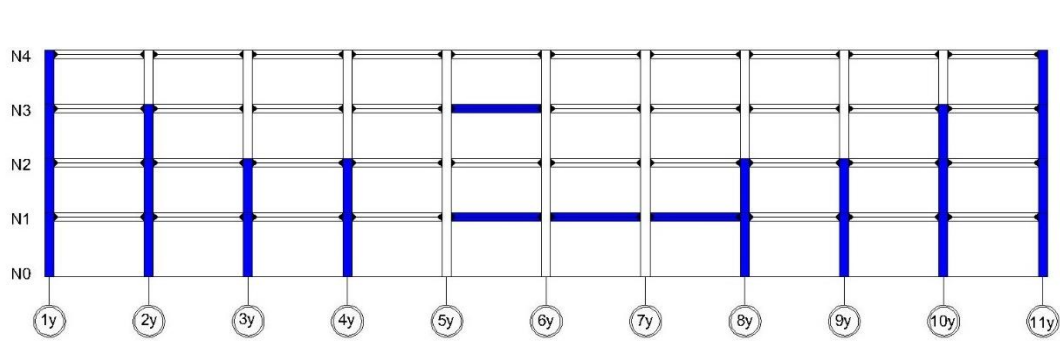
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 40. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 4x



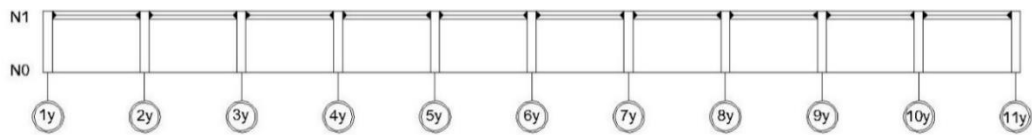
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 41. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 5x



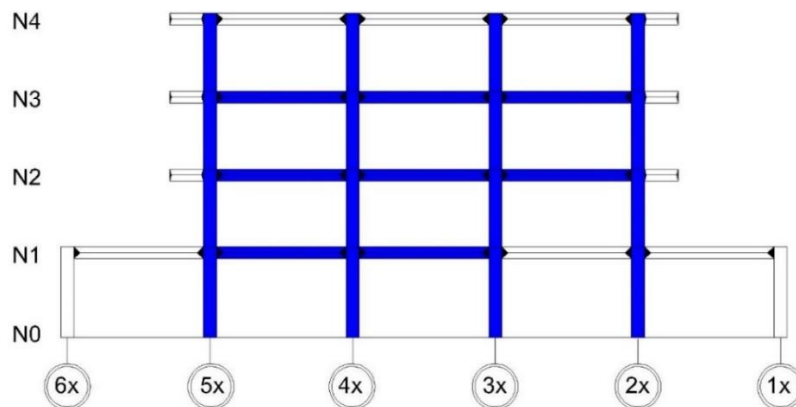
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 42. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 6x



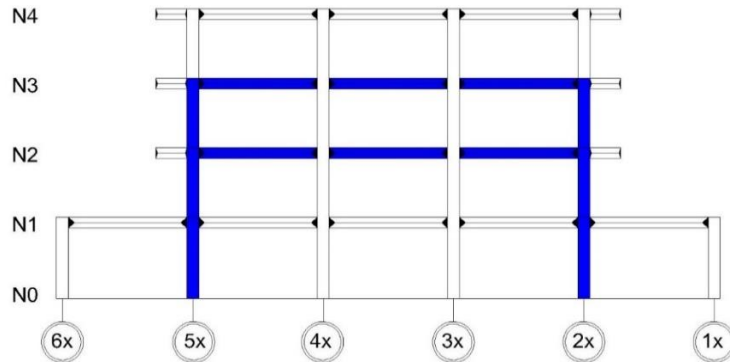
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 43. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 1y



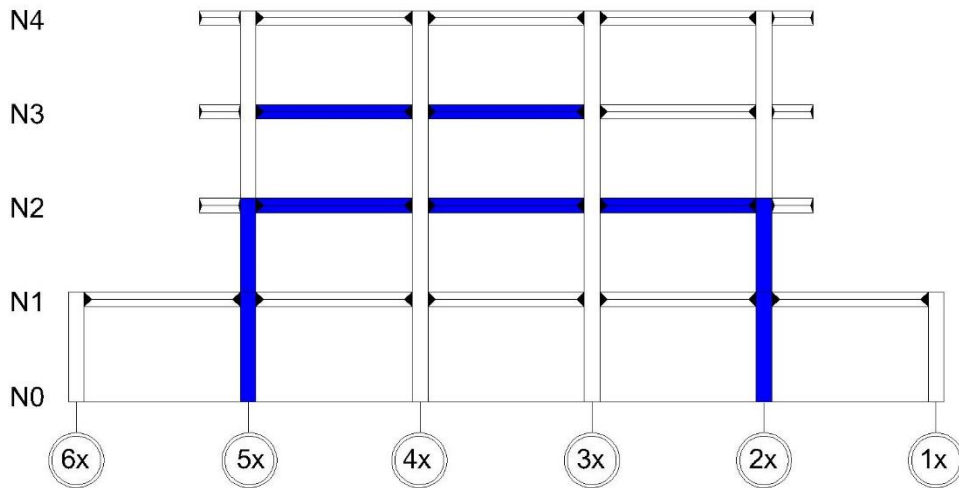
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 44. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 2y



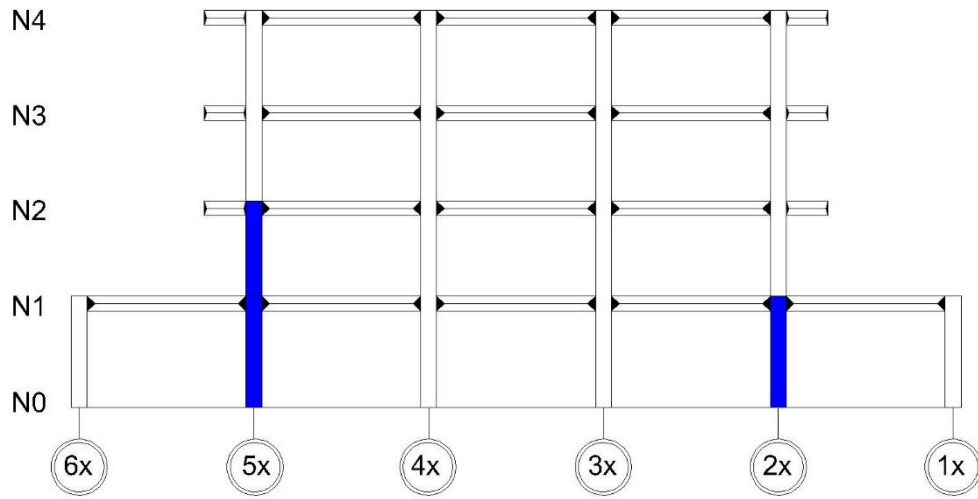
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 45. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 3y



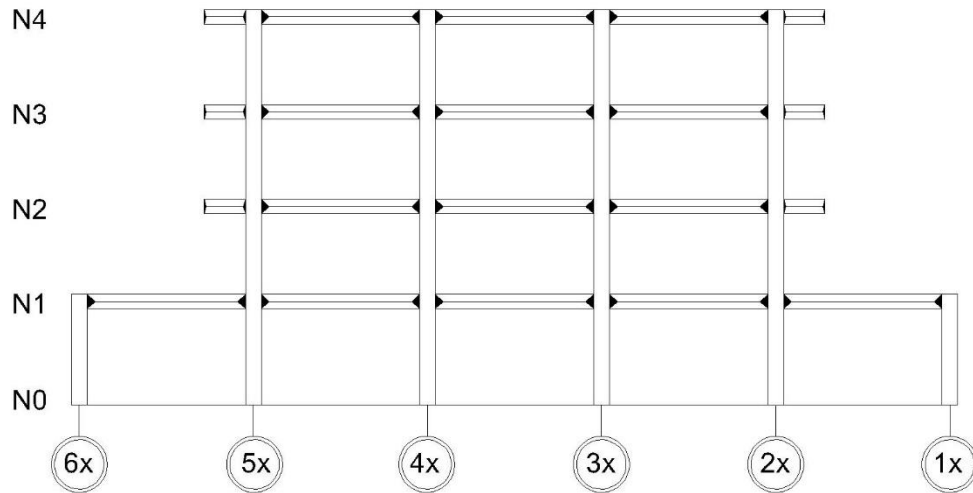
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 46. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 4y



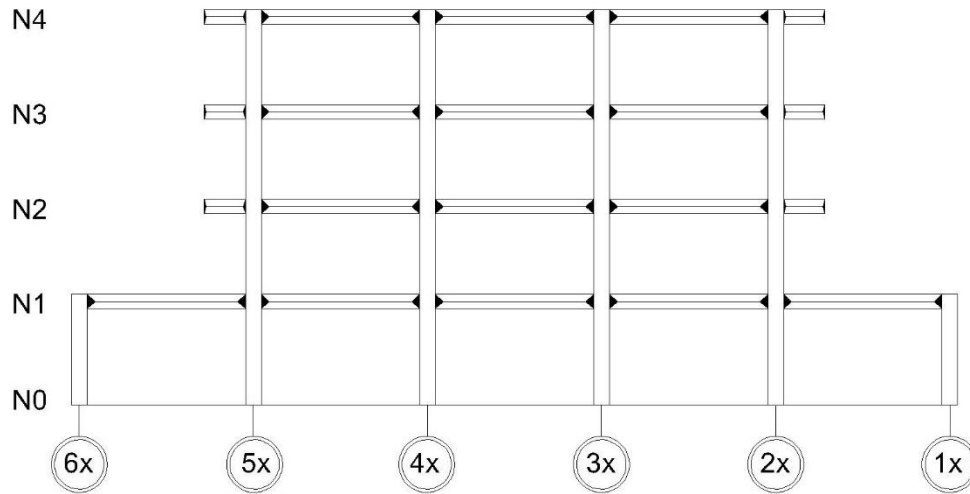
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 47. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 5y



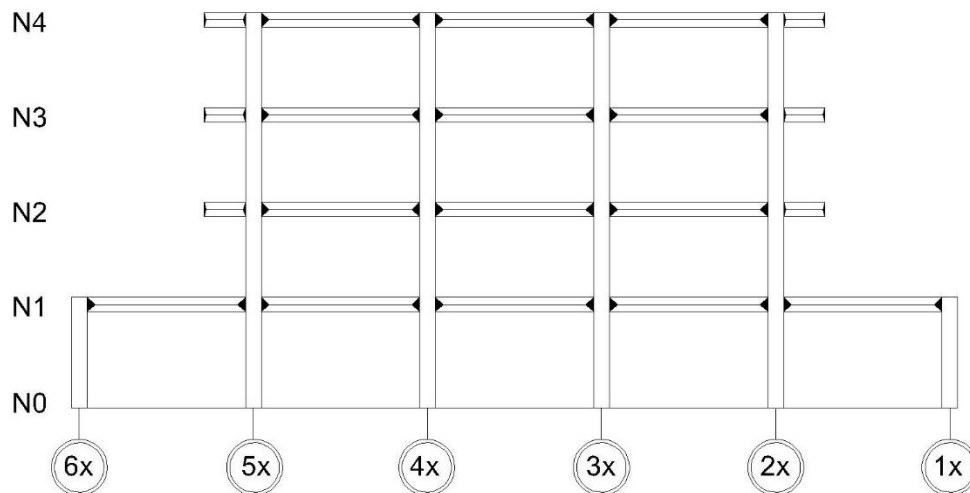
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 48. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 6y



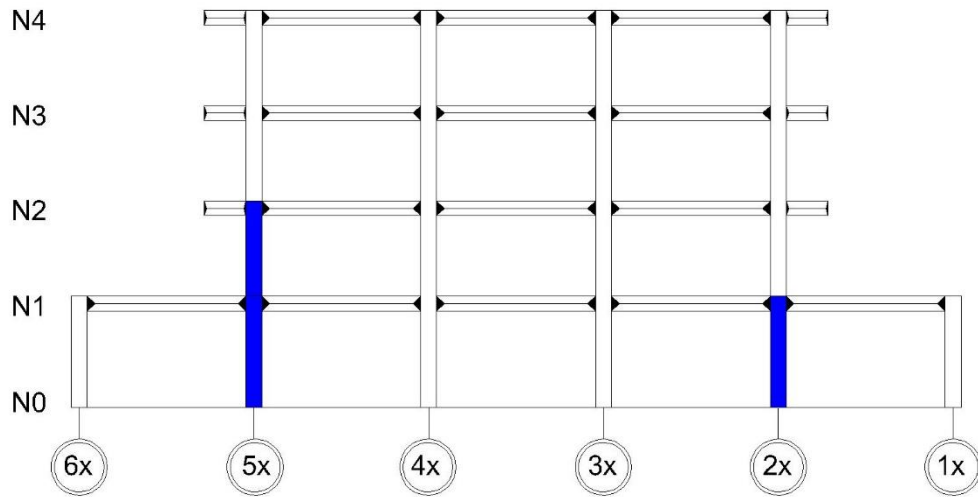
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 49. Elementos que incurrieron en el rango inelástico eje 7y



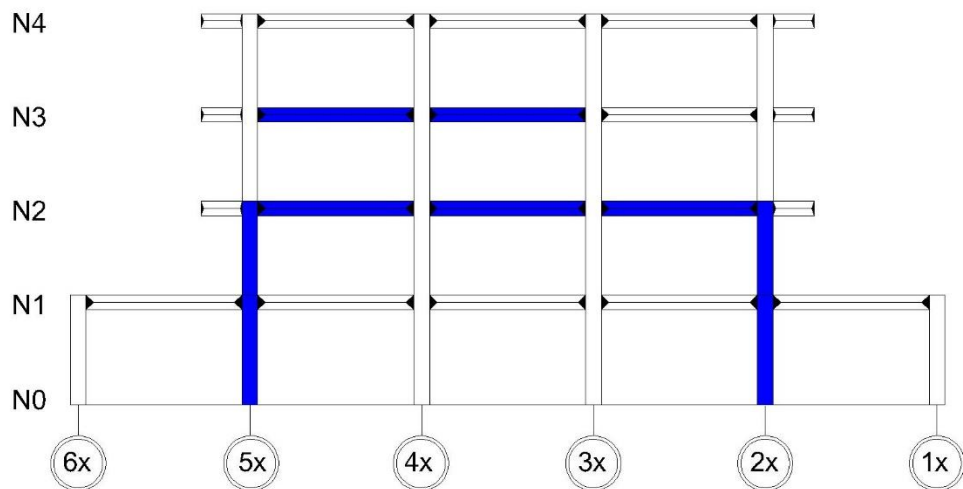
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 50. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 8y



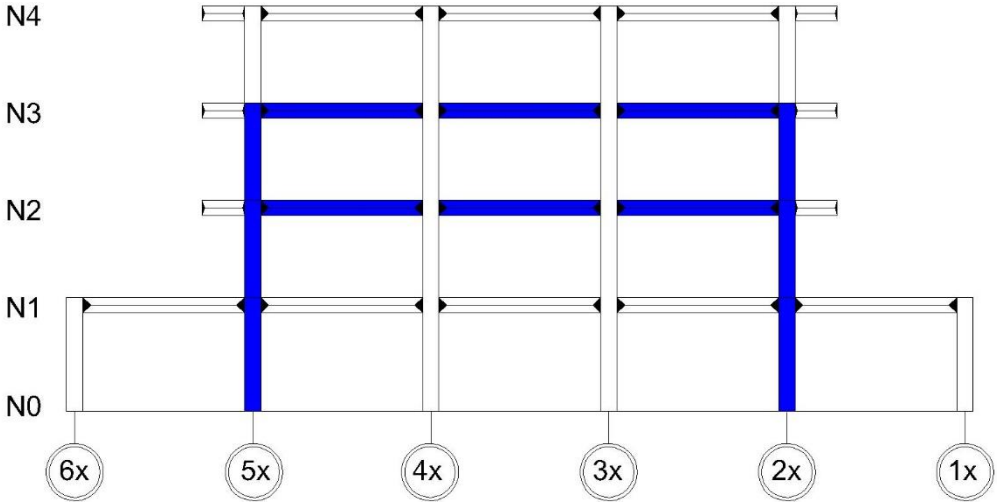
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 51. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 9y



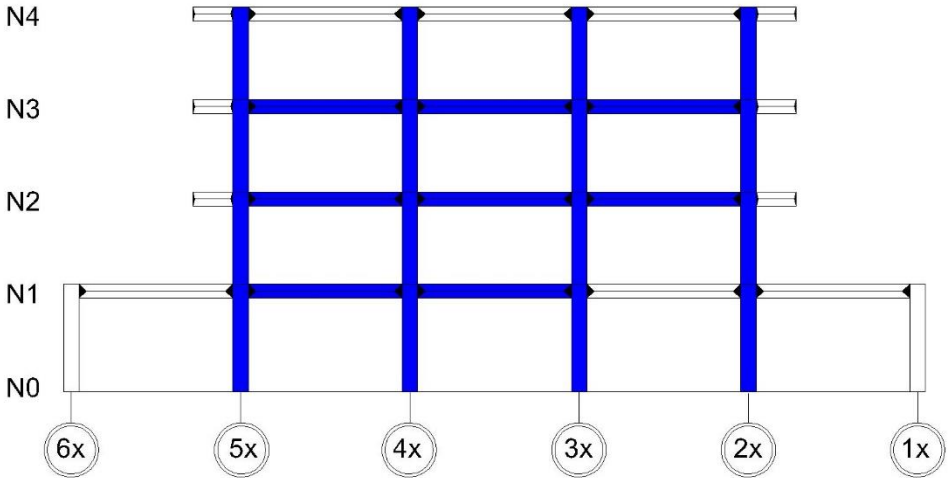
Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Figura 52. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 10y



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

Figura 53. Elementos que incursionaron en el rango inelástico eje 11y



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Establecimiento del objetivo de desempeño

El objetivo de desempeño que se estableció es la ocupación inmediata (1-B), esto considerando primeramente lo recomendado por las Normas De Seguridad Estructural Para Guatemala en la NSE 1 (Generalidades, Administración de Las normas y Supervisión técnica) que el edificio que ocupa el Hospital Nacional Pedro de Bethancourt es catalogado como una estructura Esencial y que debe garantizar la seguridad de sus ocupantes y el edificio deberá ser utilizable después de un sismo y que el ATC-40 recomiendan que para este tipo de estructuras los niveles de desempeño se sitúen en esa categoría

5.2. Análisis Pushover

Los resultados de la aplicación del análisis estático no lineal Pushover a través del programa computacional SAP2000® se describe a continuación.

5.2.1. Análisis del comportamiento

Luego de observar las secuencias de falla de la estructura del hospital Pedro de Bethancourt expuesta en el capítulo 4.2.1 se concluye lo siguiente:

- La dirección Y-Y (sentido corto) llega a comportarse a criterios de seguridad de vida, lo cual sobrepasa a las recomendaciones dadas por el ATC-40.

- Se tiene un comportamiento más favorable en la dirección X-X (sentido largo), la cual se comporta a criterios de un nivel de ocupación inmediata (IO).
- En ambos sentidos el comportamiento es acorde a lo deseado, ya que primero se produce la degradación en las vigas y posteriormente en las columnas.

5.2.2. Curvas de capacidad de la estructura y Desplazamiento objetivo

Las curvas de capacidad en las direcciones X-X y Y-Y presentan los siguientes resultados:

- Dirección X-X: desplazamiento máximo = 14.97 cms; Cortante máxima = 1,913.18 tons.
- Dirección Y-Y: desplazamiento máximo = 35.01 cms; Cortante máxima = 998.39 tons.

Por lo que la Dirección Y-Y presenta mayor desplazamiento y menor capacidad de cortante respecto a la Dirección X-X y teóricamente representará el punto de desempeño más desfavorable.

5.2.3. Desplazamiento objetivo

El desplazamiento objetivo máximo esperado en la parte más alta del edificio es de 23.56 cms, Se puede tener certeza de este valor que ya fue calculado con el programa computacional SAP2000® y corroborado manualmente con la fórmula dada por FEMA 356 y ATC 40, dando resultados idénticos.

5.3. Nivel de desempeño

Considerando el desplazamiento objetivo máximo esperado en la parte más alta del edificio que es de 23.56 cms. Al compararlo con los valores según ATC-40, que son los siguientes: Ocupación inmediata (IO) = 15 cm y Seguridad de vida (LS) = 30 cm, se tiene lo siguiente:

$$15 \text{ cm} < 23.56 \text{ cm} < 30 \text{ cm}$$
$$\text{IO} < \text{Desplazamiento esperado} < \text{LS}$$

Por lo tanto, para una demanda sísmica del 5% de probabilidad de ocurrencia en 50 años, la edificación se encuentra en el nivel de desempeño estructural para el estado de Seguridad de Vida (LS), ubicándose en el rango del estado de Control de Daños el cual es utilizado para discriminar entre los niveles ocupación inmediata y seguridad de vida, sobrepasando el criterio de desempeño de Ocupación Inmediata (IO) el cual es el recomendado por el ATC-40 para edificaciones indispensables.

Considerando los criterios del ATC-40 que la edificación se encuentra en el nivel de desempeño estructural para el estado de Seguridad de Vida (LS) representa que los ocupantes de la edificación estarán expuestos a un peligro moderado ya que se prevé que se presenten agrietamientos de mediana importancia en algunas vigas y columnas desde el primer hasta el cuarto nivel, sobre todo en los ejes laterales de la dirección Y-Y y es posible que se requieran reparaciones menores.

Para cumplir con las recomendaciones del ATC-40 y llevar la estructura al nivel de Ocupación Inmediata (IO) ante sismo máximo esperado, se deberá aumentar la capacidad de esta. Para esto se deberá realizar los refuerzos y

mantenimientos preventivos en columnas y vigas que se espera incurrieren en el rango inelástico, esto utilizando las técnicas de reforzamiento existentes (fibra de carbono, encamisados en concreto reforzado o metálicos, adición de perfiles metálicos, postensionados externos, entre otros).

5.3.1. Formación de rótulas plásticas

De acuerdo con lo observado en la sección 4.3.1, se espera que 46 vigas y 48 columnas incurrieren en el rango inelástico para una demanda sísmica del 5 % de probabilidad de ocurrencia en 50 años.

En las tablas XX y XXI se da detalle de cuáles serán los elementos que incurrieren en el rango inelástico.

Tabla XX. **Resumen de vigas que incurrieron en el rango inelástico**

Eje	Nivel	Vigas	Cantidad de elementos
1y	1	3x-4x ; 4x-5x	2
	2	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	3	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	4	-----	0
2y	1	-----	0
	2	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	3	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	4	-----	0
3y	1	-----	0
	2	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	3	3x-4x ; 4x-5x	2
	4	-----	0
4y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0

Continuación tabla XX.

Eje	Nivel	Vigas	Cantidad de elementos
5y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
6y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
7y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
8y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
9y	1	-----	0
	2	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	3	3x-4x ; 4x-5x	2
	4	-----	0
10y	1	-----	0
	2	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	3	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	4	-----	0
11y	1	3x-4x ; 4x-5x	2
	2	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	3	2x-3x ; 3x-4x ; 4x-5x	3
	4	-----	0
1x	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0

Continuación tabla XX.

Eje	Nivel	Vigas	Cantidad de elementos
2x	1	5y-6y ; 6y-7y ; 7y-8y	3
	2	-----	0
	3	5y-6y	1
	4	-----	0
3x	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
4x	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
5x	1	5y-6y ; 6y-7y ; 7y-8y	3
	2	-----	0
	3	5y-6y	1
	4	-----	0
6x	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
TOTAL			46

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resumen de Columnas que incursionaron en el rango inelástico**

Eje	Nivel	Columnas	Cantidad de elementos
1y	1	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4
	2	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4
	3	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4
	4	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4

Continuación tabla XXI

Eje	Nivel	Columnas	Cantidad de elementos
2y	1	2x ; 5x	2
	2	2x ; 5x	2
	3	2x ; 5x	2
	4	-----	0
3y	1	2x ; 5x	2
	2	2x ; 5x	2
	3	-----	0
	4	-----	0
4y	1	2x ; 5x	2
	2	5x	1
	3	-----	0
	4	-----	0
5y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
6y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
7y	1	-----	0
	2	-----	0
	3	-----	0
	4	-----	0
8y	1	2x ; 5x	2
	2	5x	1
	3	-----	0
	4	-----	0
9y	1	2x ; 5x	2
	2	2x ; 5x	2
	3	-----	0
	4	-----	0

Continuación tabla XXI

Eje	Nivel	Columnas	Cantidad de elementos
10y	1	2x ; 5x	2
	2	2x ; 5x	2
	3	2x ; 5x	2
	4	-----	0
11y	1	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4
	2	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4
	3	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4
	4	2x ; 3x ; 4x ; 5x	4
TOTAL			58

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

1. El análisis estático no lineal (Pushover) realizado al edificio que ocupa el Hospital Pedro de Bethancourt de la Antigua Guatemala, dio como resultado la curva de capacidad, el punto de desempeño y la posible secuencia de falla de los elementos estructurales.
2. En la inspección visual realizada al edificio no se encontraron daños en las columnas, vigas o losas, únicamente se observaron fisuras menores en los muros de mampostería.
3. En el modelo computacional creado en el software SAP2000® v 21 se utilizó la información recopilada en los planos constructivos originales por lo que se realizó el análisis con la misma calidad de los materiales y las mismas características geométricas de la estructura, además se aplicaron los criterios de la normativa ACI 318, en su apartado 10.10.4.1 para la reducción de la rigidez de vigas y columnas, esto con el fin de que los resultados obtenidos sean los más reales posibles.
4. En la curva de capacidad se observa que los puntos de desempeño para el sentido Y-Y serán los más desfavorables, por lo que este sentido fue el estudiado, mediante la aplicación del método ATC 40 Espectro de Capacidad, realizado con el software Sap2000, el punto de desempeño de la estructura que ocupa el edificio que ocupa el Hospital Pedro de Bethancourt presenta un valor de fuerza cortante de 864.95 ton y un desplazamiento de 23.49 cm; por otro lado, a través del método FEMA 440 Modificación de Desplazamiento se presenta un valor de fuerza cortante

de 865.96 ton y un desplazamiento de 23.56 cm; siendo los resultados muy parecidos.

5. El edificio que ocupa el Hospital Pedro de Bethancourt se encuentra en el nivel de desempeño estructural para el estado de seguridad de vida (LS) para una demanda sísmica del 5 % de probabilidad de ocurrencia en 50 años, por lo que sobrepasa el criterio de desempeño de Ocupación Inmediata (IO) el cual es el recomendado por el ATC-40 para edificaciones indispensables, por lo que para el sismo máximo se prevé que presenten agrietamientos de mediana importancia en algunas columnas y vigas desde el segundo hasta el cuarto nivel, por lo que es posible que se requieran reparaciones menores.
6. Del análisis global de la estructura se obtiene que, para el desplazamiento objetivo, 48 elementos verticales (columnas) y 46 elementos horizontales (vigas) incurrirán en el rango inelástico, es decir, entre los límites ocupación inmediata y seguridad de vida, presentando remanentes de deformación en la estructura durante el proceso de carga y descarga, generando daños únicamente correspondientes a los niveles de desempeño antes mencionados.

RECOMENDACIONES

1. A las Autoridades del Hospital Nacional Pedro de Bethancourt realizar monitoreos anuales de los elementos estructurales del edificio que ocupa el Hospital Pedro de Bethancourt o bien posterior a eventos sísmicos de magnitud considerable y así garantizar la seguridad estructural y ocupacional.
2. A las Autoridades del Hospital Nacional Pedro de Bethancourt considerar llevar a cabo un estudio más profundo y realizar los refuerzos a los elementos estructurales que llegaran a incursionar en el rango inelástico, esto con el objetivo de cumplir con las recomendaciones dadas por el ATC-40 y buscar que la estructura del Hospital se encuentre en el nivel de desempeño de Ocupación Inmediata (IO) el cual es el recomendado para edificaciones indispensables.
3. A la Escuela de Estudios de Postgrado de la Universidad de San Carlos de Guatemala fomentar la investigación sobre el comportamiento sísmico en los edificios existentes en Guatemala, calculando y determinando el estado y el nivel de desempeño en el que se encuentran durante un movimiento sísmico y así poder establecer si la estructura requiere o no refuerzos estructurales.
4. A futuros investigadores de analizar el edificio que ocupa el Hospital Pedro de Bethancourt mediante metodologías que consideren la interacción suelo-estructura, para lo cual se deberá realizar un estudio de

suelos detallado ya que es necesario tomar en cuenta las propiedades del suelo que soporta el edificio.

REFERENCIAS

1. AGIES. (2018). *NSE 2. Demandas estructurales y condiciones de sitio*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.
2. AGIES. (2018). *NSE 3. Diseño estructural de edificaciones*. Guatemala: Gobierno de Guatemala.
3. ATC. (1996). *ATC-40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California: Applied Technology Council.
4. Bonnett Díaz, R. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. (Tesis doctoral) Universidad Politécnica de Cataluña, España. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/93542>
5. Carrillo, J. (2007). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras utilizando un diseño por desempeño . Colombia: *Revista digital de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Militar Nueva Granada, 2(12)
6. Castillo Veras, M. A. (2016). *Análisis estático no lineal: Aplicación de métodos avanzados a un edificio típico de La República Dominicana*. (Trabajo de maestría). Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad Politécnica De Catalunya. España. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/103132/TFM_MCV.pdf

7. Coburn, A. W., Pomonis, A., y Spence, R. (1999). *Mitigación de desastres*. Cambridge, Reino Unido: UNDRO.
8. Crisafulli, F., y Villafañe, E. (2002). *Espectros de respuesta y de diseño*. (Tesis de grado). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina Recuperado de https://nanopdf.com/download/espectros-de-respuesta-y-de-diseño_pdf#
9. Delgadillo Alanya, E. (2005). *Análisis no lineal estático de estructuras y la norma E030*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. Recuperado de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/766>
10. Duarte Bonilla, C. E., Martínez Chavarria, M. E., y Santamaria Diaz, J. J. (2107). *Análisis estático no lineal (Pushover) del cuerpo central del edificio de la facultad de medicina de la Universidad de El Salvador*. (Tesis de grado). Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/13405>
11. FEMA, F. E. (1994). *FEMA-274 - Reducing the risk of nonstructural earthquake damage*. Washinton, EE.UU: Basic Procedures.
12. FEMA, F. E. (2000). *FEMA-356 - Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington, D.C. Basic Procedures.
13. Ferj Vargas, M. S. (2016). *Evaluación del desempeño sísmico de hospitales aislados y convencionales a través de un análisis de*

fragilidad. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.

14. Flores González, O. J., Girón Xiquitá, E. F., Hernández Meléndez, M. R., y Soza Bendfelt, L. E. (2010). *Índice de seguridad hospitalaria del hospital nacional pedro de bethancourt, Antigua Guatemala*. (Tesis de grado). Facultad de Ciencias Médicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
15. Gallego, M. (2003). *Diseño Sísmico por desempeño en Colombia*. Publicación de la Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia: Recuperado de <http://dx.doi.org/10.16924%2Friua.v0i13.546>
16. Hernandez Morales, Y. A. (2009). *Estudio comparativo de dos alternativas de reforzamiento estructural para el edificio maternal del Liceo Frances Louis Pasteur, utilizando el método de análisis lineal dinámico y un método no lineal estático (pushover)*. (Tesis de grado). Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.
17. INE. (2010). Información del departamento de Sacatepéquez, Guatemala. *Boletín informativo departamento de Sacatepéquez*. Guatemala. 4(4), 4-8 Recuperado de <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2013/12/10/bGvQWPSCoT SkbNcmoNDIIUh4JvSvW3md.pdf>
18. Kallaby, J. (marzo de 2007). Severe events. Facing the challenge. *Structure Magazine*, 14-17. Recuperado de <https://www.structuremag.org/?p=6166>

19. López Manzano, C. A., Solórzano Navarro, L. A., y Pérez Alfaro, C. R. (2017). *Aplicación de la metodología de evaluación estructural por desempeño sísmico para la evaluación del ala norte del edificio de la Facultad de Medicina de la Universidad de El Salvador*. (Tesis de grado). Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. San Salvador, El Salvador. Recuperado de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/13122>
20. Lou, C. P. (2011). *Cartilla Análisis de Vulnerabilidad Sísmica de Hospitales y Escuelas basado en una encuesta*. Guatemala: CEPREDENAC
21. Martínez Soto, C. M., Portillo Williams, Y., y Rodríguez Martínez, J. M. (2011). *Introducción al diseño de marcos de concreto reforzados, por el método de análisis estático no lineal (push-over), utilizando un software especializado*. (Tesis de grado). Facultad Multidisciplinaria Oriental Departamento de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de El Salvador. El Salvador.
22. Navarro Cieza, E. (2014). *Evaluación del desempeño sísmico del edificio Hospital Privado Jaén de la Ciudad de Jaén Cajamarca*. (Tesis de grado). Facultad de Ingeniería. Universidad de Cajamarca. El Salvador. Recuperado de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/87>
23. OPS. (2008). *Índice de seguridad hospitalaria: Guía del evaluador de hospitales seguros*. Washinton D.C: Autor.

24. OPS. (2009). *Hospitales seguros. Una responsabilidad colectiva. Un indicador mundial de reducción de los desastres*. Guatemala. Autor.
25. Peralta Álvarez, M. G. (2012). *Análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal del Hospital de Vielha*. (Tesina de Máster) Universidad Politécnica de Catalunya UPC. Barcelona, España.
26. Safina, M. S. (2003). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña. España: Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/93538>
27. Trevor E Kelly, S. (marzo 2014). Performance based evaluation of buildings. *Nonlinear pushover and time history analysis* (Vol. 4). New Zealand: Group Holmes Consulting Group Ltd
28. UNEPSSA. (abril de 1980). *Planos constructivos*. Antigua Guatemala, Guatemala.

APÉNDICES

Apéndice 1. Formulario

Ajustes por clase de sitio (AGIES, 2018)

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a \quad [Ecc.3.1]$$

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v \quad [Ecc.3.2]$$

Ajustes por intensidades sísmicas especiales (AGIES, 2018)

$$S_{cs} = S_{cr} * F_a * N_a \quad [Ecc.3.3]$$

$$S_{1s} = S_{1r} * F_v * N_v \quad [Ecc.3.4]$$

Períodos de vibración de transición (AGIES, 2018)

$$T_s = S_{1s} / S_{cs} \quad [Ecc.3.5]$$

$$T_o = 0.2 T_s \quad [Ecc.3.6]$$

Probabilidades nominales de ocurrencia de los sismos de diseño (AGIES, 2018)

$$S_{cd} = K_d * S_{cs} \quad [Ecc.3.7]$$

$$S_{1d} = K_d * S_{1s} \quad [Ecc.3.8]$$

Continuación apéndice 1.

Aceleración máxima del suelo (AMS) (AGIES, 2018)

$$AMS = 0.40 * Scd \quad [Ecc.3.9]$$

Componente vertical del sismo de diseño (AGIES, 2018)

$$Svd = 0.20 * Scd \quad [Ecc.3.10]$$

Período fundamental de vibración (AGIES, 2018)

$$Ta = Kt(hn)^x \quad [Ecc.3.11]$$

Coefficiente sísmico al límite de cedencia Cs (AGIES, 2018)

$$Cs = \frac{Sa(T)}{R} \quad [Ecc.3.12]$$

Carga de gravedad (AGIES, 2018)

$$(CR1) \quad 1.4 \text{ CM} + 1.4 \text{ SCM} \quad [Ecc.3.13]$$

$$(CR2) \quad 1.2 \text{ CM} + 1.2 \text{ SCM} + 1.6 \text{ CV} + 0.5 \text{ (CVT ó AR)} \quad [Ecc.3.14]$$

$$(CR3) \quad 1.2 \text{ CM} + 1.2 \text{ SCM} + 1.0 \text{ CV} + 1.6 \text{ (CVT ó AR)} \quad [Ecc.3.15]$$

Continuación apéndice 1.

Carga de sismo (AGIES, 2018)

$$(CR4) \quad 1.2 \text{ CM} + 1.20 \text{ SCM} + CV + Sv \pm Sh \quad [\text{Ecc.3.16}]$$

$$(CR5 \text{ vigas}) \quad 0.90 \text{ CM} + 0.90 \text{ SCM} - Sv \pm Sh \quad [\text{Ecc.3.17}]$$

$$(CR5 \text{ columnas}) \quad 1.0 \text{ CM} + 1.0 \text{ SCM} - Sv \pm Sh \quad [\text{Ecc.3.18}]$$

Continuación Apéndice 1.

Rigidez inicial (Ki). (Duarte, Martínez y Santamaria, 2017)

$$ki = \frac{Vy}{Dy} \quad [\text{Ecc.4.1}]$$

Rigidez efectiva (Ke). (Duarte, Martínez y Santamaria, 2017)

$$ke = \frac{Vi}{Di} \quad [\text{Ecc.4.2}]$$

Rigidez post-fluencia (Kp). (Duarte, Martínez y Santamaria, 2017)

$$kp = \frac{Vu}{Du} \quad [\text{Ecc.4.3}]$$

Periodo fundamental efectivo. (Duarte, Martínez y Santamaria, 2017)

$$Te = Ti \sqrt{\frac{Ki}{Ke}} \quad [\text{Ecc.4.4}]$$

Continuación apéndice 1.

El desplazamiento objetivo. (FEMA, 2000)

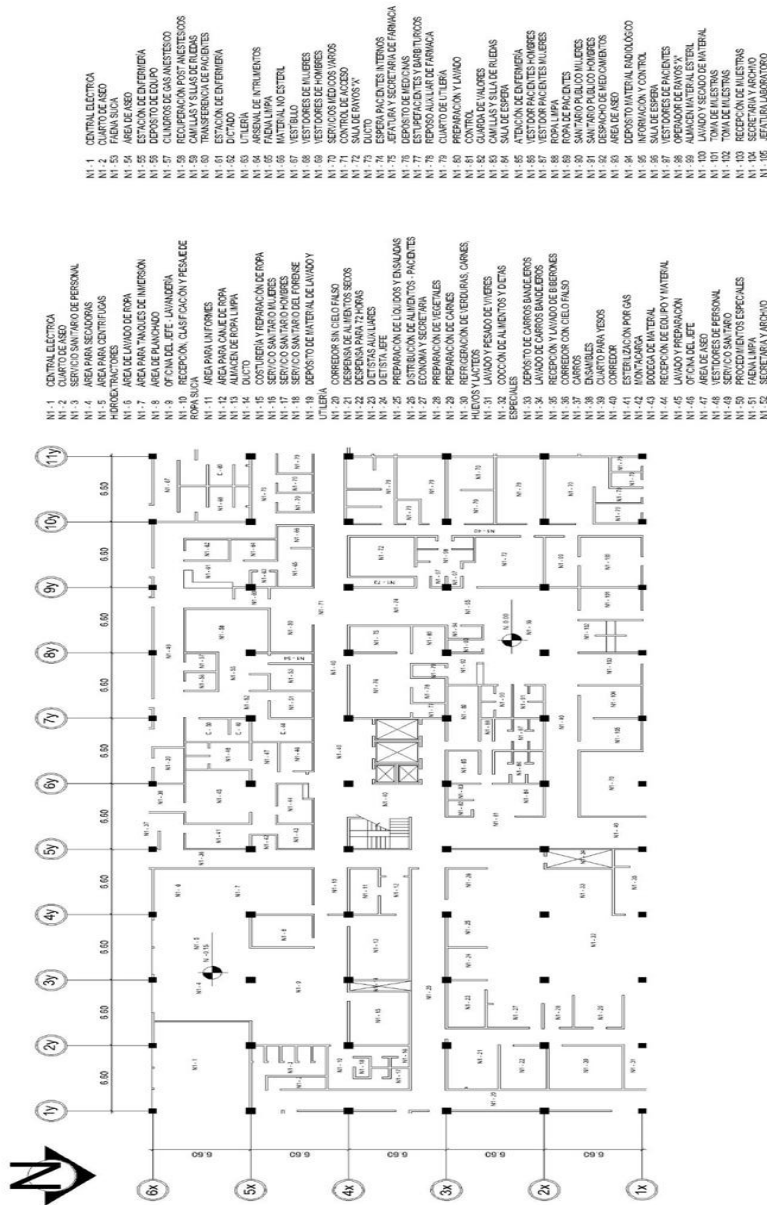
$$\delta t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T e^2}{4\pi^2} \right) (g) \quad [\text{Ecc.4.5}]$$

Coeficiente de modificación para incremento de desplazamiento por el efecto P-▲. (FEMA, 2000)

$$\alpha = \frac{Kp}{Ke} \quad [\text{Ecc.4.6}]$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Plano arquitectónico de primer nivel

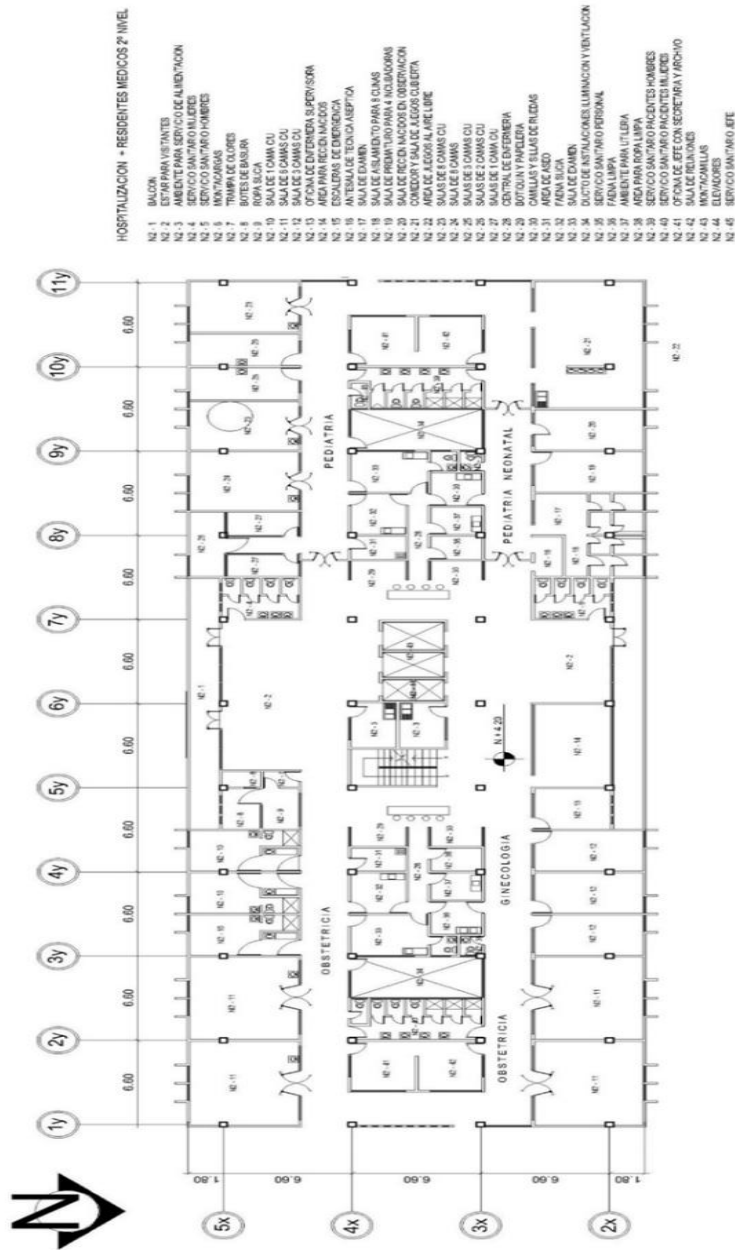


- N1-1 CENTRAL ELECTRICA
- N1-2 CUARTO DE ASEO
- N1-3 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-4 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-5 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-6 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-7 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-8 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-9 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-10 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-11 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-12 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-13 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-14 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-15 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-16 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-17 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-18 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-19 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-20 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-21 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-22 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-23 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-24 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-25 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-26 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-27 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-28 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-29 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-30 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-31 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-32 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-33 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-34 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-35 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-36 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-37 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-38 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-39 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-40 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-41 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-42 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-43 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-44 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-45 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-46 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-47 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-48 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-49 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-50 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-51 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-52 AREA PARA SECCIONADAS

- N1-53 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-54 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-55 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-56 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-57 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-58 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-59 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-60 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-61 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-62 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-63 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-64 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-65 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-66 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-67 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-68 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-69 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-70 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-71 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-72 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-73 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-74 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-75 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-76 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-77 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-78 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-79 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-80 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-81 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-82 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-83 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-84 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-85 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-86 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-87 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-88 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-89 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-90 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-91 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-92 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-93 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-94 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-95 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-96 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-97 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-98 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-99 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-100 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-101 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-102 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-103 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-104 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-105 AREA PARA SECCIONADAS
- N1-106 AREA PARA SECCIONADAS

Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Apéndice 3. Plano arquitectónico de segundo nivel



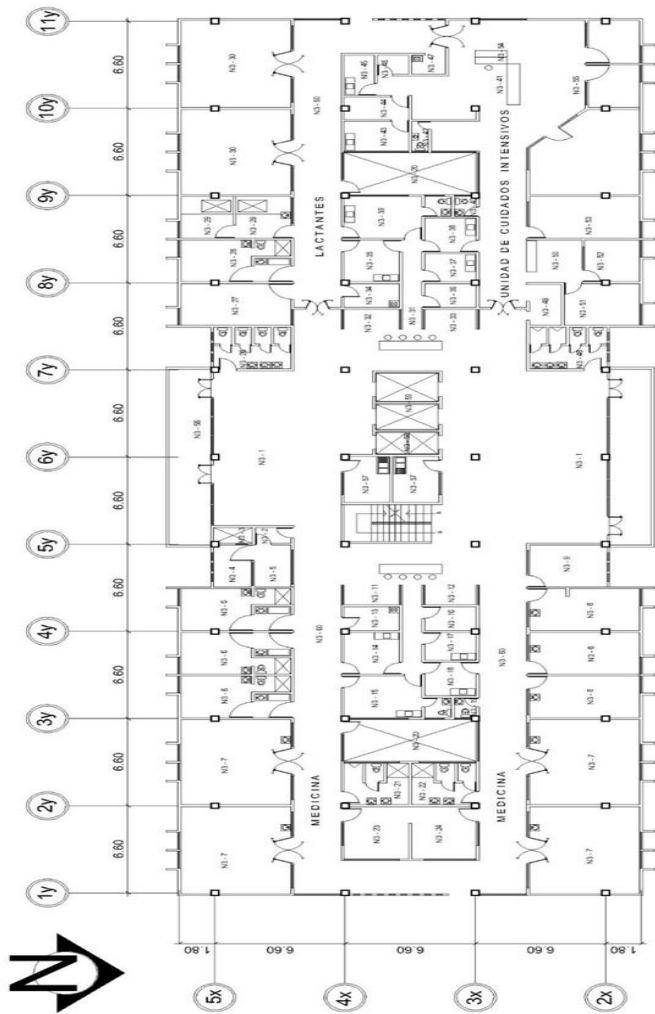
PLANTA SITUACION ACTUAL
 HOSPITAL NACIONAL PEDRO BETHANCOURT ANTIGUA GUATEMALA
 PLANTA SEGUNDO NIVEL

Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Apéndice 4. Plano arquitectónico de tercer nivel

HOSPITALIZACION DE MEDICINA, LACTANTES 3º NIVEL.

- N3-1 ESPERA VISITANTES Y SALA DE ENFERMERIA
- N3-2 TRATAMIENTO DE LESIONES
- N3-3 BOTEN DE BASURA
- N3-4 BOTEN DE BASURA
- N3-5 AREA PARA ROPA SUCIA
- N3-6 SALAS DE TAMA OUI
- N3-7 SALAS DE TAMA OUI
- N3-8 SALAS DE TAMA OUI
- N3-9 SALAS DE TAMA OUI
- N3-10 SALAS DE TAMA OUI
- N3-11 ESTACION CENTRAL DE ENFERMERIA
- N3-12 BOTIQUN Y PAPELERIA
- N3-13 AREA DE ASEO
- N3-14 AREA DE ASEO
- N3-15 AREA DE ASEO
- N3-16 AREA DE ASEO
- N3-17 AREA PARA ROPA LIMPIA
- N3-18 AMBIENTE PARA FABRICA Y LIMPIEZA
- N3-19 BIENHE PARA FABRICA Y LIMPIEZA
- N3-20 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-21 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-22 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-23 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-24 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-25 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-26 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-27 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-28 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-29 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-30 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-31 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-32 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-33 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-34 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-35 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-36 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-37 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-38 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-39 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-40 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-41 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-42 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-43 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-44 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-45 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-46 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-47 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-48 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-49 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-50 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-51 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-52 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-53 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-54 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-55 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-56 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-57 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-58 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-59 BOTIQUN DE TAMA OUI
- N3-60 BOTIQUN DE TAMA OUI

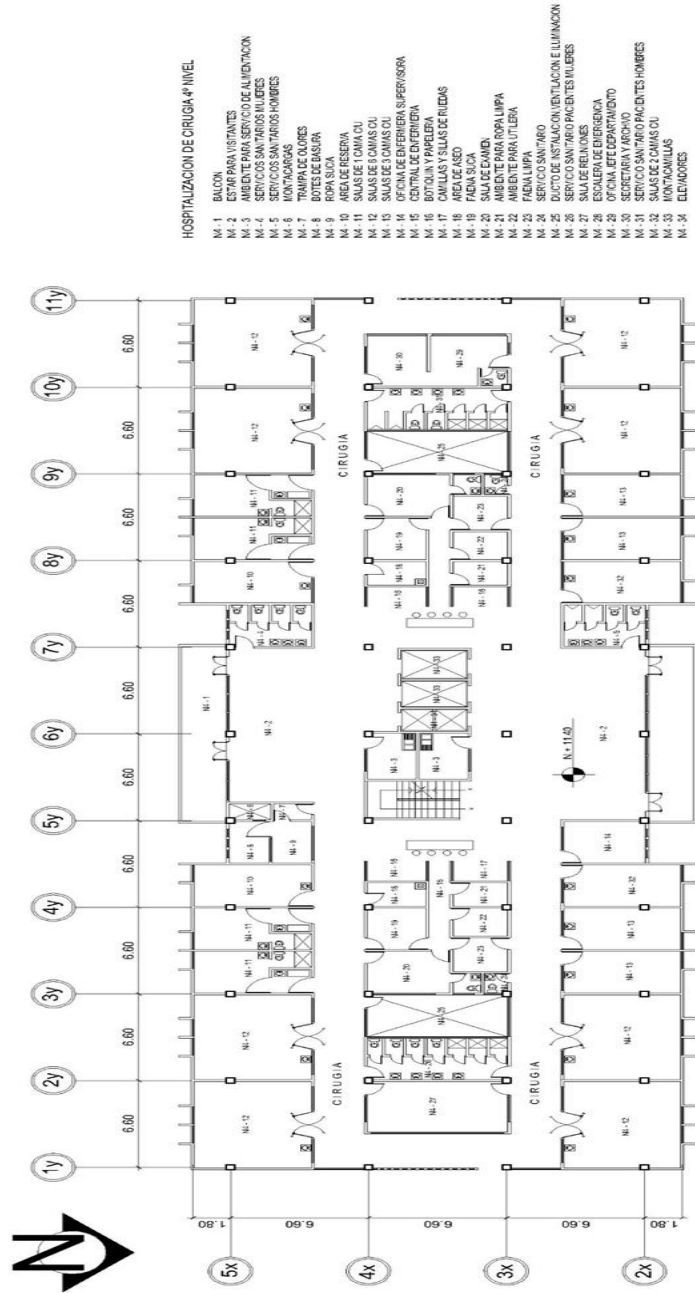


PLANTA SITUACION ACTUAL

HOSPITAL NACIONAL PEDRO BETHANCOURT ANTIGUA GUATEMALA
PLANTA TERCER NIVEL

Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

Apéndice 5. Plano arquitectónico de cuarto nivel



PLANTA SITUACION ACTUAL

HOSPITAL NACIONAL PEDRO BETHANCOURT ANTIGUA GUATEMALA
PLANTA CUARTO NIVEL

Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD.

