



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN PRELIMINAR DE DAÑOS DE
EDIFICIOS INSTRUMENTADOS**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN ESTRUCTURAS

PRESENTA:

ING. EDGAR MANUEL VÉRTIZ LÓPEZ

DIRECTOR DE TESINA: **DR. DAVID MURIÀ VILA**

CODIRECTOR DE TESINA: **DR. ORIOL ARNAU DELGADO**

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2015

Resumen

En esta tesina se pretende revisar la documentación existente, en México y otros países, sobre la inspección y evaluación preliminar de daños en edificios después de ocurrir un evento sísmico y, con base en ella, establecer una metodología semiautomática, para aplicarla en los edificios instrumentados a cargo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM).

Los alcances son:

- Definir un procedimiento para realizar un levantamiento de daños en el que sea factible de capturar electrónicamente los datos recopilados de la inspección de la estructura y compararlo con los registros de daños previos.
- A partir de ellos hacer la evaluación preliminar del estado físico del edificio y compararlos con el nivel de daños definido por el sistema de alerta estructural que se tiene implementado en los edificios instrumentados por el IIUNAM.

En este trabajo, esta metodología se aplicará al edificio del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT). El edificio consta de una torre de 22 pisos y tres cuerpos de baja altura. Los cuatro cuerpos del edificio comparten un sótano común. Desde un inicio, en 1964, los cuerpos manifestaron diversos problemas. El CCUT sufrió asentamientos diferenciales, la torre desplomos en la dirección sur poniente y emersiones en los cuerpos bajos. La instrumentación sísmica del edificio, opera desde 2008, la cual consiste de 28 acelerómetros ubicados en diferentes puntos del edificio y el terreno. En 2009, se instalaron GPS de alta resolución en la azotea del edificio para monitorear la verticalidad y para registrar los desplazamientos relativos de la azotea con respecto a la estación de referencia durante un sismo. Con esta instrumentación se han registrado hasta la fecha 14 eventos sísmicos.

Índice

Introducción	7
1.1. Objetivos y alcances	7
Análisis bibliográfico	9
2.1 Metodologías de inspección y evaluación en México y en otros países.	9
2.2 Sistema de alerta en edificios instrumentados	14
Metodología propuesta.....	19
3.1 Clasificación de daños	19
3.2 Recolección de información	20
3.3 Procedimiento general de la metodología	21
3.3.1 Inspección naranja.....	21
3.3.2 Inspección amarilla	22
3.4 Preparativos de inspección	23
3.5 Levantamiento de daños <i>in situ</i>	25
3.6 Digitalización del levantamiento de daños.....	30
3.7 Análisis de la información recabada	34
Aplicación al edificio CCUT	35
4.1 Recolección de información	39
4.2 Preparativos de inspección	41
4.3 Inspección de la zona	43
4.4 Clasificación de daños	45
4.5 Digitalización de la información	46
Conclusiones	51
Referencias	53

Introducción

Debido a que México se encuentra en una zona con alta sismicidad y continuamente se enfrenta a eventos sísmicos de diferente magnitud como se ha visto a lo largo de la historia, resulta de gran interés el estar constantemente innovando, revisando y complementando la literatura existente que ayude a tratar este asunto de los sismos en las estructuras.

Cuando una estructura recibe los efectos de un sismo con una intensidad tal que se puedan registrar los cambios provocados en ella, es conveniente que se revise su desempeño y el estado en que quedó en cuanto a seguridad estructural, para ello hay que realizar una inspección, en este sentido se han propuesto metodologías de inspección y evaluación postsísmicas.

En el caso de la metodología que se propone más adelante, contiene un procedimiento con el que se le podrá dar un seguimiento al estado estructural del edificio por medio de una evaluación rápida y otra detallada según se requiera.

Esta metodología será la que se lleve a cabo una vez que el sistema de alerta estructural requiera

de una inspección, ya que se desarrolló pensando que su aplicación sería en edificios instrumentados.

La idea es que en caso de un sismo, una edificación que se encuentre instrumentada, por medio de la alerta estructural, automáticamente avisará el posible daño que presenta, y dependiendo el nivel de este, se tendrá que ir o no, a inspeccionar y hacer una evaluación preliminar del estado del edificio con ayuda de la metodología aquí propuesta.

Esto con el fin de conservar la seguridad de los ocupantes, y lograr tomar las medidas pertinentes en un tiempo relativamente corto. Así mismo, se le podrá dar un seguimiento al desempeño que presenta la estructura ante estas solicitudes.

1.1. Objetivos y alcances

Establecer una metodología semiautomática, acerca de la inspección y evaluación preliminar de posibles daños en edificios después de ocurrir un evento sísmico para aplicarla en los edificios instrumentados a cargo del IIUNAM.

Los alcances son:

- Definir un procedimiento en la metodología propuesta para realizar un levantamiento de daños que sea factible utilizarlo como una herramienta para que posterior a la obtención de los datos recopilados de la inspección de la estructura, estos se puedan capturar electrónicamente para compararlos con cierta facilidad con los levantamientos de daños previos.
- Con ayuda de esta herramienta obtener una evaluación preliminar del estado físico del edificio y compararla con el nivel de daños definido por el sistema de alerta estructural que se ha implementado en los edificios instrumentados.

Capítulo 2

Análisis bibliográfico

En primera instancia se van a comentar algunas metodologías que existen para inspección de edificios en general y posteriormente se hablará de un sistema de alerta estructural para edificios instrumentados.

2.1 Metodologías de inspección y evaluación en México y en otros países.

México.

Uno de los primeros manuales que se han elaborado es el de Loera (1982), investigador del IIUNAM. Consta principalmente de dos pasos, recopilar información del inmueble por medio de una inspección visual y de clasificar el nivel de daño que se presenta en el mismo.

En cuanto a la información que tratará de recabar, se proporciona una lista que es una adaptación de “U.S. Department of Housing and Urban Development” (1977). Es relevante esta lista de información ya que, en la metodología propuesta, uno de los pasos trata del proceso de recabar documentación referente al edificio, misma que deberá por lo menos servir para conocer la

información que aparece en esa lista, que en pocas palabras contiene información que ayuda a conocer el estado del edificio.

Acercas de la clasificación de daños, en el manual propuesto por Loera (1982) indica seis niveles de daño: daño nulo, daños en elementos no estructurales, daño estructural ligero, daño estructural intermedio, daño estructural severo y colapso.

La metodología de Rodríguez y Castrillón (1995), también desarrollada por el IIUNAM, se basa principalmente en las siguientes referencias: “ATC 20” (ATC 1989a y 1989b), “ATC 21” (ATC 1988), Japón (Ohkubo, 1990 y “University Kiril and Metodij” (1984).

Su objetivo principal es llegar a una evaluación en la que se establezca si una determinada edificación que ha presenciado los efectos de un evento sísmico, pudiera llegar a continuar con su uso normal, o en caso que se requiera tener que establecer el acceso a esta como restringido o incluso prohibido. También pretende con todos los datos de las evaluaciones realizadas estimar la magnitud del daño e identificar sus

características generales, con la posibilidad de que llegaran a ser consideradas para cambiar o mejorar los reglamentos de construcción vigentes. Y como sucede con el resto de las metodologías, estandarizar un proceso de evaluación, para que diferentes evaluadores en una misma edificación lleguen a conclusiones semejantes.

Propone tres etapas o niveles de evaluación, la evaluación rápida, la evaluación detallada y evaluación de ingeniería. En la evaluación rápida (primer nivel), se busca identificar cuales estructuras se encuentran en un estado aceptable y que puedan continuar con su uso normal (habitables), también identifica cuáles son inseguras y se debe prohibir la entrada al edificio ya sea por el nivel de daño o por la presencia de otra condición, por ejemplo una línea de electricidad caída (insegura), así mismo contiene una clasificación más que sería una intermedia a estas dos anteriores (cuidado).

La evaluación rápida se realiza por medio de una inspección con la experiencia de un par de inspectores que tiene conocimiento en aspectos estructurales de la construcción de edificios, mencionando a ingenieros civiles o arquitectos.

Sin embargo, para la evaluación detallada (segundo nivel), las edificaciones se clasifican de la misma manera pero esta vez se recomienda un par de ingenieros civiles donde al menos uno sea

especialista en estructuras, y si llega a requerirse uno más en geotecnia.

Los daños los clasifican según los valores de la tabla 1.

Acercas de los pasos que se requieren llevar a cabo para realizar la evaluación rápida o la evaluación detallada, son prácticamente los mismos para los dos niveles de evaluación, solamente que en el caso de la evaluación detallada se debe de observar más a fondo.

A grandes rasgos, hablan de examinar tanto el exterior como el interior de la edificación, así como examinar el sitio por riesgos geotécnicos que pudieran llegar a afectar la estructura para posteriormente evaluarla y clasificarla en alguno de los tres estados posibles con ayuda de sus formatos propuestos, por último, informar a los ocupantes.

Por otro lado, si al realizar la primera inspección la edificación se clasifica como de cuidado o insegura, se llevará a cabo la segunda inspección, y si en la evaluación detallada se confirma que es de cuidado o insegura, para cualquier evaluación adicional se tendrá que hacer lo que la metodología menciona como una evaluación de ingeniería, es decir llevar a cabo un estudio a fondo y detallado de lo que sucede con la edificación por especialistas en estructuras.

Tabla 1 - Clasificación de uso de una edificación

CLASIFICACIÓN DE USO (COLOR)	DESCRIPCIÓN
Habitable (Verde)	No se encuentra en peligro aparente. La capacidad original para resistir cargas no presenta disminución significativa. No ofrece peligro para las vidas humanas, se puede ocupar.
Cuidado (Amarillo)	Presenta disminución significativa en su capacidad para resistir cargas. La entrada de propietarios se permite solo con fines de emergencia, y únicamente bajo su propio riesgo. No se permite uso continuo, ni entrada al público.
Insegura (Rojo)	Alto riesgo, posible derrumbe ante réplicas del temblor principal. La entrada está prohibida. La edificación es insegura para ocupar o entrar, excepto por las autoridades.
Área insegura	El área específica designada con este letrero es insegura. No se debe entrar o utilizar, excepto por las autoridades.

La metodología propuesta por Gama *et al*, (2012) se basa principalmente en la de Rodríguez y Castrillón (1995) y de otra adaptada de métodos japoneses por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco (UAM-A).

Un objetivo fundamental es mejorar los reglamentos de construcciones. Hace énfasis en que se deben estudiar los errores para mejorar los procesos de diseño, construcción, operación y mantenimiento de nuevas construcciones.

Propone cuatro niveles de evaluación.

- a) Evaluación Rápida
- b) Evaluación Nivel No.1
- c) Evaluación Nivel No. 2
- d) Evaluación Nivel No. 3 (Detallada)

La evaluación rápida, se refiere a la evaluación rápida de Rodríguez y Castrillón, (1995).

En la evaluación nivel no. 1 se inspecciona y se estiman algunas características básicas como el periodo de la estructura, con las que clasifica a la construcción, definiendo si el grado de seguridad

es adecuado o si requiere de la evaluación nivel no. 2 o 3.

La evaluación nivel no. 2 se basa en un procedimiento para la evaluación simplificada de la capacidad sísmica de edificios de mampostería y de concreto de mediana altura. Requiere de una inspección más detallada que la del nivel anterior para estimar la flexibilidad del edificio. Destaca que para la parte de periodo se puede hacer una estimación para edificios de hasta 10 niveles, de lo contrario sugiere hacer una medición *in situ* del periodo de la estructura.

La evaluación nivel no. 3 es aquella que determina la capacidad sísmica de la estructura llevando a cabo los procedimientos de análisis y revisión que marca el reglamento de construcciones. El resultado puede concluir en la posibilidad de llevar a cabo desde una reparación o refuerzo de la estructura hasta su demolición.

Se propone un formato único para recabar la información necesaria para la evaluación de daño.

El manual de Aragón *et al.*, (2011) si bien no es una metodología en sí, forma parte de ella; se elaboró en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). En sus objetivos destaca la creación de un formato que junto con el manual mismo, que ayuda como herramienta

de consulta, tratará de llegar a una evaluación de la edificación de una manera sistemática y uniforme.

Este formato recaba datos de la edificación como información general, el uso de la misma, el terreno y cimentación, características de la estructura en cuanto a su geometría general, la vulnerabilidad que presenta, de su sistema estructural, tiene un espacio para indicar una recomendación acerca de una posible rehabilitación; así mismo, una parte donde se puede indicar cierta información referente a la evaluación de daños y por último un espacio para colocar un croquis del inmueble.

El documento contiene información adecuada para repasar los aspectos necesarios para poder llevar a cabo la inspección y evaluación, y con ello evitar confusiones y omisiones en la recolección de datos.

Colombia.

La metodología de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS, 2002) se elaboró con base en la experiencia obtenida en un par de sismos, el del 8 de febrero de 1995 y el 25 de enero de 1999 en la región del Eje Cafetero, y como lo menciona en su documento, en la recopilación de las principales metodologías existentes a nivel internacional como en México,

Yugoslavia, Japón y Estados Unidos, y en su propio país.

Su objetivo general se centra principalmente en disponer de una metodología con la cual sean capaces de evaluar el daño y la seguridad de las edificaciones después de ocurrir un sismo. De ahí se desprenden otros, los cuales como en la mayoría de las metodologías, velan por la seguridad de las personas, ya que muy acertadamente en uno de ellos habla de reducir las incidencias de lesiones y muerte.

En cuanto al procedimiento de inspección tiene prácticamente los mismos pasos que la metodología de Rodríguez y Castrillón, (1995).

El formato de apoyo para realizar la evaluación, es también como en las metodologías pasadas, un formulario donde se describen ciertos aspectos de la edificación, tiene una apariencia más completa que los antes mencionados, ya que aunque el formato consta de una sola hoja necesaria por edificación, las preguntas realizadas en el mismo llevan a un lado las posibles respuestas, lo cual simplifica y agiliza su llenado.

Esta manera de clasificar parece práctica, ya que aunque sigue un procedimiento de inspección muy parecido a otras metodologías, al final con ayuda de todos los datos y características que se recolectaron utilizando el formato, ayudará a que

el evaluador decida un estado usando siempre su criterio y experiencia.

Ya que como reitera esta metodología, aunque la mayoría de los elementos estén en buenas condiciones, basta con que un solo elemento o serie de elementos se encuentren en muy mal estado, para que la edificación pudiera comprometer su seguridad estructural.

La metodología hace énfasis en lo anterior debido a que contempla realizar una sola inspección, que será del tipo detallada, y con ella establecer una opinión; ya sea llevar a cabo trabajos de reparación, reforzamiento o demolición.

Estados Unidos.

La publicación FEMA-154 (2002) es parte de los artículos de la “Federal Emergency Management Agency” (FEMA), es un manual que contiene toda una planeación para identificar aquellas edificaciones que, en pocas palabras, representen un cierto peligro al enfrentar un sismo, ya sea por su antigüedad, la reglamentación que se usó para su diseño estructural, el tipo de suelo, o ciertas características que lleven a un desempeño que influya negativamente en su respuesta sísmica.

Básicamente se trata de una revisión y evaluación del estado en que se encuentran las edificaciones, principalmente desde el punto de vista

estructural, antes de que ocurra algún evento sísmico. Más allá de hacer una evaluación rápida después de haber ocurrido un sismo, se trata de prevenir que las edificaciones alcancen niveles altos de daño una vez que ha ocurrido el sismo y evitar poner en peligro la seguridad de los ocupantes.

Así que oportunamente se comienzan a revisar las edificaciones buscando e identificando aquellas que se alejen de presentar un buen comportamiento o desempeño durante un evento sísmico.

Esto es bueno ya que con esta información, se puede proceder a reforzar los edificios que así lo requieran, o en caso que no se alcance a efectuar un reforzamiento, se tendría una idea de cuales sectores o edificaciones están más propensas a recibir daños significantes, y de esta manera planear rutas dando prioridad a estas edificaciones que de ante mano se sabrá que probablemente tendrán un daño estructural mayor a otras edificaciones.

El formato que se usa reúne algunas características con las cuales se obtiene un puntaje, y con este se puede determinar qué acción se va a tomar con la edificación según los límites que se hayan establecido. Este formato viene en tres presentaciones dependiendo el grado de sismicidad en que se encuentre la zona que se evaluará, entonces dependiendo la zona

los valores de los puntajes varían, sin embargo, los lugares donde se podrían aplicar este tipo de metodologías con mayor frecuencia serían aquellos que se encuentren en una zona altamente sísmica.

Lo interesante de esta metodología es que al dar un puntaje a cada edificación, a pesar de que la incertidumbre del estado real de estas es grande, se pueden comparar entre las mismas edificaciones y pasar a revisar primeramente a las que según los puntajes así lo requieran, esto es, que aunque no conozcamos el daño con entera exactitud, sabemos cuáles son las más vulnerables según estos indicadores.

2.2 Sistema de alerta en edificios instrumentados

En la búsqueda de diferentes alternativas y aprovechando la tecnología se han creado otro tipo de metodologías como la de Murià-Vila *et al.*, (2010) con el fin de proveer un informe preliminar con los datos más significativos del evento y señalar el posible estado físico de la edificación en cuestión de minutos y de manera automática.

Este sistema de alerta podría ser de gran ayuda, ya que menciona que después de un sismo, puede establecer si es necesario o no llevar a cabo una inspección visual *in situ* de la edificación que se

esté revisando, gracias a la instrumentación del edificio.

Sin embargo, no es el objetivo ni se pretende hacer una explicación a detalle del mecanismo de trabajo de la alerta, solamente se pretende mencionar con un fin informativo y para que se tenga idea de qué es lo que se considera para obtener los resultados.

En caso que se desee investigar o entender más a fondo a cerca del sistema de alerta, se invita a revisar el artículo original, el cual además de hablar del sistema, contiene las referencias con las cuales se puede dar soporte a su contenido, así como sus ventajas y desventajas.

Teniendo lo anterior como entendido, en seguida se presenta el criterio y el procedimiento de evaluación del sistema de alerta estructural en edificios instrumentados (Murià-Vila *et al.*, 2010).

Criterio de evaluación

El criterio de evaluación se basa en cinco indicadores, dos relativos a la intensidad del sismo y tres de respuesta estructural, con los que el sistema de alerta estructural se basa para tomar una decisión. Estos indicadores se han elegido debido a la facilidad para su obtención, ya que la información que suministra la instrumentación,

se puede calcular por medio de un procedimiento automático, quedando como tarea interpretar estos datos para llegar a un resultado deseado.

De estos indicadores, los dos que son relativos a la intensidad del sismo son la aceleración máxima ($A_{m\acute{a}x}$) y la intensidad de Arias (I_{Arias}) de los componentes horizontales del terreno o en su defecto de la base del edificio, y los tres a respuesta estructural son las distorsiones de entrepiso (DE) en los componentes transversal (T) y longitudinal (L) del edificio, las variaciones de las frecuencias (VF) fundamentales de vibración de los componentes T y L, y por último la estimación del coeficiente sísmico (C_s) con base en las aceleraciones registradas en la estructura.

Estos indicadores en diferente medida, presentan algunas implicaciones, limitaciones y desventajas al estimar los resultados que cada uno de ellos proporciona por individual, dando como resultado que no es posible utilizar un solo indicador para lograr estimar algún daño presente en la edificación con la confianza debida, es necesario utilizarlos en conjunto para que entre ellos se puedan confirmar hasta cierto punto los resultados que están generando, y es entonces cuando el sistema de alerta emplea un procedimiento de evaluación.

Procedimiento de evaluación

Se han propuesto tres niveles de posible daño para cada indicador, estos niveles son; Nivel 1 posible daño ligero, Nivel 2 posible daño intermedio y Nivel 3 posible daño severo. Los límites para estos niveles están en función del edificio (estructura y elementos no estructurales), de las características del sitio donde esté ubicado y de su estado físico al iniciar su monitoreo. Lo que significa que estos límites que enmarcan los rangos para los niveles de daño podrían tener variaciones de una edificación a otra.

Gracias a la experiencia en la materia, se hizo posible considerar los diversos escenarios, y establecer para ellos los valores de referencia y los límites para cada nivel de daño. Así que para edificaciones con características similares a la de los edificios estudiados para realizar la alerta estructural, se podrán usar los mismos valores los cuales son aplicables para edificios entre 14 y 17 niveles que estén cimentados en suelos blandos y con una estructura de concreto reforzado.

Para poder editar u obtener los límites de estos rangos, es necesario contar con la siguiente información: verticalidades, frecuencias de vibración del edificio, tipo de estructuración, tipo de cimentación y de suelo, rehabilitaciones y antigüedad de la construcción, y estimación de su estado físico, la cual se tomará como inicial.

Para finalizar, al ponderar los cinco indicadores se puede establecer el estado físico del edificio, obteniendo cuatro grados y/o colores:

1. Verde, se tendrá cuando VF, A_{max} , I_{Arias} y C_s sean igual al nivel 1.
2. Amarillo, cuando VF o dos de los indicadores restantes sean nivel 2.
3. Naranja, (inspección del edificio) será establecido cuando VF sea nivel 3 y al menos uno de los indicadores $A_{máx}$, I_{Arias} o C_s es nivel 2, o si VF es nivel 2 y alguno de los otros es nivel 3. En ambos casos no se considera DE por las incertidumbres en su estimación. En este estado es urgente hacer una inspección del edificio para descartar que se trate de un estado Rojo.
4. Rojo, si la inspección sugiere evacuar el edificio.

Esta inspección del edificio que se menciona en el color naranja, será efectuada por medio de la metodología que se propone en este documento, incluso si se obtiene color amarillo.

En cuanto a los niveles o clasificación de daños que se proponen en esta alerta, con el objetivo de no repetirlos, serán mencionados en el capítulo 3 en la metodología propuesta.

Sistema de alerta estructural

La implementación de un sistema de alerta automatizado es factible en edificios instrumentados. Esto permite analizar su respuesta dinámica ante la ocurrencia de un sismo y detectar posibles cambios en sus características estructurales con base en sus valores iniciales y establecer aproximadamente su estado de daño.

El sistema automatizado de alerta estructural se elaboró como una ayuda en la operación y mantenimiento de un edificio, con base en los eventos que se registren. Al ocurrir un sismo, el sistema propuesto procesa los registros, obtiene los valores de los indicadores y los compara con los de referencia. Con estos datos elabora un informe automático donde se presentan algunos registros y sus espectros, los valores de los indicadores, y la estimación del posible estado de daño. Posteriormente, el informe debe ser revisado por personal capacitado para su ratificación o posible corrección.

Capítulo 3

Metodología propuesta

Esta metodología está orientada para la inspección y evaluación preliminar de daños de edificios instrumentados, de los cuales se cuenta con información sobre su estructuración, tipo de suelo, reglamento con el que fue diseñado, así como daños de eventos sísmicos y rehabilitaciones previas a su instrumentación.

Los edificios estarán monitoreados con el sistema de alerta estructural del que se habló en el capítulo dos, ya que con la instrumentación de un edificio y la aplicación del sistema de alerta es posible detectar cambios en sus características estructurales con relación a sus valores iniciales, y establecer su estado de daño al momento de presentarse un evento sísmico y determinar si se necesita ir a revisar una de estas edificaciones.

Para ello es conveniente implementar un procedimiento de inspección y recopilación de datos que complemente al sistema de alerta estructural.

3.1 Clasificación de daños

Se mantendrán los tres niveles de daño propuestos por el sistema de alerta estructural en edificios instrumentados (Murià-Vila *et al.*,

2010), conocidos como daño ligero, intermedio y severo, y se incluye una breve aclaración para edificios con daños previos.

El daño ligero o tolerable incluye la posible presencia de agrietamientos, en su mayoría en los elementos no estructurales, aunque pueden aparecer agrietamientos en elementos estructurales como son los muros de mampostería. Estos daños no representan riesgo para los ocupantes. Puede haber pequeñas disminuciones de frecuencias de vibración del edificio por pérdidas de rigidez atribuibles a reacomodos de los elementos no estructurales. No se exceden las distorsiones de entrepiso tolerables, aunque dichas distorsiones pueden producir un cierto daño en los elementos no estructurales y estructurales, pero son de igual o menor magnitud que los producidos por el uso normal del edificio.

En el daño intermedio es evidente la presencia de grietas en elementos estructurales y no estructurales. Pueden ocurrir desprendimiento de aplanados y caída de plafones. Las distorsiones de entrepiso pueden rebasar los valores tolerables en elementos no estructurales y estructurales. Habrá disminución de las frecuencias de

vibración del edificio por pérdida de rigidez del sistema suelo-estructura. Estos daños en general no representan riesgo para los ocupantes, aunque puede ser eventualmente necesario limitar algún área del edificio con el fin de hacer las reparaciones pertinentes. Requiere la inspección ocular del edificio por un profesional debidamente capacitado para determinar su estado físico y si hay evidencia de un deficiente comportamiento que requiera de una posible intervención correctiva.

El daño severo es evidenciado por la presencia de agrietamientos en elementos no estructurales y estructurales, y por la mayor pérdida de rigidez. En general, el coeficiente sísmico y las distorsiones de entrepiso son cercanos o rebasan las permisibles por las normas de construcción. Requiere de una urgente inspección ocular del edificio por profesionales debidamente capacitados en ingeniería estructural para determinar el posible desalojo del personal que lo ocupa.

Para edificios que contengan daños previos a su instrumentación, por ejemplo agrietamientos; independientemente del nivel de daño que presente, puede que aparezcan o no más grietas en los elementos estructurales y no estructurales, así como la reaparición de las mismas en caso que hubieran sido cubiertas, también pudieran aumentar de tamaño las grietas ya existentes.

3.2 Recolección de información

La información que se debe recabar desde que se va a instrumentar el edificio para conocer su historial estructural y que es pieza fundamental de esta metodología se obtiene de la siguiente documentación:

- De su construcción
 - Planos estructurales
 - Memoria de cálculo
 - Estudio de mecánica de suelos
 - Planos arquitectónicos
 - Planos de instalaciones
- Durante su vida útil
 - Cambio de uso del inmueble
 - Remodelaciones
 - Reparaciones o rehabilitaciones
 - Estudios extras y evaluaciones
- Si fue rehabilitado
 - Los nuevos planos estructurales que contienen estas modificaciones
 - Estudios extras que se hayan realizado como de mecánica de suelos, dictámenes, materiales, etc.

3.3 Procedimiento general de la metodología

Inicia cuando el evento sísmico es registrado por la instrumentación. En seguida la alerta estructural generará un informe el cual será revisado por especialistas.

En caso de que resulte alerta amarilla o naranja se llevará a cabo una inspección. Si la alerta es naranja se llevará a cabo una inspección urgente buscando indicios de daño severo que lleven a una evacuación (alerta roja). Una vez se concluya la inspección urgente, y en caso de que la alerta se mantenga en naranja o resulte amarilla se llevará a cabo una inspección general de los daños realizando un levantamiento de daños.

Se clasificará el nivel de daños que se detectó en la inspección general, sugiriendo alguna posible intervención a la estructura si es necesaria.

Se procederá a realizar una digitalización del levantamiento que se realizó y se continuará con el estudio de la información recabada con fines de investigación.

3.3.1 Inspección naranja

En caso de una señal de alerta naranja urge que se lleve a cabo una inspección específica, apoyado de la información que ya se tiene de la

estructura como el levantamiento de daños previos, se buscarán indicios que nos lleven a tener que realizar una evacuación y clasificar el edificio con un nivel de daño severo.

Se hará una comparación visual entre el daño actual y el último levantamiento que se tenga, comenzando por aquellas zonas que se conoce que presentan más daños, por ejemplo daños en algún piso en específico, desplomos importantes en un sector o problemas en la cimentación, es decir, donde según la información estudiada, es más probable que se pudiera comprometer la seguridad estructural de la edificación si aparecieran más daños.

Una vez que se identifiquen estos daños, y se concluya que es necesario realizar una evacuación por el grado de estos, se clasificará con alerta roja y se evacuará el edificio.

Es importante resaltar que aunque se encuentren indicios de daños severos no necesariamente se requiere de una evacuación. Puede pasar que no se encuentren indicios de daños severos y tampoco se requiera desalojar el edificio.

Sin embargo, existe el caso que después de esta inspección ya sea que se encuentren o no indicios de daños severos, por necesidad de alguna reparación o reforzamiento se tenga que desalojar todo o una parte del edificio.

En caso que no se clasifique como alerta roja en este paso, se marcará como alerta naranja, hasta que se demuestre que pudiera clasificarse como amarilla o verde.

Una vez que se atendió la urgencia, se llevará a cabo el mismo procedimiento que en la alerta amarilla, es decir, una inspección general de daños en la que se realizará un levantamiento de daños *in situ*. Sin dejar a un lado que de haber sido alerta roja, se deberá de tener cuidado al realizar la inspección con la posibilidad de no hacerla.

El procedimiento a seguir para llevar a cabo la inspección naranja en la metodología propuesta es la siguiente:

- 1) Tomar el paquete de información y material referente a los preparativos de inspección del edificio.
- 2) Comenzar a inspeccionar la edificación en las zonas que se conoce que presentan más daños sin descuidar cualquier otra anomalía que se detecte.
- 3) Evaluación preliminar *in situ*. Informar si se va a realizar o no un desalojo ya sea parcial o total.

- 4) Realizar inspección general completa llevando a cabo el levantamiento de daños *in situ* del edificio, con ayuda del levantamiento de daños anterior.

- 5) Clasificar el nivel de daños encontrados. Confirmar clasificación de nivel de daños.

- 6) Generar el levantamiento de daños digitalizado y continuar con el estudio la información recabada.

3.3.2 Inspección amarilla

Cuando la alerta indique amarillo, se deberá hacer una inspección en la que se llevara a cabo el levantamiento de daños *in situ*, que incluye las grietas y demás daños que se logren observar como desplomos, hundimientos, daños en elementos no estructurales y estructurales.

En esta evaluación se revisará toda la estructura que sea necesaria para poder clasificar con mayor precisión el nivel de daño en que se encuentra. También podríamos identificar alguna zona que debiera ser delimitada hasta que sea reparada.

Se deberá contar con el último levantamiento de daños, con el fin de poder ir haciendo una comparación rápida del estado actual contra el estado anterior e identificar con mayor facilidad el nivel de daño, ya sea por el aumento del daño

que ya existía o en el caso de que no tuviera un daño previo, señalar si aparecieron indicios de daños nuevos; también ayudará a tener que hacer la anotación únicamente de los daños nuevos, y no tener que iniciar desde cero.

Además, al revisar todo el edificio señalar en el levantamiento de grietas digitalizado las zonas donde se observe aparición de daños.

De esta manera podríamos darnos una idea de cómo están repartidos los nuevos daños en la estructura y saber que están ahí para ayudar a determinar el nuevo estado en el que se encuentra el edificio.

Identificar si ha habido cambios en la estructura como la colocación y/o retiro de muros que no estén reflejados en los planos.

El procedimiento a seguir para llevar a cabo la inspección amarilla en la metodología propuesta es la siguiente:

- 1) Tomar el paquete de información y material referente a los preparativos de inspección del edificio.
- 2) Realizar inspección general completa llevando a cabo el levantamiento de daños *in situ* del edificio, con ayuda del levantamiento de daños anterior ya sea digitalizado o no.
- 3) Clasificar el nivel de daños encontrados.

- 4) Generar el levantamiento de daños digitalizado y continuar con el estudio de la información recabada.

3.4 Preparativos de inspección

Para realizar la inspección hay que tener a la mano un paquete de información de la estructura y material que se deberá de llevar:

1. Informe de la alerta estructural
2. Desplomos
3. Levantamiento de daños previos
4. Juego de elevaciones en limpio
5. Material necesario

Juego de elevaciones.

Deberá contar con las siguientes características (figura 1):

- Las elevaciones de los elementos estructurales deberán tener una escala con la que sea adecuado trabajar, por ejemplo, 1:50.
- Un espacio próximo a una esquina de la hoja, para indicar la posición del elemento del que se esté refiriendo, por ejemplo, el nivel y eje.
- Una planta del nivel
- Impreso en hojas tamaño carta

Material necesario

- Lápiz o lapicera y pluma con varios colores de tinta
- Borrador
- Tabla de madera o plástico para sujetar hojas
- Grietómetro
- Flexómetro

- Plomada
- Escalera de tijera
- Lámpara con baterías extras
- Cámara fotográfica con alta resolución
- Desarmador
- Silbato
- Casco
- Botas
- Mochila

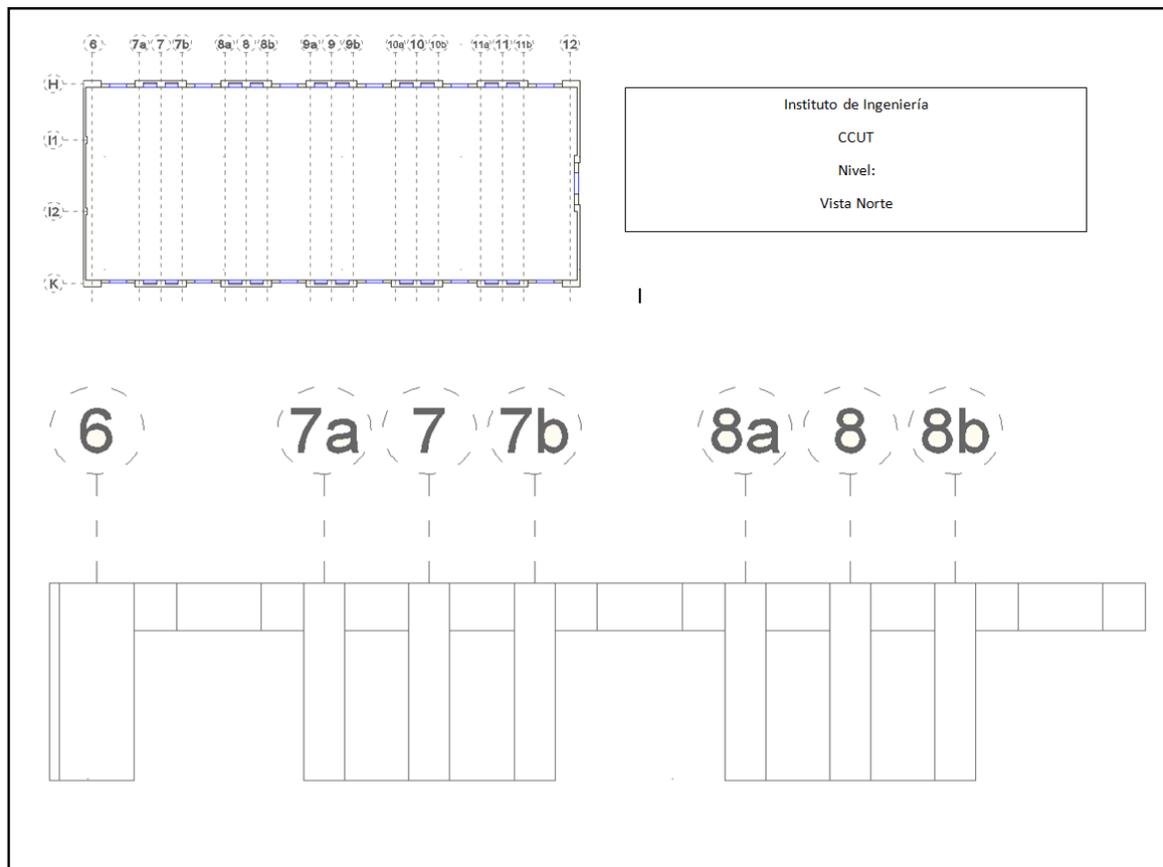


Figura 1 – Ejemplo de distribución de la información del formato de elevación.

3.5 Levantamiento de daños *in situ*

El levantamiento de daños consiste en hacer una inspección visual de los elementos estructurales y de los elementos no estructurales, con el fin de poder compararlos con los registros previos de daños que se tengan.

Se sugiere comenzar con el levantamiento en las zonas o elementos donde se crea que es más probable que se presenten daños que pudieran comprometer la seguridad estructural de la edificación; es decir, en una estructura resentida pudiera ser donde ya se conoce que existían daños previos.

Procedimiento para levantamiento de daños *in situ*

1. Revisar la estructura comparándola con el último levantamiento realizado, ya sea que este digitalizado o no, realizando un reconocimiento de los posibles cambios en la estructura, como por ejemplo la presencia de grietas, desplomos, daños en cimentación, entre otros, en los elementos estructurales y/o no estructurales.
2. En el juego de elevaciones trazar con lápiz las grietas que pudieran llegar a tener los elementos y que se considere sean útiles para el propósito. Se tratará de medir el ancho máximo con un grietómetro y se indicará en cada grieta trazada (figura 2), así mismo se podrá indicar la longitud de las grietas.
3. Indicar cualquier otro cambio que se detecte y se considere conveniente como perforaciones en lugares inadecuados, exposición de refuerzo, etc.
4. Si se considera necesario, se debe descubrir la estructura que contenga algún acabado.
5. Se revisarán los desplomos por cada nivel, cuidando de hacerlo siempre en la misma columna. Se anotará el porcentaje de la pendiente en el levantamiento de daños en las columnas donde se hayan hecho las mediciones.

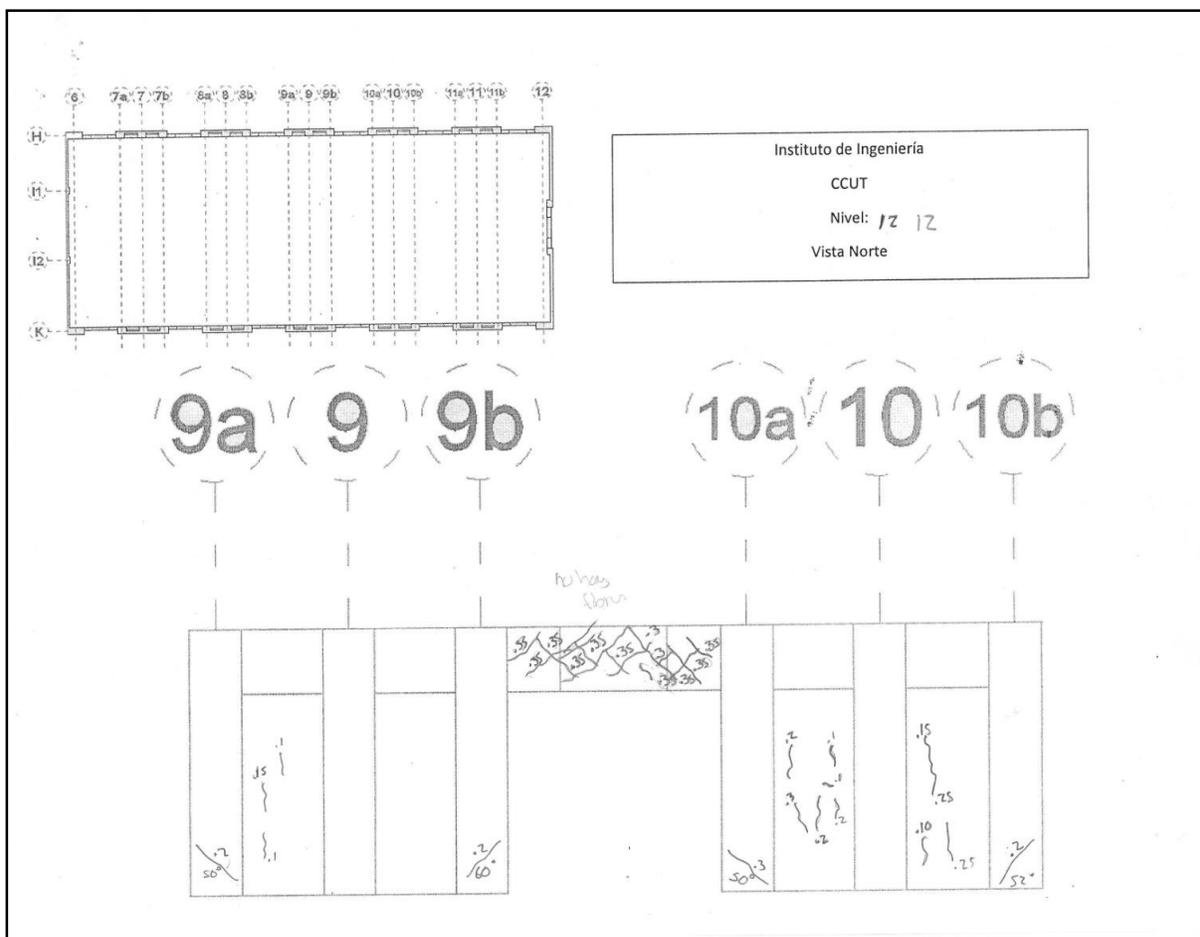


Figura 2 – Elevación con levantamiento de grietas en columnas, muros y trabes.

6. Tomar fotografías que ayuden a complementar la información para conocer el estado actual de la estructura, pensando en que se revisará la información recabada en gabinete.

Para el caso en el que se genere el punto de comparación inicial de daños, se realizará el levantamiento de daños *in situ* por primera vez.

La estrategia a tomar para repartir el trabajo de realizar el levantamiento *in situ* entre el equipo

de evaluadores se definirá en función del escenario observado.

Como una alternativa para realizar el levantamiento de daños *in situ* se pudieran tomar fotografías de los elementos, con la suficiente resolución para alcanzar a ver las grietas y lograr medir su espesor en pantalla; para esto en cada fotografía deberá aparecer un grietómetro para usarlo como referencia para tener una escala (figura 3).



Figura 3 – Ejemplo de fotografía de una trabe N8T H 8-9 0.

Algunas ventajas de las fotografías son que contienen mucha información, son rápidas de tomar, permiten realizar todo un trabajo en gabinete sin la prisa que demanda una visita al edificio, y que se puede entrar al detalle que se desee.

Para identificar y ubicar en la estructura fácilmente las fotografías se propone la siguiente nomenclatura para el nombre del archivo (figuras 3 y 4):

El nombre del archivo de la primera imagen de la figura 4 es N8T H 8-9 0, a continuación se describe cada parte.

N8T = Nivel 8 Trabe

H = Se encuentra en el eje H.

8-9 = Entre los ejes 8 y 9

0 = La terminación en “0” quiere decir que es la foto general del elemento en cuestión.

En el caso de realizar un acercamiento en el que un elemento se tenga que dividir en tres partes por ejemplo, cada acercamiento de estos se llama igual que el elemento al cual pertenece, solo cambiará la terminación, en este caso cambia de “0” a ya sea “1”, “2” o “3”, por ejemplo N8T H 8-9 2. Para hacer esta distinción la terminación se considerará observando el elemento de izquierda a derecha o de arriba hacia abajo, según se requiera.

Y en el caso que se tuviera que tomar una foto aún más de cerca para algún detalle en especial, llevaría el mismo nombre que el del primer acercamiento pero al final le agregaría una “D” de detalle, quedaría así, N8T H 8-9 2D.

Esto de que exista una foto con el elemento completo, y las que tienen el acercamiento, es debido a que no es de mucha ayuda ir y tomar una

foto a una grieta muy de cerca, si no se sabe en qué parte del elemento se encuentra.

Se logra apreciar en el recorte de pantalla que se muestra (figura 4), si se abre la ventana con cierto tamaño para que solo se muestren 4 columnas de fotos, en la primera columna aparecen las fotos con terminación en “0” las cuales contienen al elemento completo. Y las columnas 2, 3 y 4 contienen cada una de las partes de los acercamientos respectivamente.

Se deben juntar todos estos croquis que se elaboraron por secciones o elementos aislados, de manera que en una sola imagen pueda observarse más claramente el daño en todo un nivel o un eje determinado; esto puede ayudar a encontrar el funcionamiento de un sistema estructural.



Figura 4 – Ejemplo de acomodo de fotografías por su nombre.

3.6 Digitalización del levantamiento de daños

La digitalización del levantamiento de daños no es otra cosa que la recopilación de los daños recabados en el levantamiento *in situ*, que se someten a un procedimiento para que las elevaciones con sus daños se hagan digitales y se agrupen con la configuración que más nos convenga, para elaborar una ilustración que contenga los daños en todos los niveles de una determinada zona de la estructura.

Se proponen dos procedimientos para realizar la digitalización.

Digitalización del levantamiento de daños vectorizando automáticamente imágenes escaneadas:

- a) Recabar la información del levantamiento de daños *in situ*. Repasar las grietas con algún color para que resalten del resto de líneas.
- b) Escanear a colores las hojas, ya que de esta manera resaltarán las grietas que fueron repasadas con algún color. Además, se tendrá el cuidado de que la calidad del

escaneo sea la suficiente para que se puedan ver claras las imágenes en la computadora incluso haciendo acercamientos a la imagen, misma que deberá estar en formato JPG.

- c) Cada imagen escaneada será recortada, rotada y escalada usando algún programa de edición de imágenes, para que posteriormente se puedan agrupar (figura 5).
- d) Se llevará a cabo la vectorización de cada imagen con Adobe Illustrator. Se propone este programa debido a lo sencillo que resulta llevar a cabo este proceso con el tipo de imágenes con las que trabajamos, ya que el programa contiene unos tipos de vectorización predefinidos, solo basta con seleccionar el adecuado y/o hacer un pequeño ajuste en las propiedades de esta parte (figuras 6 y 7).

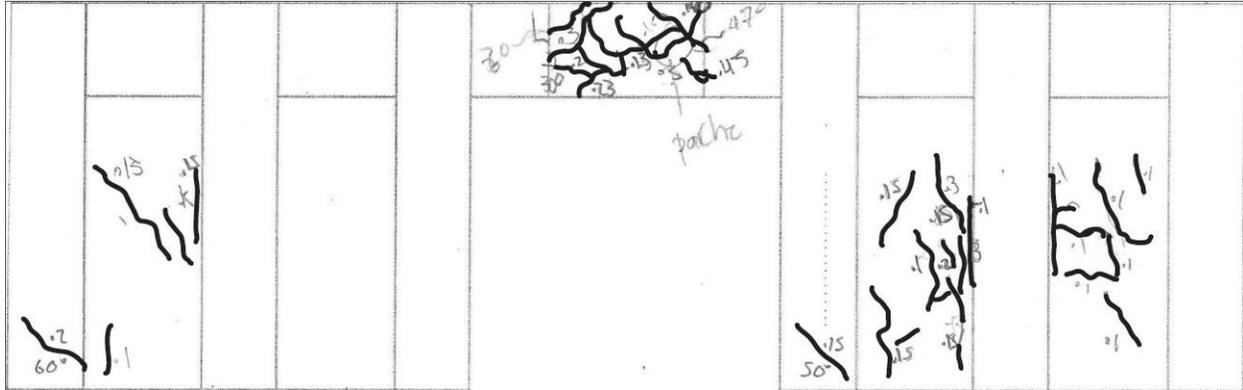


Figura 8 – Imagen con trazos de grietas creados con el proceso de vectorización.

Posterior al proceso de vectorizado se debe expandir y desagrupar la imagen que se creó para poder editar individualmente los trazos creados, y eliminar los trazos que no se desee (figura 8).

Crear una rutina dentro del Illustrator la cual, al iniciarla, se encargue de abrir, vectorizar, expandir, desagrupar, guardar y cerrar un archivo de manera automática, y aplicarla a todos los archivos de una carpeta con una sola vez que se ejecute.

e) Hacer en AutoCAD la elevación general donde se piense colocar las grietas, y exportarla a Illustrator. Tener en cuenta que al importar un archivo desde el Illustrator,

automáticamente se pueden mantener las capas que se hayan creado en AutoCAD.

f) En el archivo donde se importó la elevación de AutoCAD, crear las capas que se van a necesitar para separar los diferentes trazos y así poder distinguir los espesores de las grietas por ejemplo. Importar cada una de las imágenes que fueron recortadas, rotadas y escaladas, acomodándolas en el lugar que le corresponda según la parte que estén representando.

g) Crear el archivo en formato PDF de la elevación general con todas las grietas y demás detalles que se hayan querido agregar, separados debidamente en diferentes capas, las cuales se pueden prender y apagar en

Adobe Reader al abrir el PDF (figuras 14a y 14b).

Digitalización del levantamiento de daños usando una pantalla táctil:

- a) Recabar la información del levantamiento de daños *in situ*.
- b) Se escanearán las hojas teniendo el cuidado que la calidad sea la suficiente para que se puedan ver claras las imágenes en la computadora incluso haciendo acercamientos a la imagen, misma que deberá estar en formato JPG.
- c) Cada imagen escaneada será recortada, rotada y escalada usando algún programa de edición de imágenes, para que posteriormente se puedan agrupar.
- d) Hacer en AutoCAD la elevación general donde se piense colocar las grietas, y exportarlo a Illustrator. Tener en cuenta que al importar un archivo desde el Illustrator, automáticamente se pueden mantener las capas que se hayan creado en AutoCAD.
- e) En el archivo de Illustrator donde se importó la elevación de AutoCAD, crear las capas que se van a necesitar para separar los

diferentes trazos y así poder distinguir los espesores de las grietas por ejemplo. Importar cada una de las imágenes que fueron recortadas, rotadas y escaladas, acomodándolas en el lugar que le corresponda según la parte que estén representando.

- f) Con ayuda de la pantalla táctil y su pluma especial, en el Illustrator repasar sobre las grietas para crearlas digitalmente separándolas en sus diferentes capas.
- g) Crear el archivo en formato PDF de la elevación general con todas las grietas y demás detalles que se hayan querido agregar, separados debidamente en diferentes capas, las cuales se pueden prender y apagar individualmente en el Adobe Reader para poder trabajar con ellas posteriormente, pero en un formato más práctico como lo es el PDF.

Al final con ambos métodos las imágenes digitales creadas tienen la particularidad de que son imágenes vectorizadas, y una ventaja de este tipo de imágenes es que no resultan muy grandes en cuanto a espacio de almacenamiento se refiere, y que por sus características se pueden realizar acercamientos a la imagen sin que pierdan calidad (figuras 14a, 14b y 15).

3.7 Análisis de la información recabada

Una vez que se tenga el levantamiento de daños *in situ*, el reporte de la alerta estructural, fotografías y apoyado en el levantamiento de daños digitalizado se continuará con el estudio del edificio incorporando la información recabada a partir del evento registrado.

Se podrá observar el registro de los daños reales en los elementos estructurales, en el levantamiento de daños digitalizado y en las fotografías para determinar si existe algún aumento contra los daños anteriores.

Dándole un seguimiento a la parte anterior, podría ayudar en primera instancia a detectar si existe alguna zona que este presentando un mal comportamiento evidenciado por el aumento de daños, y sugerir un posible reforzamiento en dicha zona.

Con el informe de la alerta, al detectar cambios en los indicadores, podrían ser indicios de cambios en algunas propiedades de la estructura, que al seguir instrumentada se podría corroborar estos cambios en las mediciones posteriores, incluso se podría pensar en algún mantenimiento preventivo.

La información recabada ayudará a continuar con el estudio refinado del comportamiento del

edificio, al servir de apoyo para realizar modelos de análisis no lineal de la estructural.

Capítulo 4

Aplicación al edificio CCUT

Con el paso del tiempo el conjunto del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT) ha manifestado algunos problemas desde su construcción, esto ha llevado a que haya sido estudiado, reforzado y reparado en varias ocasiones.

El conjunto del CCUT consta de una torre de 22 niveles (figura 9) y de tres cuerpos bajos, es propiedad de la UNAM, anteriormente pertenecía a la Secretaria de Relaciones Exteriores. Se localiza en la esquina del Eje Central Lázaro Cárdenas y de la avenida Ricardo Flores Magón junto a la Plaza de las Tres Culturas en el Distrito Federal, México.

La siguiente información se sustrajo de los trabajos de Ávila *et al.* (2009) y Murià-Vila *et al.* (2013).

Cuando se inauguró en 1964 ya mostraba varios problemas, el edificio tenía asentamientos diferenciales y se encontraba desplomado, así como la elevación de los cuerpos bajos.

Con el fin de controlar estos problemas, se han realizado cuatro recimentaciones en diferentes etapas y un reforzamiento de la estructura del edificio.

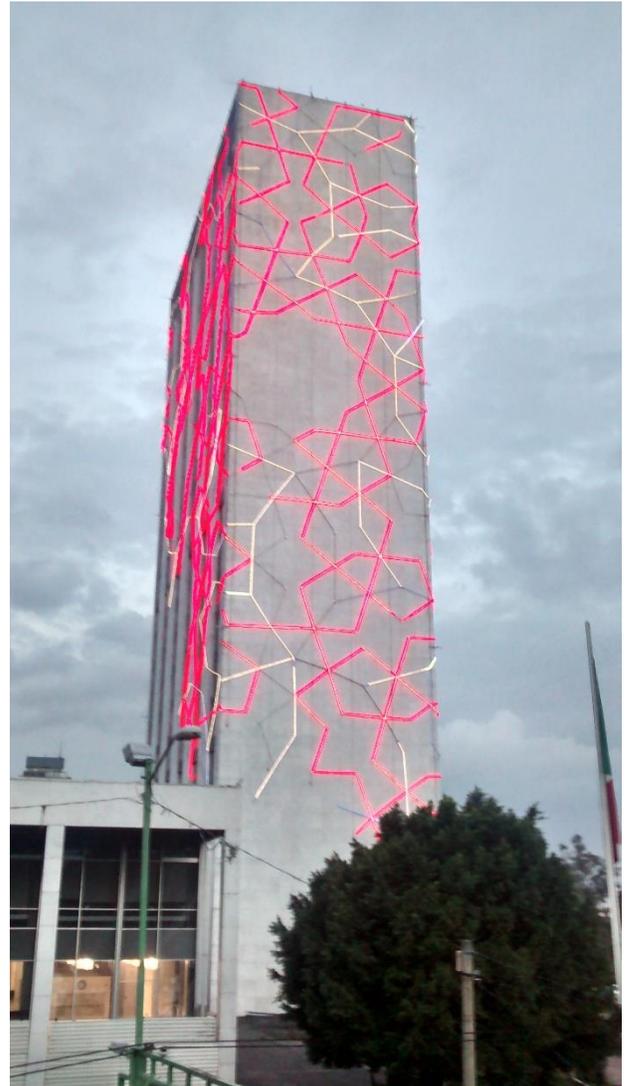


Figura 9 - Fotografía del edificio del Centro Cultural Universitario Tlatelolco.

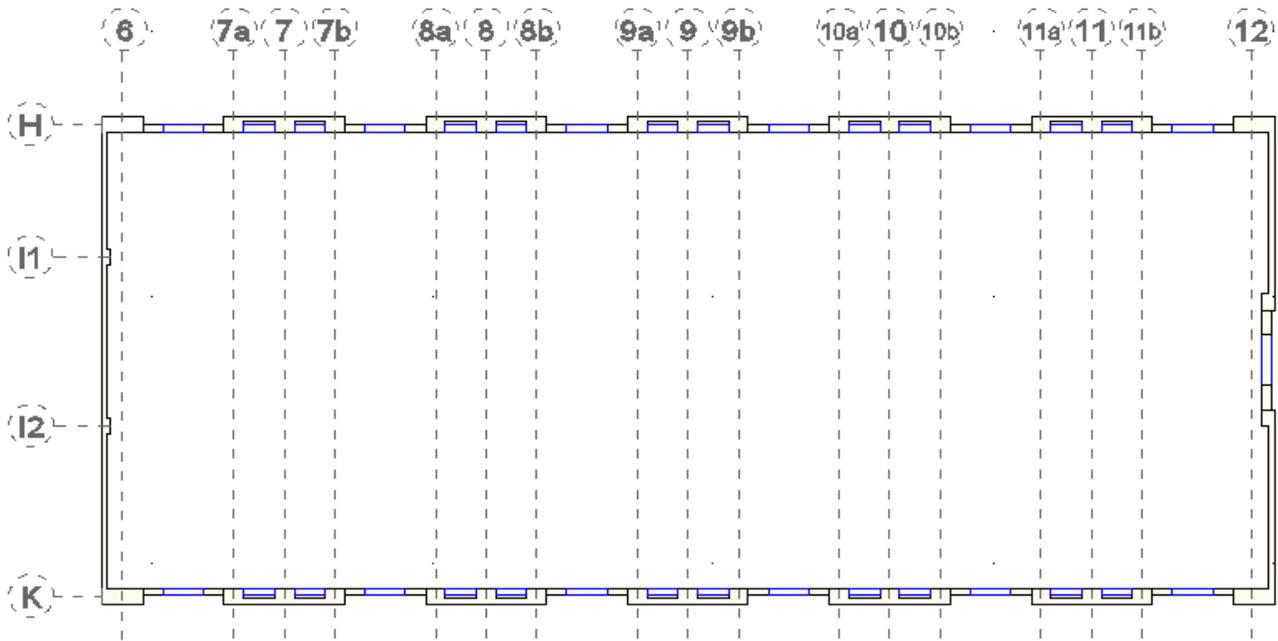


Figura 10 – Planta esquemática del edificio CCUT.

El edificio se encuentra ubicado según el mapa de la zonificación geotécnica de la ciudad de México presentado en las NTC-Sismo del RDF-04 dentro de la zona sísmica lacustre tipo IIIb donde el periodo dominante del movimiento del suelo está entre 1.9 y 2.0 s.

La torre del CCUT tiene una forma rectangular en planta de 41.87 m de largo y 18.35 m de ancho (figura 10), y 86.30 m de altura. Se conforma por un sótano, planta baja y 22 niveles.

Los elementos de apoyo están conformados por muros de concreto reforzado de 4.30 m de largo que forman bandas sobre los ejes longitudinales H y K que van hasta el nivel 20 desde la planta

baja. Las fachadas laterales están cerradas por muros de concreto con la particularidad que el muro del eje 12 cuenta con una abertura al centro del mismo que va a largo de toda la altura del edificio ligando ambas partes por traveses de concreto al nivel de piso. A partir del primer nivel las losas se apoyan en traveses de acero de alma abierta con una longitud de 17.15 m.

Según los planos la cimentación consta de una losa en forma de cascaron invertido de 18 cm de espesor con flechas que van de 62 a 88 cm. El nivel donde comienzan las bóvedas es el nivel -6.60 m. Cuenta con contratrabes en el sentido transversal de 3 m de peralte y de 60 a 70 cm de ancho y en el otro sentido miden 1.3 m por 30 cm de ancho. Los muros que forman el cajón de

cimentación del edificio tienen 7.3 m apoyado sobre 156 pilotes de fricción de concreto reforzado a 25 m de profundidad de 50 cm de diámetro.

Contaba con un puente que se localizaba en el primer piso para comunicar el edificio con uno de los cuerpos bajos, salvando un claro de 7 m.

A raíz de los asentamientos diferenciales que ocurrieron en la torre, en octubre de 1964 se colocó lastre de arena en la cimentación en las zonas norte y este, y se instalaron 25 pilotes electrometálicos de tubo de acero de 2" de diámetro en la zona Suroeste, en la cual se presentaron los hundimientos mayores. Estos pilotes se hincaron hasta la primera capa resistente y fueron recibidos por viguetas de sección I de acero, ancladas a las contratraves.

No obstante, los asentamientos prosiguieron, por lo que un año más tarde, en octubre de 1965 se instalaron otros 48 pilotes del mismo tipo y se retiró el lastre de la zona suroeste.

Después de 1985, se diseñó el refuerzo de las columnas y traveses del marco de la fachada oriente; el refuerzo consistió en el ensanchamiento de las columnas de concreto en la cimentación y en el sótano, con nuevos colados de concreto armado. A partir de la planta baja, se colocaron ángulos de acero de 6"

x 6" en las esquinas de las columnas, en toda su altura, soldados a placas en el sentido horizontal.

En 1987 se llevó a cabo un estudio que sirvió de base para el proyecto de la ampliación de la cimentación de la torre, el cual contemplaba, además, una sobrecarga de 2 ton/m² en los cuerpos bajos. Con ambas acciones se esperaba acelerar el hundimiento en la zona contraria hacia donde se acusaba el desplomo y propiciar su recuperación. La ampliación de la cimentación consistió en un cajón de 6 m de ancho por 42.05 m de longitud, desplantado a 3.80 m de profundidad. Está constituido por cinco contratraves principales (armaduras de placa de hacer) colocadas en el sentido norte-sur, que penetran 7.82 m al interior de la torre, hasta el eje I2 longitudinal; por una contratrabe longitudinal a 3 m al sur del paño exterior de la torre y por cuatro muros de concreto que limitan el cajón.

El hundimiento general del conjunto se traduce en la tendencia de la torre al desplomo hacia el sur, que es resultado de la excentricidad de la torre en el conjunto y a las diferencias de compresibilidad del subsuelo, cuya resistencia disminuye de norte a sur, lo que se ve agravado por la sobre-explotación de los acuíferos en la zona.

La torre está ligada funcional y físicamente a los edificios que forman el conjunto, circunstancia

que ha sido afortunada; la unión de su cimentación con la de los cuerpos bajos ha sido fundamental en su resistencia al posible vuelco.

En los estudios elaborados para el artículo de Ávila *et al* (2009) se determinó el mecanismo de colapso así como la magnitud de la capacidad lateral de los ejes perimetrales. Señala que el eje 12 es el que tiene menor resistencia ante los efectos sísmicos específicamente en sus vigas de acoplamiento que presentan un modo de falla por flexión, y no por cortante. En cuanto a las vigas de acoplamiento de los ejes longitudinales algunos resultados demostraron que la fuerza cortante actuante excede ligeramente la resistencia disponible; en el caso de las vigas y extremo inferior de los muros de planta baja la mayoría presentan fluencia.

Con base en este mismo estudio y los correspondientes de geotécnica se llevó a cabo la última rehabilitación del edificio que fue entre 2008 y 2009.

Esta rehabilitación consistió a grandes rasgos en rigidizar la torre con diagonales metálicas principalmente en la dirección transversal

(norte-sur) y con el reforzamiento de la mayoría de las traveses con fibras de carbono para darles mayor resistencia a la flexión y al corte; la cimentación del edificio se amplió hacia el sur, se adicionaron 30 pilotes de control y se construyeron cinco muros de concreto reforzado de 60 cm de espesor entre la cimentación del edificio y de los cuerpos bajos.

La instrumentación del edificio opera desde diciembre del 2008, esta instrumentación consiste en 28 acelerómetros uniaxiales localizados en diferentes puntos en el edificio y en el subsuelo. La resolución empleada para monitorear la respuesta estructural es adecuada para capturar niveles de excitación que van desde vibraciones ambientales hasta sismos de alta intensidad.

En mayo 2009, se instaló un sistema GPS, compuesto por una estación fija (GPS1) y dos antenas en la azotea (GPS2 y GPS3) de la torre para monitorear la verticalidad.

Entre febrero 2011 y enero del 2015 se han registrado los 14 eventos sísmicos que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 – Eventos sísmicos registrados entre febrero 2011 y enero 2015.

Evento	Fecha	M_w	Distancia epicentral, en km	$A_{m\acute{a}x}$, en cm/s^2	Profundidad focal, en km
11-1	25-feb-11	6	430	0.9	135
11-2	07-abr-11	6.7	539	1.6	167
11-3	10-dic-11	6.5	214	16.4	58
11-4	16-dic-11	4.5	364	0.4	5
12-1	20-mar-12	7.4	358	29.2	15
12-2	02-abr-12	6	356	5.4	10
12-3	11-abr-12	6.4	475	5.0	16
12-4	15-nov-12	6.1	225	6.1	40
13-1	21-abr-13	5.8	392	7.8	10
13-2	16-jun-13	5.8	162	20.6	60
13-3	21-ago-13	6	305	8.9	20
14-1	18-abr-14	7.2	352	30.0	10
14-2	08-may-14	6.4	336	29.4	17
14-3	10-may-14	6.1	345	8.5	12

4.1 Recolección de información

Para obtener información acerca de lo que le ha ocurrido al edificio a lo largo de las diferentes intervenciones que ha tenido y el estado actual en que se encuentra, se ha ido recolectando la siguiente documentación: planos del proyecto estructural original, memorias de cálculo, dictámenes, refuerzos, levantamientos en campo de daños y levantamiento fotográfico, etc.. Al realizar los levantamientos se ha estado verificando que la información contenida en esta documentación coincida con lo que se encuentra en campo, esto es algo que se ha venido haciendo a lo largo de las diferentes intervenciones que ha tenido la torre.

En estas intervenciones se han hecho diferentes levantamientos, los cuales han quedado fuera del alcance de este trabajo, en cambio se utiliza el levantamiento recién realizado a partir del último evento sísmico registrado el 10 de mayo de 2014 (tabla 2).

En el caso de este trabajo se contó con la documentación de la última rehabilitación, que junto con el resto de la información que se tenía del edificio, fue de ayuda para crear parte de los preparativos de inspección.

Para esta metodología el punto inicial de comparación para posteriores inspecciones será este levantamiento ya que se encuentra en un formato adecuado para poder llevar un seguimiento a detalle de los cambios de los

daños y que sean de mejor ayuda para propósitos de estudio de la estructura.

Tabla 3 – Características de los eventos sísmicos registrados por el sistema de alerta estructural en la torre del CCUT.

Evento *	A _{máx} suelo, en cm/s ²	I _{Arias} , en cm/s	Cs _{máx} , en %		DE _{máx} , en %		VF _{máx} , en %		Nivel del daño
			T	L	T	L	T	L	
11-1 (V)	0.9	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0	0	Ligero
11-2 (V)	1.6	0.08	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	2	4	Ligero
11-3 (A)	17.2	2.85	0.01	0.01	0.05	0.04	4	7	Intermedio
11-4 (V)	0.4	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1	2	Ligero
12-1 (A)	31.8	15.04	0.03	0.05	0.14	0.20	6	16	Intermedio
12-2 (V)	7.9	0.41	<0.01	<0.01	0.03	0.03	6	16	Intermedio
12-3 (V)	5.0	0.42	<0.01	<0.01	0.03	0.04	7	15	Intermedio
12-4 (V)	6.1	0.52	<0.01	<0.01	0.02	0.02	4	13	Intermedio
13-1 (V)	7.8	0.57	0.01	0.01	0.06	0.05	6	16	Intermedio
13-2 (A)	20.6	3.44	0.02	0.02	0.09	0.07	8	16	Intermedio
13-3 (V)	8.9	0.95	<0.01	<0.01	0.04	0.04	8	19	Intermedio
14-1 (A)	30.0	12.86	0.03	0.03	0.18	0.17	9	21	Intermedio
14-2 (A)	29.4	8.50	0.04	0.02	0.19	0.13	9	16	Intermedio
14-3(V)	8.5	0.92	<0.01	0.01	0.05	0.05	7	14	Intermedio

Se muestra el desempeño que ha tenido el sistema de alerta estructural en la tabla 3, en ella se pueden observar los valores de los indicadores y el nivel de daño que le corresponde de cada evento registrado.

En los eventos registrados por la alerta del 2011 se observa que en su mayoría el nivel de daño fue ligero con excepción del evento 11-3 el cual marcó amarillo, pero al realizar la inspección como se sugiere para este nivel de daño, solo se encontraron pequeños agrietamientos en los recubrimientos de algunos muros de mampostería, por lo que el nivel de daño terminó por considerarse ligero.

Las amplitudes de los desplazamientos para el evento sísmico de baja intensidad 11-4 fueron apenas mayores a las producidas por las pruebas de vibración ambiental.

Sin embargo, a partir del evento 12-1 la estructura según la alerta se ha mantenido en nivel de daño intermedio (tabla 3), esto debido a que en este evento el VF aumentó de valor clasificándose en amarillo y a pesar de que algunos eventos posteriores fueron de baja intensidad no se recuperó el valor de VF.

El aumento en el indicador VF para el caso del evento 12-1, se vio reflejado principalmente en

la reducción de la frecuencia fundamental de vibración y de la rigidez en comparación con el primer evento registrado 11-1.

Se puede decir que el motivo por el que la frecuencia se modificó en la dirección L, fue debido a la pérdida de rigidez en el edificio, ya que se sabe que la masa no se ha modificado de manera que pudiera llegar a tener manifestaciones con los valores de las frecuencias.

Esta pérdida de rigidez probablemente pudo tener origen al reajustarse las conexiones del reforzamiento metálico con los elementos de concreto, así como en las trabes de acoplamiento que fueron reforzadas con fibra de carbono, daños en elementos no estructurales como muros de fachada y de mampostería.

Para los eventos posteriores al 12-1, el nivel de daño se mantiene en intermedio.

Se destaca que a pesar de la intensidad de los eventos 14-1 y 14-2, los valores de VF en la dirección L se mantuvieron del orden que los del evento 12-1, sin embargo se nota una tendencia en la que aumenta VF en la dirección T. El evento 14-3 de menor intensidad confirma estos valores.

Queda realizar un seguimiento de estos indicadores para identificar esta posible

reducción de rigidez en la dirección T que se está presentando a partir del evento 12-1.

El evento 14-3 presenta la mayoría de sus indicadores en verde como se puede ver en la tabla 3 pero mantuvo la VF para ambas direcciones en amarillo, por lo que no era necesario realizar una inspección amarilla pero para los fines de la tesina se realizó. Cabe aclarar que los eventos que motivaron a llevar a cabo una inspección han sido los eventos 11-3, 12-1, 13-2, 14-1 y 14-2 debido a la moderada intensidad.

4.2 Preparativos de inspección

Se preparó un juego de elevaciones por cada nivel de piso, en hojas tamaño carta, identificadas con su nivel y sus ejes con el fin de lograr ubicar la elevación de algún elemento con rapidez.

En las figuras 1, 11 y 12 se muestra cómo se hicieron las elevaciones de los elementos, y la información que deben contener en cada hoja y en cada elevación.

Se tuvo a disposición el material necesario enlistado en el apartado 3.4, utilizando gran parte de él, resaltando el grietómetro, la escalera y una cámara fotográfica, por mencionar algunos.

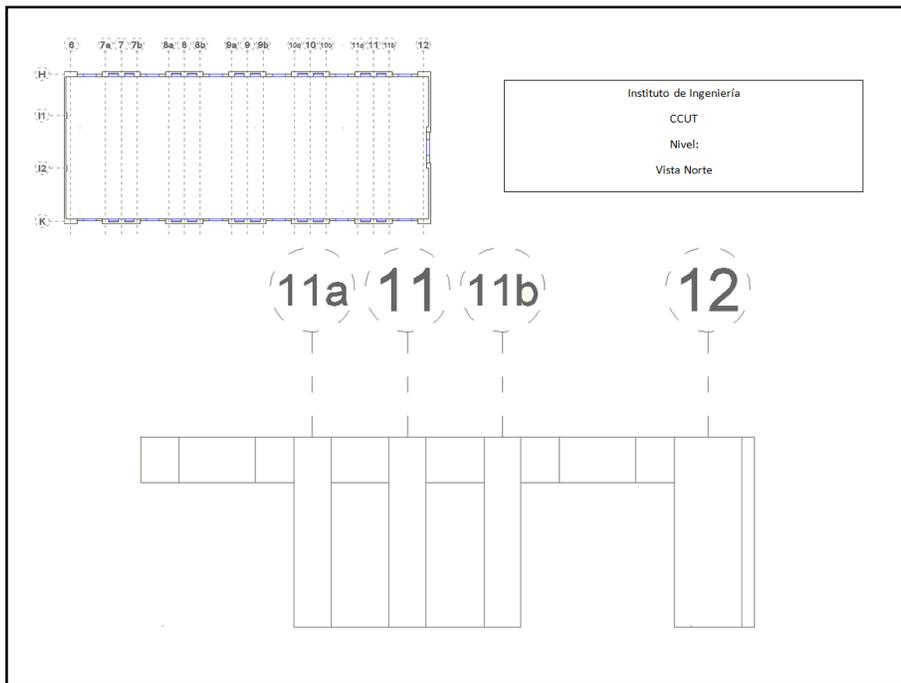


Figura 11 – Elevación de columnas, muros y trabes, sobre eje H entre eje 10b y 12

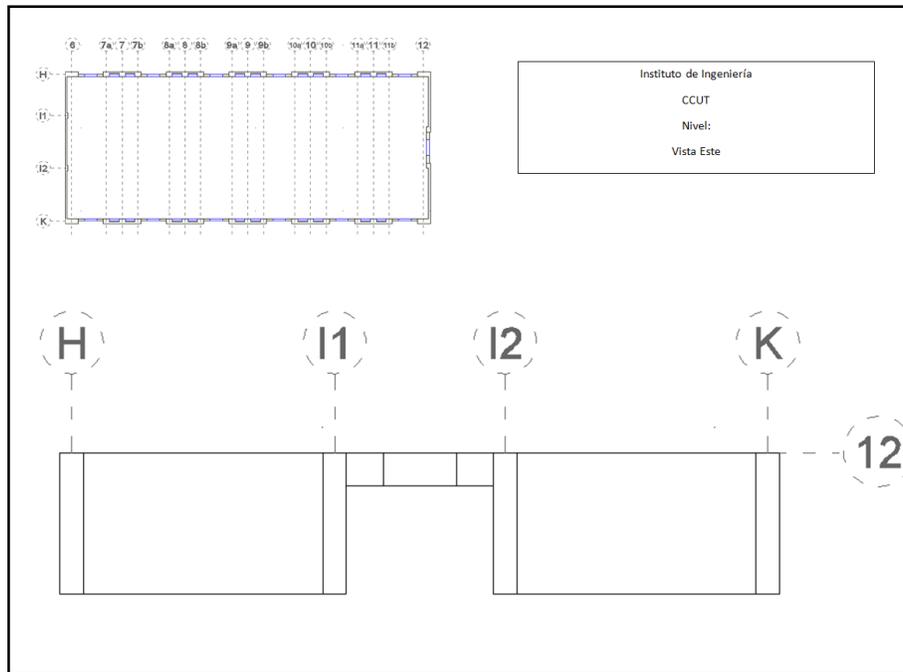


Figura 12 – Elevación de columnas, muros y trabes, sobre eje 12 entre eje H y K

4.3 Inspección de la zona

Esta inspección corresponde al estado de la estructura posterior al último evento sísmico registrado (tabla 3), se llevó a cabo en septiembre de 2014 para los fines de esta tesina, pero el personal académico ya había realizado una inspección en mayo de 2014.

Para realizar el levantamiento de daños *in situ* la inspección se hizo de la superestructura, nivel por nivel siguiendo los ejes longitudinales de la planta.

Por las características de este edificio, al estar desalojados algunos niveles, la inspección se

enfocó en estos. Se comenzó con las columnas, luego los muros y al final las trabes.

La inspección se llevó a cabo por un equipo de dos personas. Debido a que el escenario lo permitía se optó por que cada quien inspeccionara un nivel completo con el fin de evitar que el levantamiento de una zona quedará plasmado en hojas diferentes. Fue necesario utilizar la escalera, esta se fue turnando según la iba necesitando cada integrante.

Los daños visibles, que en este caso se manifestaron principalmente con grietas, se trazaron con lápiz en las hojas con las elevaciones de los diferentes elementos, indicando los espesores máximos aproximados

de cada una de las grietas a partir de 0.1 mm de espesor. La medición del espesor se realizó con grietómetro.

También se hicieron anotaciones en las hojas de las elevaciones para indicar otras situaciones, como por ejemplo, la mayoría de las trabes fueron reforzadas con fibra de carbono, pero había algunas que no, así que se indicó cuáles estaban reforzadas. Otra anotación fue respecto a las columnas que estaban encamisadas o los ventanales que contenían diagonales metálicas, se anotaba cualquier información que ayudara a conocer el estado actual de la estructura.

De esta manera se corroboraba la información que se tenía en los planos de la última rehabilitación.

Así mismo, se indicó las zonas donde no fue posible observar la estructura, identificando aquellas donde el motivo fue que no se tuvo acceso a la zona y en otras por encontrarse cubiertas por algún acabado.

Logrando con esto obtener el levantamiento de daños *in situ* de los elementos de varios niveles (figura 2 y 13).

Se tomaron algunas fotografías siguiendo las recomendaciones descritas en el tema 3.5 (figura 3 y 4).

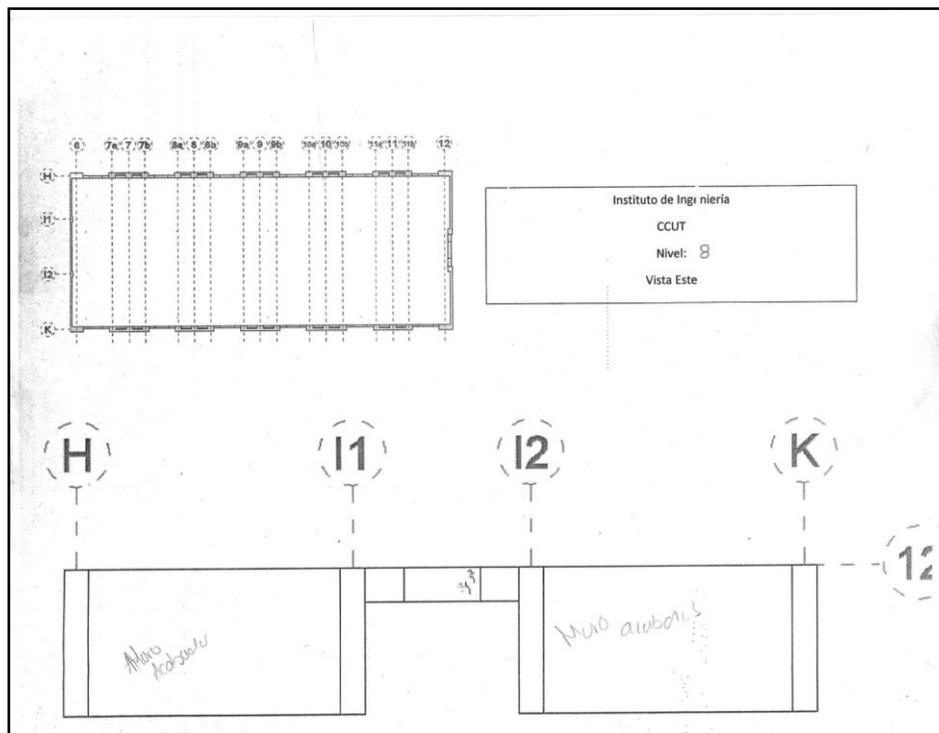


Figura 13 – Elevación con levantamiento de grietas en columnas, muros y trabes, sobre eje 12 entre eje E y K. En este se indica que los muros están cubiertos por un acabado.

4.4 Clasificación de daños

Tomando en cuenta la inspección *in situ* y con ayuda del levantamiento de daños digitalizado, se puede observar que, en cuanto a grietas se refiere, los elementos que se ven con mayores afectaciones son las vigas de acoplamiento entre los muros.

Aunque se desconoce con certeza, si han aumentado en los últimos años el tamaño de estas grietas, a partir de este levantamiento se podrá llevar a cabo un seguimiento más preciso en este aspecto.

Sin embargo, la presencia de estas grietas no representa un riesgo para los ocupantes ya que de hecho es en estas zonas donde se espera que se formen grietas debido a la formación de articulaciones plásticas.

Por el tipo de estructuración sería más delicado si aparecieran grietas del tamaño como las de las trabes, en los muros de concreto ya que estos son los que principalmente proporcionan la rigidez lateral.

Otro lugar donde se observaron grietas fue en la base de algunas columnas de los niveles que se encuentran sobre los que fueron reforzados con diagonales de acero.

En cuanto al desplome, es uno de los problemas que más ha destacado en este edificio. En una de las intervenciones que tuvo en la cimentación, se logró estabilizar y reducir el aumento del desplomo frenándose y quedando alrededor de un metro en su parte más alta.

La última rehabilitación del 2008 realizada al edificio hace que la alerta parta de un estado verde, sin embargo, a partir del evento sísmico 12-1 de la tabla 3, se ha clasificado a la estructura en nivel de daño intermedio de manera constante, debido a que los valores de VF aumentaron colocando a este indicador en estado amarillo y ahí se ha mantenido hasta el último evento registrado.

Para el actual estado de daño tenemos que el último evento registrado ha sido el 14-3. La alerta lo clasificó en amarillo debido a que el valor de la VF no se ha recuperado, sin embargo el resto de los indicadores registró verde por lo que el evento se clasificó en estado verde.

Esta parte también es motivo para que se lleve a cabo un seguimiento de los daños, con el fin de encontrar cambios en los daños presentes o la aparición de nuevos. Ya que por ejemplo, con las grietas en las columnas antes mencionadas existe la duda si aparecieron antes o después de la rehabilitación.

4.5 Digitalización de la información

Para reunir la información del levantamiento de daños *in situ* se decidió digitalizar el levantamiento de daños por medio de la vectorización automática de imágenes escaneadas.

Con ayuda de los planos que se tienen de la última rehabilitación, se creó la elevación completa en AutoCAD y se exportó a Illustrator, donde posteriormente se le añadieron los trazos de las grietas.

Se crearon las capas en el Illustrator para separar las grietas y la información extra (zonas donde no se realizó el levantamiento *in situ* por ejemplo) que se añadió conforme nos conviene para trabajar con el levantamiento digitalizado. En la tabla 4 se muestra el arreglo de las capas que se utilizaron para separar las grietas por colores y espesores.

Cabe aclarar que este detalle en los anchos de las grietas es para fines de investigación y no tanto para fines prácticos.

Tabla 4 – Arreglo de capas empleado.

Color de trazo	Intervalo de ancho de grieta, en mm
Rojo	≥ 0.6
Naranja oscuro	0.5 – 0.55
Naranja claro	0.4 – 0.45
Verde	0.3 – 0.35
Azul	0.2 – 0.25
Negro	≤ 0.15

Una vez que la información en la ilustración digitalizada estuvo completa, se guardó como archivo PDF manteniendo las capas con las que se estuvo trabajando en el Illustrator.

En la ilustración que se generó (figura 14a, 14b y 15) se muestran las grietas visibles sobre las fachadas interiores de la estructura. Se hizo un levantamiento a mano, el cual fue digitalizado en esta ilustración a formato PDF.

Al abrirla se puede observar la estructura (columnas, traveses y muros de concreto) de las fachadas interiores del edificio en color gris claro.

En las traveses se aprecia un sombreado de color gris oscuro, el cual hace referencia a las zonas donde las traveses han sido reforzadas con fibra de carbono.

Las cruces de color azul indican las crujeas donde se colocaron diagonales de acero. Las zonas sombreadas de color azul sobre las columnas indican el nudo donde conectan las diagonales que van de fachada sur a norte y

viceversa, o también pueden indicar si están al lado de las cruces, las columnas que fueron reforzadas con el objetivo de colocar las diagonales de acero.

En las fachadas pueden observarse las grietas que presentan estos elementos y en diferentes colores dependiendo su espesor.

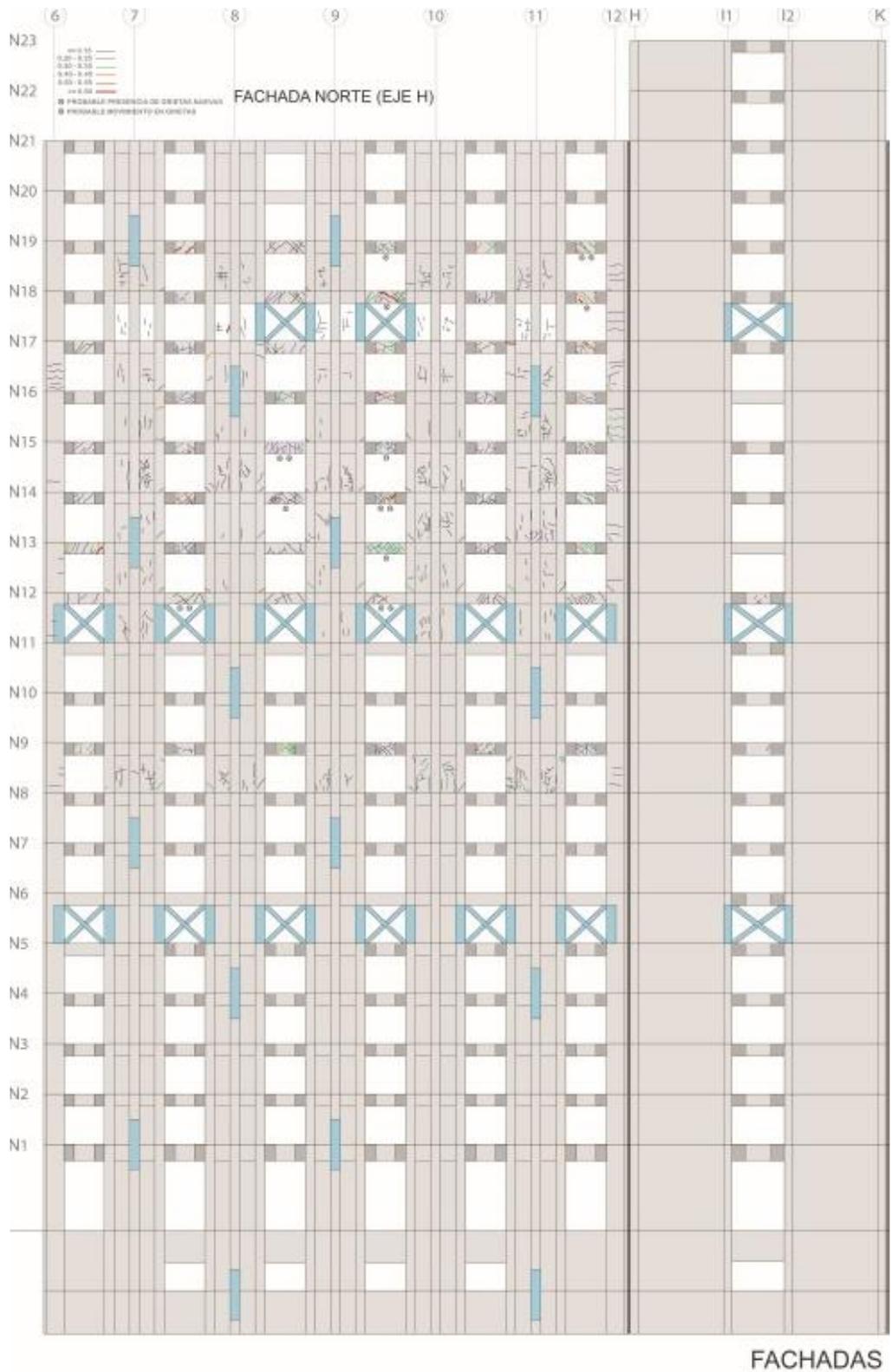


Figura 14a - Imagen con trazos de grietas creados con el proceso de vectorización.

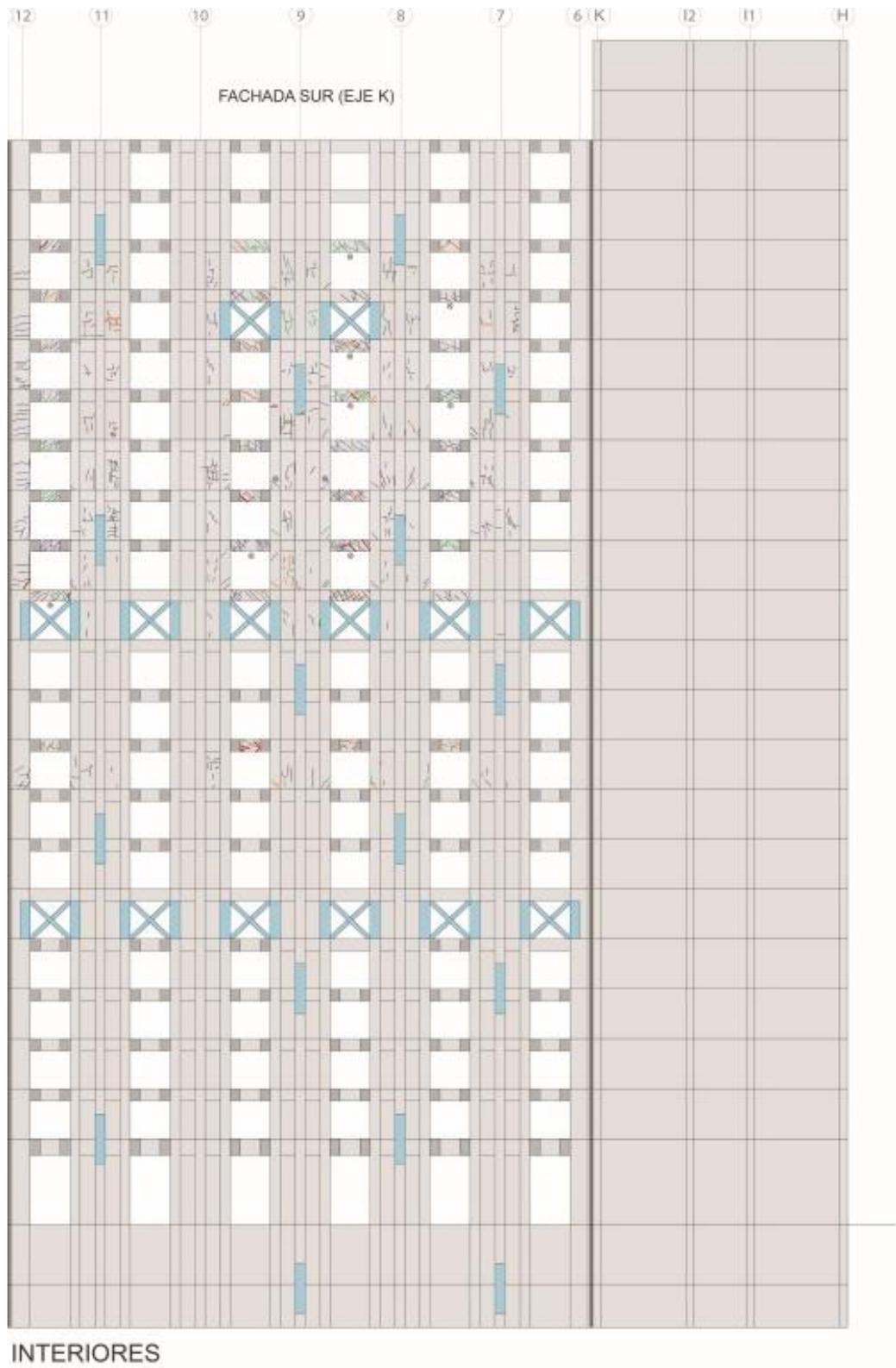


Figura 14b - Imagen con trazos de grietas creados con el proceso de vectorización.

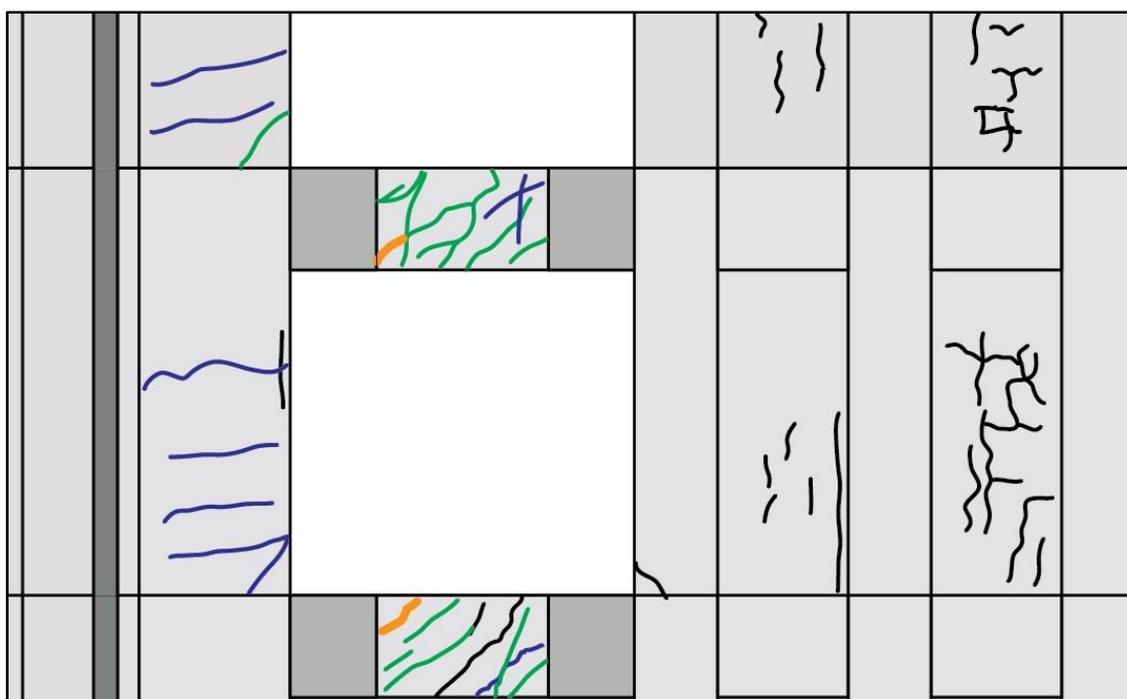


Figura 15 – Acercamiento de imagen con trazos de grietas creados con el proceso de vectorización (acercamiento de figura 14).

Adicionalmente, al terminar de realizar la digitalización de la información recabada en el levantamiento *in situ*, se llevó a cabo una inspección nuevamente para revisar el levantamiento y teniendo en mente que de esta manera se haría un levantamiento de daños, comparando un levantamiento anterior con los daños actuales en caso de que se presentará un evento sísmico

También se logró rescatar de esta segunda inspección, que para editar los trazos en el levantamiento digital, es mucho más fácil hacerlos con la ayuda de una computadora que cuenta con una pantalla táctil, que volver a vectorizar todo.

Conclusiones

Por la naturaleza de este tipo de metodología, que se apoya en un informe realizado por una instrumentación que mide y estima el posible estado en el que se encuentra la edificación, se logran resultados satisfactorios en un tiempo relativamente corto y con una aproximación adecuada.

A parte ayuda bastante poder contar con los diferentes resultados que ha proporcionado la alerta estructural desde su implementación hasta el último evento sísmico registrado, ya que podemos hacer una comparación rápida revisando que tipo de cambios ha tenido el desempeño del edificio.

De igual manera sucede con los levantamientos de daños *in situ*, los cuales al estarse digitalizando se pueden comparar rápidamente, detectando cambios o aumentos de daños en el edificio, es decir, se puede llevar un historial de lo que está sucediendo con la estructura.

En general la metodología propuesta sirve de apoyo para obtener resultados confiables, ya que se basa en el levantamiento de daños *in situ* y la

alerta estructural, lo que ayuda a resaltar los efectos y las respuestas que han tenido frente a los diferentes eventos sísmicos y poderles dar un seguimiento.

Se aprecia que se puede utilizar esa metodología como base para aplicarla a edificios instrumentados que no pertenezcan al IIUNAM, siempre que se utilice el sistema de alerta estructural.

Incluso haciendo la adaptación pertinente, se pudiera aplicar a edificios que no se encuentren instrumentados pero que estuvieran en algún programa de mediciones periódicas, aunque sin tener la misma eficacia que se tendría al estar instrumentado.

Cuando ya se tiene el levantamiento digital de apoyo, es posible revisar los daños de la estructura en un par de horas, y para llevar a cabo el levantamiento a detalle de los daños anotando únicamente los cambios y novedades que se encuentre apoyado de fotografías, se puede realizar entre dos y tres días.

Gracias a que la alerta y la metodología comparten la misma clasificación del nivel de daños, al confirmar los resultados emitidos por la alerta con la inspección, se pudiera ayudar a que se calibraran entre sí, para lograr resultados preliminares aún más confiables.

Esto es importante tomar en cuenta debido a que los colores que utiliza la alerta estructural tienen un rango amplio de posible daño en la estructura, pero provee valores numéricos. En cambio, con la inspección *in situ* se logran apreciar los daños reales, entonces al compararse pueden generar una idea más clara de los efectos reales que tiene en el comportamiento de la estructura cierto tipo de daños que son visibles a simple vista.

Es conveniente aclarar que el hecho de que la edificación se clasificara en estado verde (daño ligero) al comenzar con la alerta estructural, fue debido a la última rehabilitación que tuvo en el 2008 con la que se aumentó la rigidez en la estructura.

La edificación se mantuvo con el mismo nivel de daño desde que se rehabilitó hasta que se presentó el evento 12-1, con el cual cambió a estado amarillo, principalmente debido a la disminución de las frecuencias fundamentales de vibración, y a partir de este evento se ha mantenido en estado amarillo porque no se ha recuperado.

Es necesario llevar a cabo un seguimiento más formal de los daños observados usando esta metodología, y así poder determinar si los daños observados en campo corresponden con el nivel de daño sugerido por la alerta estructural.

Referencias

AIS (2002). Guía técnica para la inspección de edificaciones después de un sismo - Manual de campo. Realizado para el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Colombia.

Aragón, J, Flores, L, y López, Ó (2011). Manual del formato de captura de datos para evaluación estructural. Red nacional de evaluadores. Sistema Nacional de Protección civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres. México

Ávila, J, Torres, J, Loera, S, Alcocer, S y Meli, R (2009). Revisión de los aspectos generales estructurales del proyecto de rehabilitación del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT). XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Puebla, México.

FEMA-154 (2002). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook. Federal Emergency Management Agency. Washington, Estados Unidos.

Gama, A, Juárez, H y Arroyo, R (2012). Avances recientes en las metodologías para la evaluación estructural de edificaciones típicas. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Guerrero, México

Gama, A, Juárez, H y Arroyo, R (2012). Avances recientes en las metodologías para la evaluación estructural de edificaciones típicas. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Guerrero, México.

Loera, S (1982). Manual para evaluar daños causados por sismos en edificios de concreto reforzado. Elaborado para el Departamento del Distrito Federal. Instituto de Ingeniería, UNAM. DF, México.

Murià-Vila, D, Aldama, B y Loera, S (2010). Alerta estructural para edificios instrumentados. Instituto de Ingeniería, UNAM. Revista Digital Universitaria. DF, México.

<http://www.revista.unam.mx/vol.11/num01/art02/int02.htm>

Murià-Vila, D, Camargo, J, Aldama, B, Rodríguez, G, Aguilar, L y Ayala, M (2013). Structural health monitoring of an instrumented building in Mexico with accelerometers and GPS sensors. The 6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Instituto de Ingeniería, UNAM. Hong Kong.

Rodríguez, M y Castrillón, E (1995). Manual de Evaluación Postsísmica de la Seguridad Estructural de Edificaciones. Basado en investigaciones realizadas para el Gobierno del Distrito Federal. Series del Instituto de Ingeniería 569. Instituto de Ingeniería, UNAM. DF, México.

U.S. Department of Housing and Urban Development (1977). A Methodology for Seismic Evaluation of Existing Multistory Residential Buildings. Washington, Estados Unidos.