



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

**CRITERIOS PARA ESTABLECER LOS PARÁMETROS DE
CONTROL EN LA SALUD ESTRUCTURAL DE UNA
CONSTRUCCIÓN ESCOLAR CON MARCOS DE ACERO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL EN ESTRUCTURAS

PRESENTA:

JOSÉ CERVANTES BLANCA

DIRECTOR:

DR. EDUARDO ISMAEL HERNÁNDEZ

CO-DIRECTOR:

M. MARTÍN CASTILLO FLORES

Puebla, Pue.

Diciembre 2018

**ESTE TRABAJO PERTENECE AL PROYECTO CONACYT
PDCPN2014-1 CON CLAVE 249071 “ESTUDIOS
PARAMÉTRICOS PARA ESTABLECER LA VULNERABILIDAD
SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES ESCOLARES MEDIANTE UNA
PLATAFORMA DE MONITORIZACIÓN BASADA EN SENSORES
INALÁMBRICOS”.**

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.




Oficio No. 3877/2018

C. José Cervantes Blanca
Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Estructuras
Facultad de Ingeniería, BUAP
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Criterios para establecer los parámetros de control en la salud estructural de una construcción escolar con marcos de acero.** Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director al Dr. Eduardo Ismael Hernández y Co-director al M.I. Martín Castillo Flores.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, noviembre 30 de 2018.


M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. Dr. Eduardo Ismael Hernández y Martín Castillo Flores, Director y Co-director del tema de tesis

C.c.p. Archivo

ABH/MCF/sco*



Facultad
de Ingeniería

Bvtd. Valsequillo y Av. San Claudio
sin. edif. ING - 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

H. Puebla de Zaragoza, a 3 de diciembre de 2018

Asunto: Carta de liberación de proyecto de tesis

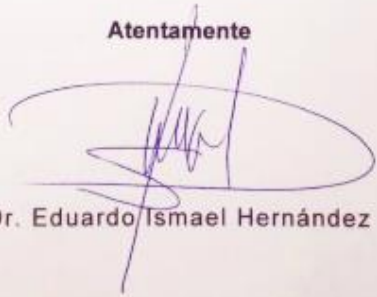
M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
PRESENTE

El que suscribe Dr. Eduardo Ismael Hernández, nombrado director del tema de tesis: "**Criterios para establecer los parámetros de control en la salud estructural de una construcción escolar con marcos de acero**", informa a usted, por medio de la presente, que después de haber revisado el contenido del documento, la metodología, así como la redacción del mismo, no tengo el inconveniente en autorizar la impresión de dicha tesis, para que la estudiante de la **Maestría en Ingeniería con opción terminal en Estructuras, Ing. José Cervantes Blanca, matrícula 215470343**, pueda continuar su proceso de titulación.

La presente se extiende para su conocimiento y los efectos legales a que haya lugar.

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente



Dr. Eduardo Ismael Hernández

c.c.p. Exámenes profesionales
c.c.p. Interesado
c.c.p. Archivo

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN..... | 10 |
| ABSTRACT | 12 |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1 Planteamiento del problema. | 19 |
| 1.2 Objetivo General | 21 |
| 1.3 Objetivos Específicos | 21 |
| 1.4 Alcances y limitaciones. | 22 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO. | 24 |
| 2.1 Análisis no lineal | 24 |
| 2.2 Análisis estático no lineal Pushover..... | 24 |
| 2.3 Análisis estructural dinámico no lineal Paso a Paso. | 26 |
| 2.4 Modelo Histerético de Takeda..... | 28 |
| 2.5 FEMA 356. Niveles de desempeño estructural..... | 30 |
| 2.5.1 Ocupación Inmediata..... | 31 |
| 2.5.2 Control de Daño..... | 31 |
| 2.5.3 Seguridad de Vida. | 32 |
| 2.5.4 Seguridad Limitada. | 32 |
| 2.5.5 Prevención de Colapso..... | 32 |
| 2.5.6 No Considerada..... | 33 |
| 2.6 Articulaciones plásticas..... | 34 |
| CAPÍTULO 3. MODELADO | 37 |
| 3.1 Vibración Ambiental | 37 |
| 3.1.1 Vibración ambiental y obtención de las propiedades dinámicas | 37 |
| 3.1.2 Instrumentación..... | 38 |
| 3.1.3 Cocientes espectrales. | 41 |
| 3.2 Descripción de la estructura, modelo U-2 | 44 |
| 3.2.1 Secciones transversales | 50 |
| 3.2.1.1 Columnas. | 50 |
| 3.2.1.2 Trabes | 52 |
| 3.2.1.3 Cerramientos. | 54 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

| | | |
|--|--|------------|
| 3.2.1.4 | Conexiones..... | 55 |
| 3.2.1.5 | Apoyos..... | 57 |
| 3.3 | Modelo analítico..... | 58 |
| 3.3.1 | Análisis de cargas gravitacionales..... | 65 |
| 3.3.1.1 | Materiales..... | 65 |
| 3.3.1.2 | Cargas..... | 68 |
| 3.3.1.2.1 | Cargas muertas..... | 69 |
| 3.3.1.2.2 | Cargas Vivas..... | 70 |
| 3.3.1.3 | Combinaciones cargas vivas y cargas muertas..... | 70 |
| 3.3.1.4 | Cargas por sismo..... | 71 |
| CAPÍTULO 4. CALIBRADO DE MODELO MATEMÁTICO..... | | 72 |
| 4.1 | Propiedades dinámicas de modelo analítico de marcos de acero calibrado..... | 77 |
| 4.2 | Amortiguamiento..... | 78 |
| CAPÍTULO 5. RESULTADOS..... | | 80 |
| 5.1 | General..... | 80 |
| 5.2 | Modelado de articulaciones plásticas..... | 81 |
| 5.2.1 | Articulaciones en trabes y cerramientos..... | 81 |
| 5.2.2 | Articulaciones en columnas..... | 84 |
| 5.2.3 | Curva Momento-Rotación para articulaciones plásticas en trabes y cerramientos..... | 87 |
| 5.2.4 | Curva Momento-Rotación para articulaciones plásticas en columnas..... | 90 |
| 5.3 | Análisis Pushover..... | 93 |
| 5.4 | Análisis Paso a Paso..... | 98 |
| 5.5 | Función de Daño..... | 102 |
| 5.6 | Vulnerabilidad sísmica..... | 109 |
| 5.6.1 | Vulnerabilidad Estructural..... | 109 |
| 5.6.2 | Intensidad sísmica..... | 110 |
| 5.6.3 | Intensidad sísmica normalizada..... | 110 |
| 5.7 | Función de Vulnerabilidad..... | 111 |
| 5.8 | Desplazamientos vs nivel de entrepiso..... | 117 |
| 5.9 | Distorsión de entrepiso vs nivel de piso..... | 118 |
| 5.10 | Análisis dinámico incremental (IDA)..... | 123 |
| CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | 127 |
| 6.1 | Conclusiones..... | 127 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

| | | |
|-------------------------|----------------------|------------|
| 6.2 | Recomendaciones..... | 128 |
| REFERENCIAS..... | | 130 |
| ANEXO A | | 133 |
| ANEXO B | | 134 |

**Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de
una Construcción Escolar con Marcos de Acero.**

DEDICATORIA

*A mi Rey y Dios, a Jesús solo a él, honrándolo con los frutos de lo que me da,
me permite obtener y lograr, a él entrego esta corona.*

“Reconócelo en todos tus caminos, y él enderezará tus veredas” Proverbios 3:6.

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Único y Sabido Dios, a Jesucristo mi Señor por su infinito amor y misericordia para conmigo, por conceder las peticiones de mi corazón, por su fiel promesa de estar conmigo todos los días, por enseñarme que nada ha sido por capacidad propia sino regalo suyo, pues “Él da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia” (Proverbios 2:6).

A mi Dios por la vida de mi padre el Ing. José Cervantes Reyes, que siempre me dio ánimo, me empujó a éxito, me dio consejos de sabiduría, por ser ejemplo a seguir y un motor en mi vida; Dios me permita llegar a ser como él, te amo padre.

Al Admirable por darme a mi madre la Sra. María Asunción Blanca Proo, madre ejemplar, amorosa, dedicada que ha dado gran parte de su vida a sus hijos, porque siempre se ha preocupado por mi bienestar y comodidad en todo aspecto de mi vida; Dios me permita regresarle un poco de lo mucho que me ha dado, te amo madre.

Al Creador del cielo y de la tierra por darme a mis hermanos Keren-Hapuc Cervantes Blanca, Libna Lizeth Cervantes Blanca, Moisés Jordán Cervantes Blanca y Dana Gabriela Cervantes Blanca que siempre han apoyado lo que hago en cualquier contexto y en todo momento.

Al Gran Yo Soy por mis compañeros de trabajo Emmanuel Martínez Colexcua y Dulce Ramírez Tecorralco, que siempre fueron apoyo incondicional para la

**Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de
una Construcción Escolar con Marcos de Acero.**

consecución de este trabajo de investigación, agradeciendo su empuje y sus consejos.

Al Padre Eterno por proveerme de mis amigas Fabiola Sanabria Marín y Laura Arely Petriz Saldaña que dispusieron de tiempo, de palabras de aliento y preocupación para ver este trabajo terminado y mi meta alcanzada.

Al Rey de reyes por la vida del Dr. Eduardo Ismael Hernández que compartió con mis compañeros y conmigo su tiempo, paciencia y conocimiento en el salón de clases y en las largas sesiones en su oficina para realizar este trabajo de tesis.

Al Príncipe de paz por permitirme ingresar a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y poder realizar mis estudios de posgrado en ella.

Al Dios verdadero por llevarme de triunfo en triunfo y de victoria en victoria; porque puedo asegurar y testificar que en Él soy más que vencedor.

Por eso y todo lo que me das te doy gracias Jesús, porque nada de esto he merecido, pero en tu amor y misericordia me has dado todo.

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el estudio de vulnerabilidad sísmica estructural realizado a una construcción escolar de marcos rígidos de acero tipo U-2, clasificación determinada por la entidad federal denominada Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE), quien realizó el diseño y llevó a cabo la construcción del inmueble, lo anterior para establecer los parámetros de control en la salud estructural de construcciones similares.

La construcción tipo U-2 fue propuesta para zonas de sismicidad media y alta, según el Índice de Planos Estructurales de proyectos de escuelas de 1981 proporcionado por el INIFED. En este estudio se desarrolla una investigación detallada de un edificio tipo (U-2) para verificar si el diseño original, previo al año 1985, cumple con los requerimientos normativos vigentes a la fecha.

Se contempla la descripción de la estructura, así como los materiales utilizados y las secciones transversales empleadas en su construcción, a fin de poder conocer la respuesta dinámica propia de la estructura en un sitio específico, llevándose a cabo el correspondiente análisis no lineal.

El análisis estructural tomó como punto de partida el análisis modal, el no lineal estático y el dinámico no lineal paso a paso para los marcos en ambas direcciones. Con la finalidad de conocer la respuesta de la estructura y las condiciones necesarias para que incurra en la zona plástica, según la *Federal Emergency Management Agency-Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*-(FEMA 356), en su versión de noviembre del año 2000, así como algunas recomendaciones según el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MDOC CFE) 2015 en su capítulo C1.3. Diseño por sismo.

Se eligió una escuela tipo U-2 sin daño ubicada en la ciudad de Puebla, la cual se instrumentó usando un acelerómetro triaxial para generar posteriormente un modelo 3D. Con los registros obtenidos se logró obtener la estimación de los periodos de vibrar

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

para los 3 primeros modos. Estos a su vez ayudaron en la calibración de un modelo analítico para un posterior análisis no lineal.

El análisis no lineal se dividió en dos partes, el estático o “Pushover” y el dinámico paso a paso. El primero permitió obtener la curva de capacidad, así como el mecanismo de colapso.

El análisis paso a paso permitió estimar la respuesta en términos de la distorsión de entrepiso, misma que fue útil para estimar las correspondientes funciones de daño.

Al final de este trabajo se presenta una serie de recomendaciones y observaciones para la estructura estudiada bajo ciertas intensidades sísmicas, con la finalidad que se pueda diseñar, en su caso un reforzamiento para salvaguardar la integridad física de todos sus ocupantes.

ABSTRACT

The present work shows the study of structural seismic vulnerability made to a type of school construction of rigid steel frames type U-2, classification determined by the federal entity called Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE), who carried out the design and carried out the construction of the building, to establish the parameters of control in the structural health of similar constructions.

The construction type U-2 was proposed for medium and high seismicity zones, according to the Structural Plans Index of 1981 school projects provided by the INIFED. In this study a detailed investigation of a type building (U-2) is developed to verify if the original design, prior to 1985, complies with the normative requirements in force to date.

The description of the structure is contemplated, as well as the materials used and the transversal sections used in its construction, in order to know the characteristic dynamic response of the structure in a specific site, carrying out a first and non linear analysis according to current regulations.

The structural análisis process took as a starting point the modal analysis and the dynamic step by step for the frames in both directions, in order to know the structural response and the necessary conditions to represent the plastic hinges. The Federal Emergency Management Agency-Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356) was used, as well as some recommendations according to the Manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC CFE) 2015 in its chapter C1. 3. Seismic Design.

An U-2 school building without damage was chosen as a study case. Located in the Puebla city. The building was instrumented using a triaxial accelerometer to generate a 3D model. The ambiental vibration records were analyzed in order to obtain estimation of the vibration periods for the first 3 modes. These in turn helped in the calibration of an analytical model for a later non-linear analysis.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

The nonlinear analysis was divided into two parts, the static or "Pushover" and the dynamic step by step. The first allowed to obtain the capacity curve, as well as the collapse mechanism.

The step-by-step analysis allowed to estimate the response in terms of the drift, which was useful to estimate the corresponding damage functions.

At the end of this work comentaries and recommendations for the studied building are given, in case of a retrofit process would be necesary.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El 19 de septiembre de 1985, el 15 de junio de 1999, el 7 de septiembre de 2017 y el 19 de septiembre de 2017 son fechas que todo el pueblo de México recuerda con temor, dolor y miedo. Los eventos sísmicos ocurridos en esos días mostraron a la sociedad mexicana, cuan vulnerable es la infraestructura física civil ante el movimiento de las capas tectónicas, y sobre todo cuánto perjuicio puede desencadenar el no tomar en cuenta las consideraciones en el diseño estructural de todo tipo de inmueble o estructura.

Debido a los daños materiales y sociales que se generan ante un evento sísmico de gran magnitud, es de vital importancia el escrutinio detallado del comportamiento estructural frente a tal fenómeno natural, inherente y constante en la actividad geológica del planeta. La ingeniería sísmica es la disciplina encargada de observar y estudiar el comportamiento estructural, tal que garantice la disminución de las pérdidas tanto humanas como económicas ante eventos telúricos, así como promover que las estructuras tengan un comportamiento adecuado ante las diferentes demandas sísmicas durante su vida útil.

Por tanto, es pertinente la formulación práctica de procedimientos y parámetros que nos permitan estimar los niveles de riesgo sísmico en construcciones ya erigidas, los cuales permitan generar planes de acción o procedimientos de rehabilitación para

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

garantizar la continuidad en el funcionamiento de diseño en la construcción y por ende disminuir al máximo posible las pérdidas humanas y económicas.

La casi nula existencia de estudios dirigidos a la estimación y mitigación del riesgo por sismo, en construcciones escolares en México es punto de partida para esta investigación, dada la cantidad de estructuras existentes y la poca información de las condiciones en estas construcciones, el margen de incertidumbre es elevado para estimar apropiadamente las fuerzas sísmicas y las condiciones reales de las construcciones existentes. Por otro lado, muchas construcciones denominadas como grupo "A", entre ellas escolares, deben mantener niveles adecuados de seguridad ante eventos sísmicos (Villegas 2005).

En vista de la amenaza sísmica latente a lo largo y ancho del territorio de la República mexicana, es necesario profundizar en la investigación y el conocimiento de la vulnerabilidad sísmica de los sistemas estructurales.

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad inherente a toda estructura, independientemente de la geometría y los materiales utilizados, es una característica de su propio comportamiento ante la acción de un sismo a través de una ley causa-efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño.

En el trabajo de Amani (2004) se presenta un método para determinar las características dinámicas de estructuras sometidas a vibraciones ambientales a partir del conocimiento de la respuesta del sistema denominado Método de los Modos Complejos.

La base consiste en evaluar el estado en el cual una estructura se encuentra en

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

su funcionamiento normal sin interrupciones, a partir de la medición de su respuesta dinámica para poder detectar daño o programar su mantenimiento.

Más tarde en Ismael (2010), trabajo realizado para tesis doctoral, permitió el desarrollo de un esquema general para llevar a cabo estudios sistemáticos que permitieran el establecimiento de criterios para diseño sísmico basado la confiabilidad y desempeño de sistemas estructurales nuevos de múltiples grados de libertad construidos en la zona del Valle de México.

En Ismael (2012), se presentó un procedimiento sencillo y práctico para estimar el nivel de confiabilidad sísmica en términos de un factor de seguridad de construcciones escolares.

El procedimiento toma en cuenta la respuesta lineal de las construcciones cuyas propiedades dinámicas se obtiene mediante instrumentación y medición de la vibración ambiental, considerando también los efectos de sitio en el terreno de desplante. Estos datos son de utilidad para poder asignar un nivel preliminar de riesgo basado exclusivamente en los periodos de vibrar del terreno y del edificio.

Ismael y Mora (2014) presentan un procedimiento alternativo para estimar la vulnerabilidad sísmica de construcciones escolares, mediante criterios simplificados basados en la respuesta no lineal usando el método de empuje lateral. El nivel de vulnerabilidad se estima a partir de una función que toma en cuenta el nivel de daño físico en términos de la distorsión de entrepiso. Las distorsiones de entrepiso, utilizadas para la evaluación de daño, se estimaron para diferentes niveles de desempeño de los marcos considerados según criterios de documentos FEMA356. Se

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

usaron modelos 3D, se determinó el periodo de manera experimental y analítica. Se tomaron en cuenta las incertidumbres en las cargas gravitacionales y en las propiedades mecánicas de los materiales. De este análisis se obtuvo la curva Pushover y las configuraciones de deformación lateral para diferentes niveles de desempeño.

En Ismael (2015) se presenta un procedimiento para estimar la confiabilidad estructural de un edificio construido a base de marcos de concreto reforzado. El procedimiento contempla la evaluación de propiedades dinámicas utilizando registros de vibración ambiental, estos datos fueron útiles para calibrar el modelo analítico; además se consideraron el índice de daño y las incertidumbres relacionadas con las propiedades mecánicas y las cargas gravitacionales.

Los edificios escolares tipo U-2 construidos por el CAPFCE se encuentran distribuidos a lo largo y ancho de toda la república mexicana tanto en zonas rurales como en ciudades importantes. Estas edificaciones se diseñaron principalmente para zonas sísmicas de media a alta intensidad, clasificación que difiere para inicios de la década de los 80's con la zonificación que se plantea de acuerdo con los reglamentos locales y al MDOC CFE, que para el cual la ciudad de Puebla se encuentra dentro de dos principales intensidades, intermedia (B) y alta (C). Ver figura 1.1.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

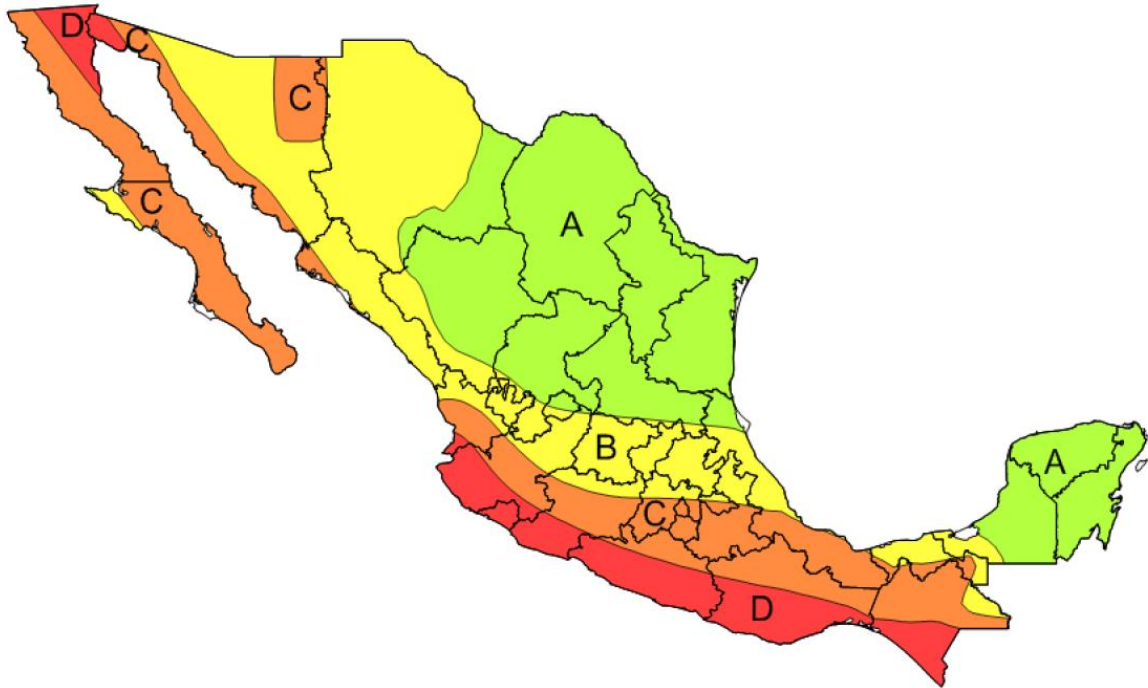


Figura 1.1. Zonificación sísmica en la actualidad según MDOC CFE 2015.

En este estudio se analiza un inmueble escolar tipo U-2 ubicado en la ciudad de Puebla, el cual no ha presentado daño estructural durante y después de los eventos sísmicos del pasado 19 de septiembre, pero se analiza la vulnerabilidad del mismo para ofrecer recomendaciones con el fin de planear reforzamiento ante la inminente actividad telúrica de la zona.

Nuestros reglamentos de construcción, así como sus normas técnicas complementarias clasifican a todo inmueble escolar, como tipo de importancia del “grupo A”, para el cual se debe diseñar considerando mayores factores de seguridad, debido a que una falla o colapso en un edificio escolar dentro de horario de clases significa poner en riesgo sin número de vidas.

1.1 Planteamiento del problema.

El diseño sísmico tiene como meta proveer a las estructuras diseñadas las características y propiedades necesarias para desarrollar un comportamiento adecuado cuando se presentan las fuerzas sísmicas, propiedades que deben conservarse durante toda su vida útil ante la incertidumbre de la fecha exacta del evento sísmico.

El procedimiento para el diseño de todo sistema estructural se basa en el uso de factores de seguridad y de hipótesis conservadoras para las principales variables de diseño. Por tanto, el comportamiento de una estructura se considera el óptimo si cumple con una serie de requisitos estipulados por una normativa que garantiza la seguridad de la estructura. Las normas buscan disminuir la probabilidad de falla producto de la combinación de factores que inciden en el diseño estructural o en la construcción de la obra o en ambos. Sin embargo, el diseño bajo cierta normativa no es suficiente para garantizar el buen comportamiento sísmico la de estructura (Mireles 2016).

En el análisis estructural se determina la forma en que se comporta una estructura hecha de un material específico y un sistema de cargas dada, pero todo fenómeno de la naturaleza presenta dispersión en los resultados; esto lo convierte en un problema estocástico (con sus respectivas frecuencias de ocurrencia con base a

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

registros históricos). La teoría de la probabilidad contempla esta tendencia y trata la incertidumbre en los resultados considerando las variables como aleatorias. Como resultado de esta teoría, nunca podrá predecirse completamente el comportamiento de un modelo estructural.

En términos de las probabilidades se puede indicar la condición satisfactoria o no satisfactoria de una estructura, mediante el uso de cocientes. Con el análisis por confiabilidad estructural se puede medir el nivel de seguridad de una estructura, determinar el grado de seguridad necesario y proporcionar herramientas para establecer el óptimo nivel de seguridad para una estructura.

Teniendo en consideración la incertidumbre en los parámetros de análisis y diseño estructural al estimar las cargas máximas, la resistencia de los materiales, factores constructivos, errores en el método de análisis, predicción de los fenómenos naturales (sismo); es imprescindible realizar un estudio para determinar el grado de vulnerabilidad que guarda una estructura de marcos de acero ante un sismo de magnitud considerable y evaluar si el riesgo es aceptable o no para dar las recomendaciones pertinentes.

Es común que después de la ocurrencia de sismos moderados e intensos las construcciones escolares sean empleadas como refugios temporales y albergues. Por la razón anterior y por la importancia intrínseca que tienen estas estructuras al alojar niños y jóvenes, se consideran en los reglamentos de construcción como edificaciones tipo A; que requieren condiciones de seguridad adecuadas para el uso dado o

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

programado. Dado lo anterior surge la importancia de profundizar en la investigación de la vulnerabilidad sísmica en construcciones de este tipo.

Por lo tanto, se puede asumir que los parámetros determinantes de la salud estructural en construcciones escolares están directamente relacionados con el periodo fundamental de la estructura, su ductilidad (Q) y sus coeficientes sísmicos (c).

1.2 Objetivo General

Este trabajo de investigación tiene como meta principal la determinación de parámetros útiles que se emplearan en el análisis de la salud estructural de un edificio escolar con marcos de acero. Para lo anterior se hará uso de un criterio que toma en cuenta la formación de articulaciones plásticas de los elementos ante fuerzas laterales sísmicas equivalentes y del concepto de capacidad de deformación normalizada del sistema.

1.3 Objetivos Específicos

- Determinar las características geométricas y mecánicas de la estructura para implementarlas en el análisis lineal y no lineal.
- Implementar un procedimiento basado en el uso de un modelo estructural 3D de varios grados de libertad, para obtener la respuesta no lineal de dicho sistema, a partir de respuestas instrumentales del sistema de interés.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

- Formular mediante la estimación de la distorsión de entrepiso una función de daño que permita evaluar la vulnerabilidad sísmica estructural del edificio.
- Ubicar las posibles fallas de la estructura ante eventos sísmicos de gran magnitud.
- Graficar las funciones de daño en términos de la distorsión de entre piso, y correlacionar dichas funciones con la intensidad sísmica, para identificar los parámetros que controlen dicho daño. O bien correlacionar el nivel de daño con la salud estructural.

1.4 Alcances y limitaciones.

A partir del monitoreo de construcciones escolares se podrá obtener, mediante los registros de vibración ambiental, la estimación de los valores del periodo de vibrar de las edificaciones a analizar en sus tres componentes, longitudinal, transversal y rotación, que posteriormente se ocuparán para la calibración del modelo para el análisis no lineal.

Se plantea además del análisis no lineal del sistema, una función de daño para el sistema estructural partiendo de los desplazamientos máximos obtenidos, así como la vulnerabilidad sísmica de la estructura usando la función de daño en términos de las distorsiones de entrepiso.

Siguiendo como base las normas de diseño vigente, se considera que la falla por flexión rige sobre la falla por cortante y axial, así como también en este trabajo se considera una estructura de marcos de acero únicamente.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Las articulaciones plásticas se modelarán siguiendo los criterios contenidos en los documentos FEMA 356, ASCE y AISC.

Se tomarán como nulos los efectos de torsión y la interacción suelo-estructura para fines prácticos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Análisis no lineal

Los reglamentos y normas de construcción señalan que es permisible para la estructura un comportamiento por encima del intervalo lineal al presentarse un evento sísmico de moderada y alta intensidad, llegando a incursionar en la zona del comportamiento inelástico en la cual se llega a disipar una porción importante de la energía introducida por el sismo. Esto permite que el diseño de la estructura se contemple para resistir esfuerzos inferiores a los que se necesitarían para mantenerse en el intervalo elástico lineal.

Por lo cual, es prioritario que la estructura tenga un desempeño inelástico apropiado para lo que requerirá una capacidad de carga para deformaciones muy por arriba a la de la fluencia, sin llegar al colapso.

2.2 Análisis estático no lineal Pushover.

Se denomina Pushover al método de análisis estructural estático no lineal en el cual el sistema estructural es sometido a una carga lateral monotónica incremental, equivalente a la excitación en la base generada por la ocurrencia de un evento sísmico. Esta fuerza lateral representativa al aplicarse a la estructura propicia desplazamientos controlados de manera continua, incursionando en la zona elástica continuando por la plástica hasta llevar a la estructura a un estado de falla o colapso. Ver figura 2.2.1.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

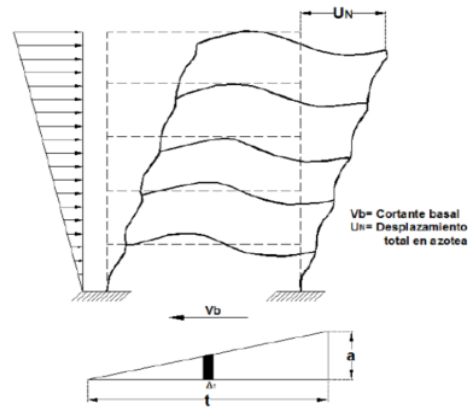


Figura 2.2.1. Representación esquemática de una estructura sometida a una carga lateral monótona.

Cruz, A. (2015)

La resultante de la aplicación de este análisis es una curva de “capacidad” en la cual se vincula el desplazamiento con el cortante basal. La aportación de esta gráfica resulta de gran trascendencia en la interpretación del comportamiento dinámico de la estructura. Se puede observar la resistencia de la estructura al leer el valor máximo de fuerza cortante que logra desarrollar antes del colapso. También, se puede estimar el desplazamiento máximo. En otras palabras, podemos observar la capacidad dúctil del sistema, la formación de mecanismos en función del desplazamiento y la deformación en que se produce el colapso, como se puede leer en la figura 2.2.2

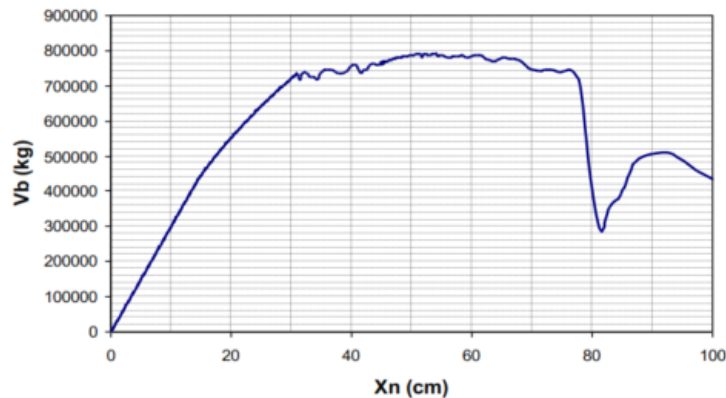


Figura. 2.2.2. Ejemplo de curva de capacidad, “Pushover”. Ismael (2010)

2.3 Análisis estructural dinámico no lineal Paso a Paso.

Se denomina análisis estructural dinámico paso a paso, al método que presenta sus elementos modelados con características no lineales y cuyas variables van cambiando respecto al tiempo. Se presenta la ecuación de movimiento, la cual será igual para cualquier instante en el tiempo:

$$\{P\} = [M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} \quad (2.3.1)$$

Denominando al vector de incremento de aceleración, velocidad y desplazamiento nodal a $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$ y $\{x\}$ respectivamente y a $\{P\}$ como la representación de las fuerzas externas a las que se somete el sistema simbolizado por un registro sísmico de aceleraciones generalmente, es decir, el incremento de las cargas aplicadas. $[M]$, $[K]$, $[C]$ es la matriz de masas, matriz de rigidez tangente y matriz de amortiguamiento, respectivamente.

Reescribiendo la ecuación anterior con un intervalo de tiempo Δt queda como:

$$\{\Delta P\} = [M]\{\Delta \ddot{x}\} + [C]\{\Delta \dot{x}\} + [K]\{\Delta x\} \quad (2.3.2)$$

Donde la matriz de amortiguamiento y rigidez corresponden al estado inicial del paso de integración de la estructura. La solución de la ecuación 2.3.1 presenta cierta complejidad ya que las matrices C y K , amortiguamiento y rigidez respectivamente, son variables cuando la estructura en la zona no lineal, dicho de otra manera, se tiene una ecuación de equilibrio dinámico distinta para cada intervalo de tiempo en el que fluye una sección y cada intervalo en el que las fuerzas externas son diferentes. La

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

integración numérica planteada para la solución de la ecuación 2.3.2 puede resolverse por diferentes métodos conocidos, por ejemplo, con Beta de Newmark y el método de Wilson (Chopra, 1995).

Para conocer la capacidad de deformación de una estructura de manera más exacta, hay que incurrir en el análisis no lineal, es decir, un análisis paso a paso; puesto que la capacidad de deformación (observada en curva Pushover) depende de las propiedades mecánicas singulares a cada estructura y la demanda de deformación del sistema (mediante análisis paso a paso) de la excitación aplicada en la base (sismo). Esto nos señala que, únicamente el Pushover no es suficiente para conocer la demanda de deformación de la estructura de manera certera.

En la actualidad resulta posible obtener la respuesta no lineal del modelo matemático de una edificación sujeta a acciones sísmicas. La correspondencia de la respuesta calculada de esta manera con el verdadero comportamiento de la estructura durante un evento sísmico, dependerá básicamente de la calidad de la idealización del modelo matemático elegido y del procedimiento de análisis empleado.

Como consecuencia de la excitación sísmica en la base de la estructura, esta oscilación alternadamente alrededor de su eje de equilibrio estático, con desplazamientos máximos en la azotea y fuerzas cortantes en la base que varían dependiendo de las aceleraciones en el terreno, (Díaz Alcántara, 2008).

El objetivo principal del análisis paso a paso es la generación de una gráfica que representa la demanda de deformación (desplazamiento vs cortante basal)

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

mediante ciclos históricos que van causando daño a la rigidez y resistencia del sistema como se aprecia en la figura 2.3.3.

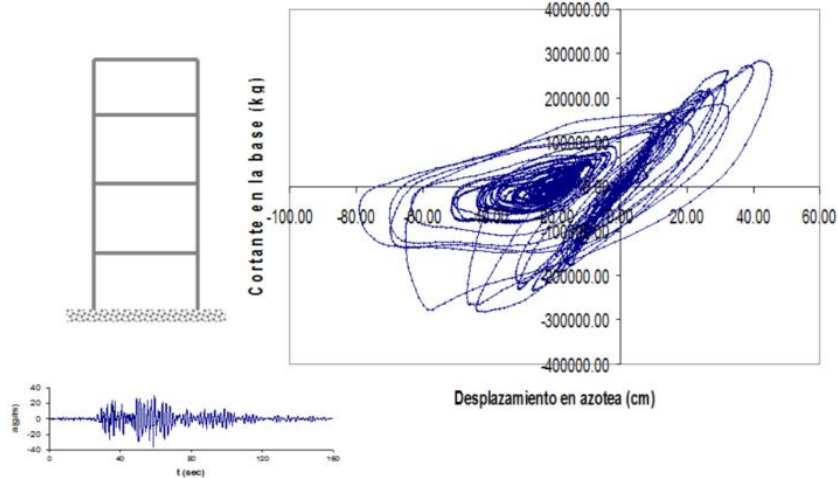


Figura 2.3.3. Ciclos de histéresis de un análisis no lineal Paso a Paso.

2.4 Modelo Histerético de Takeda.

Para analizar la respuesta no lineal de un sistema de masas discretizadas, se debe establecer un modelo matemático de las características de la fuerza de restitución y de aquí definir la relación entre fuerza cortante en el entrepiso y la deformación lateral del mismo. Para una progresión consecutiva de cargas y descargas, el segmento que une los puntos pico en la curva carga-deflexión de cada secuencia de carga se llama curva esquelética. En muchos casos, la curva esquelética coincide con la curva monótona. La curva que se obtuvo bajo las inversiones de signos de la fuerza se llama curva de histéresis (Mireles 2016).

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

La curva de histéresis es afectada directamente por la geometría y los materiales empleados en el sistema estructural. La simplificación de los modelos matemáticos será en función de del nivel de refinamiento requerido para el análisis. Estos modelos deben proporcionar la rigidez y resistencia del miembro, que tendrá una variación en el tiempo acorde con la historia de cargas y deformaciones producida por la excitación sísmica.

Takeda propone un modelo, posteriormente complementado, para representar las funciones constitutivas que describen el comportamiento a flexión de las secciones críticas en los extremos de las vigas y columnas.

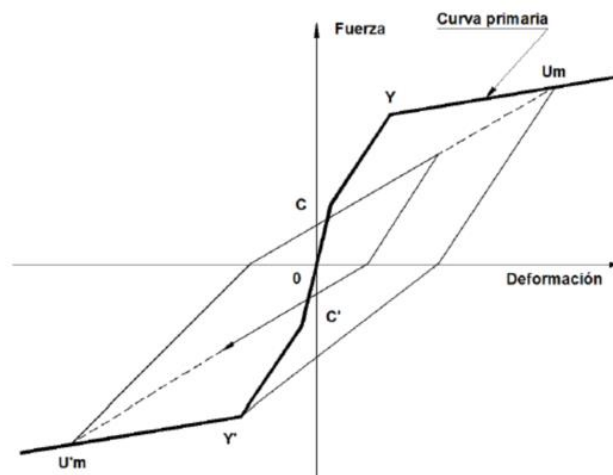


Figura 2.4.1. Modelo histérico de Takeda.

En este modelo se presenta una curva primaria trilineal, con simetría respecto al origen. Ver figura 2.4.1. La curva de carga está dirigida hacia el máximo punto

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

alcanzado anteriormente en la misma dirección. La degradación de la pendiente de la curva de descarga está propuesta en función de la deflexión máxima alcanzada anteriormente en cualquier dirección, según una función experimental. La rigidez degradada de descarga se expresa como:

$$Kr = \frac{F_C + F_Y}{D_C + D_Y} \left| \frac{D_m}{D_Y} \right|^{-\alpha} \quad (2.4.1)$$

Donde C e Y indican niveles de agrietamiento y fluencia, respectivamente, α indica la degradación de rigidez a la descarga, F hace referencia a la fuerza o resistencia y D indica el desplazamiento. Este modelo es aplicado principalmente a modelos donde la falla se presenta por flexión, usado en diferentes líneas de investigación.

2.5 FEMA 356. Niveles de desempeño estructural.

La determinación del desempeño de las edificaciones deberá ser seleccionada para cuatro Niveles de Desempeños Estructural y dos Rangos de Desempeño Estructural intermedios.

Los niveles de desempeño estructural son Ocupación Inmediata (IO), Seguridad de Vida (LS), Prevención de Colapso (CP) y No Considerada (NC). Para los intervalos intermedios de desempeño estructural tenemos Control de Daño (DC) e Intervalo de Seguridad Limitada (LSR). Para obtener el valor del rango de desempeño Control de Daño se puede aplicar una interpolación entre el criterio de aceptación Ocupación

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Inmediata y Seguridad de Vida. Para determinar el intervalo de desempeño para intervalo de seguridad Limitada, se realizará una interpolación entre Seguridad de Vida y Prevención de Colapso, es por ello que se denominan intermedios.

2.5.1 Ocupación Inmediata.

Este nivel de desempeño estructural se podrá definir como el estado de daño post-sismo en el cual permanece la estructura segura para su ocupación, esencialmente retiene la resistencia de diseño y la rigidez previa al sismo. Esto significa que el nivel de daño posterior al evento sísmico solo se refleja de manera muy limitada en algunos elementos estructurales. El sistema estructural del edificio que resiste las fuerzas verticales y laterales retiene prácticamente toda la resistencia y la rigidez aun después del evento telúrico. El riesgo o amenaza a una lesión a los ocupantes como resultado de un daño estructural es casi nula y las reparaciones estructurales son menores.

2.5.2 Control de Daño

El nivel de desempeño estructural Control de Daño puede ser definido como el siguiente intervalo de daño comprendido entre el nivel de desempeño Seguridad de Vida y la Ocupación Inmediata. Diseñar para este nivel de daños es deseable para minimizar los posibles tiempos de reparación y la interrupción de la operación.

2.5.3 Seguridad de Vida.

El nivel de desempeño estructural Seguridad de Vida podrá ser definido como el estado de daño posterior al sismo en el cual se incluyen daño a elementos estructurales, pero retienen un margen contra el inicio del colapso parcial o total. Algunos elementos y componentes estructurales son severamente dañados, pero esto no resulta en caída de escombros ni dentro o fuera de la estructura. Hay riesgo de lesiones durante el evento sísmico sin embargo el riesgo general por pérdidas humanas resulta ser bajo.

2.5.4 Seguridad Limitada.

Definido como el nivel de desempeño estructural inmediato al nivel de desempeño estructural de Seguridad de vida, pero anterior a la Prevención de Colapso.

2.5.5 Prevención de Colapso.

Este nivel de desempeño estructural será definido como el estado posterior al sismo en el cual se incluyen daños a elementos estructurales tales que aún puede soportar las cargas gravitacionales, pero no retiene ningún margen contra el colapso de la edificación según este criterio. Entendiendo que se considera una degradación importante en la resistencia de fuerzas laterales (resistencia y rigidez) del sistema considerando a la estructura al borde del colapso. Se presentan largas y permanentes

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

deformaciones laterales de la estructura y una mayor degradación en la capacidad de soporte de cargas verticales. Sin embargo, los componentes que dan soporte a las cargas gravitacionales continúan resistiendo ante tal demanda.

2.5.6 No Considerada.

La rehabilitación de un edificio que no aborda el desempeño de la estructura deberá ser clasificada como No Considerada.

Para poder tener una idealización de los niveles de desempeño para la estructura estudiada la tabla 2.5.6.1 muestra las acciones definidas para cada nivel de desempeño en una edificación con marcos de acero a momento, en la cual también muestra parámetros de niveles de desempeño en función de las distorsiones.

Tabla 2.5.6.1. Niveles de desempeño y daño estructural para marcos de acero. FEMA356

| Elementos | Tipo | Prevención de Colapso | Seguridad de Vida | Ocupación Inmediata |
|---------------------------|-------------|--|--|--|
| Marcos de acero a momento | Primario | Extensas distorsiones de tableros de vigas y columnas. | Formación de articulaciones. Pandeo local en algunas vigas. Grandes distorsiones nodales; fractura de conexiones a momento aisladas, pero conexiones a cortante intactas. Algunos elementos podrán experimentar fracturas parciales. | Fluencia local menor en algunos lugares. No hay fracturas. Menor pandeo y menores distorsiones permanentes observables de elementos. |
| | Secundario | Mismo que el primario | Largas distorsiones de tableros de vigas y columnas. Muchas fracturas en conexiones a momento, pero conexiones a cortante intactas. | Lo mismo que el primario |
| | Distorsión | 5% permanente o transitoria | 2.5% transitoria; 1% permanente | 0.7 % transitoria; permanente despreciable |

2.6 Articulaciones plásticas

Definidos los parámetros del nivel de desempeño estructural, es necesario ir delimitando en esos niveles de desempeño a los elementos estructurales del caso de estudio, es decir, definir el comportamiento del elemento y los parámetros que separan un comportamiento elástico del plástico para cada tipo de elemento de acuerdo a las fuerzas predominantes actuantes.

Para ello todas las acciones deben de ser clasificadas como *control de deformación* o *control de fuerza*, usando el componente de fuerza contra la deformación como lo muestra la figura 2.6.1. Esta clasificación se hará dependiendo del tipo de comportamiento del elemento ya sea dúctil o frágil.

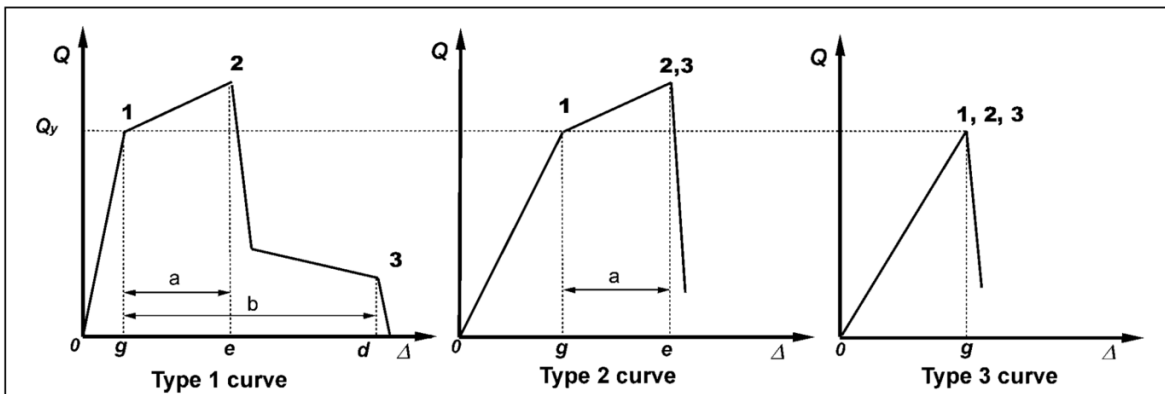


Figura 2.6.1. Curvas componente de fuerza vs deformación. Fema 356

La primera curva de la figura 2.6.1, es representativa de un comportamiento dúctil en el cual hay un intervalo elástico (punto 0 a punto 1) seguido por un intervalo plástico (punto 1 a punto 3) con una buena capacidad residual para soportar cargas gravitacionales en el punto 3. Las acciones que exhiben este comportamiento deben

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

ser clasificados como “*control de desplazamientos*” siempre y cuando el intervalo del endurecimiento por deformación o el suavizado es $e > 2g$; de otra manera, deberá ser clasificado como “*control de fuerzas*”.

La segunda curva representa también un comportamiento dúctil en el cual el intervalo elástico (punto 0 a punto 1) y el intervalo plástico (punto 1 a 2) esta seguido por una pérdida de resistencia y capacidad de soportar cargas gravitacionales.

La tercera curva es representativa de un comportamiento frágil, en el cual el intervalo elástico (punto 0 a punto 1) está seguido por una pérdida de resistencia y capacidad de soportar cargas gravitacionales ms allá del punto 1.

Para mostrar el comportamiento generalizado fuerza-deformación usado en FEMA356, la figura 2.6.2 especifica el modelo aprobado para un criterio de *control de deformación*, donde la zona proporcional o elástica está comprendida entre el punto A y el punto de fluencia B. La pendiente del punto B al C es típicamente un pequeño porcentaje (0-10%) de la pendiente de la zona elástica, y se incluye para representar el fenómeno del esfuerzo de endurecimiento. El valor de la ordenada en el punto C representa la resistencia del elemento, y el valor en la abscisa indica la deformación máxima del elemento antes de la degradación de la resistencia (línea CD). Mas allá del punto D, el elemento responde con una reducción substancial de la resistencia hacia el punto E.

Ciertos programas de cómputo presentan algunos problemas para la idealización de la pendiente entre el punto C y D, por lo que una pequeña pendiente será agregada en este segmento de la curva.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Para algunos componentes es más conveniente representar el criterio de aceptación en términos de la deformación (θ ó Δ), mientras que para otros es más conveniente dar un criterio en término de proporción de deformación. Para acomodar estos dos tipos de idealización de curvas fuerza-deformación, la figura 2.6.2 propone dos curvas (a y b). En la figura BB a) se muestra una fuerza normalizada (Q/Q_{CE}) versus deformación (θ ó Δ) y los parámetros a , b y c . La gráfica 2.6.2 b) muestra una fuerza normalizada (Q/Q_{CE}) versus una proporción de deformación ($\theta/\theta_y, \Delta/\Delta_y$ ó Δ/h) y los parámetros d , e y c .

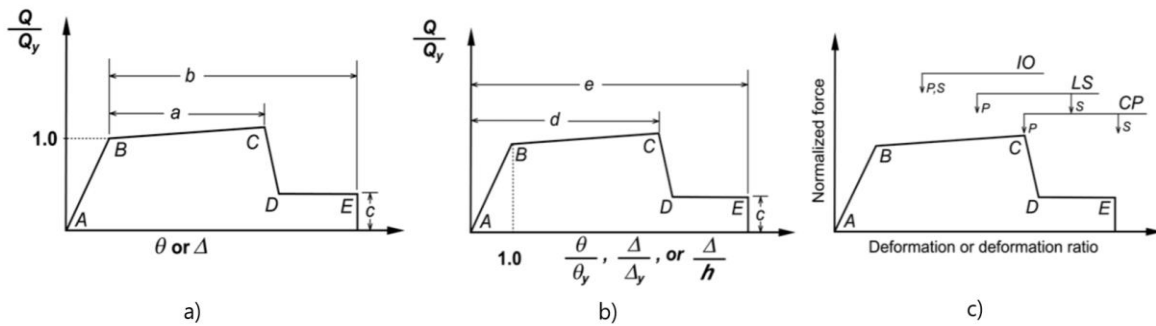


Figura 2.6.2. Componente generalizado relaciones de fuerza-deformación para representar los criterios de modelado y aceptación. FEMA356.

Q_y representa el esfuerzo de fluencia, pero para evaluar un comportamiento con *control de deformación*, se usará el esfuerzo Esperado Q_{CE} . Q_{CE} se define como el valor estadístico de fluencia incluyendo consideraciones para el esfuerzo de endurecimiento y desarrollo plástico. Cuando se evalúe un comportamiento con *control de fuerzas*, se empleará el valor estimado del límite inferior de esfuerzo Q_{CL} , el cual se define como el valor estadístico menos una desviación estándar del valor de fluencia.

CAPÍTULO 3. MODELADO

3.1 Vibración Ambiental

3.1.1 Vibración ambiental y obtención de las propiedades dinámicas

Para poder obtener las propiedades dinámicas de la estructura de manera de reducir las incertidumbres, se recurrió al procedimiento conocido como vibración ambiental, para posteriormente con ellas, realizar un calibrado del modelo matemático.

Los registros de vibración ambiental, para la determinación de algunas propiedades estructurales en construcciones existentes, tuvo sus inicios en la década de los sesentas (Ivanovic et al., 2000), y en estudios de vulnerabilidad sísmica de edificaciones escolares (Ismael et al., 2013) el uso de técnicas de vibración ambiental empleando acelerómetros tipo Basalt de KINEMETRICSTM fue herramienta fundamental para la estimación de la respuesta instrumental, de los periodos fundamentales de vibrar y las formas modales; para posteriormente calibrar modelos analíticos con la ayuda de algún software utilizando dichos resultados para continuar con el análisis no lineal y de vulnerabilidad (Mireles 2016).

Es posible conocer la respuesta dinámica ante ciertas demandas sísmicas aplicando criterios de análisis con la instrumentación de edificios. Esto ayuda a conocer la respuesta estructural ante aceleraciones del terreno, y poder detectar los

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

cambios que sufre la estructura al ser sometida a estas excitaciones en la base a partir de sus valores iniciales, y con esos parámetros plantear el grado de daño para posteriormente diseñar y planear estrategias de reforzamiento.

3.1.2 Instrumentación

Con la finalidad de conocer las propiedades y respuesta dinámica de la edificación seleccionada como objeto de estudio, se procedió a instrumentar dos edificios educacionales tipo U-2 pertenecientes al mismo plantel educativo ubicado en la colonia 10 de mayo en el estado de Puebla. Con previa solicitud y autorización de ingreso a las instalaciones de dicha escuela primaria en horario matutino.

Se pudo acceder a la planta de azotea con el uso de escaleras transportables y mediante sogas se pudo elevar el equipo de medición de aceleraciones *Basalt* (figura 3.1.2.2) ubicándolo en el centro geométrico de la losa de azotea y se procedió a la conexión del dispositivo.

Para realizar las lecturas de vibración ambiental se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Orientación del sistema de coordenadas del equipo con el sistema de coordenadas del inmueble.
- 2) Nivelación del equipo mediante tornillerías en la base
- 3) Orientar el equipo al norte geográfico.
- 4) Conectar el equipo a la fuente de portátil de energía.
- 5) Conectar al ordenador portátil el acelerógrafo.
- 6) Conectar al GPS el equipo.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.



Figura. 3.1.2.1. Acelerómetro Basalt.

Posteriormente, se procedió a encender el equipo y realizar la primera lectura durante diez minutos. Este equipo tiene la capacidad de realizar lecturas simultáneas en las tres direcciones ortogonales, norte-sur, este-oeste y verticales.



Figura 3.1.2.2. Primera lectura en centro geométrico de losa.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Las vibraciones por el uso cotidiano del inmueble y las vibraciones del entorno, fueron las registradas por este equipo altamente sensible, es así como las grandes vibraciones generadas por la circulación de grandes vehículos en la zona que provocaron algunos picos y vibraciones intensas perceptibles en la losa, las lecturas se realizaron sin mayor anomalía.

Las grandes vibraciones dan pauta a suponer que el suelo sobre el que se desplantó la construcción es un suelo blando.

Las pruebas se realizaron en tres diferentes puntos del inmueble, el centro geométrico de la azotea, la esquina y en el centro geométrico de la planta baja, como se puede observar en la figura 3.1.2.3.



Figura 3.1.2.3. Lectura en esquina de azotea.

Se registraron las lecturas en las tres direcciones durante 10 minutos de igual manera y consecutivamente se descendió de losa de azotea para realizar la tercera

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

lectura necesaria para obtención de cocientes espectrales. Una vez a nivel de planta baja se colocó el equipo nuevamente en la posición más cercana al centro geométrico del nivel, el coincidió con el arranque de la rampa de escaleras. Se colocó el equipo siguiendo la metodología ya descrita y se tomaron lecturas nuevamente en las tres direcciones. Ver Figura 3.1.2.4.



Figura 3.1.2.4. Lecturas en planta baja.

3.1.3 Cocientes espectrales.

Se completaron los trabajos en campo para los registros de vibración ambiental, para luego descargar los datos en el ordenador y separar las señales en los tres diferentes canales de registro (ch1, ch2 y ch3). Se usa un software especializado para convertir el formato de los datos arrojados por el acelerógrafo a uno que sea compatible con otros programas de cómputo, de esa manera se ingresan los resultados en nuevo formato al software *Geopsy* para procesar las señales obteniendo los espectros de amplitudes de Fourier para cada dirección y para cada punto de lectura en la losa. Ver Figura 3.1.3.1.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

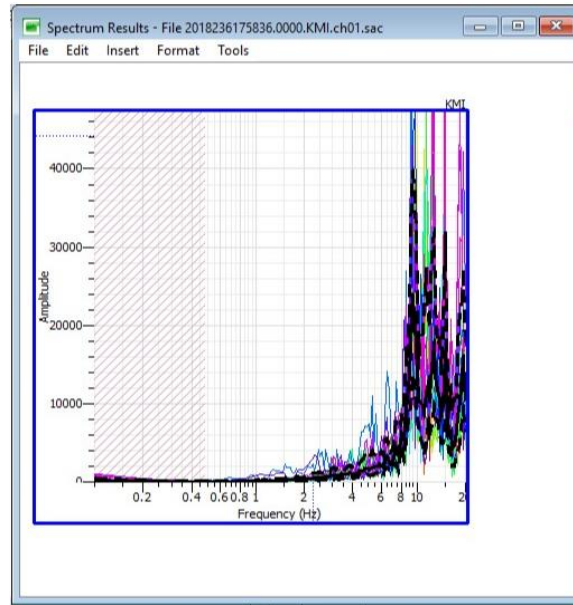


Figura. 3.1.3.1. Espectro de amplitudes de Fourier en dirección vertical.

Para la determinación de los periodos de vibrar del edificio estudiado se aplicó el análisis del dominio de la frecuencia, aplicando la transformada rápida de Fourier. Con el par de espectros de Fourier de mediciones para dos puntos del edificio, se puede determinar una función de transferencia o cociente espectral para estas dos señales. Fue necesario aplicar un filtrado o suavizado para la disminución de incertidumbres.

Como su nombre lo indica, los cocientes espectrales son la división de la lectura del espectro de amplitudes de Fourier en la dirección Norte-Sur de nivel de azotea, entre la lectura del espectro de amplitudes de Fourier para dirección Norte-Sur en planta baja, ambas para la misma frecuencia. Es decir, se dividirá lectura del nivel de azotea entre la lectura de planta baja para misma dirección en el mismo punto de lectura (centro de gravedad). Lo mismo aplica para la dirección Este-Oeste y para la rotación.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

$$FTL = \frac{EAF_{LCGA}}{EAF_{LCGPB}} \quad (3.1.3.1)$$

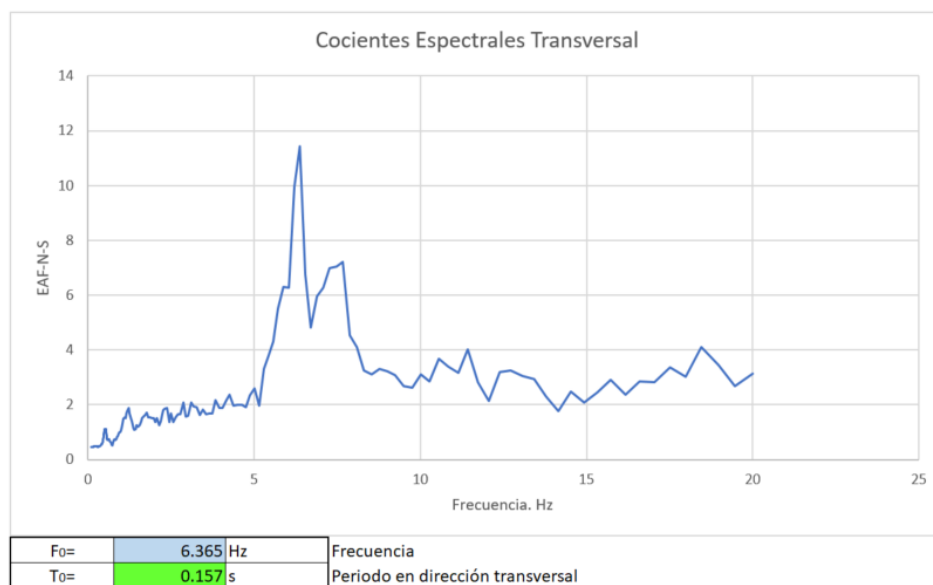


Figura 3.1.3.2. Cociente espectral. Frecuencia y periodo asociado en dirección transversal (N-S)

$$FTT = \frac{EAF_{TCGA}}{EAF_{TCGPB}} \quad (3.1.3.2)$$

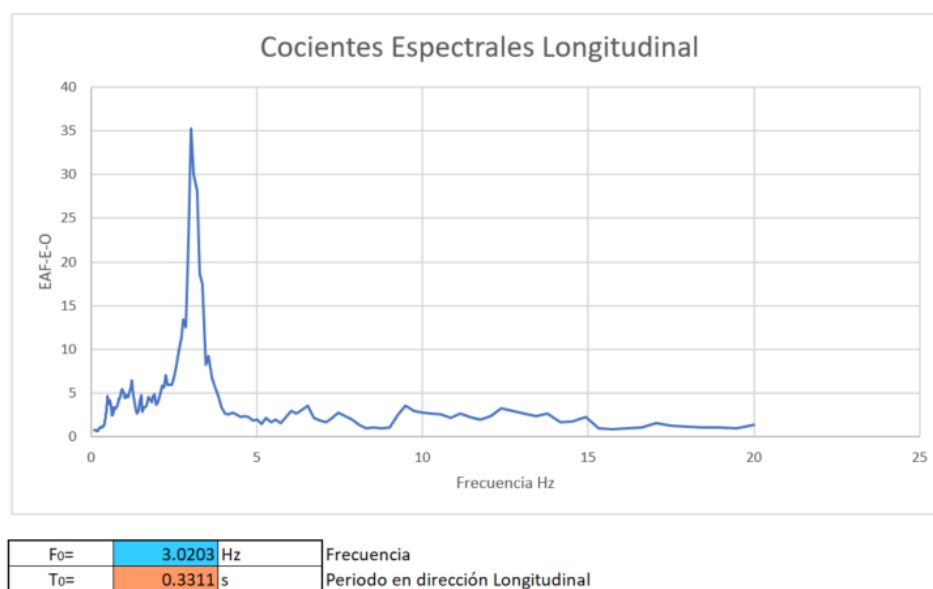


Figura 3.1.3.3. Cociente espectral. Frecuencia y periodo asociado en dirección longitudinal (E-O)

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Las ecuaciones 3.1.3.1 y 3.1.3.2, señalan la manera de calcular los cocientes espectrales para cada dirección, considerando FT_L para el sentido longitudinal y FT_T para el transversal. De manera similar se definen el numerado y el denominador, donde EAF_{LCGA} corresponde al Espectro de Amplitudes de Fourier de la componente longitudinal para el registro obtenido en el centro geométrico de la azotea; el denominador EAF_{LCGPB} corresponde al Espectro de Amplitudes de Fourier de la componente longitudinal para el registro obtenido en el centro geométrico de la planta baja. Análogamente para la dirección transversal se obtuvo EAF_{TCGA} y EAF_{TCGPB} .

Se graficarán para cada dirección la frecuencia vs cociente espectral, y la frecuencia asociada al mayor valor espectral, será la frecuencia natural de la estructura. Con ella se podrá obtener el periodo fundamental de la estructura para cada sentido, calculando el inverso de la frecuencia. Ver Figuras 3.1.3.2 y 3.1.3.3.

Como resultado de este análisis se determinó el periodo fundamental de la estructura en sentido longitudinal con un valor de 0.33 segundos y para la dirección transversal con un valor de 0.157 segundos.

Estos valores obtenidos se utilizarán como punto de partida para la calibración del modelo matemático de la edificación que más adelante se detallará, haciendo mención del intervalo de variación que se permite para cada periodo.

3.2 Descripción de la estructura, modelo U-2

Las estructuras escolares tipo U-2 se caracterizan por ser edificaciones de dos niveles a base de marcos de acero, separados longitudinalmente a trescientos seis

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

centímetros a excepción de la crujía donde se aloja la rampa de escaleras, la cual se encuentra separada a una distancia de 400 centímetros. Cuenta con dos únicos marcos en la dirección longitudinal separados a una distancia de 800 centímetros como se observa en los planos y dependiendo de la demanda arquitectónica, pueden ser de nueve a doce crujías en el sentido transversal. Ver figura 3.2.1.



Figura 3.2.1. Escuela tipo U-2.

Según algunos planos del CPAFCE las distintas variantes de escuelas tipo U-2 radican en la presencia o ausencia de muros de carga de concreto reforzado intercalados de diferente manera en el sentido longitudinal, y la otra variante se presenta en la ubicación del cubo de las escaleras.

Las escuelas construidas por CAPFCE presentan cierta similitud en su distribución y arquitectura, la diferenciación que se puede rápidamente apreciar es en cuanto el material empleado para los marcos resistentes, el número de niveles y la zona sísmica donde son propuestos, base de su clasificación y nomenclatura

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Se encontró que, en la ciudad de Puebla, en la colonia 10 de mayo se encuentra una escuela primaria tipo U-2, la cual fue elegida para realizar este estudio y aplicar ciertas pruebas, a fin de conocer sus propiedades dinámicas. Información sobre el suelo no se obtuvo, por lo que se buscó en la carta geotécnica de la ciudad para conocer el tipo de suelo sobre el cual se desplantó como lo muestra el mapa de la figura 3.2.2.

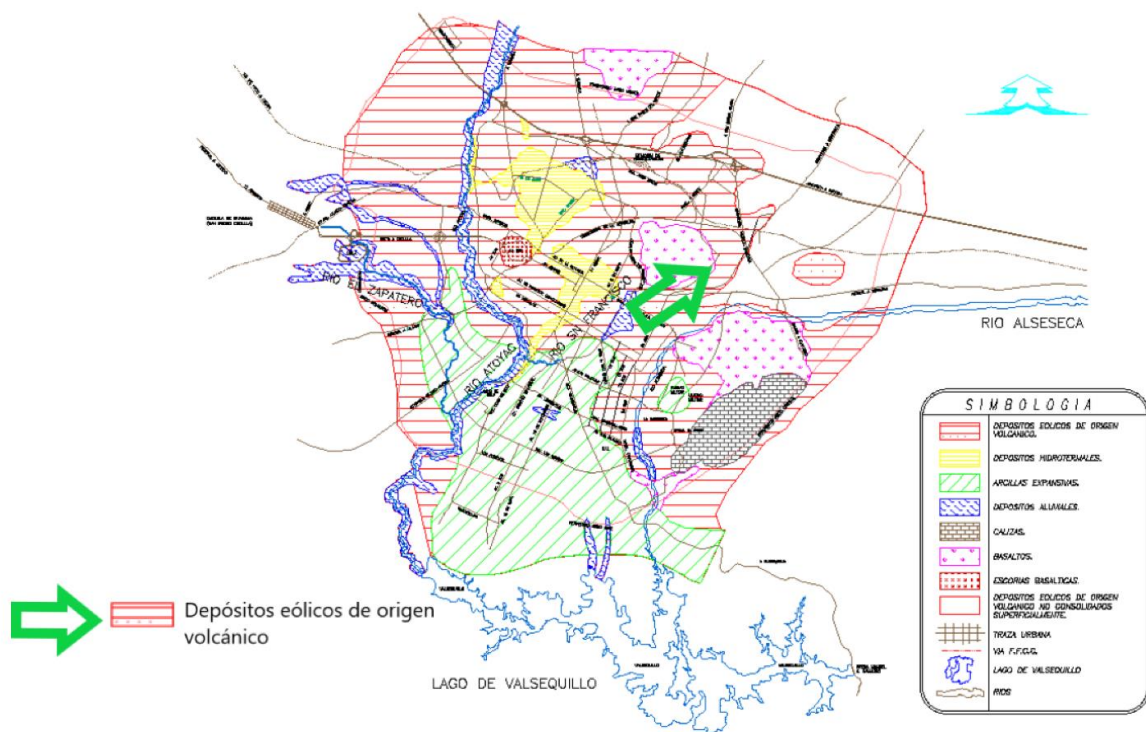


Figura 3.2.2. Mapa de zonificación geotécnica de la ciudad de Puebla. Azomoza et al 1998

El motivo por el cual fue elegida esta edificación fue principalmente por ser de las pocas, dentro del catálogo de CPAFCE, edificada a base de marcos de acero, que no presentó daño aun desplantándose en una zona de alta sismicidad y que alberga a

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

más de trescientos estudiantes menores de edad y algunos con capacidades diferentes.

Observando los planos arquitectónicos se puede leer que la planta baja alberga dos aulas, los baños para niñas y niños y dos oficinas de maestros. En la parte superior se encuentran tres salones y una pequeña sala de juntas. Las oficinas son de menor superficie que los salones ocupando solamente una crujía como delimitación. Los salones, por el contrario, abarcan dos crujías cada uno con un total aproximado de cuarenta y ocho puntos noventa y seis metros cuadrados.

La peculiaridad de este edificio seleccionado, es que los muros extremos (tapa) paralelos al sentido transversal, y los que se alojan delimitando el cubo de las escaleras, son de mampostería de tabique rojo recocido con un ancho de veinticuatro centímetros. Los muros divisorios en el mismo sentido transversal son igual de mampostería de tabique rojo recocido, pero de doce centímetros de espesor.

En el sentido longitudinal se encuentran muros y muretes de mampostería de tabique rojo recocido con un ancho de 12 cm.

La losa de entepiso y azotea son losas macizas de 12.5cm armadas con varillas del número 2 y del número 3 en ambos sentidos y ambos lechos. Cabe mencionar que el espesor de la losa no coincide con lo señalado en los planos proporcionados por el CPAFCE.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

También se observa en los planos que la losa de azotea cuenta con una ligera pendiente a dos aguas y en sitio ya no cuenta con un recubrimiento ligero “entortado” ni cuadrado de barro, únicamente una cubierta de impermeabilizante color terracota.

Las losas se encuentran coladas sobre los perfiles a una altura promedio del nivel de piso de 295 cm. La losa de azotea en la parte media posee la misma altura que la losa de entrepiso, pero en su extremo se leen 288 cm por cuestiones de la pendiente asignada para desalojo pluvial.

En los planos arquitectónicos se puede observar que, en la parte posterior, la losa sobresale 70 cm, y en la parte frontal el pasillo-corredor de unos 225 cm de ancho, de tal manera que las trabes bajo las losas de aulas y pasillo-corredor apoyadas en las columnas, reciben la carga viva y carga muerta de la construcción.

Siguiendo con las características de esta estructura, se detallará a continuación las especificaciones de las secciones transversales de los elementos.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

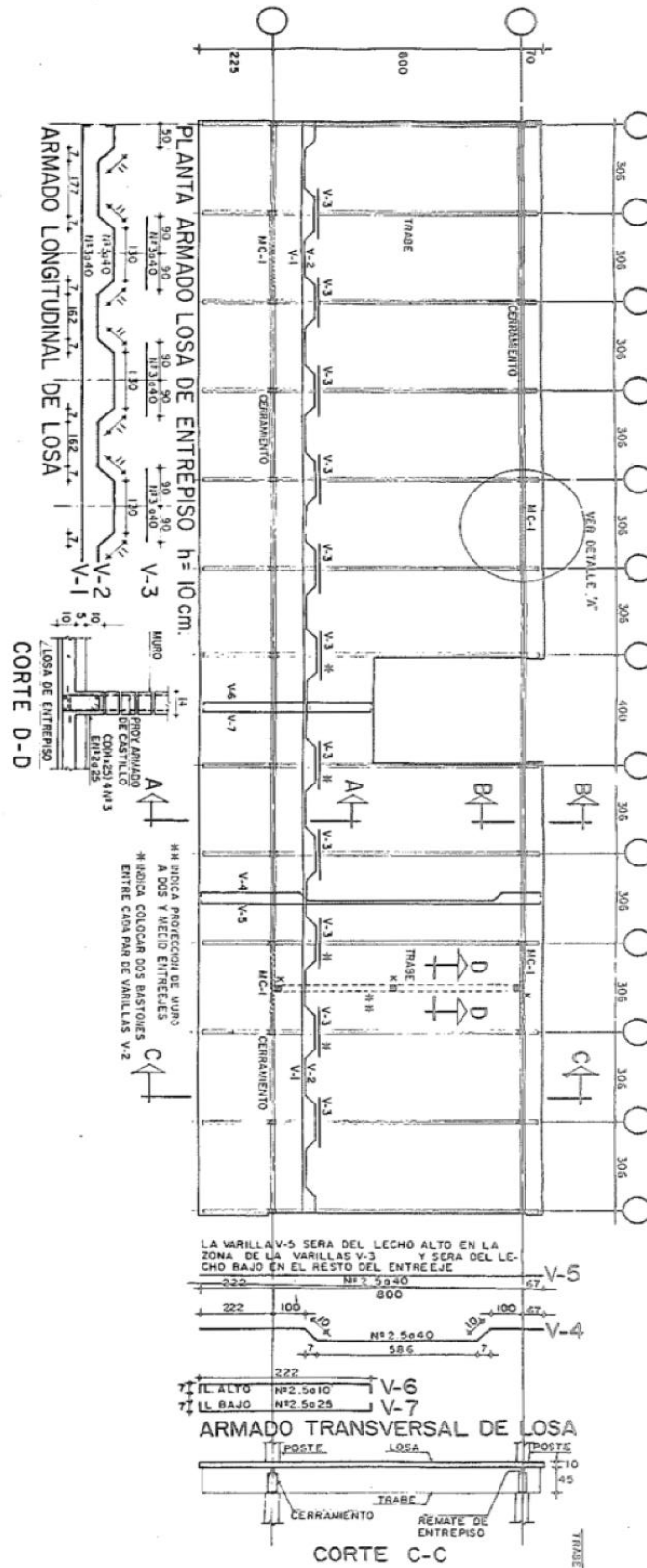


Figura 3.2.4. Planta Losa entrepiso. Armado

3.2.1 Secciones transversales

3.2.1.1 Columnas.

Los elementos estructurales verticales (columnas) presentan una sección transversal compuesta, es decir, no es una sección comercial, está compuesta por otras que se comercializan mayormente y unidas por cordones de soldadura forman la sección transversal cajón. El mismo caso ocurre para los elementos estructurales horizontales.

Para las columnas, se encontró definida la sección transversal como la unión de dos placas de espesor 5/16" de pulgada y longitud de 300 mm unidas por dos placas roladas en forma de canal de espesor de 1/4" de pulgada con sus respectivas especificaciones de soldadura, dando como resultado una sección transversal de 300 mm de largo por 120 mm de espesor asentada en una placa base de 300 mm por 350 mm con espesor de 3/4" de pulgada, anclada a la cimentación por medio de bastones de diámetro de 19 mm con longitud ahogada de 600 mm como se puede ver en la figura 3.2.1.1.1.

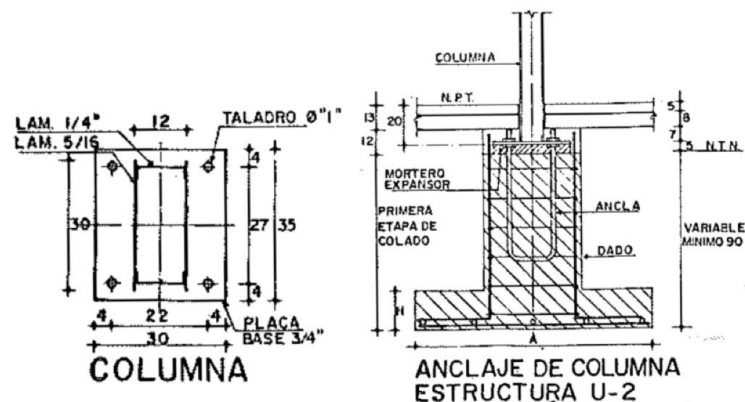


Figura 3.2.1.1.1. Columnas y anclaje a cimentación.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

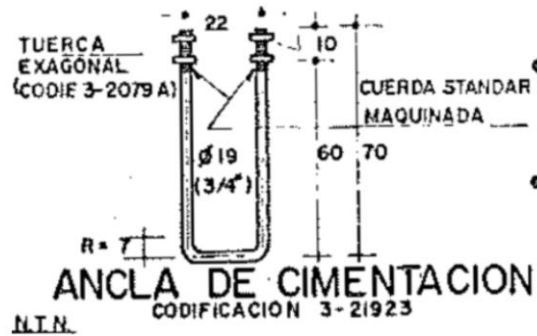


Figura 3.2.1.1.1.2. Anclas de cimentación.

Considerando la antigüedad de las edificaciones y que no se obtuvo mayor respuesta del CAPFCE y del Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa (INIFED), se supuso un acero A36 con valor a la fluencia de 2,530 kg/cm² (36 ksi) y un esfuerzo último de ruptura en tensión de 4,080 kg/cm² a 5,620 kg/cm² (50 a 80 ksi) [Manual de diseño para la construcción con acero AHMSA] para todos los elementos de acero.



Figura. 3.2.1.1.1.3 Columnas de sección transversal compuesta

3.2.1.2 Trabes

En el caso de las secciones transversales de las trabes no se encontró mayor información en planos, más que algunas ilustraciones como en la figura 3.2.1.2.1. Finalmente se hizo visita al sitio y se tomaron las medidas de las secciones tanto de planta baja como de primer nivel, corroborando o proponiendo para algunos de los casos, ya que no se pudieron realizar pruebas destructivas para realizar medidas de espesores, por lo que se propuso únicamente el espesor del canal que es parte de la sección de 6.3mm.

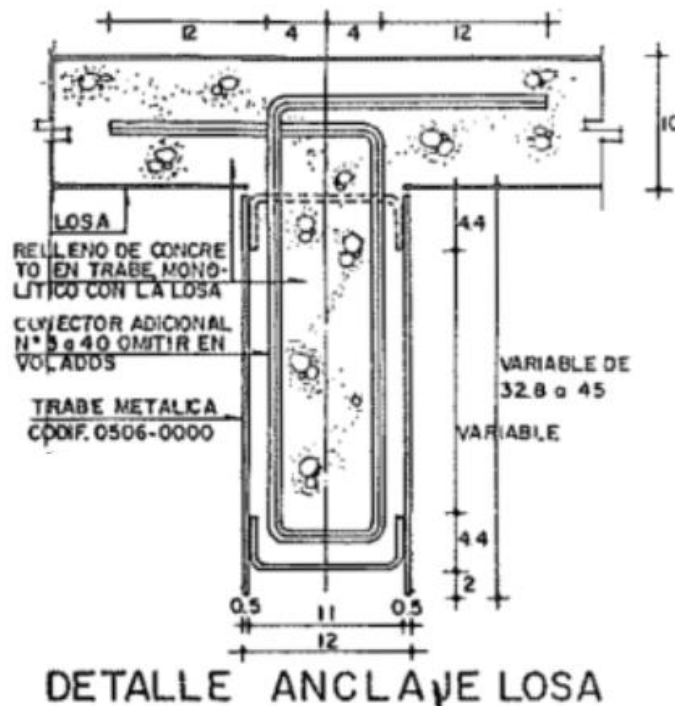


Figura 3.2.1.2.1. Trabes

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.



Figura 3.2.1.2.2 Trabes planta baja

El peralte de las trabes de la planta baja, concuerda con los 45 cm definidos en los planos, pero para las trabes de planta alta, la sección es variable debido a la pendiente existente en la losa. El espesor de la placa se asumió de $\frac{1}{4}$ " de pulgada al igual que los patines que unen las placas; dando como resultado un perfil tipo cajón conformado por dos placas roladas en forma de canal como patines y en el alma, dos placas de igual longitud unidas por cordones de soldadura.

La transmisión de flujo de cortante de la losa a las trabes, se realizó mediante oquedades en las columnas rellenas con concreto de losa, reforzado con un arreglo de varillas de $\frac{3}{8}$ " de pulgada con un dobléz en espiral a cada 40 cm como se muestra en la figura 3.2.1.2.2, permitiendo que el concreto penetre dentro del perfil y se forme una sección "T" al unirse a la losa.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Cabe mencionar que las secciones transversales de las trabes no resultan ser simétricas en ambos ejes por el desfase vertical que presenta el canal en la parte media.

3.2.1.3 Cerramientos.

Son denominados cerramientos a las trabes paralelas al sentido longitudinal. Presentan una sección semi - simétrica con un elemento en el borde superior denominado calza soldado a la sección principal como se muestra en la figura 3.2.1.3.1.

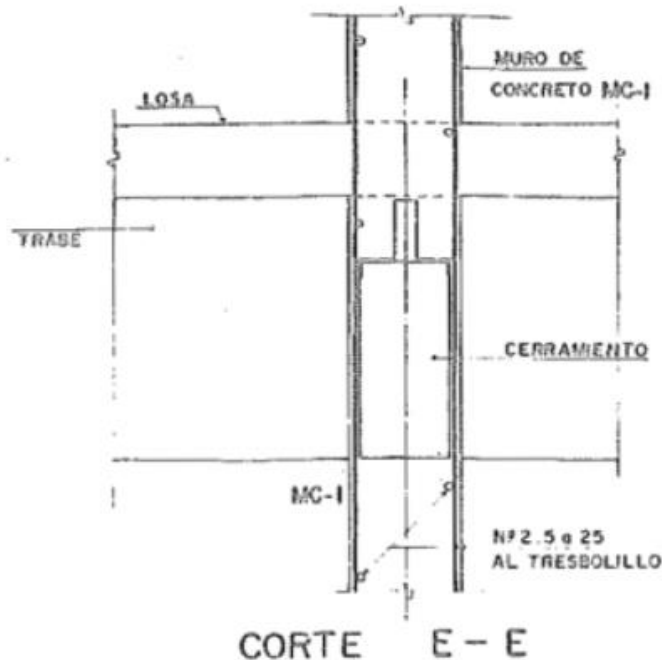


Figura 3.2.1.3.1. Cerramientos

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Se supuso un espesor uniforme para los cerramientos de 3/16 de pulgada (4.7 mm) debido a la falta de información de la sección transversal en los planos estructurales obtenidos, y la observación realizada en sitio ayudó a tomar criterio para tal suposición en el espesor.

3.2.1.4 Conexiones.

Las conexiones entre los elementos verticales y horizontales se realizaron de manera poco convencional. Como se observa en la figura 3.2.1.4.1, las columnas se encuentran orientadas de manera que su rigidez mayor sea normal al marco transversal.

Las traveses cruzan de manera continua por encima de las columnas tanto de entre piso como de azotea. La sección de cajón ininterrumpida de las traveses hace que en las intersecciones con las columnas lleve en su interior placas de 6 mm para su refuerzo.

En su parte superior las columnas cuentan una preparación para llevar a cabo el ensamble con la trabe. Realizado el ensamble de la trabe sobre la columna, se procede a fijar en campo con soldadura de penetración.

Las columnas de la planta alta se insertan en la trabe y se aplica soldadura en campo sobre un candelero acanalado y placas de refuerzo, que en taller se han fabricado y soldados por encima de la tapa del nodo de la trabe en planta alta.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

La configuración del ensamble en la unión trabe columna, genera una conexión a momento en condición de empotramiento.

En la otra dirección, las uniones de cerramientos con columnas-trabes se realizan a través de una abertura en su tapa superior y con dos perforaciones en la placa tapa en su sección transversal que permiten atornillarla en la columna. Logrado el ensamble se aplican cordones de soldadura a un canal tapa cubriendo la abertura de la tapa superior y dándole continuidad al patín superior para transmitir esfuerzos a la columna, terminando con un cordón perimetral de soldadura lo que permite asumir que es una conexión a momento.

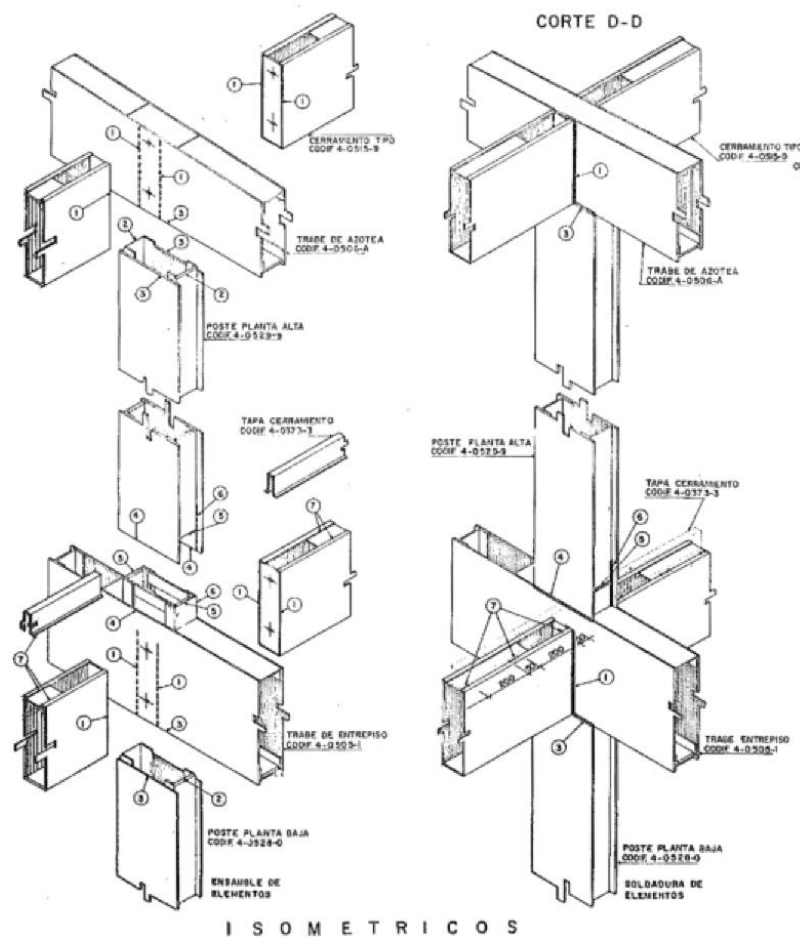


Figura. 3.2.1.4.1 conexión columna-trabe-cerramiento.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Cabe mencionar que no existe separación entre los muros divisorios y los marcos de acero aun existiendo detalles en plano que señalan como separación una placa de poliestireno como lo ilustra la figura 3.2.1.5.2. El modelado y aportación de la rigidez de los muros se verá en capítulos posteriores.

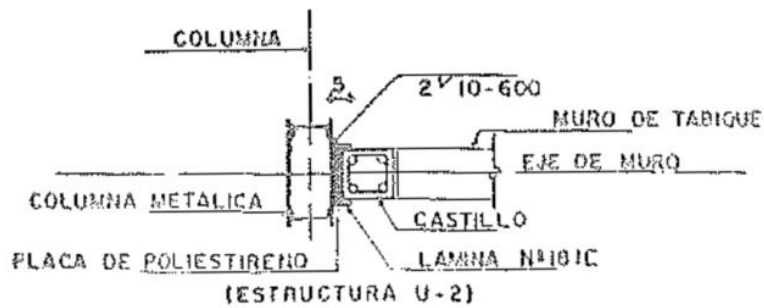


Figura 3.2.1.5.2. Detalles en unión muro-columna propuestos, pero no encontrado en sitio.

3.3 Modelo analítico.

El modelado analítico se realizó con ayuda del software RFEM5.11 de Dlubal, el cual permitió el modelado de los elementos barra y elementos planos (losas y muros) analizándolos por elemento finito y arrojando resultados del análisis dinámico.

El primer modelo permitió definir de una manera más precisa las secciones transversales de los elementos estructurales, así como el cálculo de sus propiedades mecánicas. Se presentan a continuación el modelado de los perfiles para cada caso con la ayuda del programa Shape Thin de Dlubal.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

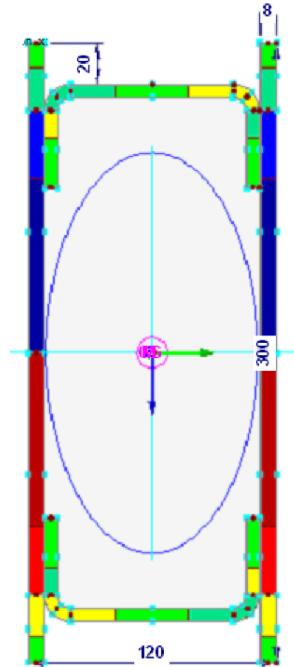


Figura. 3.3.1 Columnas

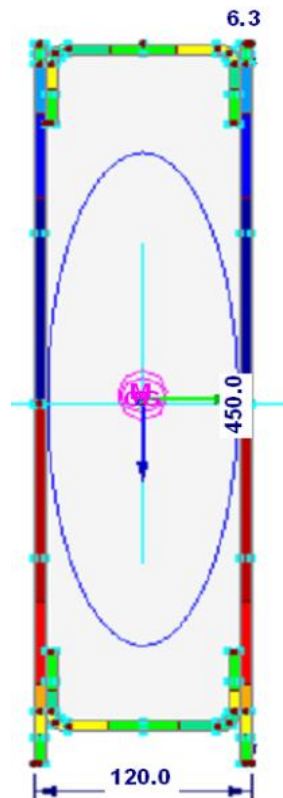


Figura. 3.3.2 Trabes de planta baja.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

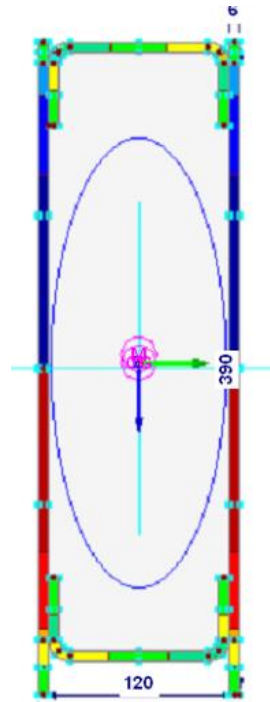


Figura 3.3.3. Trabes planta alta.

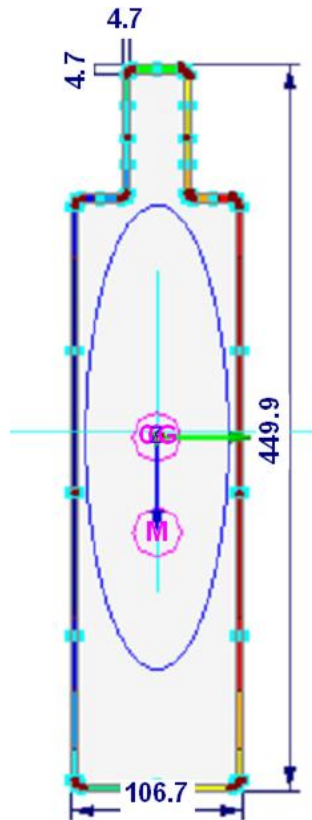


Figura. 3.3.4 Cerramiento

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Al definir las secciones, así como el cálculo de sus propiedades mecánicas, permite hacer más detallado y preciso el modelo analítico, permitiendo acercarse más a lo existente y a su comportamiento dinámico. Para ello se realizó el ensamblado de las secciones transversales de acuerdo a la geometría observada en sitio y cotejada con los planos estructurales proporcionados por CPAFCE, dando como resultado un modelo fiel de la geometría y de los elementos existentes como se puede observar en la figura 3.3.5.

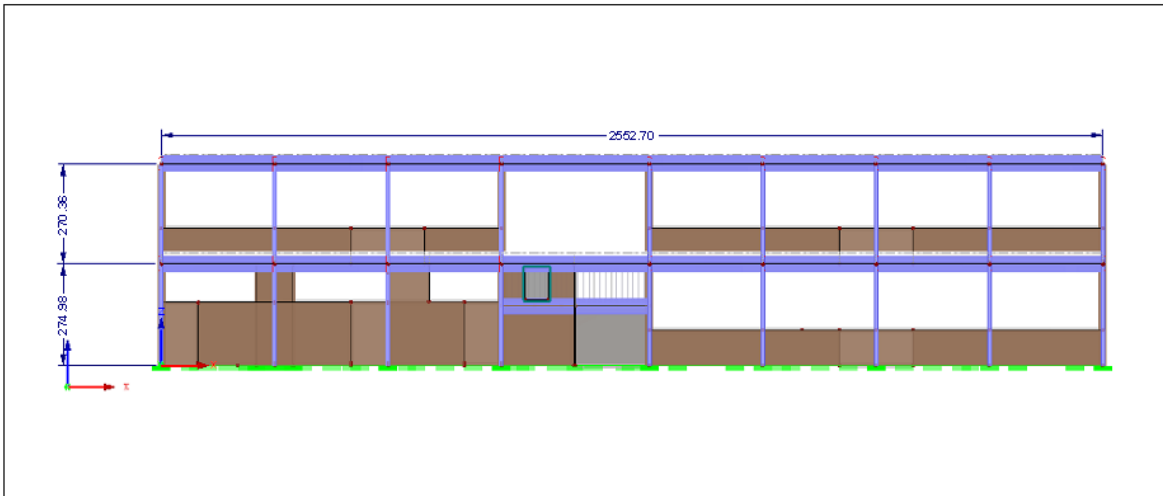


Figura 3.3.5. Vista longitudinal

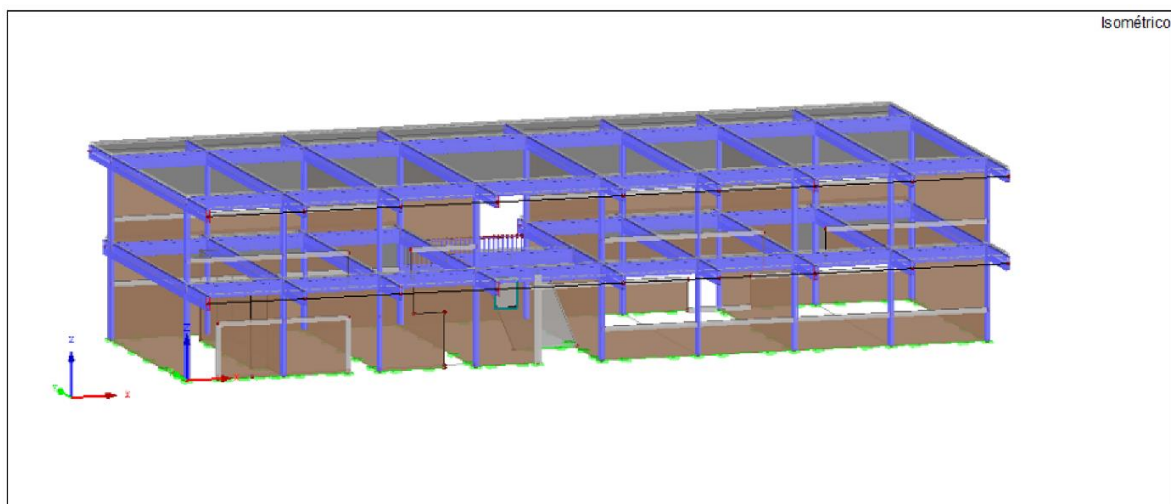


Figura. 3.3.6. Vista isométrica de modelo en software Dlubal.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Se puede reconocer visualmente la similitud en el modelo analítico (figura 3.3.6) y la imagen 3.3.7 que se procuró la reproducción a detalle de la geometría del edificio. Es apreciable que los muros en sentido transversal se encuentran confinados por los marcos en esa dirección, por el contrario, los muretes o antepechos de mampostería en la dirección longitudinal, no aportan rigidez significativa para esa dirección debido a su poca altura, además que su espesor es de 12 cm y los muros tapa de mampostería en la dirección transversal llegan a espesores de 24 cm.



Figura 3.3.7. Vista de fachada frontal.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

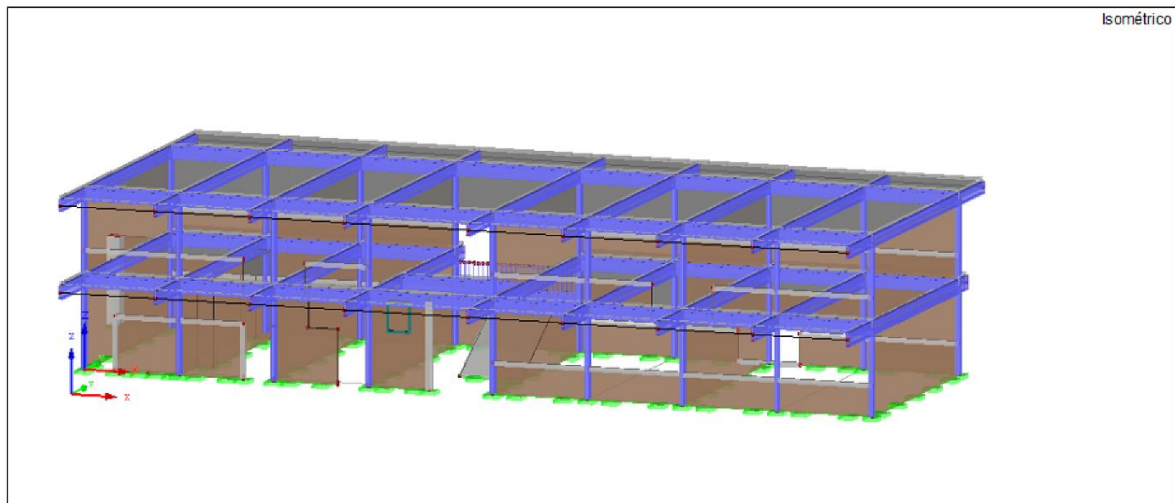


Figura 3.3.8. Vista isométrica del modelo en software Dlubal.

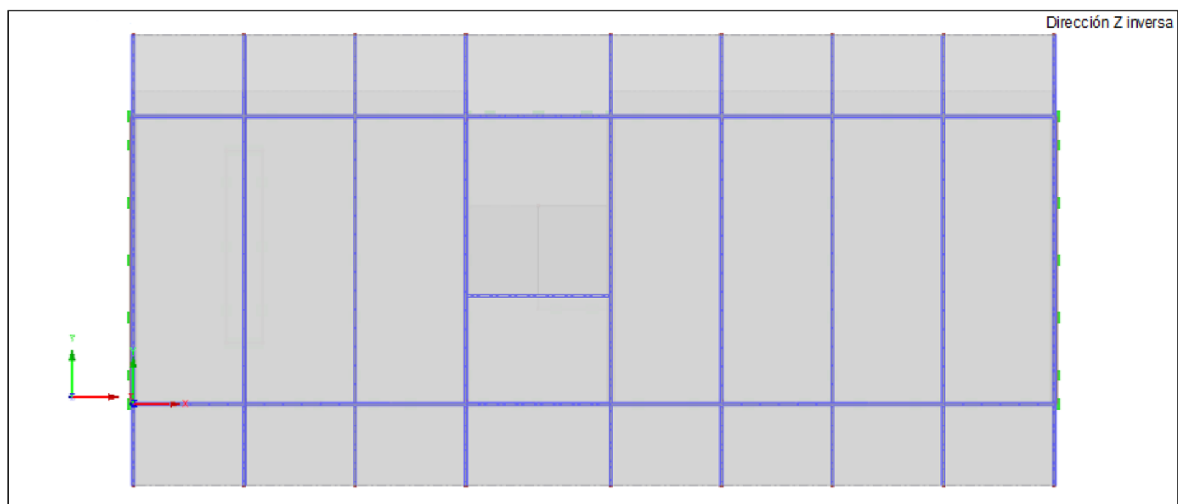


Figura 3.3.9. Vista en planta. Nivel +5.45 m

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

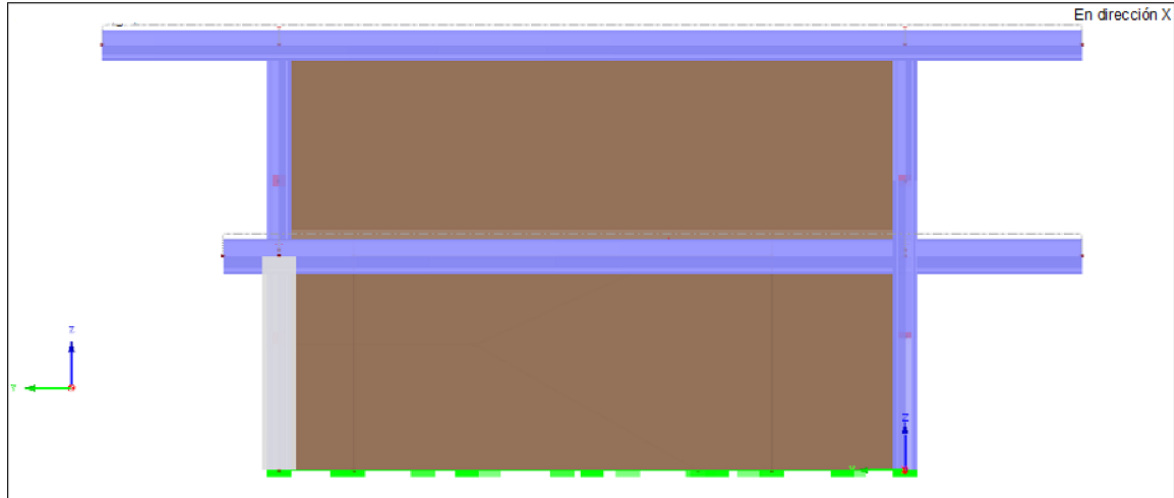


Figura 3.3.10. Vista lateral. Marcos transversales.

Una vez generado el modelo se procedió a realizar un análisis modal para conocer las propiedades dinámicas de la estructura para luego compararlas con los resultados de los cocientes espectrales (periodos y frecuencias fundamentales para cada dirección). La calibración del modelo consistió en modificar el módulo de elasticidad de los muros (E_m) para aproximar propiedades dinámicas de la escuela y poder proceder a realizar un análisis no lineal con un modelo fidedigno a lo existente. Recordando que se parte de un edificio educacional construido desde inicios de la década de los 80's, del cual no se tienen planos "as built", por lo tanto, se está generando un modelo analítico con lo observado en sitio y con la poca información estructural proveniente de algunos planos brindados por el CAPFCE, lo cual genera cierto grado de incertidumbre.

3.3.1 Análisis de cargas gravitacionales

Las cargas gravitacionales se analizaron de acuerdo con los materiales ocupados y observados en la construcción y a la clasificación del tipo de estructura perteneciente al grupo A, por tratarse de una escuela cuya falla o colapso ocasionaría la pérdida de vidas. Tal clasificación aún vigente en los reglamentos de la ciudad de Puebla COREMUN y sus normas técnicas complementarias.

3.3.1.1 Materiales

Los materiales empleados son los siguientes:

- Acero A36 para elementos de los marcos rígidos, (columnas, traveses y cerramientos).

| Núm. | Color | Descripción |
|------|-------|------------------------|
| 3 | | Acero B-254 (ASTM A36) |

| Constantes del material | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Módulo de elasticidad | E: 20000.00 [kN/cm ²] |
| Módulo de cortante | G: 7720.00 [kN/cm ²] |
| Coeficiente de Poisson | ν: 0.295 [-] |
| Peso específico | γ: 78.50 [kN/m ³] |
| Coeficiente de dilatación térmica | α: 1.2000E-05 [1/°C] |
| Coeficiente parcial de seguridad | γ _M : 1.00 [-] |

Figura 3.3.1.1.1. Propiedades de Acero A 36

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

- Concreto $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$ para elementos de cimentación.
- Concreto $f'c= 200 \text{ kg/cm}^2$ para losas y rampa de escaleras.

The screenshot shows a software interface for defining material properties. At the top, there are three tabs: 'Núm.' (Number), 'Color', and 'Descripción' (Description). The 'Núm.' tab is active, showing the value '4'. The 'Color' tab shows a grey color swatch. The 'Descripción' tab shows the text 'Concrete f'c = 20 MPa'. Below these tabs is a section titled 'Constantes del material' (Material Constants) with the following parameters:

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|------------|-----------------------|
| Módulo de elasticidad (E) | 2175.00 | [kN/cm ²] |
| Módulo de cortante (G) | 906.20 | [kN/cm ²] |
| Coefficiente de Poisson (ν) | 0.200 | [-] |
| Peso específico (γ) | 25.00 | [kN/m ³] |
| Coefficiente de dilatación térmica (α) | 1.0000E-05 | [1/°C] |
| Coefficiente parcial de seguridad (γ _M) | 1.00 | [-] |

Figura 3.3.1.1.2. Propiedades de Concreto $f'c=200\text{kg/cm}^2$

- Mampostería de tabique rojo recocido medidas 6x12x24 cm para muros divisorios y antepechos.

The screenshot shows a software interface for defining material properties. At the top, there are three tabs: 'Núm.' (Number), 'Color', and 'Descripción' (Description). The 'Núm.' tab is active, showing the value '1'. The 'Color' tab shows a red color swatch. The 'Descripción' tab shows the text 'Mampostería tabique rojo 6*12*24'. Below these tabs is a section titled 'Constantes del material' (Material Constants) with the following parameters:

| Propiedad | Valor | Unidad |
|---|------------|-----------------------|
| Módulo de elasticidad (E) | 117.72 | [kN/cm ²] |
| Módulo de cortante (G) | 47.09 | [kN/cm ²] |
| Coefficiente de Poisson (ν) | 0.250 | [-] |
| Peso específico (γ) | 15.70 | [kN/m ³] |
| Coefficiente de dilatación térmica (α) | 6.0000E-06 | [1/°C] |
| Coefficiente parcial de seguridad (γ _M) | 1.10 | [-] |

Figura 3.3.1.1.3. Propiedades de muros de mampostería.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Para determinar las propiedades de la mampostería, se siguieron las especificaciones de las Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería del reglamento de construcción de la Ciudad de México (NTC), en su apartado 2.8.5 (Módulo de elasticidad), propone la ecuación 3.3.1.1.1 para la determinación del módulo de elasticidad de muros de mampostería de tabiques de barro sometidas a cargas de corta duración.

$$E_m = 350 f'_m \quad (3.3.1.1.1)$$

Considerando obtener la resistencia a la compresión para mampostería a base de piezas de arcilla señaladas en la tabla 2.8.3 de la misma sección de las NTC- (2017) mampostería, se obtiene el valor de 20 kg/cm² como se observa en la tabla 3.3.1.1.1.

Tabla 3.3.1.1.1. Resistencia a la compresión para diseño de la mampostería de piezas de arcilla, f'_m sobre área bruta. NTC

| f'_p , MPa (kg/cm ²) ¹ | f'_m , MPa (kg/cm ²) | |
|--|---------------------------------------|------------|
| | Mortero I | Mortero II |
| 6 (60) | 2 (20) | 2 (20) |
| 7.5 (75) | 3 (30) | 3 (30) |
| 10 (100) | 4 (40) | 4 (40) |
| 15 (150) | 6 (60) | 6 (60) |
| 20 (200) | 8 (80) | 7 (70) |
| ≥ 30 (300) | 12 (120) | 9 (90) |

Así obtenemos como resultado $E_m = 12,000 \text{ kg/cm}^2$, que transformado a kilo newtons resulta 117.72 kN/cm^2 . Obteniendo el módulo de elasticidad, podemos determinar el módulo de cortante (G) asumiendo un módulo de Poisson $\nu = 0.25$ y calculándolo con la ecuación 3.3.1.1.2.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.3.1.1.2)$$

Obteniendo de esa manera $G=47.09 \text{ kN/cm}^2$ como se muestra en la figura 3.3.1.1.3.

3.3.1.2 Cargas

Las cargas o acciones a considerar que el reglamento establece para revisión o diseño de una estructura son:

Cargas permanentes: Son las que obran de manera continua sobre la estructura y su variación respecto al tiempo es mínima (Carga muerta).

Cargas variables: la intensidad de esta carga varía significativamente con el tiempo (Carga viva).

Cargas accidentales: No se deben al funcionamiento normal de la construcción y alcanzan intensidades considerables por lapsos breves de tiempo (Sismo).

De acuerdo con el reglamento, la seguridad estructural se debe revisar para el caso de combinaciones de acciones que tengan probabilidades de ocurrir de manera simultánea. Para ello se consideran las siguientes combinaciones:

- Combinaciones que consideren acciones permanentes con sus intensidades máximas y acciones variables con sus intensidades máximas.
- Combinación de acciones permanentes, variables y accidentales.

Considerando las acciones variables con su intensidad instantánea.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

3.3.1.2.1 Cargas muertas

Se consideraron como cargas muertas los pesos de todos los elementos constructivos y de los acabados que ocupan una posición permanente en la estructura. En este caso, el peso de la losa y sus acabados, además del peso de los muros definen de manera principal la carga muerta en la estructura.

Tabla.3.3.1.2.1. Cargas muertas

| ELEMENTO | AULAS | AZOTEAS | BAÑOS | PASILLOS |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | kN/M2 | kN/M2 | kN/M2 | kN/M2 |
| Losa maciza h=12.5 cm | 2.88 | 3.12 | 3.84 | 2.88 |
| Armado de losa | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Plafón de yeso | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0 |
| Firme de mortero | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0 |
| Piso | 0 | 0 | 0.4 | 0 |
| Relleno ligero | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Enladrillado | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Impermeabilizante | 0 | 0.1 | 0 | 0 |
| Instalaciones | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0 |
| Sobrecarga de reglamento | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| TOTAL CM | 4.44 | 4.78 | 5.80 | 3.34 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

3.3.1.2.2 Cargas Vivas

Las cargas vivas derivadas del uso y ocupación de las construcciones y que no tienen carácter permanente consideradas son:

Tabla.3.3.1.2.2 Carga viva máxima y viva instantánea.

| TIPO DE CARGA | AULAS | AZOTEAS | BAÑOS | PASILLOS |
|-----------------|-------|---------|-------|----------|
| | kN/M2 | kN/M2 | kN/M2 | kN/M2 |
| CV Máxima | 2.5 | 1 | 2.5 | 3.5 |
| CVa Instantánea | 1.8 | 0.71 | 1.8 | 1.5 |

3.3.1.3 Combinaciones cargas vivas y cargas muertas

De acuerdo con las combinaciones de acciones que indica el Reglamento, se consideran las cargas muertas y vivas con sus valores máximos, y para acciones accidentales se considera la carga muerta máxima y la carga viva con su valor instantáneo.

Tabla 3.3.1.3. Combinaciones de cargas.

| COMBINACIÓN | AULAS | AZOTEAS | BAÑOS | PASILLOS |
|------------------------------------|-------|---------|-------|----------|
| | kN/M2 | kN/M2 | kN/M2 | kN/M2 |
| I. $CM_{\max} + CV_{\max}$ | 6.94 | 5.78 | 8.30 | 6.84 |
| II. $CM_{\max} + CV_{\text{inst}}$ | 6.24 | 5.49 | 7.60 | 4.84 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

3.3.1.4 Cargas por sismo.

La carga sísmica considerada y aplicada en el análisis no lineal, fue la generada por un el sismo del 19 de septiembre del 2017, introduciendo las aceleraciones y el espectro correspondiente de dicho movimiento telúrico en el software para la aplicación del análisis. Se eligió este espectro y no uno sintético, debido al impacto económico, estructural y social que tuvo este sismo el año 2017 y que aún no se ha logrado una recuperación nacional de los daños ocasionados.

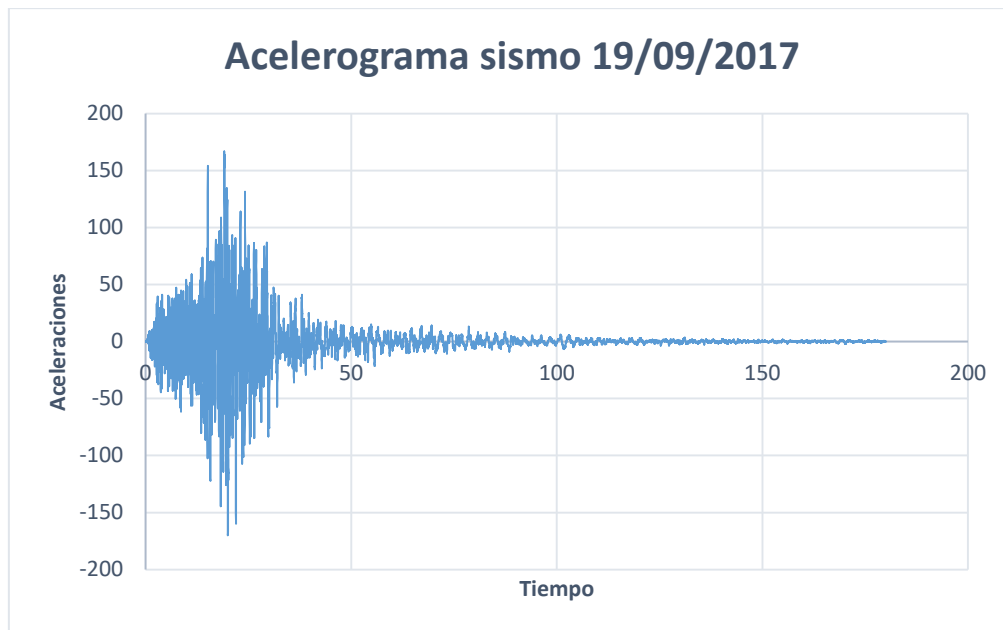


Figura 3.3.1.4. Acelerograma sismo 19/09/2017, obtenido en la estación sísmica del campus central de la UPAEP. Componente longitudinal.

CAPÍTULO 4. CALIBRADO DE MODELO MATEMÁTICO.

Se realizó el modelo analítico con las secciones transversales de los elementos estructurales fielmente como se observó y midió en campo, cotejando con la información en planos. Ya formado el modelo, se llevó a cabo un análisis dinámico modal con ayuda del software RFEM.511 para conocer las propiedades dinámicas del modelo matemático. Los resultados obtenidos previos a la calibración del modelo se pueden leer en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades dinámicas del modelo antes de calibración.

| | Periodo T (s) | Frecuencia Hz |
|--------------|---------------|---------------|
| Transversal | 0.11 | 9.091 |
| Longitudinal | 0.24 | 4.167 |

Para poder igualar los periodos del modelo en ambas direcciones, fue necesario modificar algunas propiedades de los elementos que intervienen en la rigidez y masa del sistema. Se opta por modificar estas propiedades de ciertos elementos como los muros de mampostería, debido a que al no estar separados de los marcos aportan cierta rigidez inicial al sistema lo que modifica la respuesta dinámica del edificio (frecuencia y periodo), por lo tanto, al existir incertidumbre en la fabricación de morteros y piezas, debido al escaso control de calidad en la mano de obra, pueden aceptar modificaciones mínimas en estas propiedades, a fin de llegar a una respuesta similar a la obtenida por un método experimental (vibración ambiental).

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Obteniendo una ligera modificación en las propiedades de la mampostería como se muestra en la figura 4.1, y aplicando un análisis modal de nueva cuenta al sistema, se obtienen los nuevos periodos para cada dirección.

| Núm. | Color | Descripción |
|------|-------|----------------------------------|
| 1 | | Mampostería tabique rojo 6*12*24 |

| Constantes del material | |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Módulo de elasticidad | E : 87.50 [kN/cm ²] |
| Módulo de cortante | G : 35.00 [kN/cm ²] |
| Coefficiente de Poisson | ν : 0.250 [-] |
| Peso específico | γ : 16.00 [kN/m ³] |
| Coefficiente de dilatación térmica | α : 6.0000E-06 [1/°C] |
| Coefficiente parcial de seguridad | γ _M : 1.10 [-] |

Figura 4.1. Propiedades para muros de mampostería espesor 24 cm.

Se acepta como periodos fidedignos a los resultados que no difieran en un 5% de los obtenidos con cocientes espectrales para periodo fundamental. Para periodo de modo dos, se acepta hasta una diferencia de 10 % derivado de la calibración. La tabla 4.2 muestra los resultados de la calibración comparándolos con los obtenidos experimentalmente.

Tabla 4.2. Comparativa entre periodo obtenido experimentalmente y el obtenido de calibración del modelo

| Dirección | Periodo experimental (s) | Periodo calibrado (s) | Diferencia |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|------------|
| Longitudinal | 0.331 | 0.317 | -4.45% |
| Transversal | 0.157 | 0.142 | 9.61% |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

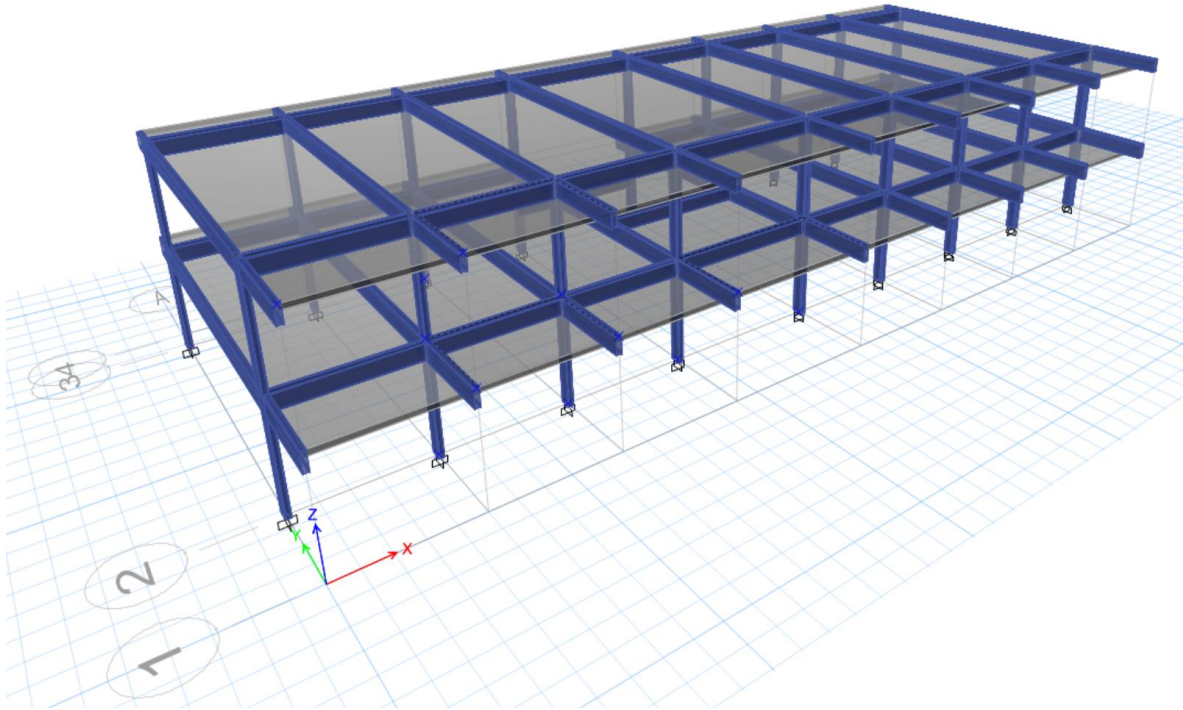
Por lo tanto, podemos considerar como calibrado al modelo que se adecuó para igualar las propiedades dinámicas del edificio construido e instrumentado.

Posteriormente se eliminaron del modelo todos sus muros de mampostería tanto divisorios como antepechos para poder analizar solamente el marco de acero debido a las limitaciones del software empleado para modelar la degradación de muros. Considerando que, ante a la ocurrencia de un evento sísmico de magnitudes considerables, en los primeros ciclos de vibración, los muros aportarán rigidez a los marcos, fallando de manera inmediata y dejando de aportar rigidez al sistema, permitiendo la vibración libre de los marcos de elemento de acero. Por tal razón se puede prescindir de la rigidez de los muros, pero considerando la masa que aportan al sistema.

En consecuencia, se realizó un modelo calibrado utilizando otro software para la aplicación del análisis no lineal, asumiendo que el software a utilizar, ETABS, tiene la capacidad de realizar análisis no lineal en 3D para edificios modelados con marcos de acero, representando los marcos de acero con sus secciones transversales tal cual se ven en la realidad.

Hay que resaltar que se incluyeron las losas de concreto y espesor de 12.5 cm en sus dos niveles, definiéndolas como diafragma flexible para posteriormente aplicar un análisis no lineal, esperando que, con dicha definición en losas, se puedan observar deformaciones.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.



En la figura 4.2 se muestra el modelo matemático en 3D utilizando el software

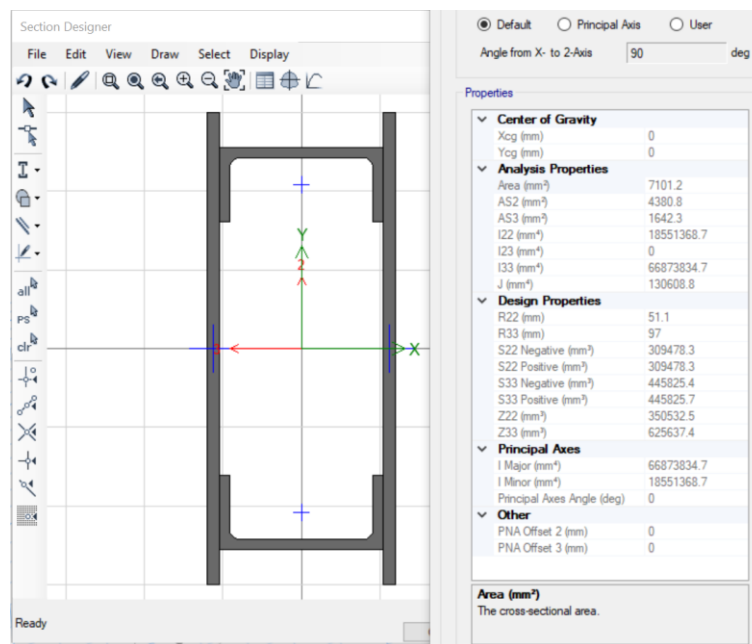


Figura. 4.3 Modelado de columnas.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

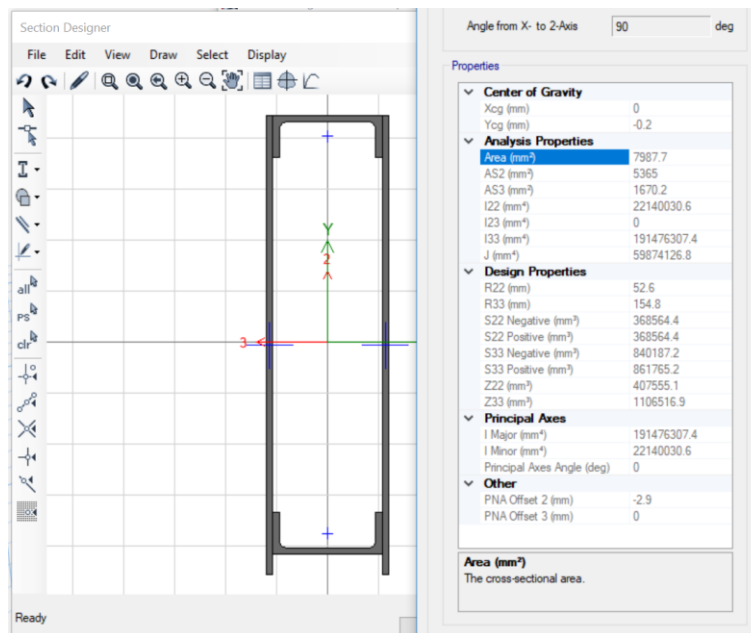


Figura 4.4 Modelado Trabes Planta Baja.

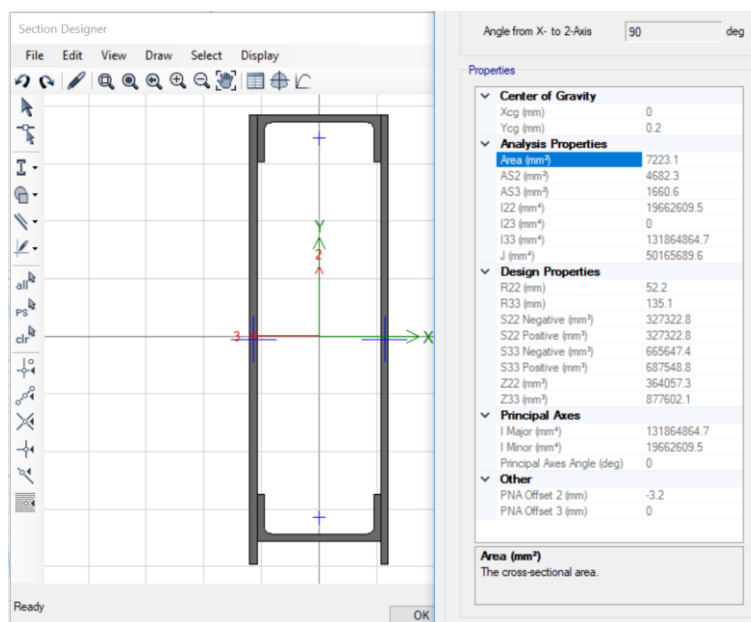


Figura 4.5. Modelado Trabes Planta Alta.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

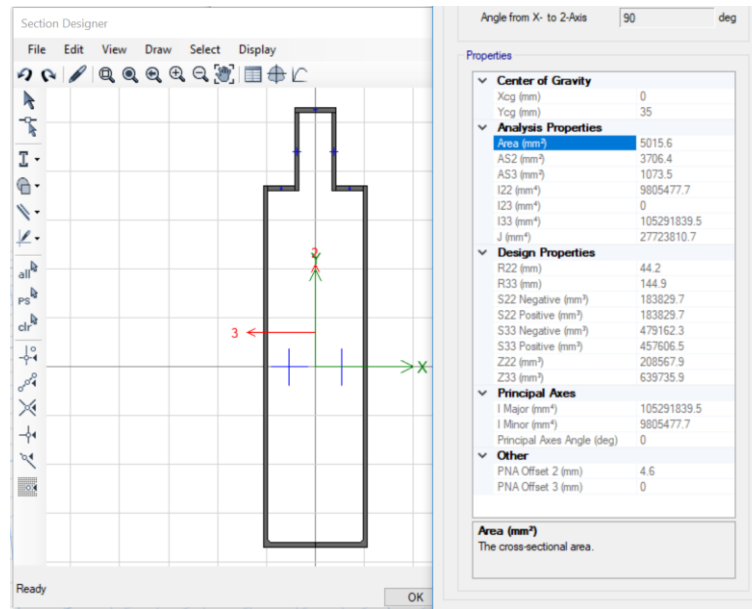


Figura 4.6. Modelado de cerramientos.

En las figuras 4.3 a 4.6 se observa el modelado y las propiedades mecánicas de las secciones transversales empleadas en el modelo 3D, haciendo fiel reproducción de la geometría existente en la escuela objeto de este estudio.

4.1 Propiedades dinámicas de modelo analítico de marcos de acero calibrado.

De igual manera se procede a realizar un análisis modal para determinar los periodos, las formas modales y las frecuencias del modelo calibrado sin muros en ambas direcciones ortogonales, para que más adelante esta información se emplee en el análisis no lineal.

Los datos arrojados por el análisis dinámico se muestran en la siguiente tabla.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Tabla 4.1.1. Propiedades dinámicas de modelo calibrado sin muros.

| Dirección | Periodo (s) | Frecuencia (Hz) |
|--------------|-------------|-----------------|
| Longitudinal | 0.53 | 1.887 |
| Transversal | 0.407 | 2.457 |

4.2 Amortiguamiento

Obteniendo periodos en ambas direcciones es posible adquirir los coeficientes correspondientes a la fracción de amortiguamiento de Rayleigh proporcional a la masa a_0 y el proporcional a la rigidez a_1 con las ecuaciones 4.2.1 y 4.2.2 (Chopra 1999) asumiendo un amortiguamiento (ζ) de 5%.

$$a_0 = 2\zeta_i \omega_i \quad (4.2.1)$$

$$a_1 = \frac{2\zeta_i}{\omega_i} \quad (4.2.2)$$

Aplicando las ecuaciones a los valores obtenidos para la dirección del periodo fundamental, la dirección longitudinal, tenemos:

$$a_0 = 0.1887$$

$$a_1 = 0.0530$$

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Haciendo lo mismo para la dirección transversal, se tiene:

$$a_0 = 0.2457$$

$$a_1 = 0.0407$$

Estos valores son necesarios para determinar la respuesta dinámica del sistema considerando su amortiguamiento para cada dirección. Los coeficientes obtenidos están estrechamente relacionados con la geometría y los materiales de la configuración del modelo, que traducidos se entienden como rigidez y masa.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 General

En este capítulo se presentan los resultados y criterios de acuerdo con el FEMA 356 aplicados al análisis no lineal de la edificación escolar de marcos de acero seleccionada U-2, empezando por una descripción de la determinación del comportamiento plástico de los elementos horizontales y verticales.

Los marcos de acero resistentes a momento son esos marcos tales que desarrollan la resistencia a sismo a través de la flexión de las trabes y columnas, y también la resistencia a momento de sus conexiones. La conexión resistente a momento es aquella designada para desarrollar resistencia a momento en el nodo entre la columna y la viga, y también para desarrollar resistencia a cortante en la zona central del nodo.

El comportamiento de los marcos de acero resistentes a momento depende generalmente de la configuración de la conexión y el detallado. Con ayuda de la tabla 5-4 del FEMA 356 podemos identificar el tipo de conexión existente en la edificación escolar tipo U-2, y determinar el criterio de aceptación del comportamiento asignado. Las conexiones entre los miembros deben ser clasificadas como Completamente Restringida o Parcialmente Restringida.

La clasificación de la conexión de los marcos de las escuelas tipo U-2 expuesta en capítulos anteriores, encaja en la primera categoría expuesta en la Tabla 5-4 del

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

FEMA 356 donde cataloga la conexión tipo *Patín soldado no reforzado* (Welded Unreinforced Flange) como *Completamente Restringido*.

5.2 Modelado de articulaciones plásticas

5.2.1 Articulaciones en trabes y cerramientos

Los esfuerzos de los elementos de acero estructural bajo acción de flexión con una despreciable carga axial presente deberán considerarse bajo “control de deformación”.

El esfuerzo esperado a flexión (expected flexural strength) Q_{CE} deberá ser calculado con la siguiente expresión:

$$Q_{CE} = M_{pCE} = ZF_{ye} \quad (5.2.1.1)$$

Donde:

M_{pCE} = capacidad a momento plástico esperado.

Z = módulo plástico de la sección

F_{ye} = Esfuerzo de fluencia esperado de material

El valor de F_{ye} para el acero A36, material empleado para la construcción de los elementos estructurales para las edificaciones escolares U-2, está dado por el producto del valor del esfuerzo de fluencia F_y de la tabla HH y el factor para obtener el esfuerzo de fluencia esperado de la tabla 5.2.1.1.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Tabla 5.2.1.1. Límite inferior de resistencia para acero predeterminada. FEMA356

| Año | Especificaciones | Observación | Esfuerzo último Fu (ksi) | Esfuerzo de fluencia Fy (ksi) |
|------------|-------------------|-------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1961 -1990 | ASTM, A36/A36M-00 | Estructural | | |
| | Grupo 1 | | 62 | 44 |
| | Grupo 2 | | 59 | 41 |
| | Grupo 3 | | 60 | 39 |
| | Grupo 4 | | 62 | 37 |
| | Grupo 5 | | 70 | 41 |

Tabla 5.2.1.2. Factores para pasar de esfuerzo de límite inferior a Esfuerzo esperado en propiedades de acero. FEMA 356.

| Propiedad | Año | Especificación | Factor |
|---------------------------------|---------------|--|--------|
| Esfuerzo último. Fu | 1961-presente | ASTM A36/A36-00 & Grado Dual, Grupo 1 | 1.05 |
| | | ASTM A36/A36-00 & Grado Dual, Grupo 2 | 1.05 |
| | | ASTM A36/A36-00 & Grado Dual, Grupo 3 | 1.05 |
| | | ASTM A36/A36-00 & Grado Dual, Grupo 4 | 1.05 |
| Esfuerzo de Fluencia. Fy | 1961-presente | ASTM A36/A36-00, Placas Grado Dual, Grupo 1 | 1.05 |
| | | ASTM A36/A36-00 & Grado Dual, Grupo 2 | 1.10 |
| | | ASTM A36/A36-00 & Grado Dual, Grupo 3 | 1.05 |
| | | ASTM A36/A36-00 & Grado Dual, Grupo 4 | 1.05 |

Esto da como resultado un F_{ye} y un F_u para material A36 grupo 4, posterior a 1961 según tablas 5.2.1.1 y 5.2.1.2:

$$F_{ye} = 37 * 1.05 = 38.85 \text{ ksi} = 26.78 \text{ kN/cm}^2$$

$$F_u = 62 * 1.05 = 65.10 \text{ ksi} = 44.88 \text{ kN/cm}^2$$

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

De tal manera el cálculo para determinar el esfuerzo a flexión esperado para las traves de planta baja M_{CE} , queda:

$$M_{pCE} = 1,108.15 * 26.78 = 29,676.25 \text{ kN} - \text{cm}$$

Convirtiendo a Tonf-m:

$$M_{pCE} = \frac{29,676.25 \text{ kN} - \text{cm}}{9.81 * 100} = 30.25 \text{ tonf} - \text{m}$$

Calculando el M_{CE} para traves planta alta y cerramientos de la misma manera se obtiene la siguiente tabla de valores.

Tabla. EE. Tabla de Momento plástico esperado para elementos horizontales.

| Elemento | Zx (cm ³) | F _{ye} (kN/cm ²) | M _{CE} (kN-m) |
|--------------------|--------------------------|--|---------------------------|
| Traves planta baja | 1,108.15 | 26.78 | 30.25 |
| Traves Planta Alta | 878.86 | 26.78 | 23.99 |
| Cerramientos | 642.46 | 26.78 | 17.54 |

Para acciones de flexión en las traves y cerramientos deberá tomarse en cuenta un criterio de control de desplazamientos. La rotación plástica permisible se indica en la tabla 5-6 y 5-7 del documento FEMA 356, donde θ_y debe ser calculado para traves con la ecuación 5.2.1.2

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{6EI_b} \quad (5.2.1.2)$$

Donde:

Z = Módulo plástico de la sección transversal.

F_{ye} = Esfuerzo de fluencia esperado

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

l_b = longitud de la trabe

E = módulo de elasticidad

La tabla 5.2.1.3 muestra en resumen los valores obtenidos para elementos horizontales.

Tabla 5.2.1.3. Resumen de valores para ϑ para cada elemento horizontal.

| Elemento | Zx (cm ³) | F _{ye} (kN/cm ²) | I _c (cm) | E (kN/cm ²) | I _x (cm ⁴) | θ (rad) |
|----------------|--------------------------|--|------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------|
| T. Planta baja | 1,108.15 | 26.78 | 800.0 | 20,000.00 | 19,045.00 | 0.01039 |
| T. Planta alta | 878.86 | 26.78 | 800.0 | 20,000.00 | 13,094.50 | 0.01198 |
| Cerramientos | 642.46 | 26.78 | 306.0 | 20,000.00 | 10,523.90 | 0.00417 |

5.2.2 Articulaciones en columnas

Estas secciones transversales serán usadas para evaluar flexión y esfuerzo axial de elementos de acero estructural que tengan carga axial no despreciable presente. Estas acciones deben ser consideradas con un control de fuerzas.

El esfuerzo de límite inferior, Q_{CL} para columnas de acero bajo compresión axial, deberá ser el de menor cuantía obtenido para el estado límite de pandeo, ya sea para el patín y para el alma. La fuerza efectiva de diseño o la fuerza de límite inferior de compresión axial P_{CL} deberá ser calculado de acuerdo con AISC (1997) *Seismic Provisions* tomando $\phi=1.0$ y usando el esfuerzo de límite inferior, F_{yLB} para fluencia.

La ecuación 5.2.2.1 define el cálculo para P_{CL} :

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

$$P_{CL} = F_{CR} * A_g \quad (5.2.2.1)$$

Teniendo:

$$F_{CR} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (5.2.2.2)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad del material

K = Factor de Longitud Efectiva

L = Longitud del elemento

r = radio de giro = $\sqrt{I/A_g}$

A_g = Área gruesa de la sección transversal.

La fuerza axial en columnas se considera con un criterio de Control de fuerzas, con la compresión de límite inferior P_{CL} , calculada con la ecuación 5.2.2.1. Para nuestro caso de estudio se aplica el otro criterio permitido por FEMA 356 en su capítulo quinto, señalando como criterio al control de desplazamiento cuando la fuerza de flexión de las columnas, con carga axial como objetivo de desplazamiento menor que el 50% de P_{CL} se presente, y permitiendo una demanda máxima rotación plástica en columnas, en radianes, como lo indica la Tabla 5-6 y 5-7, dependiendo de la carga axial presentada en la sección compacta. Calculando la rotación plástica con la ecuación 5.2.2.3:

$$\theta_y = \frac{Z F_{ye} l_c}{6E I_c} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}} \right) \quad (5.2.2.3)$$

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Donde:

Z = Módulo plástico de la sección transversal.

F_{ye} = Esfuerzo de fluencia esperado

l_c = longitud de la columna

E = módulo de elasticidad.

P = Fuerza axial en el miembro para el desplazamiento objetivo

P_{ye} = Fuerza axial de cedencia esperada del elemento = $A_g F_{ye}$

I_c = Inercia de la columna

De esta manera se aplica la ecuación 5.2.2.3 para ambas direcciones ortogonales de la sección transversal obteniendo la tabla 5.2.2.1.

Tabla 5.2.2.1. Cálculo de ángulo de rotación para columnas Planta baja para ambas direcciones según FEMA 356.

| Dirección | Z (cm ³) | F_{ye} (kN/cm ²) | l_c (cm) | E (kN/cm ²) | I (cm ⁴) | F_{cr} | P (kN) | A_g (cm ²) | P_{ye} (kN) | θ (rad) |
|----------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|----------------------------|-------------------------|----------|-----------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| Longitudinal X | 623.73 | 26.78 | 274.98 | 20,000.00 | 1,859.84 | 273.406 | 270.41 | 71.03 | 1,902.24 | 0.01765 |
| Transversal Y | 351.01 | 26.78 | 274.98 | 20,000.00 | 6,673.05 | 500.497 | 270.41 | 71.03 | 1,902.24 | 0.00277 |

Obtenidos los valores de θ_y tanto para elementos verticales como para horizontales, y usando la tabla 5-6 del documento FEMA 356, se pueden obtener los parámetros para la construcción de la gráfica momento-rotación característica de la articulación plástica como lo muestra la figura 5.2.2.1.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

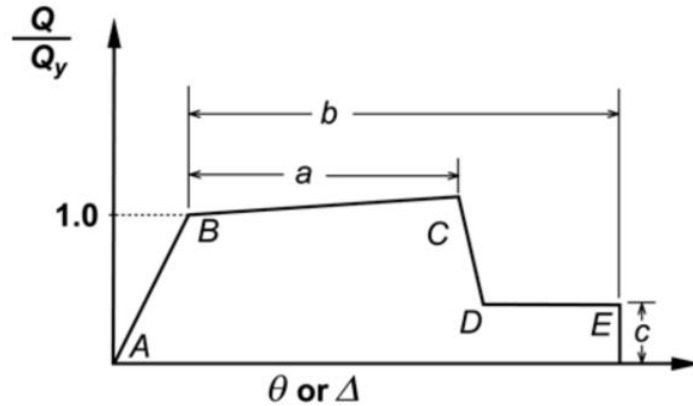


Figura 5.2.2.1. Relación Fuerza-Deformación generalizada para elementos de acero.

Se compara el valor de θ_y del elemento computado anteriormente con las relaciones establecidas $P/P_{CL} < 0.2$ y $0.2 < P/P_{CL} < 0.5$ para elegir el caso que corresponda cuando se trate de las columnas. Para ambos elementos, verticales y horizontales se hará una revisión de la relación de patín y alma, para elegir el caso apropiado a , b ó c , considerando que en el caso c se hará una interpolación lineal para establecer los valores de la curva Momento-Rotación determinante de la articulación plástica según la Tabla 5-6 FEMA 356.

5.2.3 Curva Momento-Rotación para articulaciones plásticas en trabes y cerramientos

Para determinar qué caso de los 3 posibles en la tabla 5-6 de FEMA 356, para vigas a flexión, se realizará la comparativa siguiendo las expresiones propuestas en la misma tabla siguiendo las recomendaciones para secciones en caja

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{y} \quad \frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{para el caso a.}$$

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

$$\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{y} \quad \frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{para el caso } b.$$

Para el caso c, en el que no coincide con el criterio para caso a y b se hará una interpolación con los valores de ambos casos.

Tabla 5.2.3.1. Valores característicos de curva momento-rotación para articulaciones plásticas en elementos horizontales.

| Elemento | Ángulo de rotación plástica. Rad | | Esfuerzo residual c | Criterio de aceptación | | | Caso |
|--------------------|----------------------------------|--------|------------------------|------------------------------|---------|---------|------|
| | a (θy) | b (θy) | | Ángulo de rotación plástica. | | | |
| | | | | IO (θy) | LS (θy) | CP (θy) | |
| Trabes planta baja | 6.5 | 8.5 | 0.4 | 0.625 | 4 | 5.5 | c |
| Trabes planta alta | 6.5 | 8.5 | 0.4 | 0.625 | 4 | 5.5 | c |
| Cerramientos | 6.5 | 8.5 | 0.4 | 0.625 | 4 | 5.5 | c |

Se puede leer en la tabla 5.2.3.1 que, para los tres diferentes tipos de elementos horizontales, los valores se obtuvieron con el caso c, en el cual se realizó una interpolación debido a que no hubo coincidencia con los criterios de patín y alma. Partiendo de las recomendaciones anteriores, se establece una pendiente del 2% entre los puntos B y C de la curva momento-rotación, obteniendo con ello los parámetros necesarios para la construcción de las curvas representativas (momento-rotación) de las articulaciones plásticas, las cuales podemos observar en las figuras 5.2.3.1, 5.2.3.2 y 5.2.3.3.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Displacement Control Parameters

| Point | Moment/SF | Rotation/SF |
|-------|-----------|-------------|
| E- | -0.4 | -8 |
| D- | -0.4 | -6.5 |
| C- | -1.13 | -6.5 |
| B- | -1 | 0 |
| A | 0 | 0 |
| B | 1 | 0 |
| C | 1.13 | 6.5 |
| D | 0.4 | 6.5 |
| E | 0.4 | 8 |

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment Moment SF Positive: 30.25 Negative: 30.25 tonf-m
 Use Yield Rotation Rotation SF Positive: 0.01038 Negative: 0.01038
(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy Positive: 0.625 Negative: -0.625
 Life Safety Positive: 4 Negative: -4
 Collapse Prevention Positive: 5.5 Negative: -5.5

Show Acceptance Criteria on Plot

Figura 5.2.3.1. Parámetros de articulación plástica en Trabes planta baja.

Displacement Control Parameters

| Point | Moment/SF | Rotation/SF |
|-------|-----------|-------------|
| E- | -0.4 | -8 |
| D- | -0.4 | -6.5 |
| C- | -1.13 | -6.5 |
| B- | -1 | 0 |
| A | 0 | 0 |
| B | 1 | 0 |
| C | 1.13 | 6.5 |
| D | 0.4 | 6.5 |
| E | 0.4 | 8 |

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment Moment SF Positive: 23.99 Negative: 23.99 tonf-m
 Use Yield Rotation Rotation SF Positive: 0.01198 Negative: 0.01198
(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy Positive: 0.625 Negative: -0.625
 Life Safety Positive: 4 Negative: -4
 Collapse Prevention Positive: 5.5 Negative: -5.5

Show Acceptance Criteria on Plot

Figura 5.2.3.2. Parámetros de articulación plástica en Trabes planta alta.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

| Point | Moment/SF | Rotation/SF |
|-------|-----------|-------------|
| E- | -0.4 | -8 |
| D- | -0.4 | -6.5 |
| C- | -1.13 | -6.5 |
| B- | -1 | 0 |
| A | 0 | 0 |
| B | 1 | 0 |
| C | 1.13 | 6.5 |
| D | 0.4 | 6.5 |
| E | 0.4 | 8 |

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero
 Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment Moment SF Positive: 17.53 Negative: 17.53 tonf-m
 Use Yield Rotation Rotation SF Positive: 0.004168 Negative: 0.004168
(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Show Acceptance Criteria on Plot

| | Positive | Negative |
|---------------------|----------|----------|
| Immediate Occupancy | 0.625 | -0.625 |
| Life Safety | 4 | -4 |
| Collapse Prevention | 5.5 | -5.5 |

Figura 5.2.3.3. Parámetros de articulación plástica en Cerramientos.

Se observa en todas las curvas de los elementos horizontales la ausencia de una zona elástica, la pendiente del punto A al B como la figura 5.2.2.1. La razón por la cual se discretiza esta zona elástica del comportamiento, es únicamente para obviar la zona lineal y modelar la zona plástica del comportamiento no lineal, de ahí que la ordenada en el origen corresponde a el valor de momento en el cual empieza la deformación plástica. Se añade que todas modelaron considerando un criterio de control de desplazamientos.

5.2.4 Curva Momento-Rotación para articulaciones plásticas en columnas.

De igual manera, para determinar el caso de los 3 posibles en la tabla 5-6 de FEMA 356, para columnas a flexión, se realizará la comparativa siguiendo las expresiones propuestas en la misma tabla siguiendo las recomendaciones para secciones en caja.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

$$\frac{b_f}{t_f} \leq \frac{110}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{y} \quad \frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{para el caso a.}$$

$$\frac{b_f}{t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{y} \quad \frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}} \quad \text{para el caso b.}$$

Para el caso c, en el que no coincide con los criterios para casos a y b se hará una interpolación con los valores de ambos casos.

Para poder ingresar a la tabla 5-6 es necesario calcular previamente la carga P (carga axial actuante) y P_{CL}, para poder determinar una relación entre ambos valores como se señala en capítulos anteriores. Para lo cual se presenta la tabla 5.2.4.1 indicando los valores de P y P_{CL} para cada dirección respectivamente, aplicando las ecuaciones 5.2.2.1 y 5.2.2.2 del apartado anterior.

Tabla 5.2.4.1. Relación P/P_{CL} para ambas direcciones de carga en columnas Planta baja.

| Dirección | P (kN) | F _{cr} | A _g (cm ²) | P _{CL} (kN) | P/P _{CL} | Criterio |
|-----------|-----------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| X | 270.41 | 273.406 | 71.03 | 19,420.62 | 0.014 | P/P _{CL} < 0.2 |
| Y | 270.41 | 500.497 | 71.03 | 35,551.33 | 0.008 | P/P _{CL} < 0.2 |

En la tabla anterior se presenta la relación entre P/P_{CL} necesaria para ingresar a la tabla 5-6 FEMA 356. Una vez determinada esta relación, según el caso se realiza la revisión de patín y alma determinada para cada selección a, b ó c. Generando la siguiente tabla 5.2.4.2 de parámetros para el modelado plástico de la articulación de la columna.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Tabla 5.2.4.2. Valores característicos de curva momento-rotación para articulaciones plásticas en columnas.

| Elemento | Ángulo de rotación plástica. Rad | | Esfuerzo residual c | Criterio de aceptación | | | Caso |
|------------------|----------------------------------|------------------|------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|------|
| | a (θ_y) | b (θ_y) | | Ángulo de rotación plástica. | | | |
| | | | | IO (θ_y) | LS (θ_y) | CP (θ_y) | |
| Transversal (y) | 6.5 | 8.5 | 0.4 | 0.625 | 4 | 5.5 | c |
| Longitudinal (x) | 6.5 | 8.5 | 0.4 | 0.625 | 4 | 5.5 | c |

En la tabla anterior se muestra nuevamente el criterio elegido en acorde a las características de la sección transversal de la columna es la opción c. Lo anterior permite que se pueda modelar la curva momento-rotación característica de la articulación plástica de las columnas para planta baja, siendo estas las que presentan las condiciones más desfavorables en comparación con las de la planta alta, ya que presentan una carga axial de magnitud mayor y una longitud más grande.

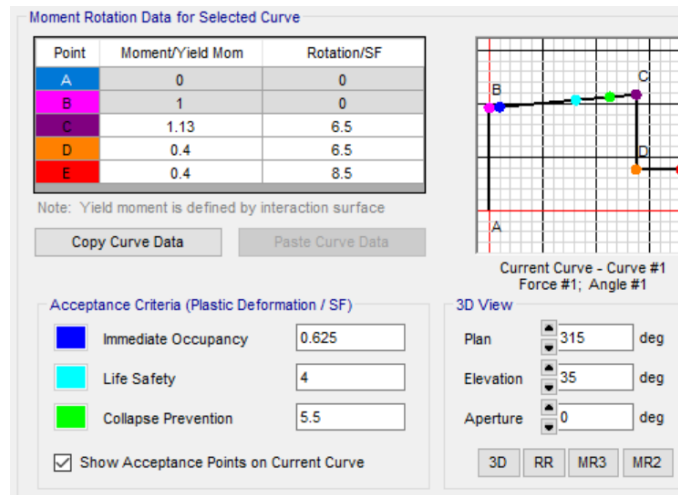


Figura. 5.2.4.1 Parámetros de articulación plástica en columnas.

5.3 Análisis Pushover.

Una vez determinados los límites del comportamiento plástico de las secciones transversales, se procede a asignar dicho comportamiento a las distancias específicas en los elementos. En este caso de estudio las rótulas plásticas se asignaron a una distancia del 5% de la longitud de los elementos, con eso se pretende simular la aparición de las articulaciones a una distancia aproximada de un peralte de sección tanto en el inicio como en el extremo final del elemento.

Se aplica un análisis estático de segundo orden al modelo matemático del edificio tipo U-2 en cada dirección ortogonal para determinar la curva de capacidad “*Pushover*” de la estructura, en la cual podemos determinar la rigidez, en la zona elástica, la rigidez inicial (k_0), el desplazamiento al momento de presentarse la fluencia (Δ_y), el desplazamiento necesario para generar la falla del sistema (Δ_f), la resistencia de la estructura (V) y la ductilidad (μ). Todo lo anteriormente mencionado se puede obtener de la curva de capacidad para cada dirección ortogonal del edificio educacional.

Se presentan en las siguientes figuras y tablas, las curvas “*Pushover*” para cada sentido (longitudinal y transversal) así como sus valores característicos mencionados en este apartado.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

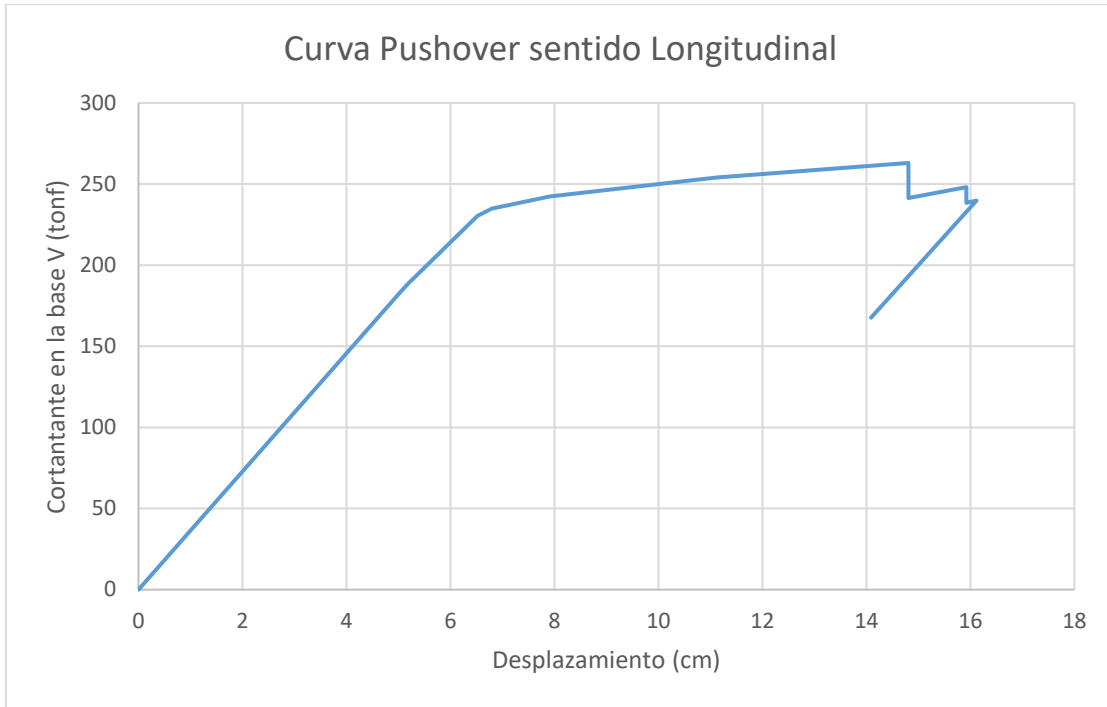


Figura 5.3.1. Curva Pushover sentido Longitudinal.

Tabla 5.3.1. Valores característicos de curva de capacidad Pushover sentido Longitudinal.

| Propiedad | Valor | Unidad |
|------------------|--------------|---------------|
| k_0 | 35.354 | tonf-cm |
| Δ_y | 6.51 | cm |
| Δ_f | 14.81 | cm |
| V | 263.03 | tonf |
| μ | 2.275 | - |

En la figura 5.3.1 se muestra la curva de capacidad en sentido longitudinal, en la cual se observa una resistencia (V) del sistema de 263.03 tonf; una zona elástica cuya pendiente indica la rigidez inicial (k_0) del sistema antes de incurrir en la zona plástica. La relación entre desplazamiento cedente (Δ_y) y desplazamiento último (Δ_f), nos permite conocer la ductilidad del sistema en esta dirección de 2.27.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

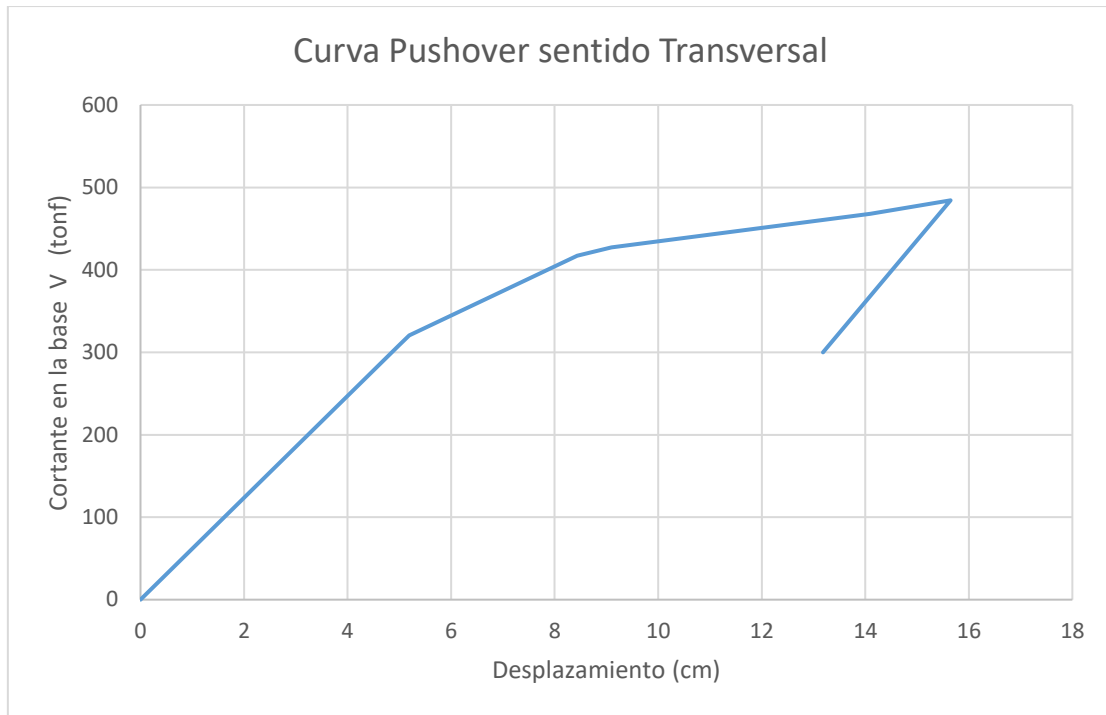


Figura 5.3.2. Curva Pushover sentido Transversal.

Tabla 5.3.2. Valores característicos de curva de capacidad Pushover sentido Transversal.

| Propiedad | Valor | Unidad |
|------------|--------|---------|
| k_0 | 61.74 | tonf-cm |
| Δ_y | 5 | cm |
| Δ_f | 15.64 | cm |
| V | 484.34 | tonf |
| μ | 3.128 | - |

Para la misma curva, pero en dirección perpendicular a la longitudinal, se puede observar en la figura 5.3.2 que la resistencia máxima del sistema está dada por el máximo cortante basal (V) aplicado de 484.34 tonf; la rigidez inicial (k_0) de la estructura es mucho mayor que las del sentido longitudinal quizá debido a la orientación de las columnas para ese sentido estrechamente relacionado con su segundo momento de

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

inercia. Para la ductilidad se observa un factor de 3.12, que resulta mayor para la dirección transversal que para la longitudinal.

La figura 5.3.4 muestra el inicio de la formación de las articulaciones plásticas en elementos verticales en dirección longitudinal, al aplicar las fuerzas laterales monotónicas del análisis Pushover. Posteriormente al aumento de la magnitud de estas fuerzas, se desarrolla por completo el mecanismo de falla de la estructura como lo muestra la figura 5.3.5 para la dirección longitudinal, lo que ocasiona el colapso del sistema.

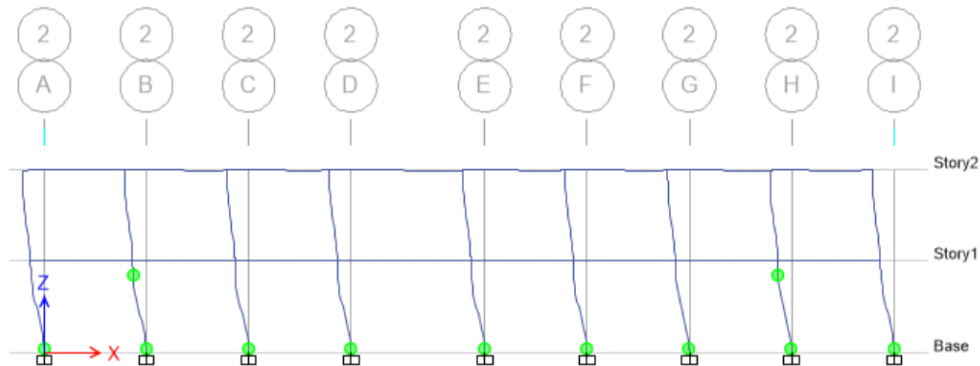


Figura 5.3.4. Inicio de formación de articulaciones plásticas en dirección longitudinal.

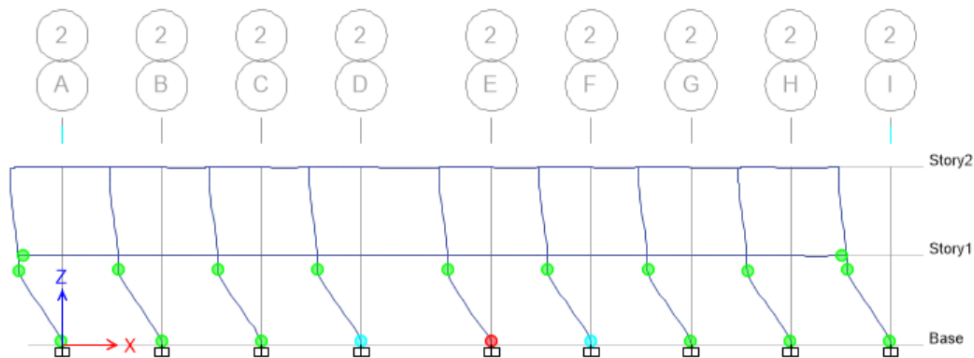


Figura 5.3.5. Formación de mecanismo de colapso en dirección longitudinal.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Análogamente, para la dirección de análisis transversal Pushover la figura 5.3.6 muestra el inicio de la fluencia en elementos del sistema y la figura 5.3.7 indica la formación del mecanismo de colapso para esta dirección de análisis.

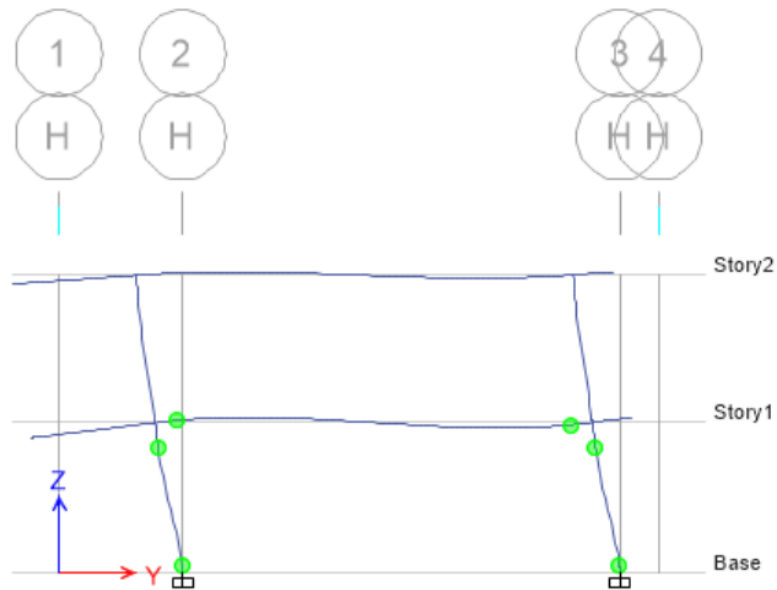


Figura 5.3.6. Inicio de formación de articulaciones plásticas en dirección transversal.

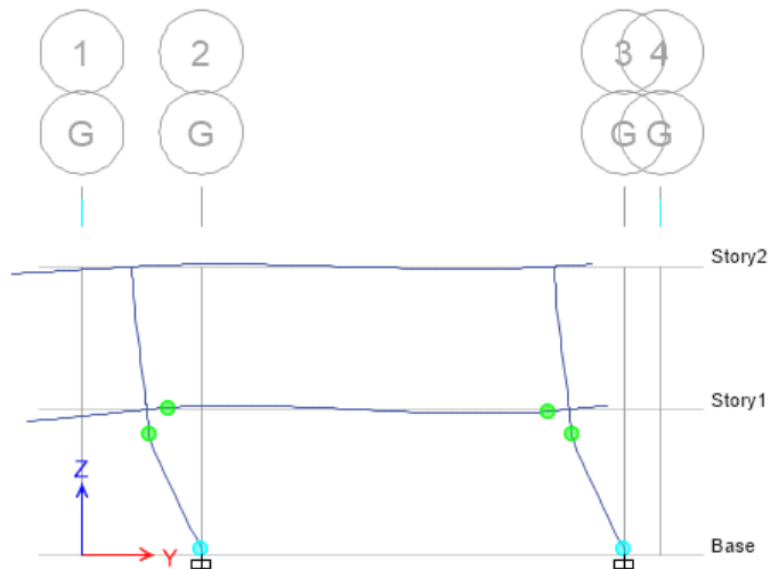


Figura 5.3.7. Inicio de formación de articulaciones plásticas en dirección transversal.

5.4 Análisis Paso a Paso.

El análisis no lineal paso a paso, generado por simulación de la excitación en la base de un sistema, con un sismo sintético o un registro de alguno ocurrido, y posteriormente escalado por diferentes factores, genera una curva histerética para cada factor de amplificación en la cual se destaca la relación entre el desplazamiento en la azotea con el cortante en la base. En él se puede observar la degradación de la rigidez y resistencia conforme va transcurriendo el tiempo. Con esto se puede determinar la rigidez en la zona plástica. Otro dato importante que podemos obtener de esta curva es la distorsión máxima que, al emplear una ecuación de daño en función de la distorsión o el desplazamiento, se observará el deterioro del sistema.

Debido a los recientes sucesos telúricos en nuestro país y los perjuicios generados por ellos, se elige el sismo del 19 de septiembre del año 2017 como registro sísmico aplicado en el análisis no lineal para el edificio U-2 objeto de este estudio. En la figura 3.3.1.4 se observa el registro de aceleraciones en la ciudad de Puebla para este evento telúrico.

Esta aceleración es aplicada en la base para cada dirección de análisis con un factor de escala asociado que posteriormente se irá incrementando. En la figura 5.4.1 se plasma la curva histerética correspondiente a una aceleración en la base del sistema para la dirección longitudinal con un factor de escala igual a 1.

De igual manera se presenta la figura 5.4.2 con un factor de escala (F.E.) igual a 1 para la curva histerética Paso a Paso para dirección Transversal.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

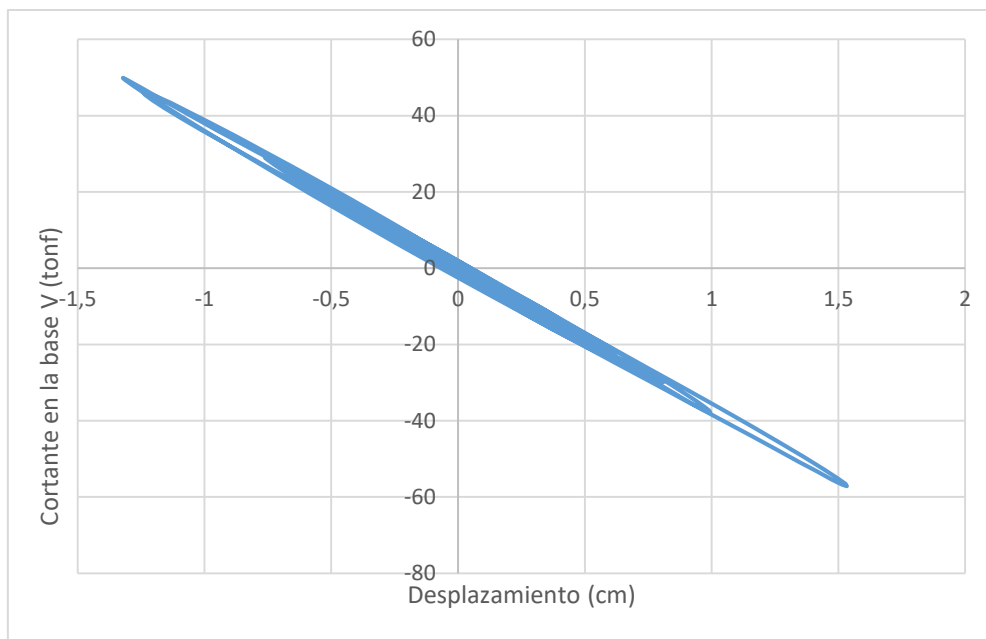


Figura 5.4.1. Curva histerética dirección Longitudinal. F.E. =1

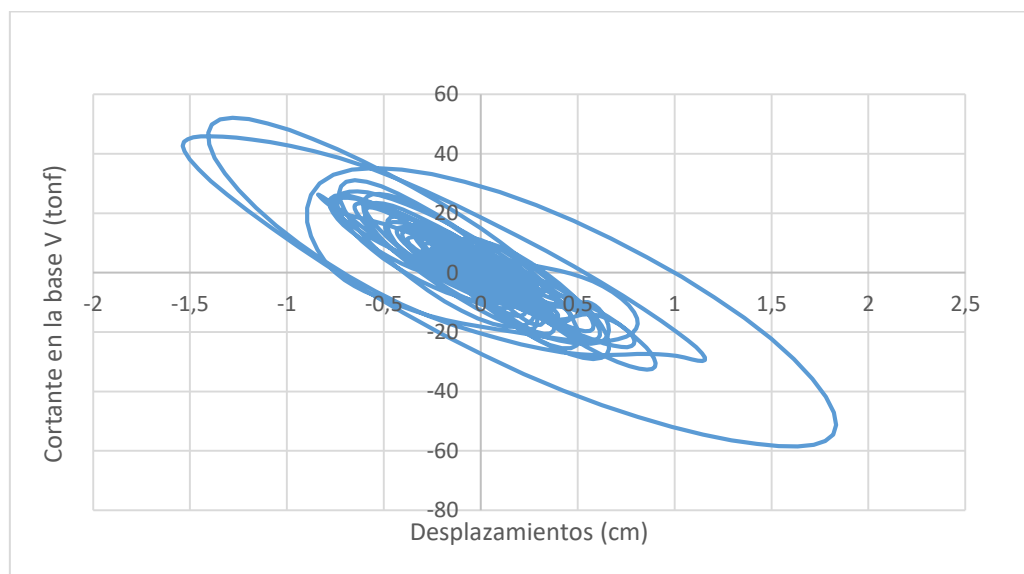


Figura 5.4.2. Curva histerética dirección Transversal. F.E. =1

Aplicando el mismo procedimiento 17 veces más, con diferentes factores de escala comprendidos entre 1 y 11, para ambas direcciones tomando lecturas de

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

desplazamiento y cortante basal máximo en el nodo 17 de la planta alta, se obtienen las siguientes tablas 5.4.1 y 5.4.2.

Tabla 5.4.1. Valores máximos de desplazamiento para cada F.E. en dirección longitudinal. Planta alta.

| Dirección | | Longitudinal | |
|-----------|-------------|--------------|--|
| F.E. | Δ cm | V tonf | |
| 1 | 1.53 | 57.129 | |
| 1.5 | 2.3 | 85.69 | |
| 2 | 3.06 | 114.25 | |
| 2.5 | 3.83 | 142.82 | |
| 3 | 4.6 | 171.38 | |
| 3.5 | 5.36 | 199.95 | |
| 4 | 6.13 | 228.5 | |
| 4.5 | 6.89 | 257.084 | |
| 5 | 7.647 | 285.27 | |
| 6 | 9.12 | 341.2 | |
| 6.5 | 9.86 | 369.22 | |
| 7.5 | 11.35 | 425.73 | |
| 8 | 12.1 | 454.08 | |
| 8.5 | 12.84 | 482.42 | |
| 9 | 13.59 | 510.75 | |
| 10 | 15.08 | 567.32 | |
| 11 | 16.58 | 623.8 | |

Tabla 5.4.2. Valores máximos de desplazamiento para cada F.E. en dirección transversal. Planta alta.

| Dirección | | Transversal | |
|-----------|-------------|-------------|--|
| F.E. | Δ cm | V tonf | |
| 1 | 1.63 | 58.46 | |
| 1.5 | 2.45 | 87.69 | |
| 2 | 3.27 | 116.93 | |
| 2.5 | 4.08 | 146.16 | |
| 3 | 4.9 | 175.4 | |
| 3.5 | 5.71 | 204.61 | |
| 4 | 6.51 | 233.78 | |
| 4.5 | 7.28 | 263.25 | |
| 5 | 8.055 | 293.15 | |
| 6 | 9.58 | 353.89 | |
| 6.5 | 10.35 | 384.42 | |
| 7.5 | 11.87 | 445.53 | |
| 8 | 12.628 | 476.038 | |
| 8.5 | 13.38 | 506.61 | |
| 9 | 14.138 | 537.22 | |
| 10 | 15.65 | 598.53 | |
| 11 | 17.166 | 659.91 | |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

El mismo análisis proporciona tanto desplazamientos como distorsiones de entrepiso para cada nivel y cada dirección de análisis. Las distorsiones presentes en el análisis para cada factor de escala se pueden apreciar en las tablas 5.4.3 y 5.4.4.

Tabla 5.4.3. Distorsiones planta baja.

| Nivel: Planta baja. | | |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| F.E. | Distorsión Longitudinal | Distorsión Transversal |
| 1 | 0.003647 | 0.002277 |
| 1.5 | 0.005471 | 0.003415 |
| 2 | 0.007294 | 0.004553 |
| 2.5 | 0.009118 | 0.005692 |
| 3 | 0.010942 | 0.00683 |
| 3.5 | 0.012766 | 0.007969 |
| 4 | 0.014587 | 0.009099 |
| 4.5 | 0.016411 | 0.010245 |
| 5 | 0.018207 | 0.011398 |
| 6 | 0.021768 | 0.013716 |
| 6.5 | 0.023551 | 0.01488 |
| 7.5 | 0.027145 | 0.017215 |
| 8 | 0.028948 | 0.018385 |
| 8.5 | 0.030751 | 0.019557 |
| 9 | 0.032553 | 0.020726 |
| 10 | 0.036151 | 0.023075 |
| 11 | 0.039744 | 0.025438 |

Tabla 5.4.4. Distorsiones planta alta.

| Nivel: Planta alta. | | |
|---------------------|----------------------------|---------------------------|
| FE. | Distorsión Longitudinal | Distorsión Transversal |
| 1 | 0.002512 | 0.00211 |
| 1.5 | 0.003768 | 0.003164 |
| 2 | 0.005024 | 0.004219 |
| 2.5 | 0.006279 | 0.005274 |
| 3 | 0.007535 | 0.006329 |
| 3.5 | 0.008791 | 0.007373 |
| 4 | 0.010042 | 0.008398 |
| 4.5 | 0.011282 | 0.009414 |
| 5 | 0.012491 | 0.010435 |
| 6 | 0.014865 | 0.012484 |
| 6.5 | 0.016042 | 0.013518 |
| 7.5 | 0.018421 | 0.015602 |
| 8 | 0.019618 | 0.016654 |
| 8.5 | 0.020813 | 0.017711 |
| 9 | 0.022013 | 0.01877 |
| 10 | 0.024423 | 0.020901 |
| 11 | 0.026872 | 0.023056 |

5.5 Función de Daño.

Se tiene entendido que el nivel de respuesta del sistema determina el daño estructural (y no estructural también), el primero asociado a una intensidad sísmica determinado. De esta forma se deben considerar planteamientos que estén ligados directamente con la respuesta estructural y la intensidad asociada. En la práctica del diseño sismorresistente se han buscado sistemas estructurales que permitan la reducción de la respuesta estructural y el buen comportamiento sísmico (Ismael et al,2003).

Cuantitativamente, el daño se puede expresar como un concepto físico, descrito por medidas adecuadas de las respuestas estructurales, tanto locales como globales. Ejemplos de estos indicadores son los valores máximos de las distorsiones de entrepiso, o de las rotaciones locales en los extremos de los elementos sujetos a flexión.

En este trabajo, se plantea una función de daño expresada en términos de la distorsión angular que se presenta en los diversos sub-arreglos. Para describir la función de daño en el sistema, se emplea la Ecuación 5.5.1 (Esteva et al, 2002a).

$$d(u) = 1 - \exp(-au^m) \quad (5.5.1)$$

En esta ecuación, a y m son parámetros que se determinan mediante un sistema de ecuaciones estableciendo las condiciones de frontera en las que $u = \varepsilon/\varepsilon_u$, es la variable de interés normalizada respecto a su valor máximo (daño total). Para

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

calcular los parámetros mencionados, en forma alternativa, se emplea la variable normalizada u_1 , que se define como sigue: $u_1 = \epsilon_o / \epsilon_u$. Aquí, ϵ_o y ϵ_u corresponden al valor de la distorsión cuando se inicia el daño y la distorsión cuando se alcanza el valor máximo de daño, respectivamente; se observa que $u_1 = 1$ cuando $\epsilon_o = \epsilon_u$. Tienen ϵ_o y ϵ_u diferentes valores, según el sub-arreglo que se esté evaluando. En Reyes (1999) se encuentran valores iniciales para marcos de acero sin un buen detallado sísmico, dicho de otra manera, son construcciones diseñadas para resistir únicamente carga vertical (Reyes, 1999). También se señalan valores para $\epsilon_o = 0.0034$ y $\epsilon_u = 0.024$. suponiendo también que el valor de $d(u)$ es de 0.01 cuando se inicia el daño y toma un valor de 0.99 cuando este es total (Ismael 2003).

En la tabla 5.5.1 se plasman los valores iniciales para la función de daño en dirección longitudinal y en la tabla 5.5.2 los mismos para la dirección transversal.

Tabla 5.5.1. Parámetros de función de daño. Dirección Longitudinal.

| Longitudinal | | |
|---------------------|--------------|---------------|
| Parámetro | Valor | Unidad |
| $\epsilon_o =$ | 0.0034 | (cm/cm) |
| $\epsilon_u =$ | 0.024 | (cm/cm) |
| $d(U_o) =$ | 0.01 | - |
| $d(U_u) =$ | 0.99 | - |
| $a =$ | 4.6052 | - |
| $m =$ | 3.1353 | - |
| $\omega_1 =$ | 11.855 | rad/s |
| $T_1 =$ | 0.53 | s |
| $U_F =$ | 14.809 | cm |
| $U_1 =$ | 0.14166667 | - |
| $U_u =$ | 1 | - |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Tabla 5.5.2. Parámetros de función de daño Transversal.

| <i>Transversal</i> | | |
|--------------------|--------------|---------------|
| Parámetro | Valor | Unidad |
| $\varepsilon_0=$ | 0.0034 | (cm/cm) |
| $\varepsilon_u=$ | 0.024 | (cm/cm) |
| $d(U_0)=$ | 0.01 | - |
| $d(U_u)=$ | 0.99 | - |
| $a=$ | 4.6052 | - |
| $m=$ | 3.1353 | - |
| $\omega_1=$ | 15.438 | rad/s |
| $T_1=$ | 0.407 | s |
| $U_F=$ | 15.648 | cm |
| $U_1=$ | 0.14166667 | - |
| $U_u=$ | 1 | - |

Con los datos de la tabla 5.5.1, 5.5.2 y tomando un $\Delta\varepsilon$ de 0.0001 se construye la gráfica del daño para cada dirección de análisis aplicando la ecuación 5.5.1, luego, se realiza una superposición de la función de daño con el daño producido. El daño producido no es más que la aplicación de la función de daño nuevamente, pero tomando como ε a las lecturas de la distorsión máxima para cada dirección de análisis, nivel y factor de escala, sobre poniéndolo en la gráfica de función de daño como se muestra en las siguientes tablas y figuras.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

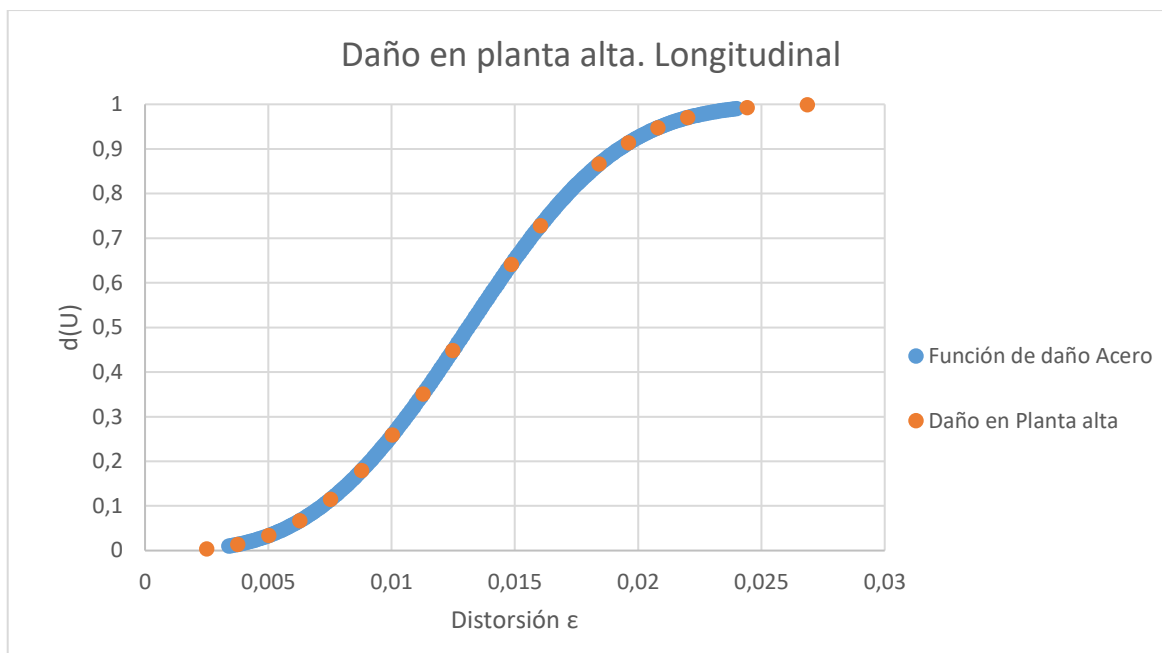


Figura 5.5.1. Función de daño y daño en planta alta. Dirección Longitudinal.

Tabla 5.5.3. Daño en planta alta en función del factor de escala. Dirección Longitudinal

| Longitudinal Planta Alta | | |
|---------------------------------|------------------|-------------|
| F.E. | ε (cm/cm) | d(U) |
| 1 | 0.002512 | 0.003883 |
| 1.5 | 0.003768 | 0.01377555 |
| 2 | 0.005024 | 0.03360786 |
| 2.5 | 0.006279 | 0.06646943 |
| 3 | 0.007535 | 0.11470465 |
| 3.5 | 0.008791 | 0.17926765 |
| 4 | 0.010042 | 0.2590487 |
| 4.5 | 0.011282 | 0.35073807 |
| 5 | 0.012491 | 0.44806141 |
| 6 | 0.014865 | 0.64139477 |
| 6.5 | 0.016042 | 0.72809296 |
| 7.5 | 0.018421 | 0.8658905 |
| 8 | 0.019618 | 0.91349214 |
| 8.5 | 0.020813 | 0.94745369 |
| 9 | 0.022013 | 0.97016658 |
| 10 | 0.024423 | 0.99228412 |
| 11 | 0.026872 | 0.99858949 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

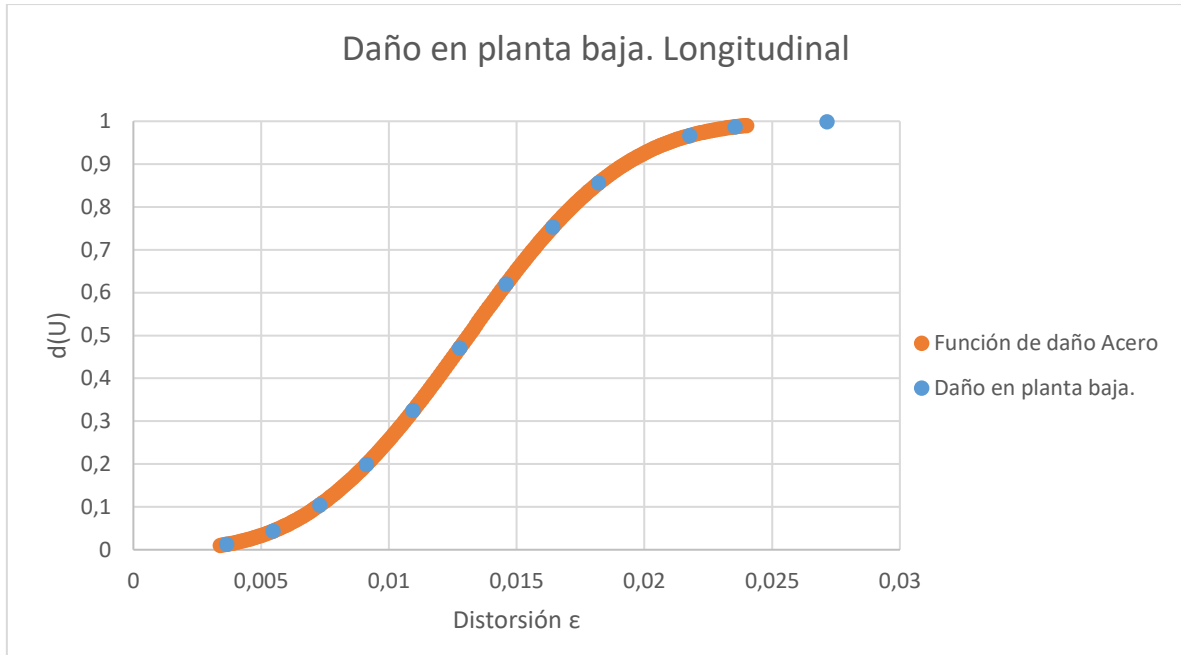


Figura 5.5.2. Función de daño y daño en planta baja. Dirección Longitudinal.

Tabla 5.5.4. Daño en planta baja en función del factor de escala. Longitudinal

| Longitudinal Planta baja | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| F.E. | ϵ (cm/cm) | $d(U)$ |
| 1 | 0.00365 | 0.01244 |
| 1.5 | 0.00547 | 0.04368 |
| 2 | 0.00729 | 0.10419 |
| 2.5 | 0.00912 | 0.19871 |
| 3 | 0.01094 | 0.32457 |
| 3.5 | 0.01277 | 0.47076 |
| 4 | 0.01459 | 0.61962 |
| 4.5 | 0.01641 | 0.75304 |
| 5 | 0.01821 | 0.85584 |
| 6 | 0.02177 | 0.96633 |
| 6.5 | 0.02355 | 0.98697 |
| 7.5 | 0.02715 | 0.99886 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

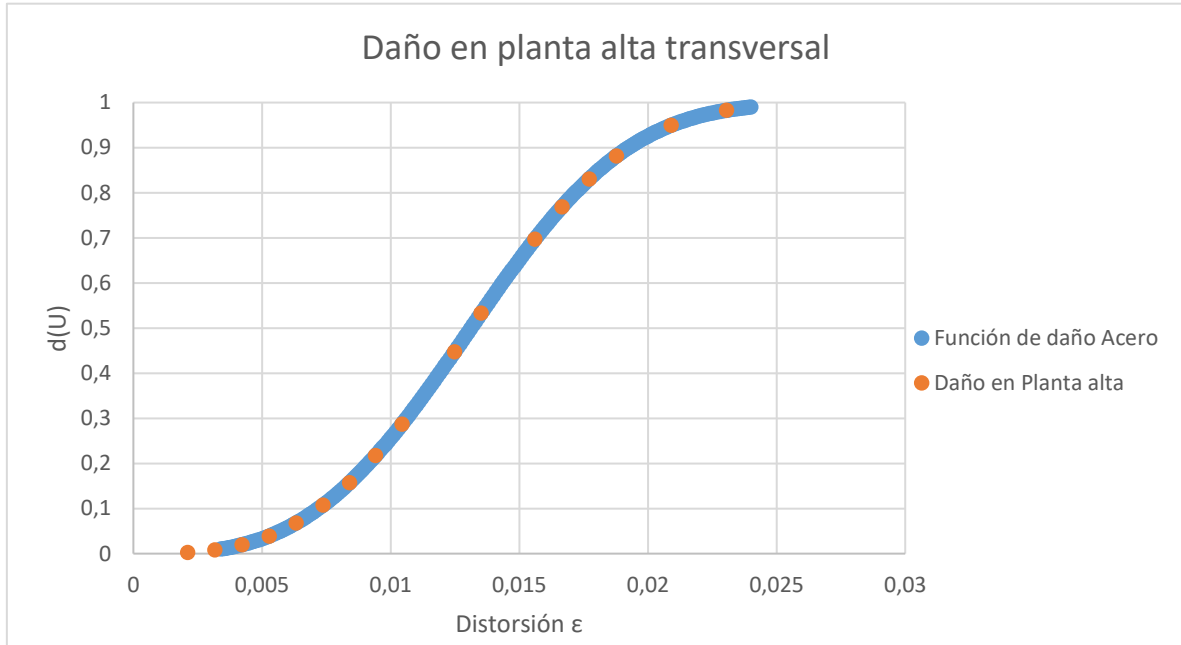


Figura 5.5.3. Función de daño y daño en planta alta. Transversal.

Tabla 5.5.5. Daño en planta alta en función del factor de escala. Transversal

| Transversal Planta Alta | | |
|--------------------------------|------------------|-------------|
| F.E. | ε (cm/cm) | d(U) |
| 1 | 0.00211 | 0.00224937 |
| 1.5 | 0.003164 | 0.00798886 |
| 2 | 0.004219 | 0.01957817 |
| 2.5 | 0.005274 | 0.03902595 |
| 3 | 0.006329 | 0.06808482 |
| 3.5 | 0.007373 | 0.10757095 |
| 4 | 0.008398 | 0.15731906 |
| 4.5 | 0.009414 | 0.21719006 |
| 5 | 0.010435 | 0.2869255 |
| 6 | 0.012484 | 0.44748509 |
| 6.5 | 0.013518 | 0.53298481 |
| 7.5 | 0.015602 | 0.69685629 |
| 8 | 0.016654 | 0.76880705 |
| 8.5 | 0.017711 | 0.83071203 |
| 9 | 0.01877 | 0.88126645 |
| 10 | 0.020901 | 0.94947524 |
| 11 | 0.023056 | 0.98276375 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

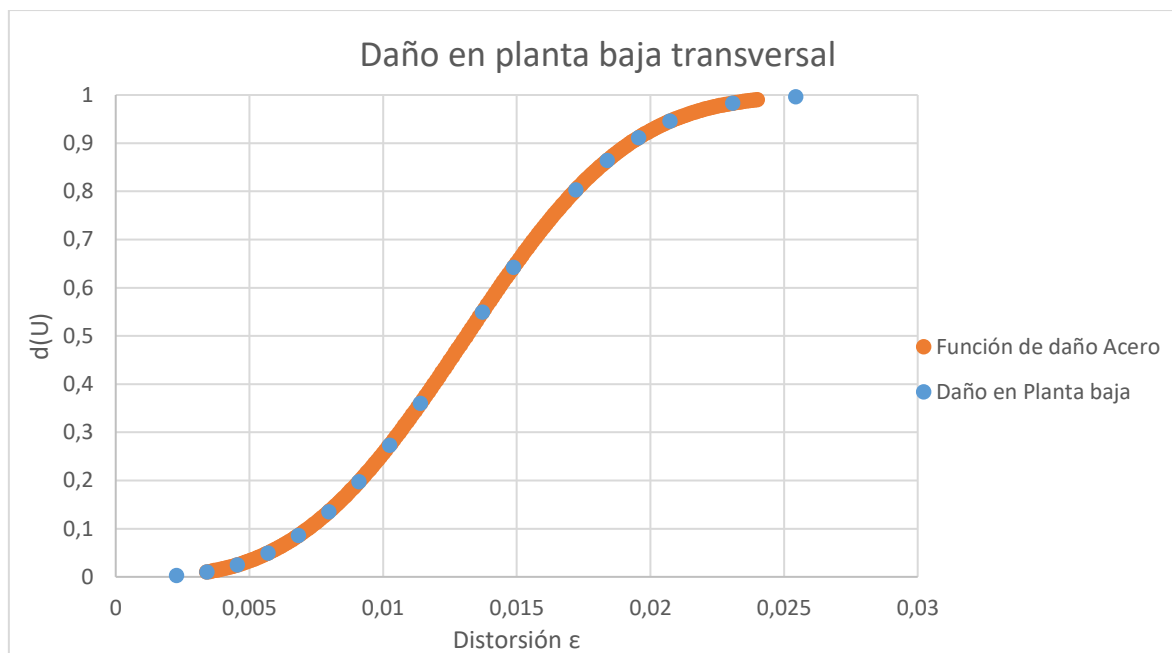


Figura 5.5.4. Función de daño y daño en planta baja. Transversal.

Tabla 5.5.6. Daño en planta baja en función del factor de escala. Transversal.

| Transversal Planta Baja | | |
|--------------------------------|------------------|-------------|
| F.E. | ε (cm/cm) | d(U) |
| 1 | 0.002277 | 0.00285528 |
| 1.5 | 0.003415 | 0.01013828 |
| 2 | 0.004553 | 0.02479479 |
| 2.5 | 0.005692 | 0.04930525 |
| 3 | 0.00683 | 0.08564636 |
| 3.5 | 0.007969 | 0.1351666 |
| 4 | 0.009099 | 0.19754734 |
| 4.5 | 0.010245 | 0.27329643 |
| 5 | 0.011398 | 0.35981388 |
| 6 | 0.013716 | 0.54928019 |
| 6.5 | 0.01488 | 0.64255766 |
| 7.5 | 0.017215 | 0.80305114 |
| 8 | 0.018385 | 0.86423283 |
| 8.5 | 0.019557 | 0.91141017 |
| 9 | 0.020726 | 0.94539454 |
| 10 | 0.023075 | 0.9829438 |
| 11 | 0.025438 | 0.99602167 |

5.6 Vulnerabilidad sísmica

La probabilidad de falla de un sistema estructural depende de cómo se aborde la función límite de falla, que puede estar dada en términos de un margen o factor de seguridad. Es también posible que la probabilidad de falla se tome como indicador de desempeño si está relacionada a diferentes estados límite de la estructura. Un ejemplo de ellos, el más general, son los códigos y normas de diseño donde se especifican dos estados límite: el de servicio y el de falla. Se entenderá el estado límite de servicio como el control de daño para elementos estructurales y no estructurales, mientras que el estado límite de falla se relaciona con el daño que origina el colapso del sistema o parte de él.

Por otra parte, en cuestiones de diseño sísmico y los criterios que se establecen para dicho diseño, es conveniente estimar la probabilidad de falla en términos de la tasa esperada de falla por unidad de tiempo. Pero por cuestiones prácticas, es necesario que tal probabilidad sea expresada para una intensidad sísmica relacionada a un periodo de recurrencia dado. (Ismael 2010).

5.6.1 Vulnerabilidad Estructural

La vulnerabilidad se define como la relación que existe entre la intensidad del movimiento sísmico, en este caso la aceleración espectral, y el daño global del sistema

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

estructural. En este trabajo, se presenta como parámetro de daño a la distorsión máxima de entrepiso.

Numerosos estudios corroboran que el más fidedigno parámetro de respuesta estructural hasta ahora utilizado es la distorsión de entrepiso, ya que presenta relación con el daño estructural y con el no estructural. A diferencia con otros métodos que toman como parámetro de daño la escala de Mercalli modificada que resulta ser un parámetro subjetivo del daño en la región. Para este cálculo se recomienda un parámetro con una excelente correlación con el daño estructural producido por la excitación en la base. Ismael (2010).

5.6.2 Intensidad sísmica

Se debe entender la intensidad sísmica como una variable de gran importancia para establecer criterios de diseño sísmico y para la determinación de la vulnerabilidad de construcciones existentes. El nivel de intensidad sísmica para el diseño depende, entre otras cosas, a las condiciones del sitio y a las propiedades del sistema estructural; entendiendo que la intensidad sísmica es una de las principales fuentes de incertidumbre en la demanda sísmica.

5.6.3 Intensidad sísmica normalizada.

En este trabajo se expresa la vulnerabilidad sísmica del sistema en cuestión como función de un indicador de intensidad normalizada con respecto a la capacidad del sistema como se expresa en la Ecuación 5.6.3 propuesta en (Ismael 2010):

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

$$\eta = \frac{S_{dl}(T)}{u_F} \quad (5.6.3)$$

Donde:

$S_{dl}(T)$ = es la ordenada lineal del espectro de respuestas de desplazamientos para el periodo fundamental en cada dirección. $S_{dl} = S_a/\omega^2$, donde ω es la frecuencia natural de vibrar.

u_F = Capacidad de deformación de fluencia del sistema, obtenida de curva Pushover para cada dirección del análisis.

5.7 Función de Vulnerabilidad

Para el cómputo de la ordenada lineal del espectro de respuesta ($S_a(T)$) se utilizó la ordenada correspondiente al periodo predominante de la estructura para el sismo del 19 de septiembre de 2017, mismo que se muestra en las figuras 5.7.1 y 5.7.2 para cada dirección del análisis.



Figura 5.7.1. Espectro de pseudo aceleraciones dirección Longitudinal, sismo 19/11/17.

(Este-Oeste)

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

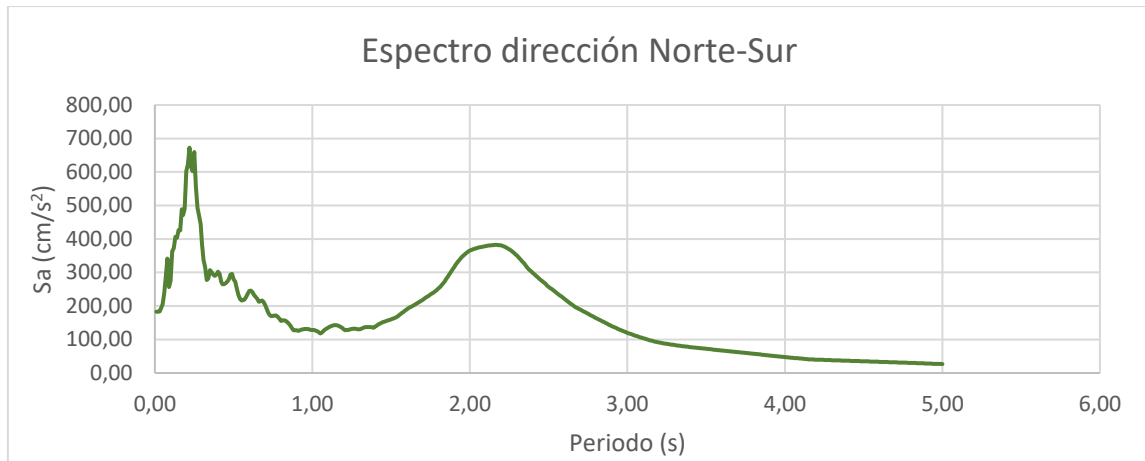


Figura 5.7.2. Espectro de pseudo aceleraciones dirección Transversal, sismo 19/11/17.

(Norte-Sur)

Una vez obtenidos los valores espectrales correspondientes de los desplazamientos, se procede a normalizarlos, dividiéndolos entre u_F teniendo como resultado η . Este procedimiento se repite para cada una de los factores de escala aplicados al análisis paso a paso, y finalmente se grafica η vs $d(\eta)$, donde $d(\eta)$ resulta ser el daño en el sistema. Esta gráfica se aplica en ambas direcciones y para cada nivel, con ello se obtienen las gráficas de vulnerabilidad en función del desplazamiento normalizado, como se observa en las figuras 5.7.3 a la 5.7.6 así como en las tablas correspondientes 5.7.1 a la 5.7.4.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

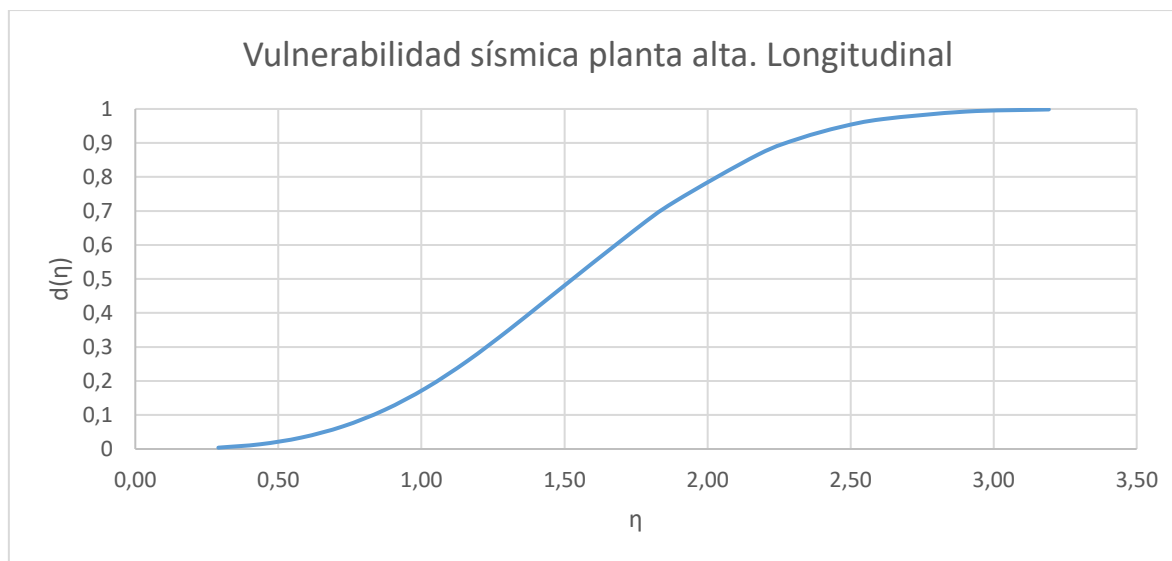


Figura 5.7.3. Vulnerabilidad sísmica planta alta, dirección longitudinal.

Tabla 5.7.1. Daño y desplazamiento normalizado para cada factor de escala, planta alta dirección longitudinal.

| Longitudinal Planta Alta | | |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| F.E. | η | $d(\eta)$ |
| 1 | 0.29 | 0.003883 |
| 1.5 | 0.44 | 0.01377555 |
| 2 | 0.58 | 0.03360786 |
| 2.5 | 0.73 | 0.06646943 |
| 3 | 0.87 | 0.11470465 |
| 3.5 | 1.02 | 0.17926765 |
| 4 | 1.16 | 0.2590487 |
| 4.5 | 1.31 | 0.35073807 |
| 5 | 1.45 | 0.44806141 |
| 6 | 1.74 | 0.64139477 |
| 6.5 | 1.89 | 0.72809296 |
| 7.5 | 2.18 | 0.8658905 |
| 8 | 2.32 | 0.91349214 |
| 8.5 | 2.47 | 0.94745369 |
| 9 | 2.61 | 0.97016658 |
| 10 | 2.90 | 0.99228412 |
| 11 | 3.19 | 0.99858949 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

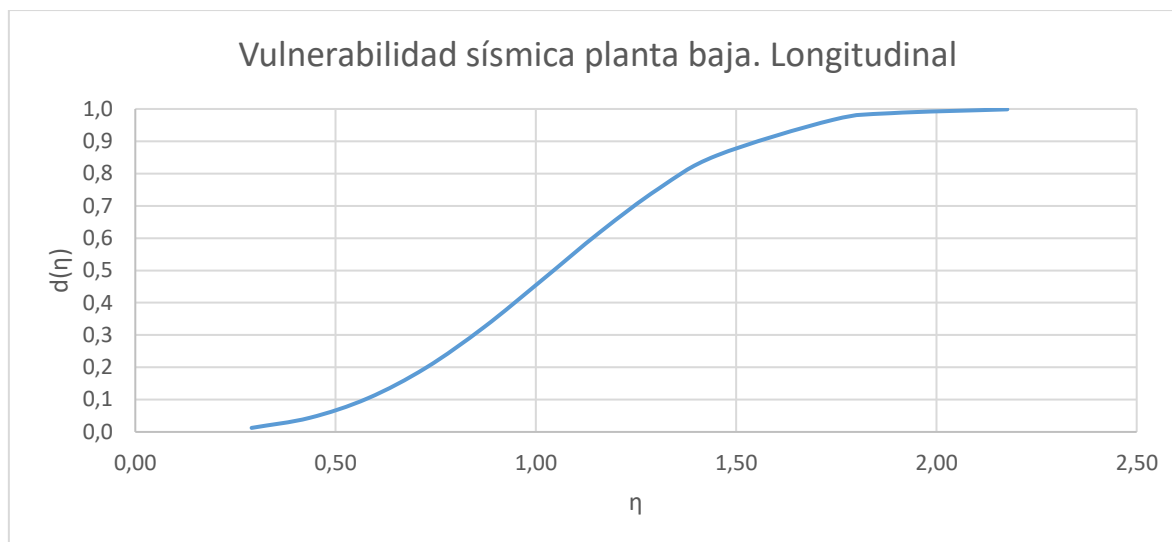


Figura 5.7.4. Vulnerabilidad sísmica planta baja, dirección longitudinal.

Tabla 5.7.2. Daño y desplazamiento normalizado para cada factor de escala, planta baja dirección longitudinal.

| Longitudinal Planta baja | | |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| F.E. | η | $d(\eta)$ |
| 1 | 0.29 | 0.01244 |
| 1.5 | 0.44 | 0.04368 |
| 2 | 0.58 | 0.10419 |
| 2.5 | 0.73 | 0.19871 |
| 3 | 0.87 | 0.32457 |
| 3.5 | 1.02 | 0.47076 |
| 4 | 1.16 | 0.61962 |
| 4.5 | 1.31 | 0.75304 |
| 5 | 1.45 | 0.85584 |
| 6 | 1.74 | 0.96633 |
| 6.5 | 1.89 | 0.98697 |
| 7.5 | 2.18 | 0.99886 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

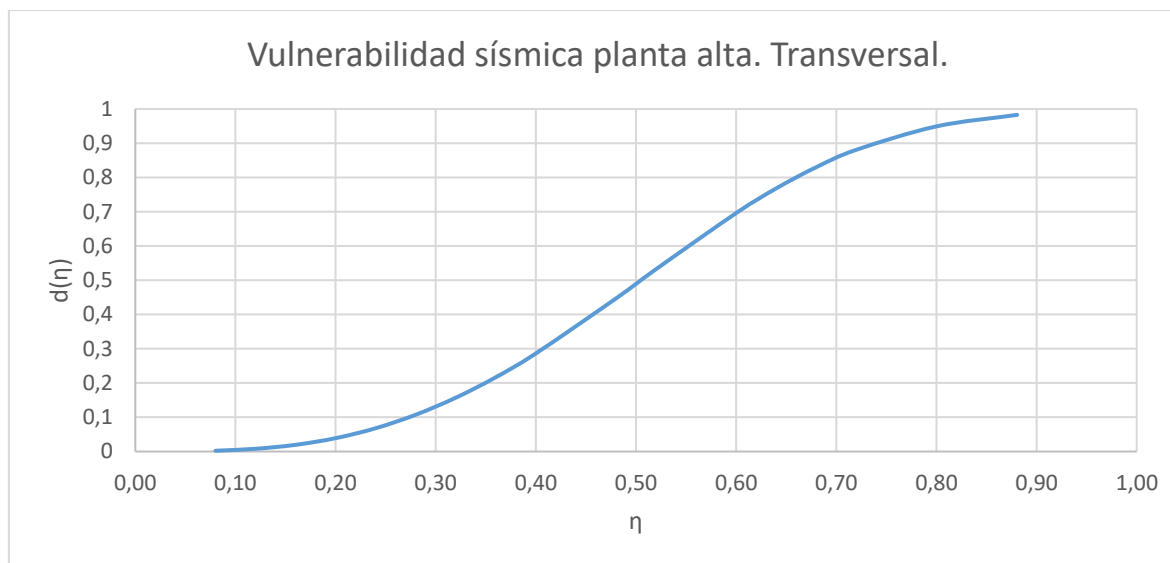


Figura 5.7.5. Vulnerabilidad sísmica planta alta, dirección transversal.

Tabla 5.7.3. Daño y desplazamiento normalizado para cada factor de escala, planta alta dirección transversal.

| Transversal Planta Alta | | |
|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| F.E. | η | $d(\eta)$ |
| 1 | 0.08 | 0.00224937 |
| 1.5 | 0.12 | 0.00798886 |
| 2 | 0.16 | 0.01957817 |
| 2.5 | 0.20 | 0.03902595 |
| 3 | 0.24 | 0.06808482 |
| 3.5 | 0.28 | 0.10757095 |
| 4 | 0.32 | 0.15731906 |
| 4.5 | 0.36 | 0.21719006 |
| 5 | 0.40 | 0.2869255 |
| 6 | 0.48 | 0.44748509 |
| 6.5 | 0.52 | 0.53298481 |
| 7.5 | 0.60 | 0.69685629 |
| 8 | 0.64 | 0.76880705 |
| 8.5 | 0.68 | 0.83071203 |
| 9 | 0.72 | 0.88126645 |
| 10 | 0.80 | 0.94947524 |
| 11 | 0.88 | 0.98276375 |

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

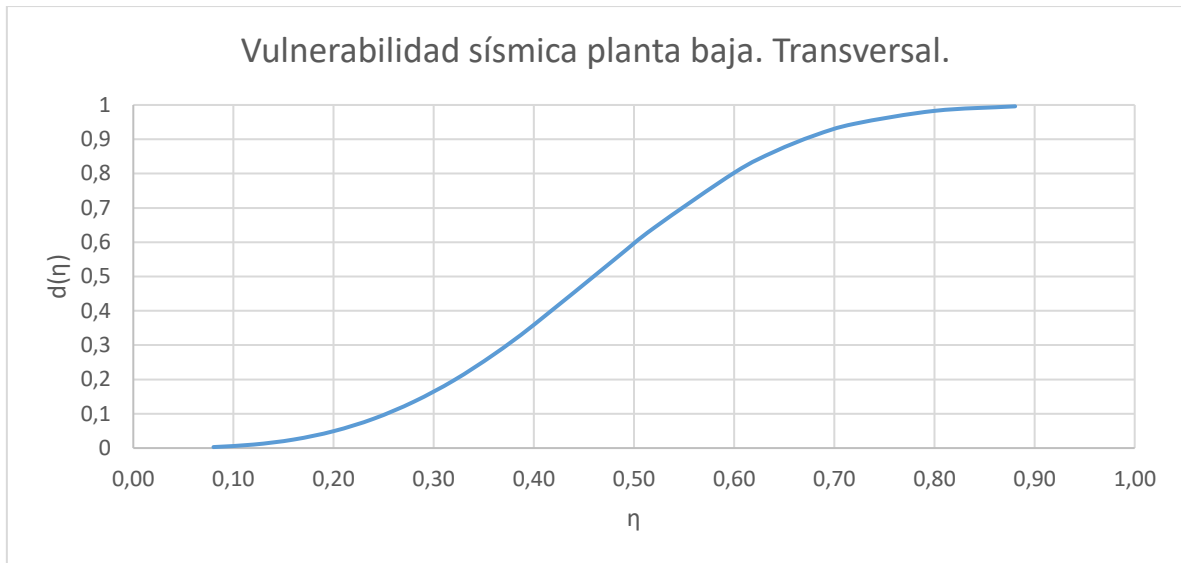


Figura 5.7.6. Vulnerabilidad sísmica planta baja, dirección transversal.

Tabla 5.7.4. Daño y desplazamiento normalizado para cada factor de escala, planta baja dirección transversal.

| Transversal Planta Baja | | |
|--------------------------------|----------|-------------|
| F.E. | η | d(η) |
| 1 | 0.08 | 0.00285528 |
| 1.5 | 0.12 | 0.01013828 |
| 2 | 0.16 | 0.02479479 |
| 2.5 | 0.20 | 0.04930525 |
| 3 | 0.24 | 0.08564636 |
| 3.5 | 0.28 | 0.1351666 |
| 4 | 0.32 | 0.19754734 |
| 4.5 | 0.36 | 0.27329643 |
| 5 | 0.40 | 0.35981388 |
| 6 | 0.48 | 0.54928019 |
| 6.5 | 0.52 | 0.64255766 |
| 7.5 | 0.60 | 0.80305114 |
| 8 | 0.64 | 0.86423283 |
| 8.5 | 0.68 | 0.91141017 |
| 9 | 0.72 | 0.94539454 |
| 10 | 0.80 | 0.9829438 |
| 11 | 0.88 | 0.99602167 |

5.8 Desplazamientos vs nivel de entrepiso

Para comprender y visualizar de otra manera los desplazamientos calculados afectados con cada uno de los factores de escala, en cada nivel y en cada dirección, y las diferencias por cada sentido de análisis, se muestran las figuras 5.8.1 y 5.8.2, observando la diferencia de pendiente para cada sentido, entendiéndose que en el sentido longitudinal el sistema se comporta a cortante y para el sentido transversal el comportamiento se muestra a flexión.

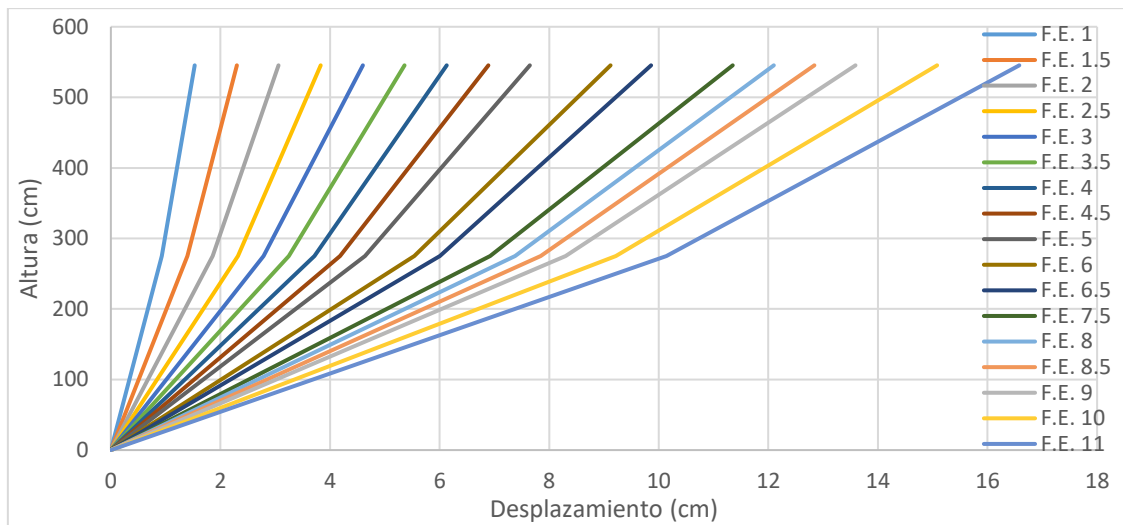


Figura 5.8.1. Desplazamiento vs Altura de entre piso para los diferentes factores de escala. Sentido Longitudinal

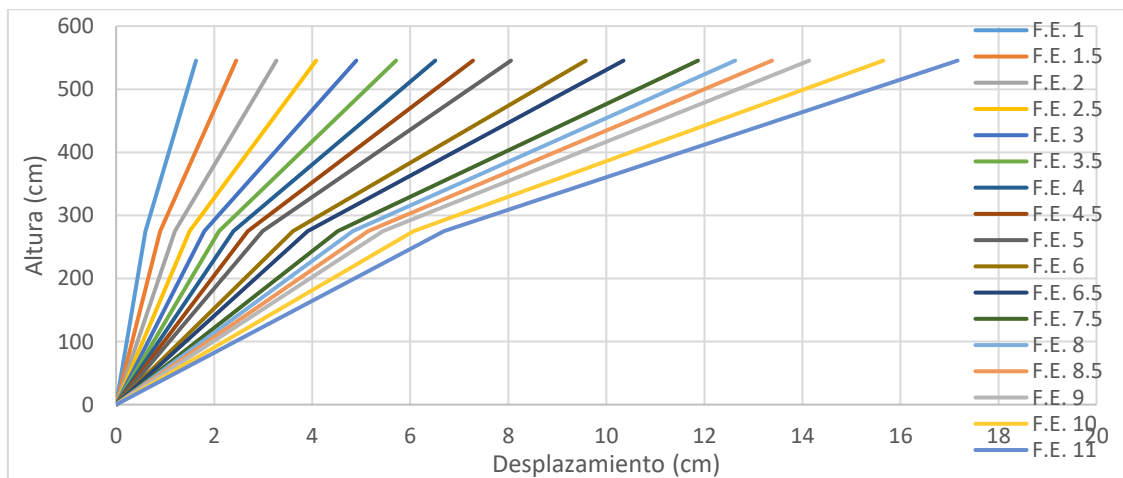


Figura 5.8.2. Desplazamiento vs Altura de entre piso para los diferentes factores de escala. Sentido Transversal.

5.9 Distorsión de entrepiso vs nivel de piso

Es pertinente señalar que la reglamentación actual y vigente, en diferentes apartados, señala que la distorsión de entre piso deberá tener ciertos límites para garantizar el correcto desempeño del sistema estructural de entre piso dependiendo del material que se haya empleado para su construcción.

El manual de diseño de obras civiles de Comisión Federal de Electricidad en su versión 2015 (MDOC CFE 2015), señala una distorsión máxima de entre piso para marcos de acero con ductilidad limitada de 0.015, tomando como criterio para el correcto funcionamiento del sistema estructural, considerando su antigüedad y los criterios de diseño para ese entonces.

Por tal motivo se grafican las distorsiones de entrepiso para cada factor de escala, para cada dirección de análisis, donde se puede observar que la distorsión de entrepiso para el primer nivel no es necesariamente igual a la del segundo nivel; mostrándose mayor distorsión para el nivel de planta baja en comparación del nivel de planta alta, como era de esperarse debido a que la geometría y materiales no varían de un nivel a otro.

Conforme se va aumentando el factor de escala se observa un incremento gradual de la distorsión de entrepiso hasta llegar al valor límite permitido para estructuras de marcos de acero según el MDOC CFE 2015.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

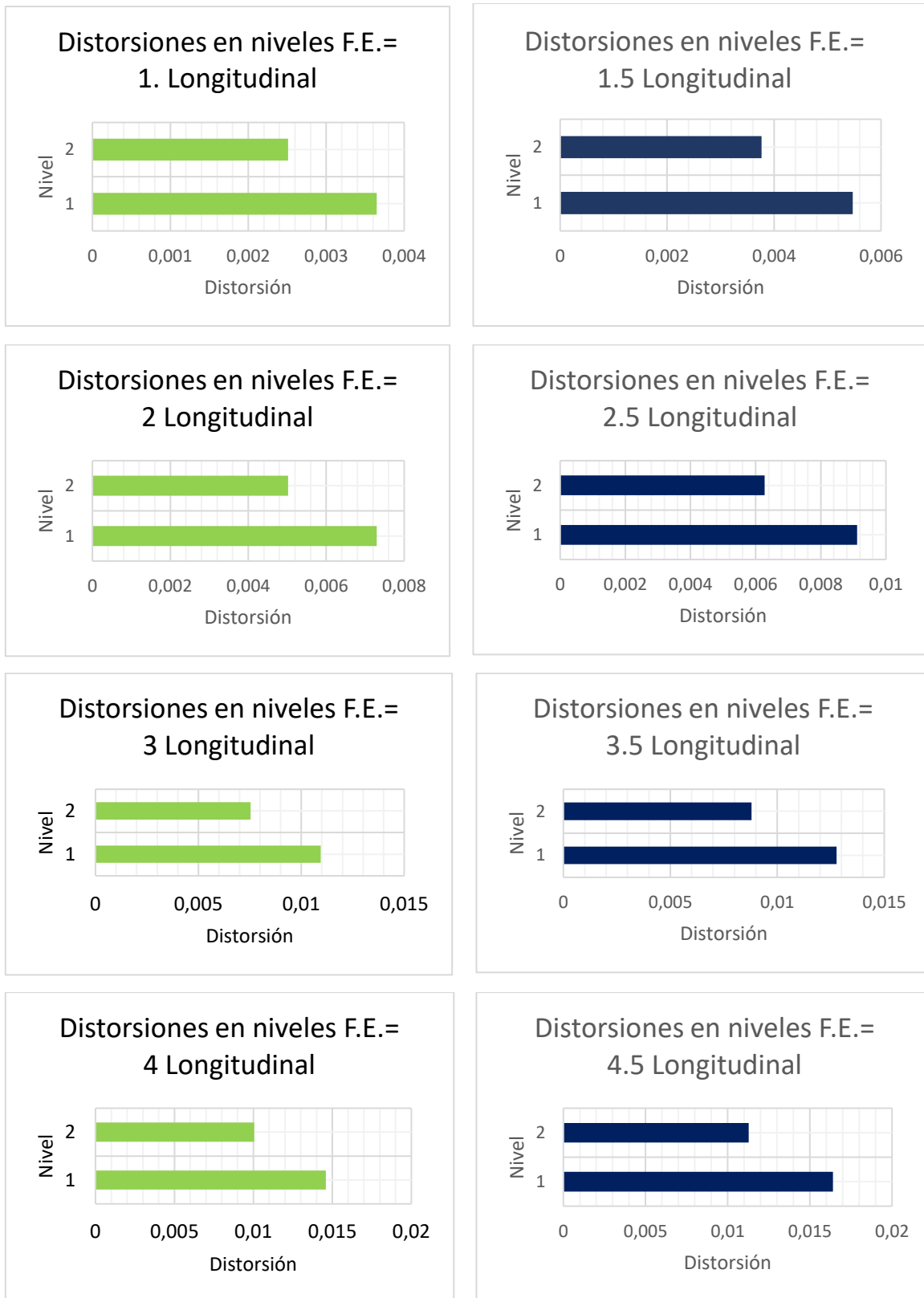


Figura 5.9.1. Distorsiones de entresijos para cada factor de escala, sentido longitudinal

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.



Figura 5.9.2. Distorsiones de entresijos para cada factor de escala, sentido longitudinal

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

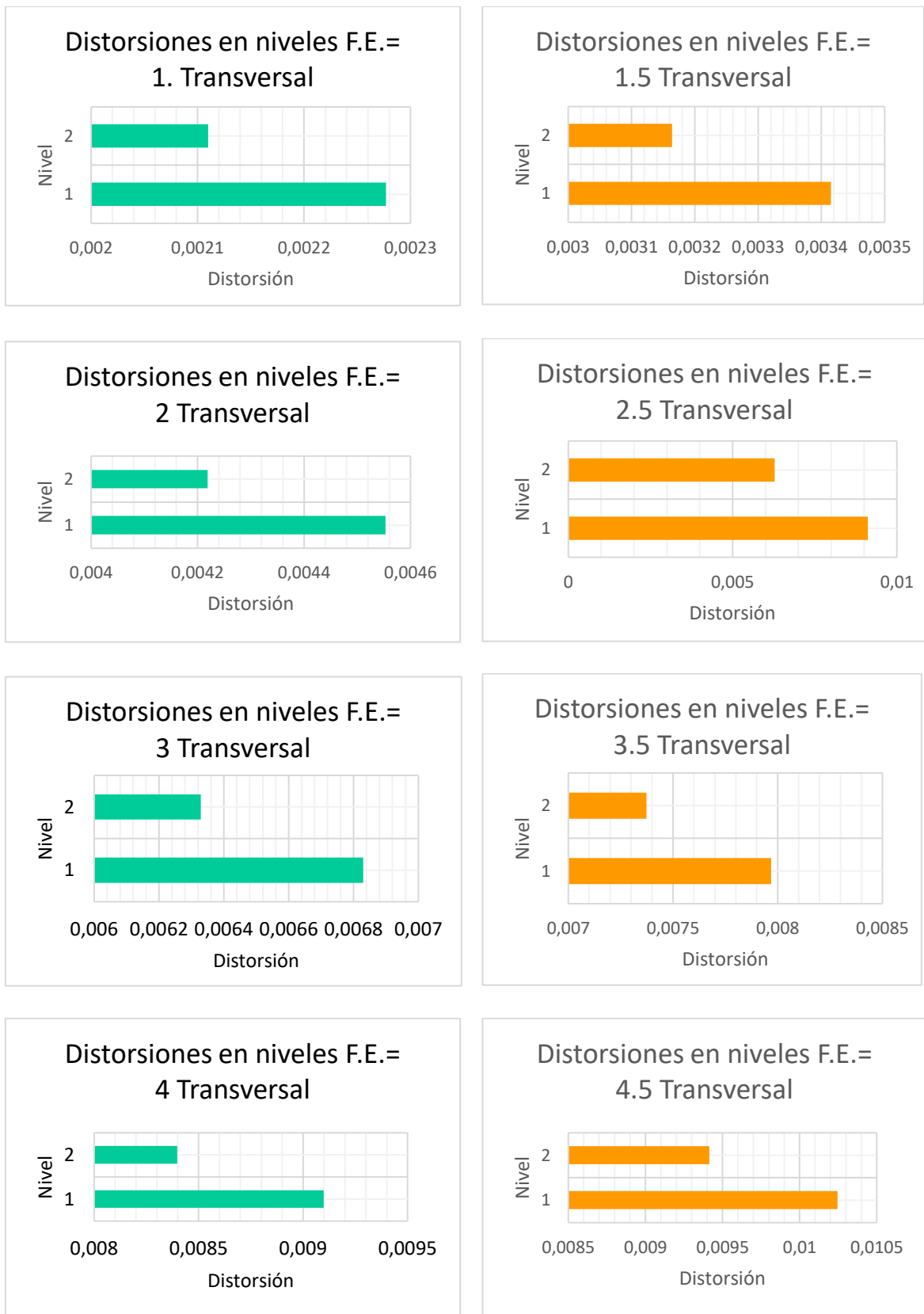


Figura 5.9.3. Distorsiones de entornos para cada factor de escala, sentido transversal

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

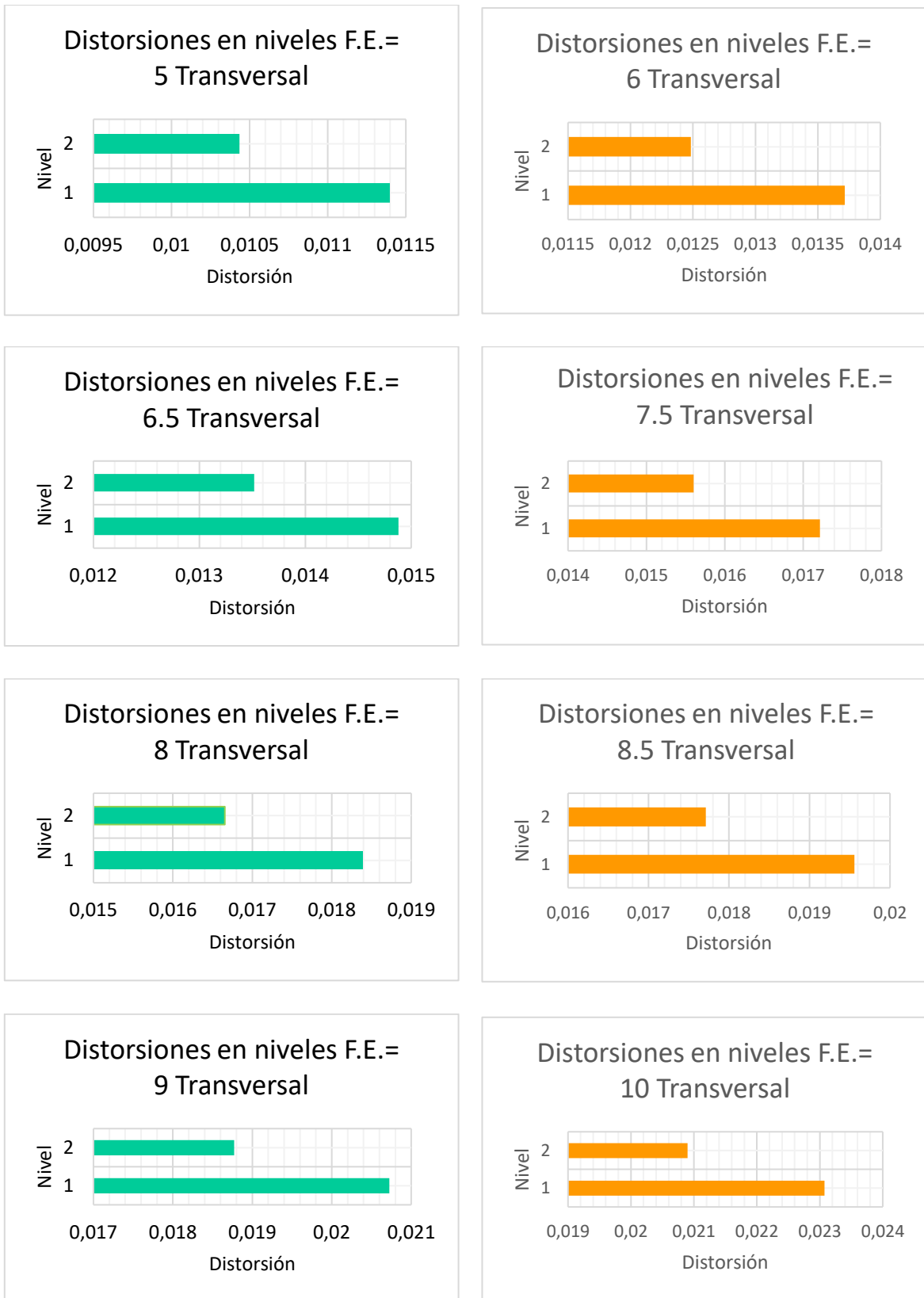


Figura 5.9.4. Distorsiones de entre pisos para cada factor de escala, sentido transversal

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

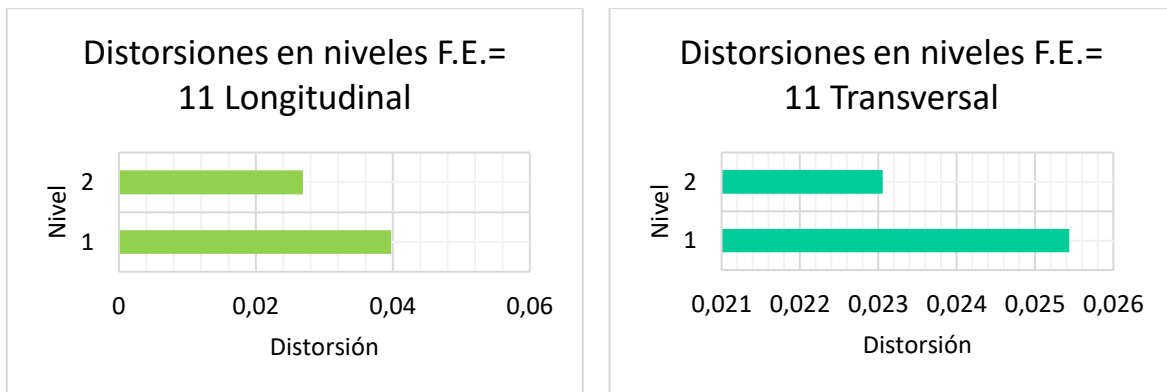


Figura 5.9.5. Comparativa de distorsiones entre sentido longitudinal y transversal para un factor de escala (F.E.) = 11.

5.10 Análisis dinámico incremental (IDA)

El análisis dinámico incremental conocido por sus siglas en inglés IDA, es un método paramétrico de análisis que se emplea para estimar el comportamiento de una estructura bajo la acción de cargas sísmicas (Vamvatsikos y Cornell, 2002). Consiste principalmente en hacer una serie de análisis dinámicos no lineales que tienen como demanda uno o dos registros de aceleraciones sísmicas amplificados a diversas escalas de intensidad. Dichas intensidades caracterizan el desempeño del sistema estructural, incursionando primeramente en el rango elástico para posteriormente atravesar la zona plástica hasta llegar al estado límite considerado (ver figura 5.10.1).

Aplicando un IDA al sistema estructural objeto de estudio, se ha descubierto que las deficiencias del software (ETABS) para modelar la demanda y capacidad plástica de una estructura de acero es limitada, no permitiendo una degradación del sistema al representar un incremento en la excitación en la base.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

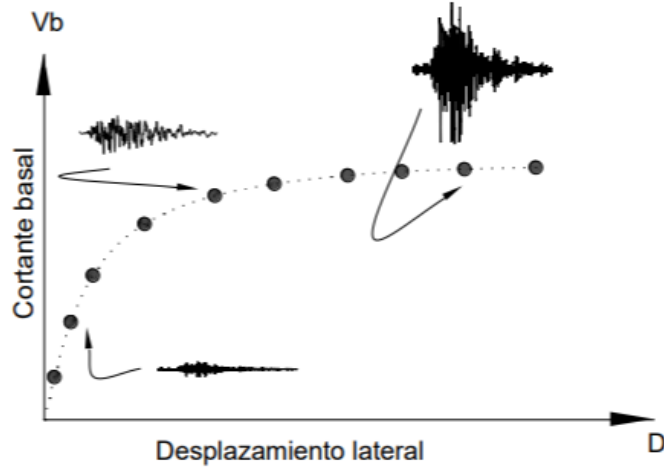


Figura 5.10.1. Curva típica de capacidad empleada en un IDA.

Por lo que se representa en las siguientes curvas el comportamiento arrojado por el software para el modelado matemático empleado, sabiendo que no es completamente representativo de la plasticidad del sistema estructural ante el incremento de las aceleraciones en la base del sismo del 19 de septiembre de 2017.

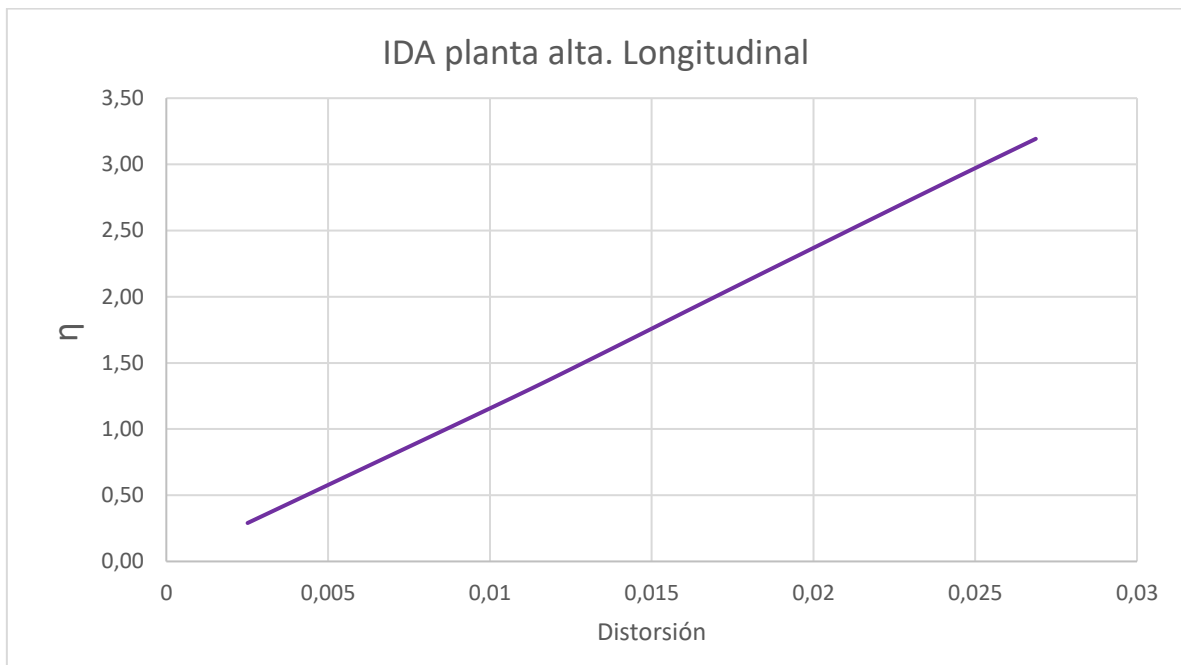


Figura 5.10.2. IDA planta alta sentido longitudinal.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

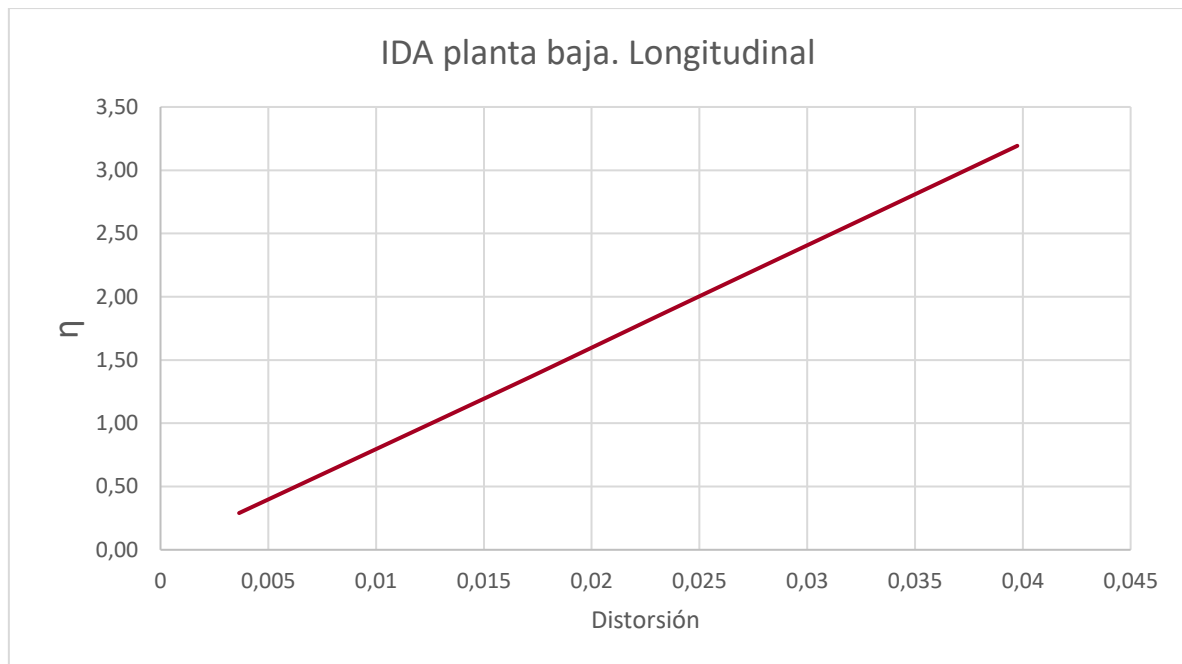


Figura 5.10.3. IDA planta baja sentido longitudinal.

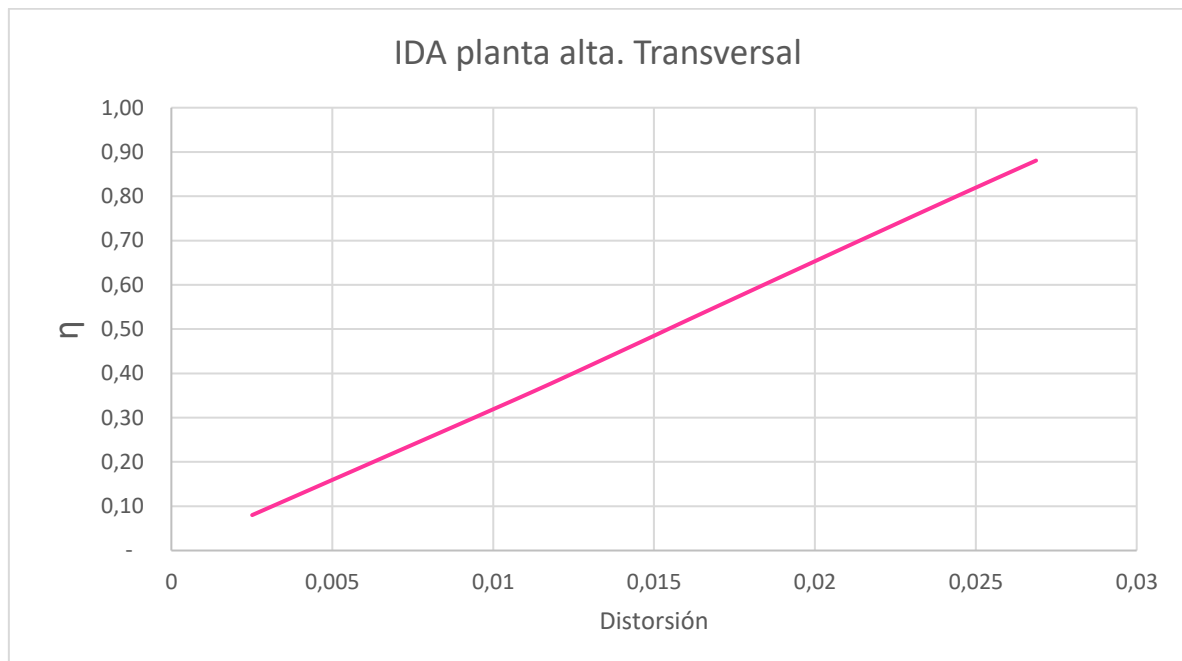


Figura 5.10.4. IDA planta alta sentido transversal.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

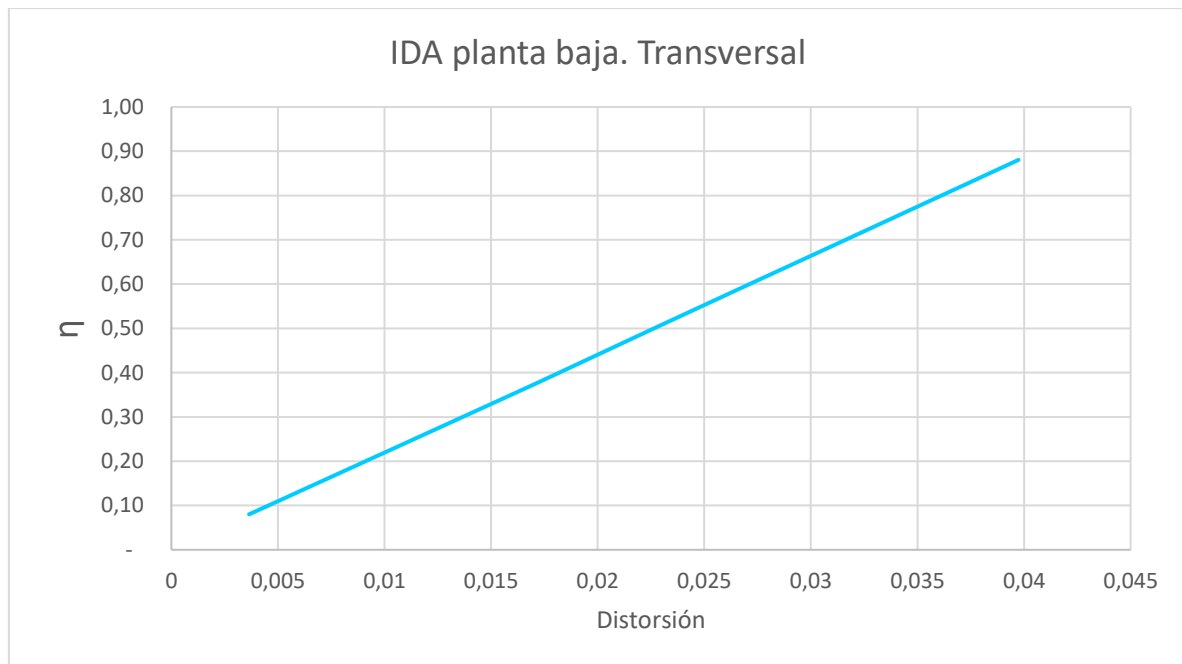


Figura 5.10.5. IDA planta baja sentido transversal.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Como resultado del análisis no lineal de esta estructura de acero, se obtienen los desplazamientos y las distorsiones de entrepiso máximas por cada factor de escala propuesto y para cada dirección. Esto permite observar la formación de articulaciones plásticas del sistema por acción de las fuerzas sísmicas equivalentes, así como la formación final del mecanismo de colapso.

Las distorsiones de entrepiso son base para el planteamiento de la función de daño (Ismael 2003) y tomando en cuenta los valores iniciales (ϵ_o) y últimos (ϵ_u) de distorsión para estructuras de acero sin un buen detallado sísmico propuestos por Reyes (1999), se grafica dicha función. De esta manera se observa cual es el nivel de daño de la estructura para cada nivel, para cada dirección y para cada factor de escala.

La curva Pushover como parte fundamental del análisis no lineal del sistema, permitió exponer la capacidad de deformación del sistema, así como la resistencia del mismo en cada dirección del análisis. La ductilidad y la rigidez del sistema son datos importantes que se pueden leer de esta curva de capacidad. La formación de articulaciones plásticas en los elementos es signo de la degradación del sistema por acción de las fuerzas laterales sísmicas y las gravitacionales por uso.

El modo esperado de falla en los diseños vigentes, obedece a un concepto de “columna fuerte y Viga débil”, buscando que la falla sea de forma dúctil, sin embargo

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

en los resultados observados del modelo, las trabes y cerramientos presentan mayor resistencia por lo que las deformaciones plásticas se presentan de manera inmediata en columnas generando una falla frágil, en lugar de una falla dúctil que es lo que se espera en un buen diseño sismo resistente. En las imágenes 5.3.4 y 5.3.6 se observa lo anteriormente mencionado, la formación de las articulaciones plásticas primeramente en las columnas y posteriormente en algunas trabes y cerramientos como en las figuras 5.3.5 y 5.3.7. La posible causa de la falla frágil presente en este modelo puede radicar en la geometría de las secciones transversales, siendo las columnas de menor peralte que las trabes de planta baja.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda para corroborar la información descrita en este estudio, realizar ensayos a las conexiones de las estructuras escolares tipo U-2 tal cual se construyeron, para obtener los valores característicos del sistema empleado ya que la cantidad de escuelas tipo U-2 (con las características aquí descritas) que se construyeron a lo largo del territorio nacional resulta no poca. El ensaye de estas conexiones tipo, permitirá la obtención de información tal como los valores que caracterizan la formación de articulaciones plásticas, los valores ϵ_0 y ϵ_u , que permitirán afinar la función de daño descrita en este estudio.

Para futuros trabajos de investigación del comportamiento no lineal, se propone el desarrollo del modelo analítico en software especializado para análisis no lineal como lo son OpenSees y Ruaumoko por mencionar algunos. Estos softwares

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

especializados en el análisis no lineal de los sistemas estructurales, permite la obtención de resultados de mayor fidelidad.

Para el uso correcto de dichos softwares se requerirá una capacitación especializada, por lo que se sugiere a las casas de estudio como la BUAP, el destinar recursos para el desarrollo de la investigación en México adquiriendo dicha capacitación.

Se recomienda incluir los efectos suelo-estructura y torsión en los casos que aplique en futuras investigaciones.

REFERENCIAS

Chopra, A K (1995). *“Dynamics of structures, theory and applications to earthquake engineering”*, Ed. Prentice Hall, pp. 409-428.

American Society of Civil Engineers (2000). *“Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings”*. Washington, D.C., USA: FEMA356

Ismael, H.E. (2003). *“Funciones de vulnerabilidad sísmica para el diseño óptimo de sistemas marco-muro”*. Tesis de maestría, UNAM, Ciudad de México, México.

Ismael, H.E. (2010). *“Diseño sísmico basado en desempeño y confiabilidad de sistemas marco-muro”*. Tesis doctoral, UNAM, Ciudad de México, México.

Ismael et al (2012). *“Evaluación de la Confiabilidad Estructural de Construcciones Escolares”*. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.

Ramón, V.J. (2005). *“Evaluación de la seguridad estructural ante sismo de dos edificios escolares de acero tipo U-2 y U-1”*, Tesis de maestría, UNAM, Ciudad de México, México.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Ismael et al. (2013). *“Estimación de la Vulnerabilidad Estructural de un índice preliminar de riesgo sísmico en construcciones escolares”*. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

Ismael et al. (2015). *“Uso de sistemas simplificados de referencia para el análisis de vulnerabilidad de construcciones escolares”*. XX Mexican Congress of Earthquake Engineering.

NTC-Sismo (2017). Normas Técnicas Complementarias para diseño por Sismo. *Gaceta oficial del Distrito Federal, 15 de diciembre.*

Montaña, P. M. (2010) *“Análisis “Push-over” de edificios con pórticos de acero en Bogotá”*. Tesis de maestría; Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona

Mireles, J. D. (2016). *“Modelos paramétricos de confiabilidad para establecer la vulnerabilidad sísmica de construcciones escolares”*. Tesis de maestría; BUAP. México.

Reyes, S.J. (1999). *“El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios”*. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería; UNAM. México D.F.

Altos Hornos de México (2013). *“Manual de diseño para la construcción con acero “*. AHMSA. México.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

ASCE (2014). *“Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE/SEI 41-13”*. Ed. American Society of Civil Engineers. Estados Unidos de América.

Gallegos, C.M. (2017). *“Desempeño sísmico de nudos en pórticos de acero a momento con columnas tubulares considerando efectos bidireccionales”*. Tesis de maestría, Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Chile. Chile

Comisión Federal de Electricidad. (2015). *“Manual de diseño de obras civiles: Diseño por sismo”*. Ciudad de México: Instituto de investigaciones eléctricas

Federal Emergency Management Agency. (2018). *“Example Application Guide for ASCE/SEI 41-13 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings with Additional Commentary for ASCE/SEI 41-17”*. Washington D.C: FEMA

American Institute of Steel construction. (2016). *“Specification for structural Steel buildings”*. Chicago USA:AISC.

Amani et al. (2004). *“Criterios de diseño sísmico basados en confiabilidad de estructuras aporcionadas”* Tesis doctoral, División de estudios de posgrado, Facultad de ingeniería, UNAM, México.

Criterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

ANEXO A

Tabla 5-4 FEMA 356. Tipos de conexiones para marcos de acero a momento.

| Connection | Description^{1, 2} | Type |
|-------------------------------------|---|-----------------|
| Welded Unreinforced Flange (WUF) | Full-penetration welds between beam and columns, flanges, bolted or welded web, designed prior to code changes following the Northridge earthquake | FR |
| Bottom Haunch in WUF w/Slab | Welded bottom haunch added to existing WUF connection with composite slab ³ | FR |
| Bottom Haunch in WUF w/o Slab | Welded bottom haunch added to existing WUF connection without composite slab ³ | FR |
| Welded Cover Plate in WUF | Welded cover plates added to existing WUF connection ³ | FR |
| Improved WUF-Bolted Web | Full-penetration welds between beam and column flanges, bolted web ⁴ | FR |
| Improved WUF-Welded Web | Full-penetration welds between beam and column flanges, welded web ⁴ | FR |
| Free Flange | Web is coped at ends of beam to separate flanges, welded web tab resists shear and bending moment due to eccentricity due to coped web ⁴ | FR |
| Welded Flange Plates | Flange plate with full-penetration weld at column and fillet welded to beam flange ⁴ | FR |
| Reduced Beam Section | Connection in which net area of beam flange is reduced to force plastic hinging away from column face ⁴ | FR |
| Welded Bottom Haunch | Haunched connection at bottom flange only ⁴ | FR |
| Welded Top and Bottom Haunches | Haunched connection at top and bottom flanges ⁴ | FR |
| Welded Cover-Plated Flanges | Beam flange and cover-plate are welded to column flange ⁴ | FR |
| Top and Bottom Clip Angles | Clip angle bolted or riveted to beam flange and column flange | PR |
| Double Split Tee | Split tees bolted or riveted to beam flange and column flange | PR |
| Composite Top and Clip Angle Bottom | Clip angle bolted or riveted to column flange and beam bottom flange with composite slab | PR |
| Bolted Flange Plates | Flange plate with full-penetration weld at column and bolted to beam flange ⁴ | PR ⁵ |
| Bolted End Plate | Stiffened or unstiffened end plate welded to beam and bolted to column flange | PR ⁵ |
| Shear Connection w/ Slab | Simple connection with shear tab, composite slab | PR |
| Shear Connection w/o Slab | Simple connection with shear tab, no composite slab | PR |

1. Where not indicated otherwise, definition applies to connections with bolted or welded web.
 2. Where not indicated otherwise, definition applies to connections with or without composite slab.
 3. Full-penetration welds between haunch or cover plate to column flange conform to the requirements of the AISC (1997) *Seismic Provisions*.
 4. Full-penetration welds conform to the requirements of the AISC (1997) *Seismic Provisions*.
 5. For purposes of modeling, the connection may be considered FR if it meets the strength and stiffness requirements of Section 5.5.2.1.

**Crterios para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de
una Construcción Escolar con Marcos de Acero.**

ANEXO B

Tabla 5-6. Parámetros para modelado y criterio de aceptación para procedimientos no lineales- Componentes de estructura de acero.

Table 5-6 Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components

| Component/Action | Modeling Parameters | | | Acceptance Criteria | | | | |
|--|--|------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | Plastic Rotation Angle, Radians | | Residual Strength Ratio | IO | Plastic Rotation Angle, Radians | | | |
| | a | b | | | Primary | | Secondary | |
| | | | LS | | CP | LS | CP | |
| Beams—flexure | | | | | | | | |
| a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$ | 90 _y | 110 _y | 0.6 | 10 _y | 60 _y | 80 _y | 90 _y | 110 _y |
| b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$ | 40 _y | 60 _y | 0.2 | 0.250 _y | 20 _y | 30 _y | 30 _y | 40 _y |
| c. Other | Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used | | | | | | | |
| Columns—flexure^{2,7} | | | | | | | | |
| For $P/P_{CL} < 0.20$ | | | | | | | | |
| a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{F_{ye}}}$ | 90 _y | 110 _y | 0.6 | 10 _y | 60 _y | 80 _y | 90 _y | 110 _y |
| b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{F_{ye}}}$ | 40 _y | 60 _y | 0.2 | 0.250 _y | 20 _y | 30 _y | 30 _y | 40 _y |
| c. Other | Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used | | | | | | | |

Criteria para Establecer los Parámetros de Control en la Salud Estructural de una Construcción Escolar con Marcos de Acero.

Table 5-6 Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components (continued)

| Component/Action | Modeling Parameters | | | Acceptance Criteria | | | | |
|--|--|-------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Plastic Rotation Angle, Radians | | Residual Strength Ratio | Plastic Rotation Angle, Radians | | | | |
| | a | b | | IO | Primary | | Secondary | |
| | | | LS | | CP | LS | CP | |
| For 0.2 < P/P _{CL} < 0.50 | | | | | | | | |
| a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{260}{\sqrt{F_{ye}}}$ | — ³ | — ⁴ | 0.2 | 0.25θ _y | — ⁵ | — ³ | — ⁶ | — ⁴ |
| b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{400}{\sqrt{F_{ye}}}$ | 1θ _y | 1.5θ _y | 0.2 | 0.25θ _y | 0.5θ _y | 0.8θ _y | 1.2θ _y | 1.2θ _y |
| c. Other | Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used | | | | | | | |
| Column Panel Zones | 12θ _y | 12θ _y | 1.0 | 1θ _y | 8θ _y | 11θ _y | 12θ _y | 12θ _y |
| Fully Restrained Moment Connections¹³ | | | | | | | | |
| WUF ¹² | 0.051-0.0013d | 0.043-0.0006d | 0.2 | 0.0128-0.0003d | 0.0337-0.0009d | 0.0284-0.0004d | 0.0323-0.0005d | 0.043-0.0006d |
| Bottom haunch in WUF with slab | 0.026 | 0.036 | 0.2 | 0.0065 | 0.0172 | 0.0238 | 0.0270 | 0.036 |
| Bottom haunch in WUF without slab | 0.018 | 0.023 | 0.2 | 0.0045 | 0.0119 | 0.0152 | 0.0180 | 0.023 |
| Welded cover plate in WUF ¹² | 0.056-0.0011d | 0.056-0.0011d | 0.2 | 0.0140-0.0003d | 0.0319-0.0006d | 0.0426-0.0008d | 0.0420-0.0008d | 0.056-0.0011d |
| Improved WUF-bolted web ¹² | 0.021-0.0003d | 0.050-0.0006d | 0.2 | 0.0053-0.0001d | 0.0139-0.0002d | 0.0210-0.0003d | 0.0375-0.0005d | 0.050-0.0006d |
| Improved WUF-welded web | 0.041 | 0.054 | 0.2 | 0.0103 | 0.0312 | 0.0410 | 0.0410 | 0.054 |
| Free flange ¹² | 0.067-0.0012d | 0.094-0.0016d | 0.2 | 0.0168-0.0003d | 0.0509-0.0009d | 0.0670-0.0012d | 0.0705-0.0012d | 0.094-0.0016d |
| Reduced beam section ¹² | 0.050-0.0003d | 0.070-0.0003d | 0.2 | 0.0125-0.0001d | 0.0380-0.0002d | 0.0500-0.0003d | 0.0525-0.0002d | 0.07-0.0003d |
| Welded flange plates | | | | | | | | |
| a. Flange plate net section | 0.03 | 0.06 | 0.2 | 0.0075 | 0.0228 | 0.0300 | 0.0450 | 0.06 |
| b. Other limit states | force-controlled | | | | | | | |
| Welded bottom haunch | 0.027 | 0.047 | 0.2 | 0.0068 | 0.0205 | 0.0270 | 0.0353 | 0.047 |
| Welded top and bottom haunches | 0.028 | 0.048 | 0.2 | 0.0070 | 0.0213 | 0.0280 | 0.0360 | 0.048 |
| Welded cover-plated flanges | 0.031 | 0.031 | 0.2 | 0.0078 | 0.0177 | 0.0236 | 0.0233 | 0.031 |