

**EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD SISMICA DEL EDIFICIO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD LA GRAN
COLOMBIA**

**SERGIO HUMBERTO CADENA ALARCÓN
JULIO JOSÉ HERNANDEZ LURÁN
DIEGO ALEJANDRO PARRA MENESES**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
SEMINARIO DE GRADO
BOGOTÁ D.C.
2016**

TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
2.	OBJETIVOS	11
2.1.	OBJETIVO GENERAL	11
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3.	JUSTIFICACIÓN	12
4.	ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	13
5.	MARCO REFERENCIAL.....	22
5.1.	MARCO TEÓRICO.....	22
5.1.1.	Método Analítico Dinámico.....	22
5.1.1.1.	Fuerzas internas en las estructuras.....	22
5.1.1.2.	Respuestas a cargas variables en el tiempo	23
5.1.1.3	Velocidad de reacción de una estructura.....	24
5.1.2.	Análisis dinámico.....	24
5.1.2.1.	Ecuaciones de Movimiento	25
5.1.3.	Método modal espectral	26
5.1.4.	Software SAP 2000	28
5.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	30
5.2.1.	Vulnerabilidad	30
5.2.2.	Metodologías.....	31
5.2.3.	Mampostería estructural.....	33
5.2.4.	Escala de vulnerabilidad	34
5.3.	MARCO LEGAL	37
5.4.	MARCO HISTORICO	39
6.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	40
6.1.	ENFOQUE INVESTIGACIÓN.....	40
6.2.	TIPO DE INVESTIGACION	40
6.3.	FASES.....	40

6.4. INSTRUMENTOS.....	42
6.4.1. Procedimientos ejecutados para la obtención de datos	42
6.4.1.1. Extracción de núcleos.....	42
6.4.1.2. Lecturas de Ferroskan.....	44
6.4.1.3. Ensayo de Carbonatación	45
6.4.1.4. Resistencia del concreto mediante esclerómetro	46
6.4.1.5. Ensayo a la compresión	48
6.4.2. Operacionalización de variables.....	49
7. ANÁLISIS Y RESULTADOS	51
7.1. IDENTIFICACIÓN DE CARACTERISTICAS Y FALENCIAS.....	51
7.1.1. Geometría general estructura existente.	51
7.1.2. Características del concreto.....	52
7.1.2.1. Resistencia a la compresión del concreto	52
7.1.2.2. Tamaño de agregado del concreto	55
7.1.3. Ensayo de Carbonatación en el concreto.....	57
7.1.5. Verificación de diámetro y recubrimiento de refuerzo existente	58
7.1.6. Falencias estructurales	61
7.2. MODELO ESTRUCTURAL SAP2000	62
7.2.1. Avalúo de Cargas.....	63
7.2.2. Espectro de respuesta y diseño	64
7.2.3. Combinaciones de Carga.....	67
7.2.4. Materiales y secciones	69
7.3. ANALISIS ESTRUCTURA EXISTENTE	74
7.3.1. Índice de flexibilidad.....	74
7.3.2. Índice de sobreesfuerzo de los elementos	77
7.3.3. Índice de sobreesfuerzo de la estructura	78
8. CONCLUSIONES	79
9. RECOMENDACIONES	80
10. BIBLIOGRAFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cargas variables en el tiempo.....	23
Figura 2. Velocidad de reacción.....	24
Figura 3. Modelo en SAP2000.....	29
Figura 4. Vulnerabilidad sísmica.....	30
Figura 5. Mampostería estructural reforzada.....	33
Figura 6. Taladro extractor de núcleos HILTI DD-150.....	43
Figura 7. Procedimiento extracción de núcleos.....	44
Figura 8. Ferrosan Hilti PS 250.....	44
Figura 9. Ferrosan Hilti PS 250.....	45
Figura 10. Fenolftaleína solución al 1%.....	46
Figura 11. Carbonatación en núcleo.....	46
Figura 12. Ensayo esclerométrico en viga.....	47
Figura 13. Esclerómetro.....	47
Figura 14. Máquina de Compresión uniaxial.....	48
Figura 15. Levantamiento general.....	51
Figura 16. Corte del núcleo.....	52
Figura 17. Corte del núcleo.....	53
Figura 18. Longitud del núcleo.....	53
Figura 19. Diámetro del núcleo.....	54
Figura 20. Tamaño de los agregados en las muestras extraídas.....	56
Figura 21. Ensayo de profundidad de carbonatación en el núcleo No 3.....	58
Figura 22. Ensayo N° 1 Ferrosan.....	59
Figura 23. Ensayo N° 2 Ferrosan.....	60
Figura 24. Evidencia N° 1 mampostería en columna.....	61
Figura 25. Evidencia N°2 mampostería en columna.....	62
Figura 26. Planta general de la edificación.....	63
Figura 27. Avalúo de cargas.....	64
Figura 28. Espectro de diseño.....	66
Figura 29. Análisis dinámico.....	67
Figura 30. Combinaciones de carga SAP2000.....	69
Figura 31. Propiedades de los materiales SAP2000.....	69
Figura 32. Secciones utilizadas SAP2000.....	70
Figura 33. Sección columna SAP2000.....	70

Figura 34. Datos de refuerzo SAP2000.....	71
Figura 35. Sección de vigas SAP2000.....	71
Figura 36. Geometría General del Modelo SAP2000.....	72
Figura 37: Deflexiones SAP2000.....	72
Figura 38: Desplazamientos Horizontales SAP2000.....	73
Figura 39: Resultado de secciones.....	73
Figura 40. Calculo de derivas e índice de flexibilidad columna eje G-1.....	74
Figura 41. Calculo de derivas e índice de flexibilidad columna eje A-1.....	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. VULNERABILIDAD DE BENEDETTI-PETRINI.....	35
Tabla 2. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS CUANTITATIVAS.....	36
Tabla 3. LEY Y APORTE (NSR-10 Y NTC 3658).....	38
Tabla 4. FASES Y ACCIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	40
Tabla 5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	49
Tabla 6. FECHAS EXTRACCIÓN Y ENSAYO DE NÚCLEOS DE CONCRETO...	54
Tabla 7. ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA.....	55
Tabla 8. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO DE LOS NÚCLEOS EXTRAÍDOS....	56
Tabla 9. RESULTADOS ENSAYO DE PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN..	57
Tabla 10. RESULTADO ENSAYO FERROSCAN.....	61

ANEXOS

Anexo A. Licencia 1941

Anexo B. Licencia 1942

Anexo C. Certificado de tradición

Anexo D. Plano levantamiento general

Anexo E. Plano localización de ensayos

Anexo F. CD modelo estructural.

INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos de los últimos 25 años ocurridos en el país influyeron de gran manera en el desarrollo e implementación de una serie de normas que condujeran a la construcción de edificaciones sismo resistente. Como consecuencia de los graves daños y pérdidas humanas ocurridas en el terremoto del 31 de marzo de 1983 en Popayán, se adoptó en el país una serie de regulaciones contenidas en la Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10), en el que se detallan los requisitos mínimos de diseño y construcción de edificaciones nuevas, así como el procedimiento de rehabilitación para edificaciones existentes.

Sabiendo que la edificación se encuentran en una zona de amenaza sísmica intermedia de acuerdo con la clasificación de la norma sismo resistente (NSR-10), y que su edificación fue construida hace 76 años, época para la cual no se hacía ningún estudio analítico de las cargas de la edificación y mucho menos no se consideraba la acción dinámica impuesta por los sismos en las estructuras, se hace imperativa la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del conjunto para determinar si existe la necesidad de realizar el reforzamiento y rehabilitación de la edificación, con el objetivo de llevarlos a los niveles mínimos de seguridad y comportamiento prescritos por las normas vigentes.

La investigación consistió en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica del edificio de la facultad de ingeniería civil de la Universidad La Gran Colombia, para verificar el cumplimiento de los parámetros exigidos en el REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NSR-10). Durante el proceso se encontraron varios inconvenientes, uno de ellos de tipo económico ya que los ensayos de Ferroskan son muy costosos y solo se realizaron 2, los cuales no son suficientes para obtener datos representativos de cuantía de acero en las columnas; de igual manera la universidad no tiene planos estructurales de la facultad de ingeniería civil que permitiera modelar la estructura y realizar anticipadamente un levantamiento estructural.

El enfoque metodológico de estudio fue mixto, puesto que es un proceso en donde se recolectó información, se analizó y se relacionaron datos cuantitativos y cualitativos, para responder al planteamiento del problema. Se manejó el análisis descriptivo comparativo a través de los requisitos generales de diseño y construcción determinados en el REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NRS-10). En este proceso se utilizó el uso del programa SAP2000 que permitió la ejemplificación de la estructura de la facultad de ingeniería.

Este documento contiene la memoria estructural del estudio de vulnerabilidad sísmica del edificio de la facultad de ingeniería civil de la Universidad La Gran Colombia ubicado en la ciudad de Bogotá, realizada en el mes de noviembre del 2016.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchas de las edificaciones existentes en Colombia no cumplen con las normativas técnicas del REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NSR-10), para que se asegure su funcionamiento después de que ocurra un desastre natural; lo que significa, que su vulnerabilidad puede ser tan alta, que su riesgo puede exceder los niveles aceptados actualmente. Por lo tanto es necesario que se tomen las medidas de mitigación, con base a los requisitos ingenieriles y así, reducir el riesgo.

Bogotá está catalogada como zona de riesgo sísmico intermedia, un desastre natural puede ocurrir en cualquier momento, y estructuras importantes como una universidad tienen que tener las condiciones adecuadas para poder estar en servicio todo el tiempo. Es así que el espacio que actualmente ocupa Bogotá se ha visto envuelto en siete eventos sísmicos de magnitudes significativas en los últimos trecientos años.

La Universidad La Gran Colombia cuenta con la sede de la Facultad de Ingeniería Civil ubicada en Bogotá sobre la Carrera 9 # 42 A – 22. Este edificio no posee planos arquitectónicos ni estructurales, y estos son fundamentales porque poseen un adecuado conjunto de notas, detalles e información necesario para poder modelar la estructura y realizar previamente un levantamiento estructural. Estas instalaciones posiblemente no cumplan a cabalidad con lo establecido en la NSR-10, situación que implica un riesgo a nivel estructural, humano y económico.

Por lo tanto, la pregunta de investigación del presente proyecto es:

¿Cómo es el comportamiento dinámico del edificio de la facultad de ingeniería civil de la Universidad La Gran Colombia, frente a un evento sísmico?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la estructura de la edificación existente de la facultad de ingeniería civil de la Universidad La Gran Colombia por medio de un estudio de vulnerabilidad sísmica.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características y falencias estructurales que posee el edificio de la facultad.
- Elaborar un modelo estructural en el software SAP2000 de la estructura existente.
- Analizar si la estructura existente cumple a cabalidad con el reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 título A.10.

3. JUSTIFICACIÓN

Un sismo es una serie de vibraciones generadas en la corteza terrestre dado a un movimiento brusco en las placas tectónicas de la Tierra, y este puede tener muchas repercusiones a cualquier tipo de estructura.

Se entiende por riesgo sísmico, el grado de pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica. El riesgo sísmico está ligado tanto a la ocurrencia de eventos sísmicos que afecten a la estructura (amenaza sísmica) como a la respuesta de este ante dichos movimientos del terreno (vulnerabilidad sísmica)¹.

Por esta razón en Colombia desde 1984 implementaron la primera norma sismo resistente (NSR), teniendo dos actualizaciones en 1998 y la última fue en el 2010, con base en esto es importante saber que todas las estructuras tienen un riesgo sísmico, que puede ser contrarrestado si se cumple la norma.

Actualmente la facultad de ingeniería civil de la universidad La Gran Colombia tiene una demanda alta de estudiantes, los cuales realizan diferentes actividades académicas, culturales y recreativas entre otras. Por lo tanto, es necesario evaluar la estructura del edificio de ingeniería civil, debido a que tiene 76 años de construida y la demanda de uso en la actualidad es alta.

Es fundamental que una edificación como lo es una universidad, este en óptimas condiciones de funcionamiento para que tenga la capacidad de seguir en pie y tenga respuesta favorable frente a una amenaza sísmica, debido a que se hace necesario frente a cualquier calamidad sitios de contención que respondan a la población que demanda sus servicios ya sea como albergue y que este en óptimas condiciones; como también que cumpla con la norma sismo resistente vigente (NSR10).

Como futuros ingenieros civiles la evaluación de vulnerabilidad sísmica de la facultad de ingeniería civil nos proporciona ampliar y vigorizar los conocimientos especialmente en las competencias investigativas de formación en el área de análisis y diseño estructural.

¹RAMOS, Julio. Análisis de la vulnerabilidad sísmica del edificio central bloque norte de la universidad de caldas, 2003. Citado por: LABEST. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas. Vulnerabilidad sísmica y patológica de la institución universitaria, tecnológico de Antioquia. 2011 pág. 2

4. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En el presente proyecto de investigación, se realizó un análisis minucioso de los diferentes estudios relacionados con la vulnerabilidad sísmica en las estructuras.

En los estudios o investigaciones a nivel internacional tenemos como antecedente el proyecto desarrollado por Shailesh Agrawal y Ajay Chourasia² publicado en 2008, cuyo objetivo fue proponer un método para valorar la vulnerabilidad sísmica de los edificios existentes de una ciudad de la India. El esquema estima la vulnerabilidad sísmica de edificios existente cuantitativamente y cualitativamente.

La metodología presentada permite identificar los edificios que pueden representar un riesgo en caso de un terremoto perjudicial y que forman parte de la microzonificación. Dicha investigación da un sustento frente a cualquier calamidad sísmica en la India y países cercanos. Donde también se analizaron edificios exponiéndolos a aparentes temblores con el fin de estimar la vulnerabilidad sísmica de las construcciones existentes en una amplia área de dispersión; considerándolos imprescindibles para la selección de muestras de construcción, análisis y determinación de los niveles de daño. Por ejemplo, se esperaba que el conjunto de viviendas en consideración debiese comportarse de acuerdo con el rendimiento conocido para cada tipo de estructura bajo condiciones de un terremoto.

La conclusión de este proyecto obtuvo el análisis de la vulnerabilidad, bajo el aspecto económico, es así el riesgo en forma de pérdidas económicas que puede estar más lejos de lo estimado después de recoger la información demográfica y censo para una ciudad. Además, el estudio de vulnerabilidad exigió una atención especial con referencia a los edificios patrimoniales o históricos, líneas de vida como el ferrocarril, carreteras, suministro de agua, suministro de energía eléctrica, alcantarillado, comunicaciones, presas, hospitales, escuelas, e industrias vulnerables. De igual forma hay una necesidad de identificar zonas, estructuras y rutas seguras para trabajar como una distribución de centros de ayuda y alivio en la incidencia de futuros desastres.

Un aporte importante de la investigación es que la metodología de diseño puede llevarse a cabo de una manera tanto cualitativa como cuantitativa, teniendo en cuenta diferentes aspectos como la resistencia de los materiales de la estructura (cuantitativo) o el registro de sismos en el pasado dentro de la ciudad de Bogotá (cualitativa), todo esto dependerá de la facilidad y la cantidad de información que se

² AGRAWAL, Shailesh Kr. CHOURASIA, Ajay. Methodology for Seismic Vulnerability Assessment of Building Stock in Mega Cities. Central Building Research Institute. 2008

recopile. También contribuye que en una ciudad como Bogotá con estructuras de todo tipo de materiales y construidas desde inicios del siglo pasado hasta la actualidad, se pueden comportar de diferentes maneras frente un sismo, hasta afectarse las estructuras entre sí, provocando un efecto de choque³.

En la parte metodológica de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de este documento, no especifica los parámetros, procedimientos y tampoco las normas utilizadas que sustente él porque los edificios analizados no cumplen las solicitudes de carga sísmica, si no que se enfoca o se centra sobre antecedentes cualitativos como el deterioro del material, daños causados en las estructuras y la calidad del material utilizado en las edificaciones entre otras. De igual manera no se ostentan ni mencionan datos cuantitativos que contribuyan de una forma más exacta al análisis de la vulnerabilidad sísmica en las edificaciones.

En el estudio a nivel internacional “*Evaluación analítica y experimental de la vulnerabilidad sísmica de las articulaciones de la viga-columna sin armadura transversal en edificios de concreto*”⁴ realizado en el 2011 en California, tuvo como objetivo desarrollar un método para mejorar la comprensión y evaluación del desempeño sísmico del exterior suelto y juntas viga-columna de esquina en edificios existentes, donde se identificaban que las juntas viga-columna en edificios de hormigón son elementos clave para asegurar la integridad estructural del edificio bajo carga sísmica; igualmente se observó la falta de articulaciones mayores tipo esquina las cuales parece que han llevado al colapso del edificio en estudio.

El autor hace referencia en que desde la década de 1960 se han logrado muchos avances para mejorar el desempeño sísmico en edificaciones a partir de la construcción de componentes, incluyendo las juntas viga-columna. Este nuevo diseño detalla los enfoques que deben producir las nuevas construcciones y donde se efectúan satisfactoriamente durante el sacudimiento de un terremoto fuerte. Además indica que los edificios de concreto construidos antes de desarrollar detalles para ductilidad en la década de 1970 normalmente carecen de refuerzo transversal común. Llegando a concluir que la identificación de los parámetros más importantes y el efecto de cada parámetro en el comportamiento sísmico⁵.

³ *Ibíd.*, p.4

⁴ WAEL MOHAMMED Hassan. Analytical and Experimental Assessment of Seismic Vulnerability of Beam-Column Joints without Transverse Reinforcement in Concrete Buildings. California. 2011

⁵ *Ibíd.*, p.428

Este estudio contribuye acerca de cómo realizar una evaluación paramétrica para evaluar la vulnerabilidad de error axial de juntas viga-columna libre, basado en los modelos de capacidad axial y cortante desarrollada. Este estudio paramétrico en comparación con el potencial de falla axial de junta viga-columna junto al impedimento crítico en columnas para proporcionar una visión preliminar de la falla axial, a partir de un colapso gracias a la vulnerabilidad de los edificios más viejos durante el sacudimiento de tierra intenso.

Este documento no detalla de una manera más descifrable cómo se obtuvo los datos para la metodología de evaluación paramétrica en la evaluación de vulnerabilidad sísmica, como técnicas directas donde permiten predecir directamente y en una sola etapa, el daño causado para un sismo, donde se destacan los métodos tipológicos y los métodos mecánicos. De igual forma en las técnicas indirectas que determinan un índice de vulnerabilidad independiente de la predicción del daño, las cuales son utilizadas para comparar la vulnerabilidad relativa de diferentes construcciones ubicadas en la misma zona de sismicidad.

En la investigación de nivel nacional llamado la “*Determinación de la vulnerabilidad sísmica por el método del índice de vulnerabilidad en las estructuras ubicadas en el centro histórico de la ciudad de Sincelejo, utilizando la tecnología del sistema de información geográfica*”⁶ 2007, el autor estipula la vulnerabilidad sísmica del centro de Sincelejo y sus alrededores, para así determinar el daño esperado en caso de un sismo.

El objetivo del estudio fue “*hallar la vulnerabilidad sísmica del centro de la Ciudad de Sincelejo por el método de índice de vulnerabilidad, utilizando Tecnología de Sistema de Información Geográfica*”. Este se realizó por el método de pushover (método cuantitativo), para compararlo con el método del índice de vulnerabilidad, elaborando posibles escenarios de daños de la zona para distintas intensidades.

El autor concluyó que la mayoría de edificaciones presentaron comportamientos regulares, a pesar de ser elaboradas en mampostería no reforzada, esto debido principalmente a los materiales empleados en la construcción de dichas infraestructuras.

Esta investigación solo se analizó estructuras en mampostería no estructural y de hormigón armado, y por lo tanto descarta otros tipos de estructura que son

⁶ CABALLERO GUERRERO, Álvaro Rafael. Determinación de la vulnerabilidad sísmica por medio del método del índice de vulnerabilidad en las estructuras ubicadas en el centro histórico de la ciudad de Sincelejo, utilizando la tecnología del sistema de información geográfica. Tesis de maestría. Sincelejo: Universidad del Norte de Sincelejo. 2010.

importantes para obtener óptimos resultados de la zona de estudio por medio de metodologías adecuadas sin excluir ningún tipo de estructura. De igual forma para desarrollar el método del índice de vulnerabilidad es importante contar con una adecuada información, donde se realizó una encuesta para determinar la tipología estructural de la zona, como la edad de los edificios, el tipo de material utilizado durante la construcción, los tipos de acabados, el sistema estructural resistente, tipo de cubierta, entre otros. Ya que esto depende los resultados del estudio final.

Para la “*Metodología para el estudio de la vulnerabilidad estructural de edificaciones*”⁷, se desarrolló unas técnicas de trabajo que pueden ser adoptadas para cualquier estructura, permite identificar la demanda un estudio de vulnerabilidad sísmica, donde su metodología de estudio se basa en la adquisición de conocimiento determinista. En el evalúa que el estado de la estructura se de acuerdo con las características valoradas en campo por medio de una o varias visitas de inspección, diagnóstico de acuerdo con los datos históricos de su diseño, construcción, operación, mantenimiento y la exploración de información adicional suministrada por los ocupantes o vecinos a la obra en estudio; que puedan ayudar a identificar el comportamiento estructural debido a sucesos extraordinarios y determinar de forma preliminar la línea de degradación o deterioro cronológico de la estructura⁸.

Como conclusión del estudio considera que la metodología utilizada permitió adquirir información del estado de los materiales, el sistema estructural, el nivel o grado de necesidad social y económica de la estructura; y demás aspectos que generen los datos suficientes para la evaluación.

Esta investigación permitió conocer la metodología utilizada para determinar el índice de vulnerabilidad especificado en la norma sismo resistente de 1998. En la actualidad se cuenta con una versión actualizada de esta norma (NSR-10), donde los índices de sobre esfuerzo, e índices de flexibilidad se han modificado, para que de esta manera se pueda hallar los puntos débiles y zonas de la estructura que pueden causar pérdidas de vida durante un evento sísmico.

Dentro de los estudios nacionales se encuentra el de “*Vulnerabilidad Sísmica y Patológico de la Institución Universitaria, Tecnológico de Antioquia*”⁹, realizado por

⁷ PÁEZ MORENO Diego Fernando, HERNÁNDEZ DELGADILLO Javier Hugo. Metodología para el estudio de la vulnerabilidad estructural de edificaciones. En: Revista Facultad de Ingeniería UPTC. 2005. No.19

⁸ *Ibíd.*, p. 79

⁹ LABEST, Universidad Nacional de Colombia facultad de minas. Vulnerabilidad sísmica y patológico de la institución universitaria, tecnológico de Antioquia. 2011. p. 1

la facultad de minas, de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2011, sede Medellín, el objetivo fue la recopilación de datos de las nuevas tendencias de los materiales en la construcción civil y el estudio de vulnerabilidad sísmica y patológica de la sede central del Tecnológico de Antioquia.

Los investigadores realizaron estudios geológicos y geotécnicos, exploraciones de las cimentaciones, levantamiento arquitectónico, patología, determinación de refuerzo en vigas y columnas. Esclerometría, detección de refuerzo y extracción de núcleos, para determinar la calidad del concreto.

Entre las conclusiones se encuentran: *“En el sector de las edificaciones en estudio se puede definir, por las investigaciones del subsuelo, que estos depósitos están cubiertos por llenos antrópicos, al menos de dos (2,00) metros de espesor. Sobre estos llenos parecen estar cimentadas la mayor parte de las estructuras que hacen parte del Tecnológico de Antioquia (Institución Universitaria)”*.

Así mismo que *“La alta capacidad de expansión de los materiales que conforman el lleno de apoyo de las estructuras se considera la causa de la problemática presente en algunas ellas, consistentes en grietas que aumentan y disminuyen su espesor dependiendo de las condiciones climáticas”*¹⁰.

Como también *“Según las especificaciones NSR-10 en su numeral A.10.6 (tipos de modificación permitidos), se escogió el definido en A.10.6.2 y que según el literal A.10.9.2.1, sugiere intervenir la estructura, con el fin de lograr un nivel de seguridad equivalente al de una edificación nueva”*.

De igual manera se concluyó que las adecuaciones y cambio de uso de muchas de las estructuras, sin control de calidad en los procesos y sin control técnico, no garantizan la seguridad y funcionalidad que debe tener una Institución Universitaria, que alberga personal¹¹, y evidenció que la vulnerabilidad de las edificaciones puede ser tan alta, que su riesgo puede exceder los niveles aceptados actualmente. Por lo tanto es necesario que se tomen las medidas de mitigación, con base a los requisitos ingenieriles y así, reducir el riesgo.

Este estudio proporcionó conocimientos sobre la interacción y la respuesta de una estructura que estará sometida a diferentes eventos durante su vida útil, por lo tanto se hace necesario estudiar principalmente los aspectos geológicos o naturales que pueden afectarla, entre los cuales pueden ser su ubicación cercana o lejana de

¹⁰ Ibíd., p. 38

¹¹Ibíd., p.39

fallas geológicas y la profundidad en las que se hallen la ubicación del terreno respecto a fuentes hídricas que puedan producir inundaciones o altos niveles freáticos, el empuje de corrientes de viento y la amplificación de las aceleraciones del terreno respecto a la aceleración en roca. Además de estos aspectos naturales, son de vital importancia los aspectos estructurales, entre los cuales se destacan: el uso que se le dé al edificio, su configuración estructural, el tipo y calidad de los materiales, calidad de los diseños y el cuidado que se haya seguido durante la construcción e instalación de la edificación¹².

Otro antecedente a nivel nacional es el estudio de *“Vulnerabilidad sísmica usando el método del índice de vulnerabilidad en viviendas construidas en el barrio La Paz”*¹³, desarrollado en el 2011 en la ciudad de Barranquilla, con el objetivo de determinar el nivel de seguridad en la zona de las viviendas ubicadas en el barrio La Paz. Se informaron los resultados del estudio de viviendas construidas ubicadas al Sur-occidente de la ciudad. La mayoría de las construcciones corresponden a viviendas de una planta construidas en mampostería no estructural, sin el seguimiento de especificaciones técnicas, ni de la asesoría profesional, generalmente construidas por el sistema de autoconstrucción, es decir, edificadas por sus propietarios, lo que hace predecir que ante la eventualidad de un sismo la vulnerabilidad de estas viviendas es alta.

Este estudio de vulnerabilidad determinó que las viviendas en la zona son muy susceptibles a sufrir daño severo ante un sismo de intensidad baja a moderada. La gran debilidad se observó a nivel de cimentación, mala calidad de materiales e inadecuada configuración en planta del sistema resistente a cargas. La estrategia a emplear para disminuir la vulnerabilidad de las estructuras estudiadas consiste en reforzar la cimentación, diseñar el sistema estructural resistente que consiste en muros de mampostería confinada por vigas y columnas, y determinar la calidad de los materiales a usar, siguiendo los requisitos establecidos por el Reglamento Colombiano De Construcciones Sismo Resistente, NSR-10.

Esta investigación suministró conocimientos para identificar y definir el nivel de seguridad de una zona o de una estructura ante los movimientos sísmicos que

¹²RAMOS, Julio. Análisis de la vulnerabilidad sísmica del edificio central bloque norte de la universidad de caldas, 2003. Citado por: LABEST. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas. Vulnerabilidad sísmica y patológica de la institución universitaria, tecnológico de Antioquia. 2011 pág. 2

¹³ AHUMA VILLAFÁÑE, José Luis. MORENO RODRIGUEZ, Nayib. Estudio de vulnerabilidad sísmica usando el método del índice de vulnerabilidad en viviendas construidas en el barrio la paz. Agosto 3-5, 2011, Medellín, Colombia.

pueden acontecer en el sitio en donde se hace un diagnóstico de niveles de desempeño de una estructura y evaluar el posible comportamiento¹⁴.

En este estudio no se menciona de manera detalla la metodología para para la determinación del índice de vulnerabilidad sísmica, como lo puede ser el sistema de puntuación el cual es utilizado en estudios a nivel urbano, basados en la evaluación de algunos parámetros básicos basados en la propuesta ATC-21 (Concejo de Tecnología Aplicada), y además agregando consideraciones para tener en cuenta las características específicas del sitio estudiado.

Entre los estudios a nivel local (Bogotá), está el “*Estudio De Vulnerabilidad Sísmico Estructural Del Ala Antigua Del Convento Hermanas De La Visitación De Santa María De Bosa*”, realizado en 2007 por estudiantes de la Universidad de la Salle. El objetivo fue determinar las debilidades en los componentes del sistema estructural para hacerle frente al impacto de amenaza sísmica y disminuir la vulnerabilidad ante el mismo. Por otra parte ubicar y determinar de manera detallada las lesiones que afectan la estructura existente. La investigación se desarrolló a partir de la recopilación de información existente, estudio de patología, levantamiento estructural y la evaluación de la amenaza sísmica local.

Entre las conclusiones más relevantes están la evidencia del estado de deterioro en el cual se encuentra la edificación; y el riesgo que representa este para la comunidad que alberga, es por esto que la intervención y reforzamiento eran prioritarios, para ofrecer mejor calidad de vida a las personas, disminuir el riesgo de catástrofe tanto a la comunidad que en ella habita como a las edificaciones y residentes aledaños, y la conservación del inmueble.

También se pudo comprobar que la edificación no poseía una cimentación adecuada, por tal razón se debía integrar a esta la que más se ajuste a la construcción, se recomendaba vigas de cimentación, puesto que junto con ellas se pretendía acoplar columnas y vigas de confinamiento, claro está, diseñadas tanto en geometría como en método constructivo para conservar el estilo arquitectónico del convento y causar el menor daño posible (métodos destructivos) durante el proceso de reparación¹⁵.

Esta investigación demuestra la forma de obtener los datos de la estructura, la resistencia del concreto y la cuantía de acero en los elementos estructurales. Es

¹⁴ *Ibíd.*, p. 1

¹⁵ GRIMALDO CARDENAS, Carolina. TORRES BURGOS, Miguel G. CASTRO HIGUERA, Yezid F. estudio de vulnerabilidad sísmico estructural del ala antigua del convento hermanas de la visitación de Santa María de Bosa. Bogotá: Universidad De La Salle. Facultad de Ingeniería Civil, 2007.

una herramienta muy útil, apropiada; como también es una guía de realizar un proyecto de grado cuyo alcance es muy similar al presente, siguiendo los requerimientos de la norma vigente para la época que se llevó a cabo el proyecto (NSR-98).

Este estudio se fundamentó sobre la metodología utilizada para establecer la vulnerabilidad sísmica de la estructura rigiéndose en la norma sismo resistente de 1998. Actualmente se posee una versión actualizada de esta norma (NSR-10), donde los parámetros y procedimientos establecidos han sido modificados para desarrollar un mejor y más adecuado análisis de la vulnerabilidad sísmica, donde los centros educativos pasan de grupo II a grupo III, cambiando el coeficiente de importancia $I = 1.10$ a 1.25 , el módulo de elasticidad del concreto aumentó en un 20%, en las combinaciones básicas cambian la mayoraciones para cargas vivas y muertas.

En el año 2007 en la ciudad de Bogotá, en el estudio “*Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos*”¹⁶, se presentó un modelo rápido y sencillo de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería a escala regional. El objetivo fue desarrollar un modelo construido de forma que pueda ser aplicado especialmente a zonas donde no se cuenta con información de daños sísmicos reales.

En esta investigación el método utilizado se basó en la identificación de las características más relevantes e influyentes en el daño que sufrirá una edificación de mampostería bajo la acción de un sismo. Una vez calificados cada uno de los parámetros, se procedió a relacionar sus calificaciones con su valor de importancia por medio de un promedio ponderado difuso. El resultado de esta relación a partir de técnicas basadas en conjuntos difusos corresponde al índice de vulnerabilidad de la edificación de mampostería¹⁷.

A partir de esta investigación se concluyó, que el método tiene gran aplicación en estudios a gran escala, donde se requiere evaluar una cantidad de edificaciones y con la mínima información posible. De esta manera, permite comparar diferentes zonas y detectar las más vulnerables; además es una buena herramienta para los planes de mitigación sísmica y planificación territorial.

¹⁶ MALDONADO RONDÓN Esperanza, CHIO CHO Gustavo, GÓMEZ ARAUJO Iván. Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos. En: Revista u. Javeriana. Ing. Univ. Julio-Diciembre 2007. Vol. 11.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 150

En este estudio para la identificación de las características más relevantes e influyentes sobre los daños que sufrirá una estructura de mampostería en un eventual sismo, los autores se basaron en parámetros que se les asignaron un grado de vulnerabilidad y un valor de importancia relativa con base a las opiniones de expertos las cuales fueron poco objetivas y que provocaron que fueran procesadas mediante técnicas difusas las cuales no generan cierto grado de confiabilidad respecto a resultados obtenidos.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO TEÓRICO

5.1.1. Método Analítico Dinámico

El objeto de la dinámica estructural es el análisis de estructuras bajo cargas dinámicas, es decir cargas que varían en el tiempo. Aunque la mayoría de las estructuras pueden diseñarse considerando sólo cargas estáticas, hay importantes excepciones que requieren del proyectista la posibilidad de distinguir entre cargas estáticas y dinámicas¹⁸.

Para determinar si una carga varía en forma “lenta” o “rápida”, el valor de referencia para comparación es el “periodo natural de la estructura”. El periodo natural es el tiempo que tarda la estructura en recorrer un ciclo de vibración libre, es decir la vibración que ocurre después que finaliza la excitación externa o después que la carga deja de variar y se mantiene constante. El periodo natural depende de la masa, de la rigidez y de las condiciones de vínculo, todas estas características intrínsecas o propias de la estructura¹⁹.

Al realizarse este tipo de análisis es importante resaltar que se pueden considerar todos los modos de vibración de la estructura, generando así una amplia variedad de desplazamientos, considerando para el diseño el más desfavorable²⁰.

5.1.1.1. Fuerzas internas en las estructuras

Las fuerzas internas que actúan sobre las componentes de una estructura dependen de los desplazamientos o deformaciones específicas. Cuando se quiere conocer una fuerza en función de la deformación se procede en primer término a calcular la deformación, y luego por medio de la ley de Hooke, se obtienen los esfuerzos. La esencia del problema dinámico es evaluar los desplazamientos de la

¹⁸ Consideraciones generales sobre dinámica estructural: dinámica-revA [en línea]. Córdoba provincia de Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Disponible en: http://www.efn.uncor.edu/departamentos/estruct/ana_est_ic/DINAMICA-revA.pdf

¹⁹ *Ibíd.*, p. 1

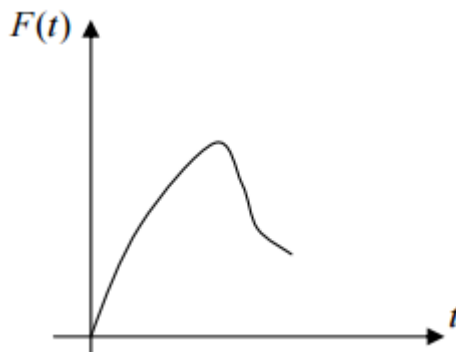
²⁰ DONOBHAN PRESICHI, Gerardo. Aplicación de los métodos estáticos y dinámico modal para el diseño sísmico de edificios con disipadores de energía. Tesis de grado. Maestro en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 2007. p.9

estructura en cada instante del tiempo, y a partir de ellos proceder a determinar los esfuerzos mediante las expresiones de la ley de Hooke o ley constitutiva del material, sin distinguir entre un problema dinámico de otro estático²¹.

5.1.1.2. Respuestas a cargas variables en el tiempo

El problema central de todo inconveniente dinámico es calcular los desplazamientos (y las respectivas deformaciones) de la estructura bajo un sistema de cargas exteriores variables con el tiempo $F(t)$. En un caso genérico la amplitud de la carga $F(t)$ describe un diagrama como el de la siguiente figura, que se considera que es conocida y que constituye un dato del problema²².

Figura 1. Cargas variables en el tiempo



La valoración o estimación de la función de carga $F(t)$ es en general compleja por la influencia de múltiples variables involucradas, y en general es necesario recurrir a simplificaciones que permiten aproximar el problema. En la mayoría de los distintos tipos de cargas dinámicas propias de las estructuras civiles, la determinación de la ley de variación de la carga en función del tiempo se basa en datos experimentales que adecuadamente interpretados y analizados, son incorporados a los reglamentos o normas de diseño²³.

²¹ Consideraciones generales sobre dinámica estructural. Op. Cit., p. 2

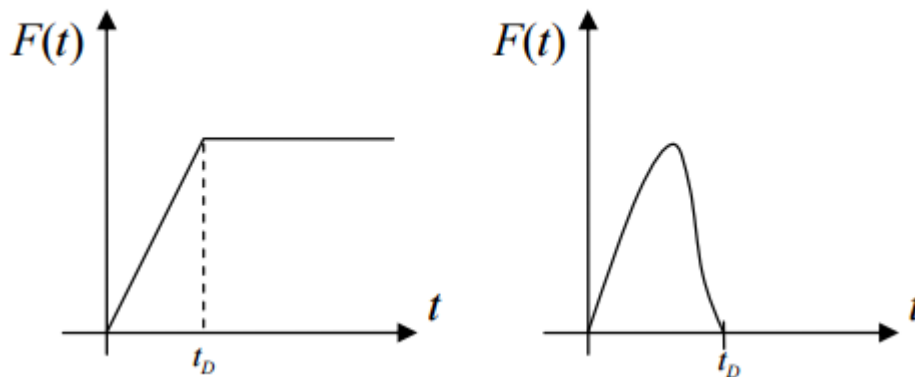
²² *Ibíd.*, p. 3

²³ *Ibíd.*, p. 4

5.1.1.3 Velocidad de reacción de una estructura

La velocidad de reacción de una estructura se define a través de los periodos naturales de vibración. La capacidad de responder a una acción externa (inercia) de alguna forma se puede expresar a través de los llamados “periodos naturales de vibración de la estructura”. Según la variación en el tiempo de la función de carga con respecto al periodo se podrá establecer si la carga aplicada produce efectos dinámicos o no, y en este último caso se dirá que el comportamiento del sistema frente a la carga es estático. Si el tiempo en el que se introduce la carga es muy pequeño frente al periodo natural se considera que la carga se aplicó en forma dinámica. La capacidad de la estructura para “reaccionar” frente a la carga está directamente asociada al valor del período “ T ”²⁴.

Figura 2. Velocidad de reacción



5.1.2. Análisis dinámico

A través del paso tiempo, ha existido la necesidad de construir edificaciones cada vez más altas y esbeltas. Los proyectos arquitectónicos han aumentado las irregularidades estructurales, por tal motivo los métodos simplificado y estático no representan con suficiente aproximación el comportamiento real de las estructuras sujetas a la acción de un sismo²⁵. El análisis dinámico permite una mejor

²⁴ *Ibíd.*, p. 6

²⁵ DONOBHAN PRESICHI, Gerardo. Aplicación de los métodos estáticos y dinámico modal para el diseño sísmico de edificios con disipadores de energía. Tesis de grado. Maestro en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 2007. p.9

aproximación del comportamiento real de las estructuras, pues incorpora información ignorada o indirectamente considerada en el análisis estático. La diferencia entre el método estático y el dinámico consiste en la manera de considerar el posible comportamiento inelástico y la forma en que se define la excitación sísmica de diseño²⁶.

Las estructuras son un conjunto continuo y tienen un infinito número de grados de libertad. Se han tratado anteriormente las formas de concentrar la evaluación en puntos (nudos o pisos) que sean suficientes para determinar el comportamiento de la estructura y calcular sus fuerzas internas. La masa del sistema estructural es concentrada en los nudos o a nivel de los centros de masa de cada piso. Así mismo, si los análisis se realizan considerando que el material estructural tendrá un comportamiento elástico y lineal, las propiedades de rigidez de la estructura pueden aproximarse con un alto grado de confiabilidad, con ayuda de información experimental. Lo mismo puede asumirse para las propiedades de amortiguamiento. Las cargas dinámicas y las condiciones en la base de la cimentación suelen ser difíciles de estimar, sobre todo en el caso de cargas sísmicas²⁷.

5.1.2.1. Ecuaciones de Movimiento

La ecuación fundamental de movimiento en un sistema de múltiples grados de libertad, de masas concentradas, puede ser expresada como una función del tiempo de la forma:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{F}_I(t) - \mathbf{F}_D(t) - \mathbf{F}_S(t) + \mathbf{T}(t)$$

Donde los vectores de fuerza, variables en el tiempo t , son:

$\mathbf{F}_I(t)$: Vector de acciones de inercia en las masas concentradas

$\mathbf{F}_D(t)$: Vector de fuerzas por amortiguamiento, supuesto como tipo viscoso

$\mathbf{F}_S(t)$: Vector de fuerzas por deformación de la estructura

$\mathbf{T}(t)$: Vector de cargas aplicadas externamente

²⁶ *Ibíd.*, p. 8

²⁷ BASUALDO SALINAS, Rafael. Fundamentos del análisis dinámico de estructuras. Curso de segunda especialización en ingeniería sismo resistente. Lima Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil, 24h.

La anterior ecuación es válida tanto para sistemas lineales como no lineales, si el equilibrio dinámico se plantea con respecto a la geometría deformada de la estructura²⁸.

En caso de un análisis lineal la ecuación se puede escribir, en términos de los desplazamientos (nodales o de piso), de la siguiente forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)_a + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t)_a + \mathbf{K}\mathbf{u}(t)_a = \mathbf{F}(t)$$

Donde **M** es la matriz de masas (concentradas), **C** es la matriz de amortiguamiento viscoso (definido para considerar la energía de disipación en la estructura real) y **K** es la matriz de rigidez para el sistema estructural. Los vectores dependientes del tiempo $\mathbf{u}(t)_a$, $\dot{\mathbf{u}}(t)_a$ y $\ddot{\mathbf{u}}(t)_a$ son los desplazamientos, velocidades y aceleraciones absolutas (nodales o de piso), respectivamente²⁹.

En el caso de una acción sísmica, las cargas externas **F**(t) se consideran iguales a cero. Los movimientos sísmicos básicos son las tres componentes de desplazamiento de la base $\mathbf{u}(t)_{ig}$, que son conocidos en los puntos que se encuentran al nivel de la cimentación. Desde el punto de vista ingenieril, los desplazamientos más importantes son los desplazamientos relativos³⁰.

Debe entenderse que la sollicitación sísmica en la estructura se origina gracias a los desplazamientos en su base y no a cargas puntuales aplicadas en la estructura. Sin embargo, se considera suficiente un análisis con cargas estáticas equivalentes en casos relativamente simples, de edificios con pocos pisos y ciertas condiciones de regularidad en la distribución de sus masas y de sus elementos que le brindan rigidez; estas condiciones son especificadas en los códigos de diseño sismo resistente³¹.

5.1.3. Método modal espectral

El método modal espectral toma en cuenta las propiedades dinámicas de la estructura, tales como su forma de vibrar y la contribución de cada modo en la

²⁸ Ibíd., p. 17

²⁹ Ibíd., p. 18

³⁰ Ibíd., p. 18

³¹ Ibíd., p. 18

respuesta. Esto con la finalidad de reproducir con mayor aproximación el comportamiento estructural real ante acciones sísmicas. Este análisis sísmico se utiliza cuando la importancia de la estructura lo amerita³².

Para aplicar el método modal espectral se debe considerar que cuando se desprecia el acoplamiento entre los grados de libertad de traslación horizontal y de rotación con respecto a un eje vertical, deberá incluirse el efecto de todos los modos naturales de vibración con un periodo no mayor o igual a 0.4 segundos, pero en ningún caso podrán considerarse menos de los tres primeros modos de vibración en cada dirección del análisis, excepto para estructuras de uno o dos niveles. En la siguiente ecuación se utiliza para calcular los pesos modales efectivos en cada dirección del análisis. Este peso deberá ser mayor o igual al noventa por ciento total de la estructura³³.

$$W_{ei} = \frac{(\{\phi_i\}^T [W] \{J\})^2}{\{\phi_i\}^T [W] \{\phi_i\}}$$

Donde ϕ_i es el vector de amplitudes del i -ésimo modo natural de vibrar, $[W]$ es la matriz de pesos de las masas y $\{J\}$ es un vector formado con “unos” en las posiciones correspondientes a los grados de libertad de traslación en la dirección de análisis y “ceros” en las otras posiciones. Para calcular la intervención de cada modo natural en las fuerzas laterales que actúan sobre la estructura se supondrán las aceleraciones espectrales de diseño. Las respuestas modales S_i (donde S_i puede ser la fuerza cortante, desplazamiento lateral, momento de volteo, u otras) se combinarán para calcular las respuestas totales de acuerdo con la siguiente expresión³⁴:

$$S = \sqrt{\sum S_i^2}$$

La anterior ecuación se aplica cada vez que los periodos en cuestión difieran al menos diez por ciento entre sí. Los desplazamientos laterales calculados, y multiplicados por el factor de comportamiento sísmico Q , se utiliza para determinar

³² DONOBHAN PRESICHI, Gerardo. Aplicación de los métodos estáticos y dinámico modal para el diseño sísmico de edificios con disipadores de energía. Tesis de grado. Maestro en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 2007. p.9

³³ *Ibíd.*, p. 10

³⁴ *Ibíd.*, p. 10

los efectos de segundo orden y para verificar que la estructura exceda los desplazamientos máximos³⁵.

5.1.4. Software SAP 2000

El software SAP2000 es uno de los programas más utilizados en la ingeniería estructural. Se puede analizar cualquier tipo de estructuras con este programa, e incluso diseñar elemento por elemento de manera precisa con los reglamentos de construcción y diseño en estructuras. Es un programa de cálculo estructural en tres dimensiones mediante elementos finitos³⁶.

Mediante SAP2000 es posible modelar complejas geometrías, definir diversos estados de carga, generar pesos propios automáticamente, asignar secciones, materiales, así como realizar cálculos estructurales de hormigón y acero basados, entre otras normativas, en los Euro códigos vigentes³⁷.

Otra característica propia de SAP2000 que no tienen otros programas de elementos finitos avanzados como ADINA o ABAQUS es la capacidad para diseñar secciones. Para ello dispone de varias normas, entre ellas los EUROCODIGOS³⁸.

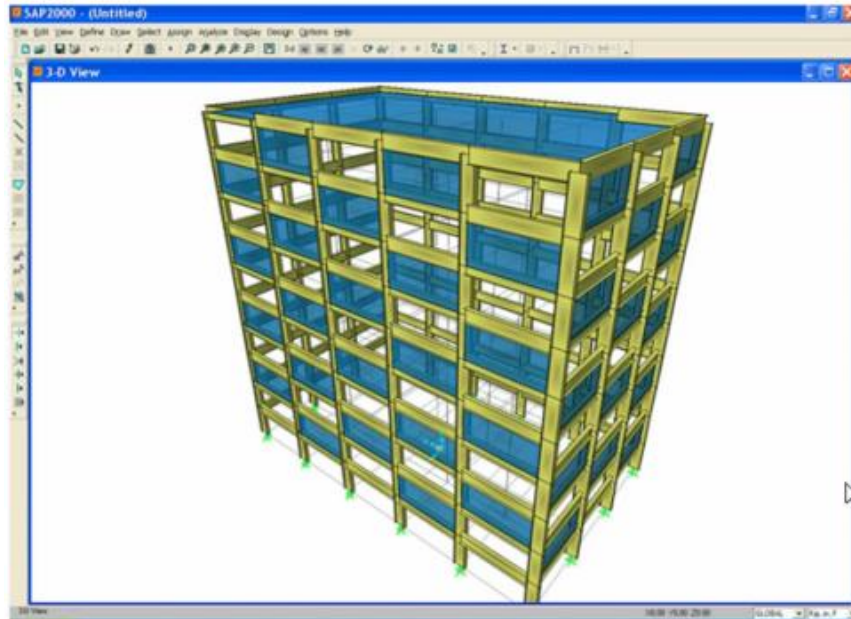
³⁵ *Ibíd.*, p. 10

³⁶ CAMACHO PUELLO, Juan Carlos. ROMERO TORRES, Marlon de Jesús. Análisis estructural con el método de elementos finitos asistido por computadora. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Cartagena: Universidad Tecnológica de Bolívar. Facultad de Ingenierías, 2012. 253h.

³⁷ *Ibíd.*, p 72

³⁸ *Ibíd.*, p 73

Figura 3. Modelo en SAP2000



Fuente: Análisis estructural con el método de elementos finitos asistido por computadora. Disponible en: <http://biblioteca.unitecnologica.edu.co/notas/tesis/0063284.pdf>

Este programa también provee amplias capacidades de modelaje para diferente gama de estructuras como puentes, represas, tanques, edificios entre otros. Su interfaz gráfica permite la creación de los modelos en forma rápida y precisa, ya sea a partir de un gráfico de un programa de dibujo CAD, mediante el uso de las herramientas de dibujo del programa o utilizando plantillas paramétricas. La creación del modelo, la ejecución de los análisis, la revisión de los resultados y la optimización de los diseños se realizan en forma totalmente interactiva dentro de la misma interfaz³⁹.

De igual forma también permite realizar y determinar el análisis lineal, análisis dinámico por espectros de respuesta, cargas móviles, análisis en el dominio de la frecuencia, elementos de barra, shell (cáscara) y sólido, el dimensionamiento de hormigón, verificación de estructuras metálicas y dimensionamiento de armadura para elementos Shell, módulo de pretensado totalmente integrado, para introducción de los cables de pretensado conectados a todo tipo de elemento y cálculo automático de pérdidas instantáneas, como también la posibilidad de considerar los efectos geoméricamente no lineales de PDelta (análisis no lineal que toma en cuenta la deformación inicial de una estructura al someterla a las cargas consideradas⁴⁰.

³⁹ *Ibíd.*, p 73

⁴⁰ *Ibíd.*, p 74

Al sufrir deformaciones, las fuerzas originales actuando sobre la estructura deformada genera excentricidades y por lo tanto momentos y torsiones adicionales) en cargas estáticas y dinámicas y generación automática de mallas de elementos finitos, con elementos de 4 nudos⁴¹.

5.2. MARCO CONCEPTUAL

5.2.1. Vulnerabilidad

Algunos autores consideran que es necesario tener en cuenta los elementos vulnerables, es decir expuestos, como la población, obras ingenieriles, bienes, actividades, líneas vitales, elementos sociales, económicos, culturales, ambientales, y por otro lado la vulnerabilidad como tal.

Según Maskrey ser vulnerable se define como: Ser susceptible de sufrir daño y tener dificultad en recuperarse de ello. Inflexibilidad o incapacidad en adaptarse. Importa precisar que si los hombres no crean un hábitat seguro es por necesidad extrema e ignorancia. La vulnerabilidad puede ser matizada, puesto que se habla de vulnerabilidad progresiva cuando los elementos expuestos, con el tiempo, se vuelven cada vez más vulnerables.

Figura 4. Vulnerabilidad Sísmica



Fuente: ARQHYS Arquitectura disponible en: www.arqhys.com/contenidos/vulnerabilidad-sismica.html

⁴¹ Ibíd., p 74

Cardona observa la vulnerabilidad como un factor de riesgo interno de un sujeto o sistema expuesto a una amenaza, correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o a ser susceptible de sufrir una pérdida. Es el grado estimado de daño o pérdida de un elemento o grupo de elementos expuestos como resultado de la ocurrencia de un fenómeno de una magnitud o intensidad dada, expresado usualmente en una escala que varía desde cero, o sin daños, a uno, o pérdida total. La definición dada por la Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica (AIS), puede ser más clara, ellos la definen como “*la vulnerabilidad sísmica es la susceptibilidad de la vivienda a sufrir daños estructurales en caso de un evento sísmico determinado.*”⁴²

En la EMA, definen amenaza como “*una fuente de daño potencial o una situación con potencial de causar pérdidas. Esta puede referirse también como condiciones potenciales o existentes que pueden causar daños a las personas, propiedades o el ambiente*”.

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su propio comportamiento ante la acción de un sismo descrito a través de una ley causa-efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño (Sandi, 1986). La definición de la naturaleza y alcance de estudio de vulnerabilidad sísmica debe estar condicionado por el tipo de daño que se pretende evaluar y el nivel de amenaza existente. La afectación o daño depende de la acción sísmica y de la capacidad sismo resistente de la estructura, de manera que la evaluación de la vulnerabilidad sísmica esta necesariamente vinculada a la manera como se definen la acción y el daño sísmico.⁴³

5.2.2. Metodologías

Para clasificar las metodologías de vulnerabilidad sísmica, Corsanego y Petrini, proponen uno de los métodos más reconocidos y completos que se han hecho hasta la actualidad. Las técnicas de evaluación se agrupan en cuatro, técnicas directas, indirectas, convencionales e híbridas.

⁴² AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo Resistente de Viviendas de Mampostería. En: LA RED (La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina). San Salvador: 2001. p.2-4

⁴³ SANDI, H. Vulnerability and risk analysis for individual structures and systems. Proceeding of the Eight European Conference on Earthquake Engineering, 8EECE. Vol. 7, Topic 2. Lisboa: 1986. Citado por: NAVIA LLORENTE, Jorge Andrés. BARRERA ROA, Elkin Mauricio. Determinación del índice de vulnerabilidad sísmica en viviendas de interés social de uno y dos pisos construidas con mampostería estructural en la ciudad de Bogotá. Proyecto de grado Ingeniero. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Civil, 2007. p. 8

Las técnicas directas, predicen el daño causado por un sismo a una estructura, paso a paso, a partir de dos modelos, los tipológicos y los mecánicos.

En el método tipológico se define la vulnerabilidad, como la probabilidad que una estructura de cierto tipo, sufran un nivel de daño para la intensidad sísmica dada. La evaluación de la probabilidad del daño es basada en los daños que se observaron en sismos pasados.

Los métodos mecánicos permiten la predicción de un efecto sísmico por medio de modelos mecánicos adecuados a las construcciones.

Las técnicas indirectas permiten conocer un índice de vulnerabilidad, y establecen una relación entre el daño y la intensidad sísmica, por medio de estudios después del terremoto y estudios estadísticos.

Las técnicas convencionales son heurísticas y dan un índice de vulnerabilidad independiente de la predicción del daño, son utilizados para comparar distintas construcciones de una misma tipología, en una zona determinada.

Según la AIS: *“para que una vivienda califique como de vulnerabilidad sísmica intermedia o alta es suficiente con que presente deficiencias en cualquiera de los aspectos mencionados (geométricos, constructivos, estructurales, cimentación, entorno, suelos)”*.⁴⁴

Una de las metodologías para estudiar la vulnerabilidad sísmica es la HAZUSMH desarrollada por FEMA (Federal Emergency Management Agency). Esta surge como una necesidad de los planificadores y especialistas en la atención de los efectos generados por los desastres naturales.

El efecto de los sismos en las edificaciones responde a las aceleraciones transmitidas desde el suelo, a través de los cimientos de la estructura. La inercia del edificio causa la deformación de la estructura, lo cual produce la concentración de esfuerzos en los muros débiles o en las juntas de la estructura resultando en daños o en el colapso total. El nivel de daño que presente la estructura dependerá de la amplitud y de la duración del sismo. La geología regional puede afectar el nivel y la duración del sismo, pero las condiciones locales son inclusive más importantes; por ejemplo los temblores en sedimentos suaves son más grandes y prolongados cuando se comparan con los temblores experimentados en sitios de roca dura. Los efectos de los sismos son mayores en las edificaciones de varios pisos, las cuales

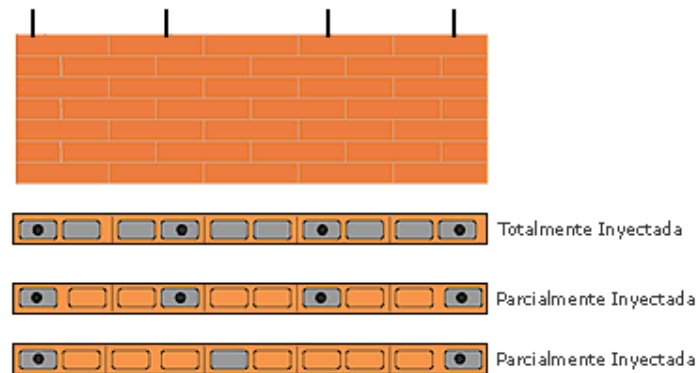
⁴⁴ AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo Resistente de Viviendas de Mampostería. Op. Cit., p. 2-6

también tienden a temblar por más tiempo que las edificaciones de uno o pocos pisos, lo cual las hace más susceptibles al daño.⁴⁵

5.2.3. Mampostería estructural

Hoy en día se trabaja mucho con la parte de mampostería, Priestley afirma que: La mampostería estructural por lo general no suele presentar un comportamiento eficiente ante cargas sísmicas. Aunque la razón de la falta de confianza de los ingenieros estructurales en este material se debe, en gran parte, a un comportamiento ineficiente de las estructuras de mampostería no reforzadas o deficientemente reforzadas, durante las primeras etapas de este siglo, el comportamiento de la mampostería reforzada en los temblores no ha sido menos que ejemplar.⁴⁶

Figura 5. Mampostería Estructural Reforzada



Fuente: CONSTRUDDATA disponible en:

<http://www.construdata.com/BancoConocimiento/T/terracota1edificiosaltoscopia/terracota1edificiosaltoscopia.asp>

⁴⁵ An Introduction to Earthquakes and Earthquake Hazard SLU EAS-A193. Citado por: BUSTAMANTE VERGARA, Rafael Enrique. CASTRO NAVARRO, Carlos Mario. MARQUEZ SABALA, Javier Eduardo. Estudio de vulnerabilidad sísmica en las instituciones educativas de la zona rural norte del municipio de Sincelejo. Proyecto de grado. Sincelejo, Sucre: Universidad de sucre. Facultad de Ingeniería. 2007. p.8

⁴⁶ PRIESTLAY, Nigel. Diseño de estructuras resistentes a sismos. 1ra ed. México D.F.: Limusa: 1991. p.273. Citado por: NAVIA LLORENTE, Jorge Andrés. BARRERA ROA, Elkin Mauricio. Determinación del índice de vulnerabilidad sísmica en viviendas de interés social de uno y dos pisos construidas con mampostería estructural en la ciudad de Bogotá. Proyecto de grado Ingeniero. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Civil, 2007. p. 8

Aunque en la mampostería estructural se han mostrado muchas formas de falla, como las que encontró Glogau al someter a evaluación a la mampostería estructural como estas:

- Fallas de cortante vertical en muros, cuyos bloques están ligados en forma incorrecta y que tienen un refuerzo horizontal inadecuado.
- Degradación estructural prematura ante fuerzas cortantes elevadas, como resultado de un refuerzo horizontal colocado en los planos débiles de las juntas horizontales.
- Falla en la base de los muros debida a la acción combinada de compresión por flexión y cortante.
- Modificación de las fuerzas sísmicas por supuestos muros divisorios y tableros de relleno, considerados como no estructurales. Como por ejemplo de lo anterior, se tiene el comportamiento del Hotel Macuto Sheraton en el temblor de Caracas de 1967, en el que muros divisorios de mampostería hueca muy débil proporcionaron rigidez a los pisos superiores, al grado de que la disipación de la energía se concentró en deformaciones inelásticas indeseables en las columnas del primer entrepiso.⁴⁷

5.2.4. Escala de vulnerabilidad

Según Benedetti-Petrini, de acuerdo con la escala de vulnerabilidad, el índice de vulnerabilidad se obtiene mediante una suma de 23 valores ponderados numéricos que expresan la "*calidad sísmica*" de cada uno de los parámetros estructurales y no estructurales que, se considera, juegan un papel importante en el comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería. A cada parámetro se le atribuye, durante las investigaciones de campo, una de las cuatro clases A, B, C, D siguiendo una serie de instrucciones detalladas con el propósito de minimizar las diferencias de apreciación entre los observadores.

A cada una de estas clases le corresponde un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45, como se observa en la de Benedetti-Petrini. Así, por ejemplo, si el parámetro número cuatro "*posición del edificio y de la fundación*" corresponde a una configuración insegura desde el punto de vista sísmico, se le asigna la clase D y el

⁴⁷ GLOGAU, O.A., Masonry Performance in Earthquakes. Bull. N.Z. natn. Soc. Earthq. Engng, vol. 7, núm. 4, 1974. págs. 149-166. Citado por: NAVIA LLORENTE, Jorge Andrés. BARRERA ROA, Elkin Mauricio. Determinación del índice de vulnerabilidad sísmica en viviendas de interés social de uno y dos pisos construidas con mampostería estructural en la ciudad de Bogotá. Proyecto de grado Ingeniero. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Civil, 2007. p. 8

valor numérico $K_4 = 45$. Por otra parte, cada parámetro es afectado por un coeficiente de importancia W_i , que varía entre 0.25 y 1.5. Este coeficiente refleja la importancia de cada uno de los parámetros dentro del sistema resistente del edificio. De esta forma, el índice de vulnerabilidad VI se define por la siguiente expresión: (Índice de vulnerabilidad)⁴⁸

$$VI = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i$$

Tabla 1. VULNERABILIDAD DE BENEDETTI-PETRINI⁴⁹

Parámetros	Clase K_i				Peso W_i
	A	B	C	D	
1. Organización del sistema resistente.	0	5	20	45	1.00
2. Calidad del sistema resistente.	0	5	25	45	0.25
3. Resistencia convencional.	0	5	25	45	1.50
4. Posición del edificio y cimentación.	0	5	25	45	0.75
5. Diafragma horizontales.	0	5	15	45	1.00
6. Configuración en planta.	0	5	25	45	0.50
7. Configuración en elevación.	0	5	25	45	1.00
8. Distancia máxima entre los muros.	0	5	25	45	0.25
9. Tipo de cubierta.	0	15	25	45	1.00
10. Elementos no estructurales.	0	0	25	45	0.25
11. Estado de conservación.	0	5	25	45	1.00

Fuente: Dirección general de geología y geofísica Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales

Al analizar la ecuación se puede deducir que el índice de vulnerabilidad define una escala continua de valores desde 0 hasta 382.5 que es el máximo valor posible. Como puede verse en la Tabla 1, los parámetros 1, 2, 4, 5, 9, 10 y 11 son de naturaleza descriptiva y quedan definidos completamente por las instrucciones que se presentan más adelante. Por el contrario, los parámetros 3, 6, 7 y 8 son de

⁴⁸Dirección general de geología y geofísica Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INTER). [citado 03 oct., 2016]. Disponible en: <http://webserver2.ineter.gob.ni/sis/vulne/cali/6.6.2.7-indice-vul.htm>

⁴⁹ Dirección general de geología y geofísica Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INTER). [citado 03 oct., 2016]. Disponible en: <http://webserver2.ineter.gob.ni/sis/vulne/cali/6.6.2.7-indice-vul.htm>

naturaleza cuantitativa y requieren de ciertas operaciones matemáticas muy sencillas, las cuales también se describen más adelante.⁵⁰

Estas son algunas metodologías para el análisis de vulnerabilidad sísmica

Tabla 2. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS CUANTITATIVAS⁵¹

Metodología	Ventajas	Desventajas
Índice de vulnerabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • La información necesaria versus la disponible es óptima. • De fácil comprensión en los cálculos y los resultados. • Resultados confiables. • Fácil adaptación a las restricciones de diseño y construcción colombianas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Al igual que las demás metodologías sus resultados sólo son aproximaciones o estimaciones de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. • Se complementa con el método del índice de daño para hacer resultados más reales.
Método de la Asociación Colombiana de ingeniería sísmica, AIS	<ul style="list-style-type: none"> • De fácil comprensión, está diseñada para que pueda ser usado por cualquier persona con conocimientos medios del tema. • Se hizo siguiendo las estipulaciones exactas de la NSR-98. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los resultados no se pueden complementar con los de otros métodos, de tal forma que no logran una mayor exactitud que las demás metodologías.
Método del Instituto di Scienza e Tecnica del le Costruzioni I.S.T.C.	<ul style="list-style-type: none"> • Su parecido con el método del índice de vulnerabilidad es grande, usa fichas de levantamiento de la información y se califican en 7 parámetros que determinan los resultados. • Tiene software desarrollado por el I.S.T.C. que analiza los resultados obtenidos en campo. 	<ul style="list-style-type: none"> • La comparación de resultados tiene que ser de estructuras bastante similares.
Método Venezolano	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede usar con gran cantidad de sistemas estructurales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para su uso se debe tener demasiada información, lo cual hace que cuando se hagan estudios en masa es bastante tedioso.
Método Japonés	<ul style="list-style-type: none"> • Evalúa gran cantidad de parámetros que los otros métodos olvidan tales como elementos no estructurales del tipo instalaciones eléctricas o demás. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de que los evaluadores tengan un criterio bastante alto del tema. • Limita su rango de acción a edificios de concreto reforzado de mediana y baja altura.

Fuente: Estudio Piloto de Vulnerabilidad Sísmica en Viviendas de 1 y 2 Pisos del Barrio Cuarto de Legua en el Cono de Cañaveralejo

⁵⁰ NAVIA LLORENTE, Jorge Andrés. BARRERA ROA, Elkin Mauricio. Determinación del índice de vulnerabilidad sísmica en viviendas de interés social de uno y dos pisos construidas con mampostería estructural en la ciudad de Bogotá. Proyecto de grado Ingeniero. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Civil, 2007.

⁵¹ DANIEL CHAVARRÍA Y DANIEL GOMEZ PIZANO. Estudio Piloto de Vulnerabilidad Sísmica en Viviendas de 1 y 2 Pisos del Barrio Cuarto de Legua en el Cono de Cañaveralejo (Cali, Colombia). Citado por: NAVIA LLORENTE, Jorge Andrés. BARRERA ROA, Elkin Mauricio. Determinación del índice de vulnerabilidad sísmica en viviendas de interés social de uno y dos pisos construidas con mampostería estructural en la ciudad de Bogotá. Proyecto de grado Ingeniero. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Civil, 2007. p.39

Toda estructura y obra civil va a tener vulnerabilidad a los sismos, la necesidad es mirar que tanto afectaran en la estructura del edificio a estudiar. En este proyecto se entenderá por vulnerabilidad sísmica la posibilidad de una estructura a ser afectada por un terremoto, lo cual puede ser objeto de un estudio de vulnerabilidad, es decir, líneas vitales, puentes, edificaciones, entre otros⁵².

Vulnerabilidad, hace referencia al grado de afectación que pueden sufrir los elementos estructurales de una edificación y está relacionada con la capacidad que tiene una estructura para soportar las sollicitaciones a las que se ve sometida en el momento de un sismo⁵³.

5.2.5. Carbonatación

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral.

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo. Es un proceso bien comprendido que ha sido investigado y documentado perfectamente.¹ En concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación es, generalmente, un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto, y asalta al acero de refuerzo causando la corrosión. Aunque la carbonatación es una causa de la corrosión menos importante que los cloruros, no por ello es menos seria en términos del daño que provoca y del dinero que cuesta remediar sus efectos⁵⁴.

5.3. MARCO LEGAL

En Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial aprobó el Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente del año 2010 la cual fue sometida a evaluación durante tres años, entre los mayores cambios e innovaciones de esta versión de la norma fue el mapa de sismicidad elaborado por la red sismológica nacional, que ayuda a identificar de mejor manera y más

⁵² WONGD., D.; SAMUDIO, R. Y MORA, H. determinación de la vulnerabilidad y estimación de daños ante los desastres naturales en los centros educativos en la república de Panamá. Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de proyectos. Panamá 1997

⁵³ UNDRO United Nations Disaster Relief Co-ordinator. Natural disasters and vulnerability analysis. Report of expertgroup. 1979.

⁵⁴ MONTANI RICK La carbonatación, enemigo olvidado del concreto, Concrete Repair Digest. 2000.

precisamente las zonas de amenaza sísmica, dado que esto obliga a hacer variaciones en los diseños teniendo en cuenta si es zona sísmica alta, media o baja.

El primer Reglamento Para Construcción Sismo Resistente En Colombia fue hecho en el año de 1984, teniendo así modificaciones a través de los años, después llegaría una modificación de mayor trascendencia en 1998 y después en el 2010 que es la actualmente vigente, esta norma ha tenido modificaciones en los años 2011 y 2012.

Como hay muchos tipos de estructuras, de diferentes materiales y de diferentes niveles de complejidad el reglamento fue dividido por títulos, para este caso se manejó el Título C que trata del concreto estructural y el Título H que habla acerca de los estudios geotécnicos que se debe tener en cuenta.

Cuando se habla de un estudio de vulnerabilidad sísmica se da por entendido que es una estructura existente la cual será sometida al estudio, para estos casos la NSR-10 (Norma Sismo Resistente 2010) brinda unos criterios que se deben tener en cuenta, por ejemplo, la calidad del concreto con el que fue construido la estructura, si ha tenido carbonatación, eflorescencias, oxidación entre otros. Otro ejemplo a dar es conocer el agregado del concreto, si su tamaño está conforme a la norma actual, conocer la resistencia del material con diferentes pruebas dadas por la norma. Se sabe que toda construcción actual debe estar regida al reglamento sismo resistente del 2010, pero las estructuras construidas antes de la creación del reglamento deben ser reforzadas y mejoradas para así cumplir con los títulos B y C de la NSR-10.

Tabla 3. LEY Y APORTE (NSR-10 Y NTC 3658)

Ley	Aporte
Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10	Esta norma es la principal herramienta para este trabajo de grado, en este la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica plasmó todos los requerimientos de todas las estructuras en el territorio nacional, las cuales la mayoría de estructuras no cumplen, sabiendo esto también posee los requerimientos que se deben tener en cuenta para el estudio de vulnerabilidad sísmico y el reforzamiento estructural.
NTC 3658 Método para la Obtención y	Uno de los datos necesarios para el modelo en SAP2000 de la estructura existente es conocer la resistencia a la

Ensayos de Núcleos Extraídos	compresión del concreto, para esto se deben extraer núcleos, y en esta norma nos muestran como debe ser extraídos y como debe ser su preparación para hacerle los ensayos pertinentes con el fin de la obtención de varios datos.
------------------------------	---

Fuente: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente

5.4. MARCO HISTORICO

La zona territorial que hoy por hoy ocupa Bogotá se han presentado siete eventos sísmicos de magnitudes importantes en los últimos tres siglos los cuales fueron:

En 1743 donde su epicentro fue páramo de Chingaza, en ese se estaba reestableciendo el gobierno virreinal en el Nuevo Reino de Granada cuando Santa Fe fue conmovida por un violento terremoto. El doce de julio de 1785, siendo las *"ocho menos cinco minutos de la mañana"* se experimentó *"en la capital un terrible terremoto cuya duración sería de tres a cuatro minutos"*, ocasionando "daños considerables en casi todos los edificios de la ciudad, en los conventos, y las torres de casi todas las iglesias quedaron en ruinas"⁵⁵.

Bajo los escombros mucha gente quedó atrapada. Lograron salvarse sólo quienes se escondieron en los confesionarios, debajo de las sillas y en refugios de ocasión. Muchos fueron los heridos y lesionados. Cayeron las torres de los conventos de San Francisco y Santo Domingo y se derrumbó la iglesia de Guadalupe. *"La iglesia Catedral se ha tenido bastante, pero su torre se ha abierto de modo que se necesita descargar"*⁵⁶. Tampoco se salvó el palacio del arzobispo–virrey, el cual debió ser deshabitado y, un año después, por una de sus amplias grietas.

A partir de estos dos se presentaron los últimos cinco, en 1826 en Sopó; en 1827 en Timaná, Huila; en 1917 en el páramo de Sumapaz; en 1923 en Paratebuena y el más reciente en 1967 donde el epicentro fue en los Cauchos (Huila-Caquetá), cuando en la ciudad de Bogotá tenía un millón y medio de habitantes. En esa época se registraron 13 muertos, y 100 heridos.

⁵⁵ ¿Cuál es el riesgo sísmico en Bogotá?: revista semana. Bogotá. [citado el 15 Ene., 2010] disponible en: <http://www.semana.com/nacion/problemas-sociales/articulo/cual-riesgo-sismico-bogota/111965-3>

⁵⁶ *Ibíd.*, p 1

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE INVESTIGACIÓN

El enfoque metodológico del estudio fue mixto, puesto que es un proceso en donde se recolectó información, se analizó y se relacionaron datos cuantitativos y cualitativos, para responder al planteamiento del problema. Con manejo estadístico de la información, de tipo evaluativo en donde se valoraron los materiales utilizados en la edificación de la facultad y la posible vulnerabilidad sísmica dirigida a la prevención en un evento sísmico, mediante un análisis de la estructura. De esta manera se logró una representación más precisa de la situación, que ayudó a clarificar y a precisar la variedad de los datos de las diferentes fuentes y tipos de datos, y potencializo los conocimientos teóricos y procedimentales.

Así es, que a través del este estudio se realizó extracción de núcleos de concreto, esclerometría, y ferrosacan que permitieron identificar los datos, donde se pudo dar verificación de una parte de la estructura si cumple o no con la norma sismo resistente.

6.2. TIPO DE INVESTIGACION

En esta investigación se manejó el análisis descriptivo comparativo a través de los requisitos generales de diseño y construcción determinados en el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NRS-10, donde se determinó si la edificación de la facultad esta prepara para eventos sísmicos relacionándola con lo estipulado en la norma. En este proceso se desarrolló el uso del programa SAP 2000 que permitió la ejemplificación de la estructura de la facultad de ingeniería.

6.3. FASES

Tabla 4. FASES Y ACCIONES DE LA INVESTIGACIÓN

FASES	ACCIONES
	Se Observó según la norma en los títulos A y B que características debe tener una estructura para que este en óptimas condiciones ante un evento sísmico.

<p>Identificar las falencias estructurales que posee una parte de la facultad.</p>	<p>Se buscó información existente del edificio en el archivo central de predios, donde se encontraron dos licencias de construcción de 1941 y 1942. (Anexos).</p> <p>Se desarrolló una detallada inspección de la edificación con el propósito de conocer daños y deterioros en los elementos estructurales, con el fin de facilitar la comprensión del patrón de daños y facilitar la formulación de los diagnósticos.</p>
<p>Analizar si la estructura existente cumple a cabalidad con la norma sismo resistente vigente.</p>	<p>Se ejecutó extracción de núcleos de concreto en diferentes columnas de la edificación. Posterior a la extracción de las muestras antes señaladas, se realizará la reparación de cada uno de los lugares donde se tomaron las muestras.</p> <p>Se Comparó los resultados obtenidos en cada ensayo realizado en el laboratorio con lo determinado con la norma.</p> <p>Se realizó la descripción del concreto de las muestras tomadas teniendo en cuenta aspectos como la textura superficial, la calidad de la distribución del agregado grueso en la muestra, el tamaño del agregado grueso, la presencia de sobre-tamaños en la muestra obteniendo los siguientes resultados.</p>
<p>Diseñar un modelo de reforzamiento estructural apropiado, para una parte de la facultad de ingeniería, que cumpla con la norma.</p>	<p>Se modeló la estructura en el software SAP 2000 con los datos obtenidos en laboratorio, y se modificó el modelo según la norma para que cumpla de acuerdo en un eventual sismo.</p>

Fuente: Propia

6.4. INSTRUMENTOS

En la investigación las técnicas para la recolección de la información se realizaron de manera cuantitativa por medio de la intervención de la estructura de la facultad que consistió en la extracción de núcleos de concreto, donde se analizó cada una de las extracciones por medio de un mecanismo de falla en el laboratorio y se determinó sus aspectos. Dentro de los instrumentos que se utilizaron se encuentra el Ferroskan que es un medio no destructivo para localizar barras de refuerzo y para la medición de la profundidad del recubrimiento de hormigón. En las perforaciones de la estructura de la facultad se utilizó el extractor de núcleos (método destructivo).

De acuerdo con los datos que se obtuvieron, se realizó una verificación y relación basándose en estudios previos y el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NRS-10), que permitieron identificar si la estructura de la facultad cumple con la normatividad.

6.4.1. Procedimientos ejecutados para la obtención de datos

6.4.1.1. Extracción de núcleos

A partir de la norma NTC 3658 la cual se refiere al método para la obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas de concreto aserradas, cuyo objetivo es establecer la obtención, la preparación y el ensayo de núcleos extraídos de concreto para la determinación de su longitud o de su resistencia a la compresión o de la resistencia a la tracción indirecta y de vigas aserradas de concreto para la determinación de la resistencia a la flexión⁵⁷.

Un espécimen de núcleo, es tomado perpendicularmente a la superficie horizontal, el cual debe localizarse en lo posible, de tal forma que su eje sea perpendicular a la base de concreto tal como fue colocado originalmente y lejos de las juntas formadas o bordes evidentes de diferentes elementos estructurales. Un espécimen tomado perpendicularmente a la superficie vertical, o perpendicular a una superficie con cierta inclinación, debe tomarse cerca a la mitad de un elemento cuando sea posible y lejos de las juntas formadas o bordes evidentes de diferentes elementos estructurales⁵⁸.

⁵⁷ Norma Técnica Colombiana: Ingeniería civil y arquitectura. método para la obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas de concreto aserradas. Bogotá. Noviembre 23, 1994. I.C.S: 91.080.40

⁵⁸ *Ibíd.*, p 2

Norma utilizada: NTC 3658 Método para la Obtención y Ensayos de Núcleos Extraídos

Equipo utilizado: Taladro extractor de núcleos HILTI DD-150

Se utiliza en la obtención de especímenes de núcleo cilíndrico. Para especímenes extraídos por una perforación perpendicular a la superficie horizontal puede ser apropiado el uso de un taladro de percusión. Se debe usar una broca de punta de diamante para núcleos extraídos en otras direcciones, cuando el diámetro del núcleo de ensayo deba determinarse con exactitud, buscando una mayor precisión en los cálculos de la resistencia a la compresión⁵⁹. La localización de los ensayos se puede observar en los Planos 1 y 2.

Figura 6. Taladro extractor de núcleos HILTI DD-150



⁵⁹ *Ibíd.*, p 3

Figura 7. Procedimiento extracción de núcleos.



6.4.1.2. Lecturas de Ferroscan

Es un ensayo no destructivo que permite obtener de manera gráfica la ubicación de los refuerzos en un elemento estructural, permite visualizar las armaduras inmediatamente de la estructura determinando la separación entre varillas, mediante campo magnético; permite realizar un control de calidad en la estructura, examinar el recubrimiento del concreto evitando daños sobre la estructura y permite evitar encontrar varillas de armado mientras se perforan los agujeros de fijaciones múltiples. Se debe una hoja de guía para así tomar de una manera adecuada las lecturas.

Equipo utilizado: Ferroscan Hilti PS 250

Figura 8. Ferroscan Hilti PS 250



Figura 9. Ferroskan Hilti PS 250



6.4.1.3. Ensayo de Carbonatación

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto, El concreto, con su ambiente altamente alcalino, protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión, cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable⁶⁰.

Ya con los núcleos extraídos se puede hacer el ensayo más común para la determinación del valor de Ph del hormigón (ensayo de carbonatación) es el test de la fenolftaleína. El test consiste en rociar los núcleos (es decir, el concreto no expuesto anteriormente al aire) con una solución al 1% de fenolftaleína en hidroalcohol (70% de alcohol y 30% de agua). Si el color del hormigón impregnado vira a un púrpura intenso se interpreta como no carbonatado y si no cambia de color se supone carbonatado⁶¹.

Equipo utilizado: Fenolftaleína al 1% de solución

⁶⁰ MONTANI, Rick. La carbonatación, enemigo olvidado del concreto: construcción de la tecnología. Diciembre 2000. Disponible en: <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>

⁶¹ Patologías construcción. Carbonatación a fondo (3) Ensayo y determinación 1 de 2: Patología + Rehabilitación + Construcción. Mayo 5 de 2014. Disponible en: <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/05/carbonatacion-fondo-3-ensayo-y-determinacion-1-de-2/>

Figura 10. Fenolftaleína solución al 1%



Fuente: Labobay, disponible en: <http://veravitr.com.mercadoshops.com.mx/fenolftaleina-indicador-ph-solucion-en-gotero-30ml-339xJM>

Figura 11. Carbonatación en núcleo



6.4.1.4. Resistencia del concreto mediante esclerómetro

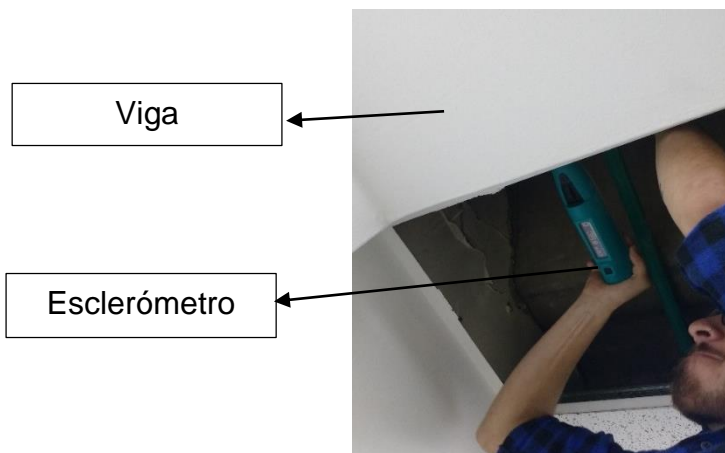
El ensayo esclerométrico o índice de rebote mediante esclerómetro es una prueba no destructiva de la resistencia del hormigón, lo que permite realizar un gran número

de determinaciones sin alterar la resistencia, estética y funcionalidad de una estructura, pero el resultado obtenido depende de demasiados factores, tales como tipo y contenido de cemento, compactación, tipo de agregado y humedad. Por esto mismo los resultados de este ensayo no fueron tenidos en cuenta como datos primordiales para determinar la resistencia a la compresión del concreto.

En este ensayo presionamos el esclerómetro sobre la superficie del concreto, una vez el émbolo llega a un determinado punto un resorte lo libera y golpea el concreto, el émbolo golpea sobre la superficie y dependiendo de la dureza de misma, rebota con mayor o menor fuerza, Es la respuesta de rebote la que desplaza una guía sobre un visor escalado y consigue la medición⁶².

Equipo utilizado: Esclerómetro Digital

Figura 12. Ensayo esclerométrico en viga



⁶² Ibíd., p 3

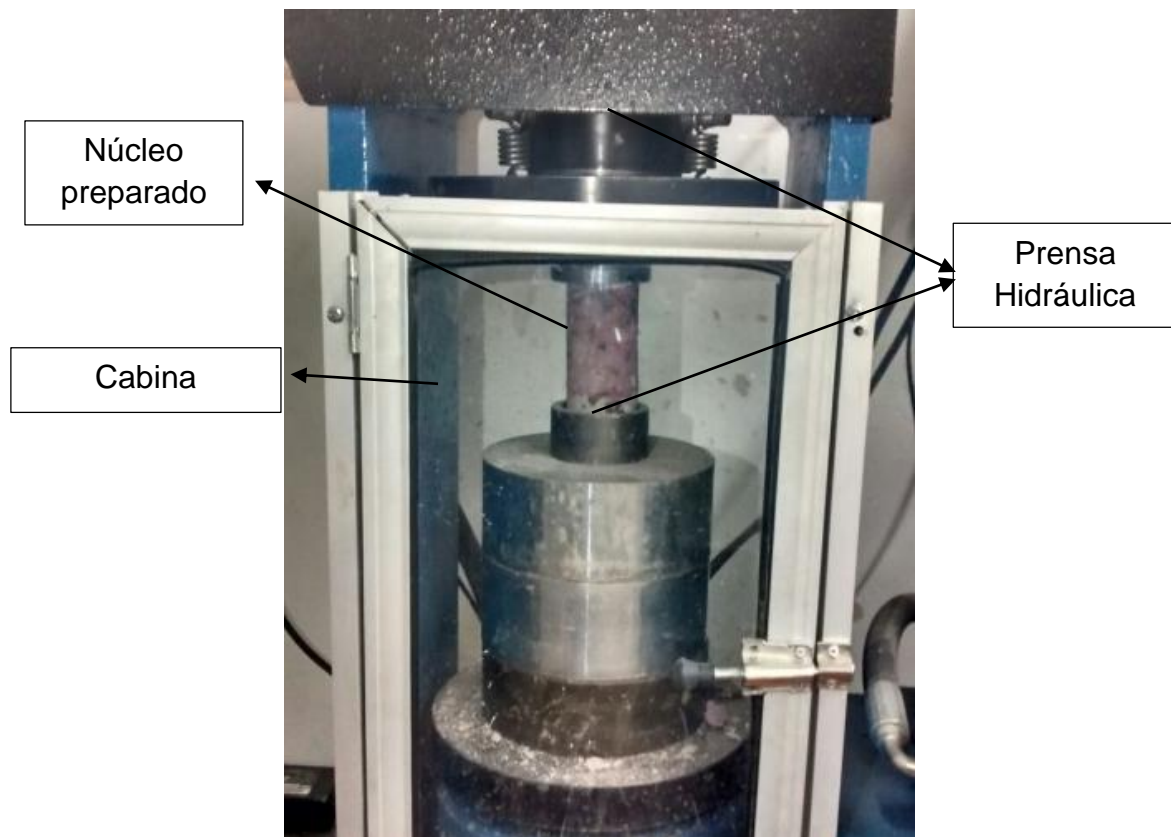
6.4.1.5. Ensayo a la compresión

Para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto fueron utilizados los diferentes núcleos extraídos en la estructura existente, para esto fue necesaria la preparación de las muestras como lo exigen las normas NTC 3658 y NTC 673, luego de esto se procedió a fallar los núcleos en la máquina de compresión simple del laboratorio de la facultad, la cual siempre permanece calibrada como es exigido en la NTC 673. Este ensayo consiste en encontrar la resistencia hasta el punto de falla de cada núcleo para así conocer la resistencia a la compresión de cada uno de ellos.

Equipo utilizado: Máquina de Compresión uniaxial

Norma utilizada: NTC 673

Figura 14. Máquina de Compresión uniaxial



6.4.2. Operacionalización de variables

Tabla 5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Nombre	Escala	Definición conceptual	Definición operativa	Categoría
Esclerometría	Cuantitativa	Método de ensayo para determinar la resistencia a la comprensión del concreto, estableciendo curvas de correlación en el laboratorio.	Delimitar la baja resistencia en los núcleos de concreto, evaluar su uniformidad, y comparar con antecedentes de evolución de resistencia en estructuras.	Evaluación de la uniformidad del concreto.
				Resistencia del concreto.
Ferroskan	Cuantitativa	Localización de barras de refuerzo y medición de la profundidad del recubrimiento.	Estimar el diámetro de las barras de refuerzo que se localizan en la estructura.	Patología de la construcción.
Ensayo de carbonatación	Cualitativo	Perdida del PH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto.	Evaluar el efecto de la carbonatación sobre el coeficiente de difusión del ion cloruro en el concreto.	Determinación del PH en muestras de concreto.
Extracción de núcleos	Cualitativo	Determinar características del concreto, mediante el uso de un taladro extractor de núcleos HILTI DD-150.	Con una broca diamantada de 2 "(5.08 cm) diámetro refrigerada mediante flujo continuo de agua, se realizará la extracción de los núcleos cumpliendo con todos los parámetros exigidos en la	Propiedades del concreto.
				Mecanismo de falla del concreto.
				Diseño estructural

			norma NTC - 3658	
Otros parámetros	Cuantitativa	Mediante el análisis de resultados obtenidos en terreno, se da respuesta a las interrogantes que puedan existir en el proyecto en el aspecto de reparación, reforzamiento o rehabilitación estructural.	A través de la determinación que se hace en el laboratorio de corrosión en barras de acero, o deterioro del recubrimiento en la estructura, y verificación de diámetros de las barras de acero y de carga por cambio de uso de la estructura.	Diagnóstico estructural
				Localización de barras de acero

Para el diagnóstico de cada muestra de concreto extraída en el laboratorio se realizó utilizando las diferentes técnicas de análisis que permitieron la adquisición de los parámetros y las características de cada núcleo de concreto, los cuales se compararon posteriormente para determinar si la estructura de la facultad cumple con la norma sismo resistente (NRS-10).

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

7.1. IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y FALENCIAS.

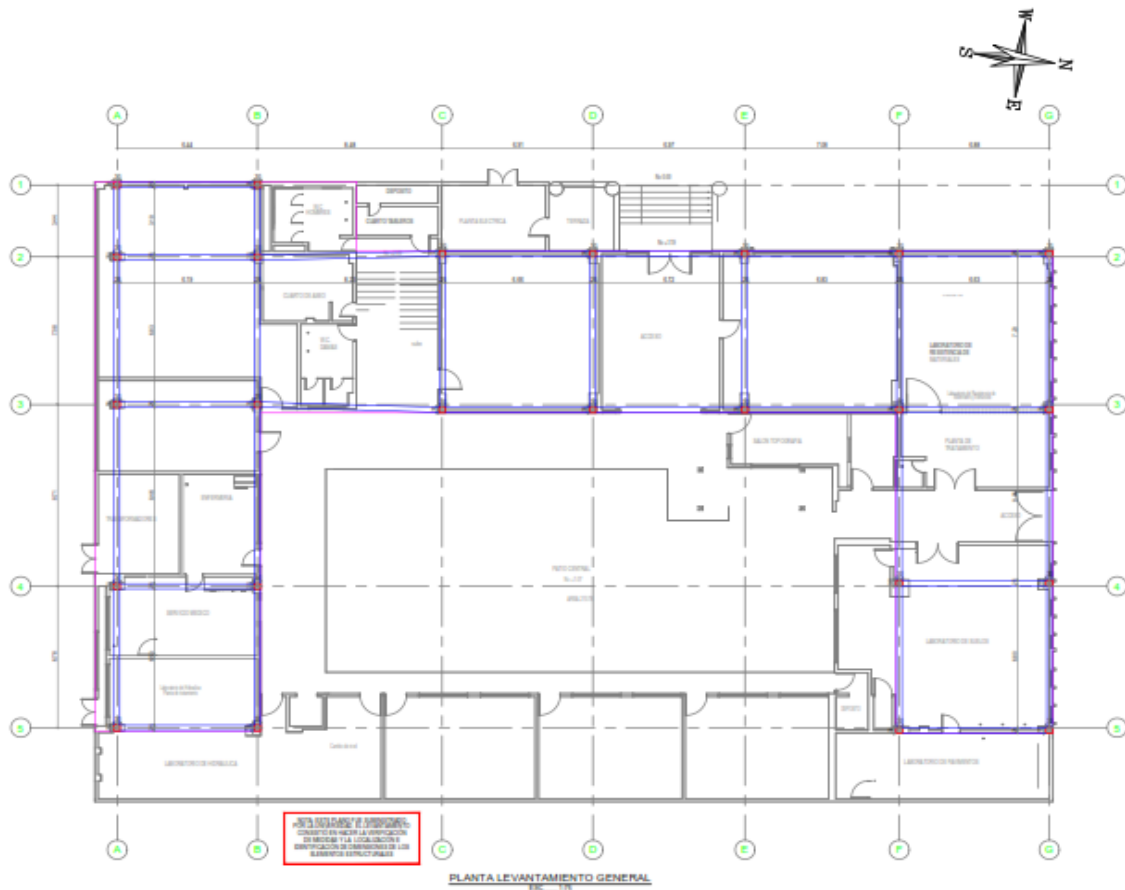
7.1.1. Geometría general estructura existente.

Para conocer la geometría general de la estructura existente se hizo una búsqueda de información arquitectónica y estructural en archivo central de predios, donde se encontraron únicamente dos licencias de adecuación a una estructura existente lo que nos indica que esta fue construida de forma empírica.

Ver Anexo A, B y C

Tras no encontrar nada de información en archivo central de predios, se buscó la ayuda de la universidad para obtener planos del edificio de la facultad de ingeniería civil. Tras la obtención de los planos se hizo la verificación de las dimensiones haciendo un levantamiento general e identificación de elementos estructurales tales como columnas y vigas. Ver Anexo D

Figura 15. Levantamiento general



En este levantamiento general que se hizo se identificó que la sede de la facultad de ingeniería civil de la universidad la gran Colombia posee dos edificios, uno que cuenta con cinco pisos y otro de dos pisos ubicado hacia la parte oriental.

7.1.2. Características del concreto

7.1.2.1. Resistencia a la compresión del concreto

Para la identificación de la resistencia a compresión se extrajeron 4 núcleos de concreto de las columnas y se hicieron 7 ensayos mediante un esclerómetro en vigas y columnas. La localización de estos ensayos se encuentra en él. Ver Anexo E

Para conocer la resistencia a la compresión por medio de los núcleos de concreto se hizo la preparación requerida por la norma establecida (NTC 3658), la cual exige que el borde de los núcleos quede perpendicular, y conservando una relación longitud-diámetro de 2:1, ya que el diámetro de la broca con la cual se extrajeron los núcleos es de 2", la longitud de estos debió ser de 4" o sea que las dimensiones de los núcleos listos para el ensayo de compresión simple fueron de 5.08cm x 10.16cm. En el núcleo numero 1 no se pudo cumplir la norma ya que la longitud que se pudo extraer era menor a la requerida para cumplir con la proporción mencionada anteriormente.

Figura 16. Corte del núcleo



Figura 17. Corte del núcleo



Figura 18. Longitud del núcleo



Figura 19. Diámetro del núcleo



Posterior a la extracción y preparación de los núcleos se espero un lapso de tiempo de 7 días que la NTC 3658 exige acondicionamiento de la humedad. En la siguiente tabla se encuentran los resultados de la resistencia a la compresión obtenida para cada uno de los núcleos:

Tabla 6. FECHAS EXTRACCIÓN Y ENSAYO DE NÚCLEOS DE CONCRETO

MUESTRA NO.	LOCALIZACIÓN	FECHA DE		RESISTENCIA OBTENIDA
		TOMA DE MUESTRA	ENSAYO	
2	Columna (4piso - Salón 401)	12-11-2016	21-11-2016	31.28 MPa
3	Columna (4piso – Salón 409)	12-11-2016	21-11-2016	19.25 MPa
4	Columna (4piso – Salón 411)	12-11-2016	21-11-2016	24.67 MPa
		Desviación Estándar		6.02 MPa

Fuente: Propia

El ensayo de resistencia del concreto mediante esclerómetro (NTC-3692) se hizo para verificación de los resultados obtenidos en el ensayo a compresión, pero los

datos obtenidos por medio de este ensayo no fueron de mayor relevancia para la modelación ya que no es un ensayo certificado para determinar la resistencia del concreto. En la siguiente tabla se encuentran los resultados dados por los ensayos con el esclerómetro.

Tabla 7. ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA

MUESTRA NO.	LOCALIZACIÓN	RESISTENCIA OBTENIDA
1	Columna (1piso – Salón 105)	18.65 MPa
2	Columna (2piso – Salón 206)	20.15 MPa
3	Viga (3piso – Salón 301)	21.52 MPa
4	Columna (3piso – Salón 306)	19.74 MPa
5	Columna (4piso - Salón 401)	30.20 Mpa
6	Viga (4piso – Salón 409)	19.06 Mpa
7	Columna (4piso – Salón 411)	25.26 Mpa
PROMEDIO		4.21 Mpa

Fuente: Propia

Según el ensayo a la compresión realizado en los núcleos No.2, No.3, y No.4, y la comprobación con los ensayos de esclerometría realizados (Tablas x y x), el diseño de mezcla cumple con los requerimientos mínimos de resistencia a compresión establecida en el capítulo C.1.1.1 de la NSR-10, donde se especifica que la resistencia mínima a la compresión del concreto estructural debe ser de 17 MPa.

7.1.2.2. Tamaño de agregado del concreto

Se realizó la descripción del concreto de las muestras tomadas para verificar si el diseño de la mezcla cumple con los requerimientos de la norma, teniendo en cuenta aspectos como la textura superficial, la calidad de la distribución del agregado grueso en la muestra, el tamaño del agregado grueso, la presencia de sobretamaños en la muestra obteniendo los siguientes resultados.

Figura 20. Tamaño de los agregados en las muestras extraídas.



Tabla 8. DESCRIPCIÓN DEL AGREGADO DE LOS NÚCLEOS EXTRAÍDOS.

<i>Núcleo No.</i>	<i>Textura Superficial</i>	<i>Distribución del Agregado</i>	<i>Tamaño Máximo del Agregado</i>	<i>Observaciones</i>
1	Lisa	Regular	19mm	Algunas partículas alargadas.
2	Lisa	Regular	19mm	
3	Lisa	Regular	42mm	Sobretamaño de 42mm, algunas partículas alargadas.
4	Lisa	Regular	20mm	

Fuente: Propia

Según la norma NRS-10 capítulo C4.1.1 los agregados gruesos de la mezcla de concreto no deben sobrepasar los 25mm, por lo tanto hay algunas partículas que no cumplen ya que tienen tamaños mayores a una pulgada.

7.1.3. Ensayo de Carbonatación en el concreto

La carbonatación es muy fácil de identificar, basta con aplicar una solución de fenolftaleína con una concentración de 1-2% diluida en alcohol, teniendo así que el concreto cambiará de matiz en donde no hay presencia de carbonatación, es decir, donde el concreto cambie a un color rosado es que no hay presencia de carbonatación en el concreto, y en donde no haya cambio se concluirá que este problema ya está avanzando por el concreto.

De acuerdo al ensayo de carbonatación en los núcleos extraídos (tabla 6), se analizó que si hay presencia de carbonatación en las muestras extraídas, pero no ha llegado a alterar la composición química del acero de refuerzo para que se genere corrosión debido a que el concreto ha adquirido un PH ácido, ya que el frente de carbonatación no es mayor a 40 mm, el cual es el recubrimiento mínimo establecido en el capítulo C.7.7.1 de la NSR-10. La localización de estos ensayos se encuentra en el plano No 2. Ver Anexo E

Tabla 9. RESULTADOS ENSAYO DE PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN.

<i>ELEMENTO No.</i>	<i>LOCALIZACIÓN</i>	<i>PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN en mm</i>
1	Columna (3piso)	30
2	Columna (4piso)	10
3	Columna (4piso)	28
4	Columna (4piso)	10

Fuente: Propia

Figura 21. Ensayo de profundidad de carbonatación en el núcleo No 3.



7.1.5. Verificación de diámetro y recubrimiento de refuerzo existente

Se verificó el refuerzo existente en los elementos estructurales que conforman la edificación mediante pruebas no destructivas. Para tal fin se utilizó un equipo de última tecnología denominado Ferroskan con el cual se determinó la profundidad a la que se encuentra el refuerzo y el diámetro de los aceros. De igual manera se determinó el número de barras que se encuentra al interior de la masa del concreto y la separación de ellas para establecer el distanciamiento de los estribos.

Se hicieron únicamente dos ensayos en el primer y segundo piso ya que este es muy costoso y no se contó con los recursos necesarios para obtener más datos por medio de este ensayo. La localización de estos ensayos se encuentra en el **Plano No 2**. Ver Anexo E

Los resultados de los dos ensayos se muestran en las siguientes figuras:

Figura 22. Ensayo No 1. ferrosan

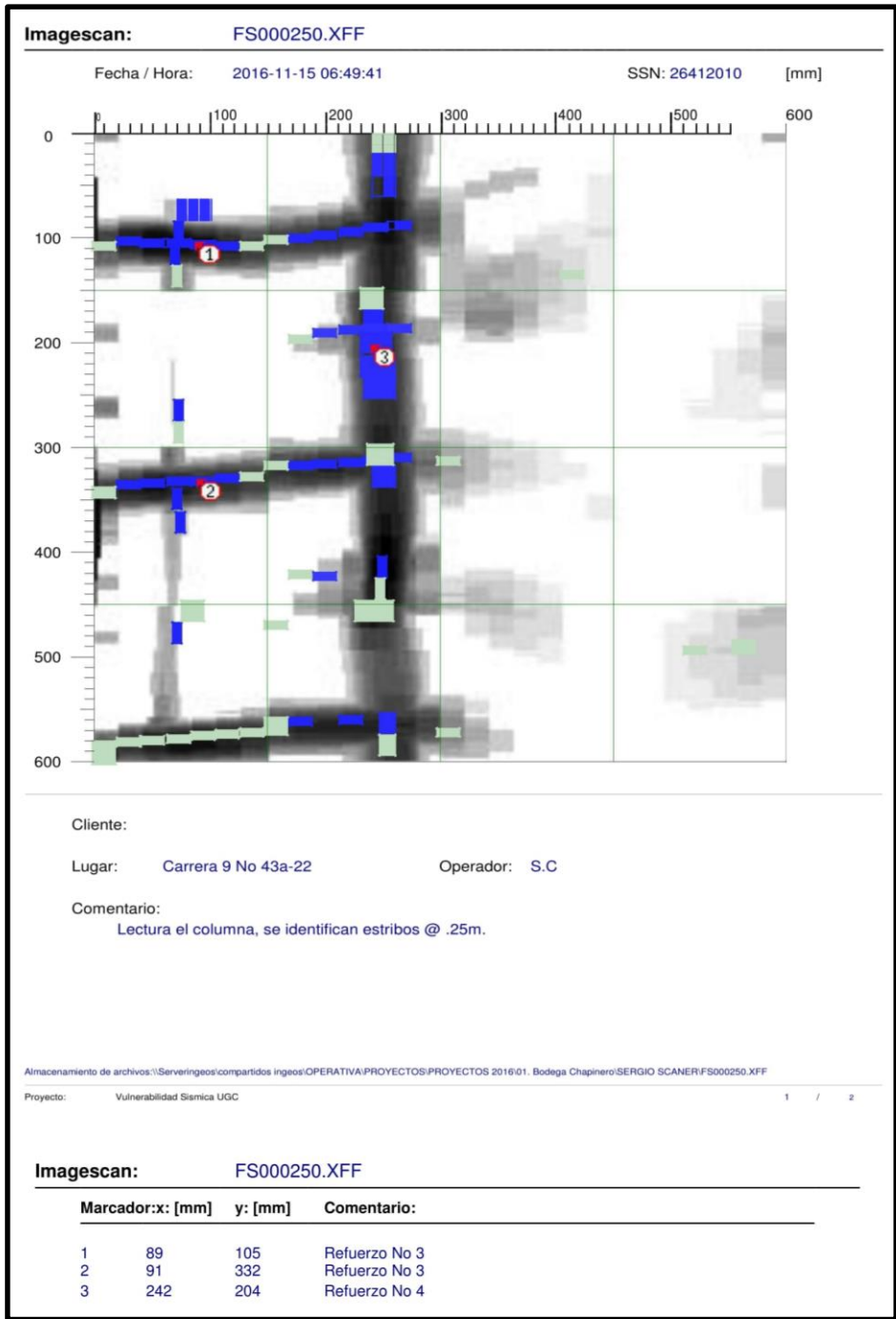
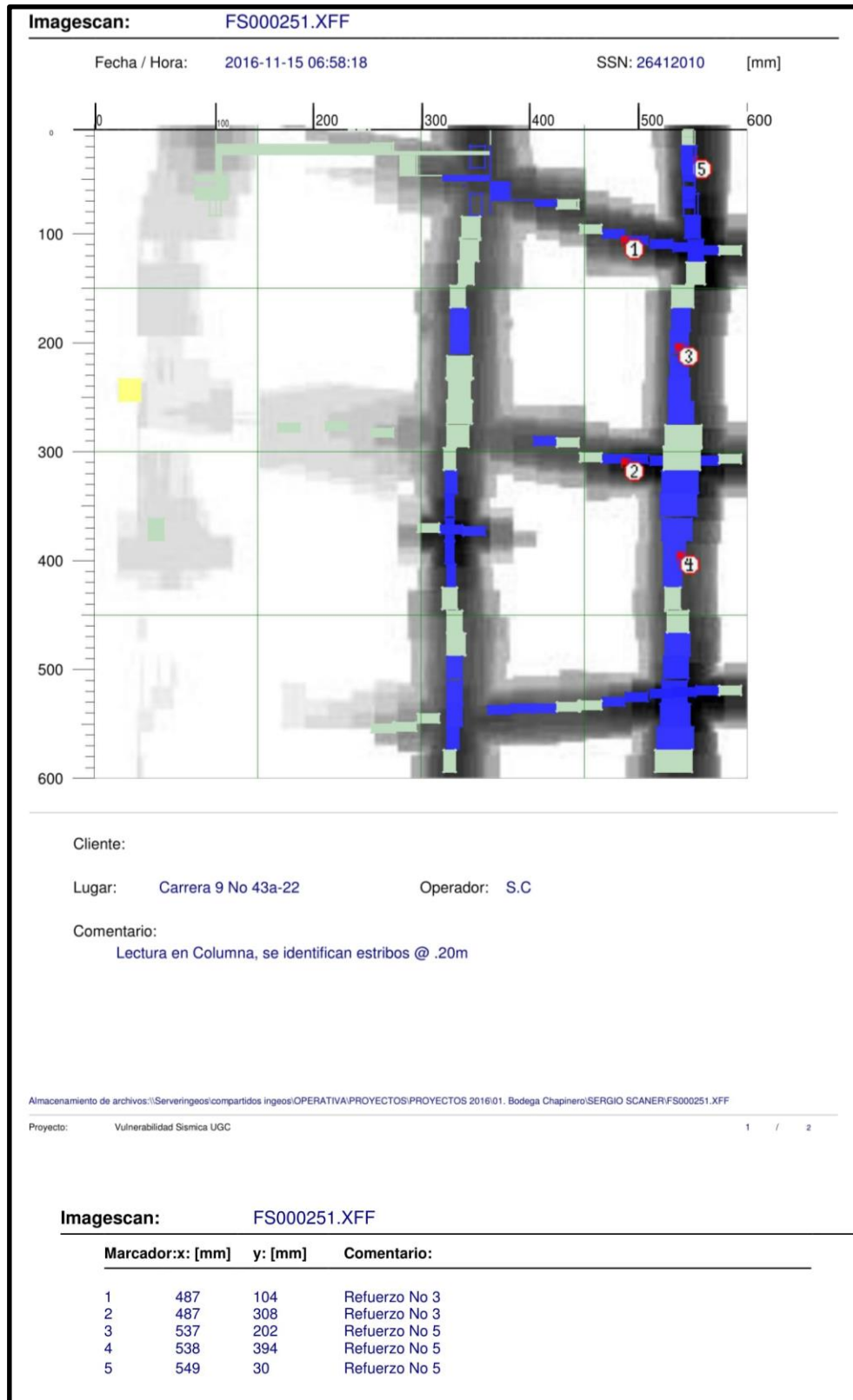


Figura 23. Ensayo No 2. ferrosan



Los resultados obtenidos en los ensayos de ferroskan se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 10. RESULTADO ENSAYO FERROSCAN

No	Lectura	Localización	ACERO PRINCIPAL			ESTRIBOS		
			No. de barras	Diámetro	Tipo	Diámetro	Tipo	Separación
1	0250	Columna 1 piso, Salón 105	4	12.7 mm	Corrugada	9.5 mm	liso	250 mm
2	0252	Columna 2 piso, Salón 203	4	15.9 mm	Corrugada	9.5 mm	liso	200 mm

Fuente: Propia

7.1.6. Falencias estructurales

Se identificaron las falencias estructurales que posee la estructura de la facultad, en la extracción del primer núcleo se encontró que la sección de las columnas centrales es más pequeña de lo que aparentan, esto se debe a que cuentan con una parte en mampostería no confinada que está con pañete y pintura junto a las columnas, como se evidencia en las imágenes x y x, esto fue comprobado con ensayos rápidos de ferroskan los cuales solo nos indican la presencia de acero y nos indicó que la sección de las columnas es de 30x30 cm.

Figura 24. Evidencia N° 1 mampostería en columna



Figura 25. Evidencia N°2 mampostería en columna

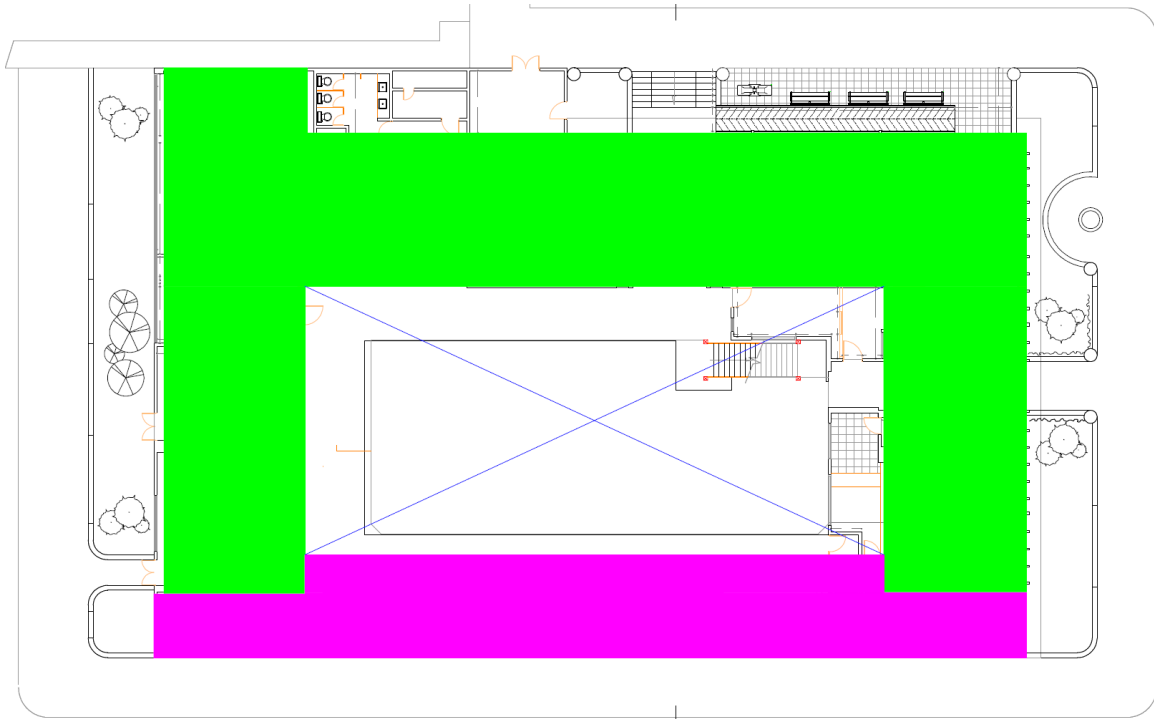


La universidad actualmente tiene cinco pisos transitables y la cubierta, en el quinto piso no hay continuidad de las columnas de la estructura, únicamente se evidenciaron muros divisorios y por lo tanto no existe un sistema de pórticos resistente a momentos o la existencia de una viga corona para recibir la cubierta, sino que esta está apoyada en los muros divisorios.

7.2. MODELO ESTRUCTURAL SAP2000

Como ya había sido mencionado se pudo observar que se encuentran dos tipos de zona del edificio, la zona resaltada en verde fue la zona a modelar ya que el proceso y la época de construcción entre estas dos zonas mostradas fueron diferentes. Para la modelación en el software SAP2000 se tuvo en cuenta el levantamiento estructural que se realizó, y adicionalmente los datos de los materiales en los diferentes ensayos mostrados anteriormente.

Figura 26. Planta general de la edificación



Fuente: Propia

7.2.1. Avalúo de Cargas

Carga Muerta: Para la realización de la evaluación sísmica de la edificación, se tomarán en cuenta las cargas muertas que efectivamente actúan sobre la estructura y están de acuerdo con las cargas establecidas actualmente en la Norma NSR-10.

Las cargas muertas utilizadas corresponden al peso propio de las placas de los entresijos y de cubierta, así como las divisiones y acabados sobre ellas.

Carga Viva: La carga viva de diseño se determinó según el uso de la edificación y teniendo los valores mínimos establecidos en Capítulo B.4 del Reglamento NSR-10.

Fue necesario tener en cuenta las cargas vivas y muertas mínimas exigidas por el reglamento de construcciones sismo resistente para los datos requeridos en la modelación. En la siguiente imagen se muestra el avalúo de cargas para todos los entresijos de la edificación, suponiendo datos como que el entresijo es aligerado, la separación y dimensión de las viguetas, ya que por requerimientos de las directivas de la universidad no se podían hacer ensayos o prácticas destructivas ya que la universidad actualmente está activamente en servicio.

Figura 27. Avalúo de cargas

PROYECTO	PROYECTO DE GRADO		
FECHA	30/11/2016		
UBICACIÓN	ENTREPISO		
AVALUO DE CARGAS			
		Altura de placa (h)= 0.40 (m) Torta superior (s)= 0.07 (m) Torta inferior (i)= 0.00 (m) Viguetas (e)= 0.10 (m) Separación (S)= 1.20 (m)	
		<u>SISTEMA INTERNACIONAL</u>	<u>M.K.S</u>
		<u>DE UNIDADES</u>	
TORTAS SUPERIOR E INFERIOR	$24.0 \times (s+i)$	1.680 kN/m ²	0.168 T/m ²
VIGUETAS	$(24 * (h-s-i) * e) / S$	0.660 kN/m ²	0.066 T/m ²
ACABADOS (NSR-10 Tabla B.3.4.3-1)		1.500 kN/m ²	0.150 T/m ²
CASETONES		0.100 kN/m ²	0.010 T/m ²
MUROS y/o PARTICIONES (NSR-10 Tabla B.3.4.3-1)		2.000 kN/m ²	0.200 T/m ²
INSTALACIONES		0.100 kN/m ²	0.010 T/m ²
CARGAMUERTA (CM)=		6.040 kN/m ²	0.604 T/m ²
(NSR-10 Tabla B.4.2.1-1) CARGA VIVA (CV) =		5.000 kN/m ²	0.500 T/m ²
CARGA TOTAL (CT)=		11.040 kN/m ²	1.104 T/m ²
CARGAULTIMA (CU) =		15.25 kN/m ²	1.52 T/m ²

7.2.2. Espectro de respuesta y diseño

Según la norma NSR-10 el espectro de diseño es el cálculo mediante la relación entre el peso de la edificación y la aceleración generada por la vibración del sismo, teniendo en cuenta esto se generó la curva de diseño de espectro para nuestro proyecto ubicado en Chapinero, la cual recoge los máximos valores de aceleración

que puede afectar nuestro edificio. Una institución universitaria es del tipo de edificaciones para atención a la comunidad lo cual nos indicó los parámetros y factores de seguridad que se debían tener en cuenta para el modelo.

Para el método de diseño de análisis dinámico se requiere realizar el espectro de aceleraciones, en las siguientes imágenes se muestran todos los datos que se tuvieron en cuenta para el espectro (NSR-10 A.2.6.1). De acuerdo con lo establecido en la Norma NSR-10 (A.3.2) y las condiciones propias de la edificación, el sistema estructural corresponde a un SISTEMA DE PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTOS.

Capacidad De Disipación De Energía

Conforme con el material de la estructura y de las características del sistema de resistencia sísmica, se establece el grado de disipación de energía del presente proyecto corresponde a: Disipación de Energía Moderada (DMO), por lo cual el coeficiente de capacidad de disipación de energía básico es $R_o = 5.0$.

Grado De Irregularidad

- Irregularidades en planta: 0.8
- Irregularidades en altura: 1.0
- Irregularidad ausencia de redundancia: 0.75

Los siguientes son los parámetros sísmicos que definen el espectro de diseño para la edificación, según la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá.

Microzonificación: Piedemonte A

Aa	0.15
Av	0.20
Fa	1.65
Fv	2.00
I	1.25

Figura 28. Espectro de diseño

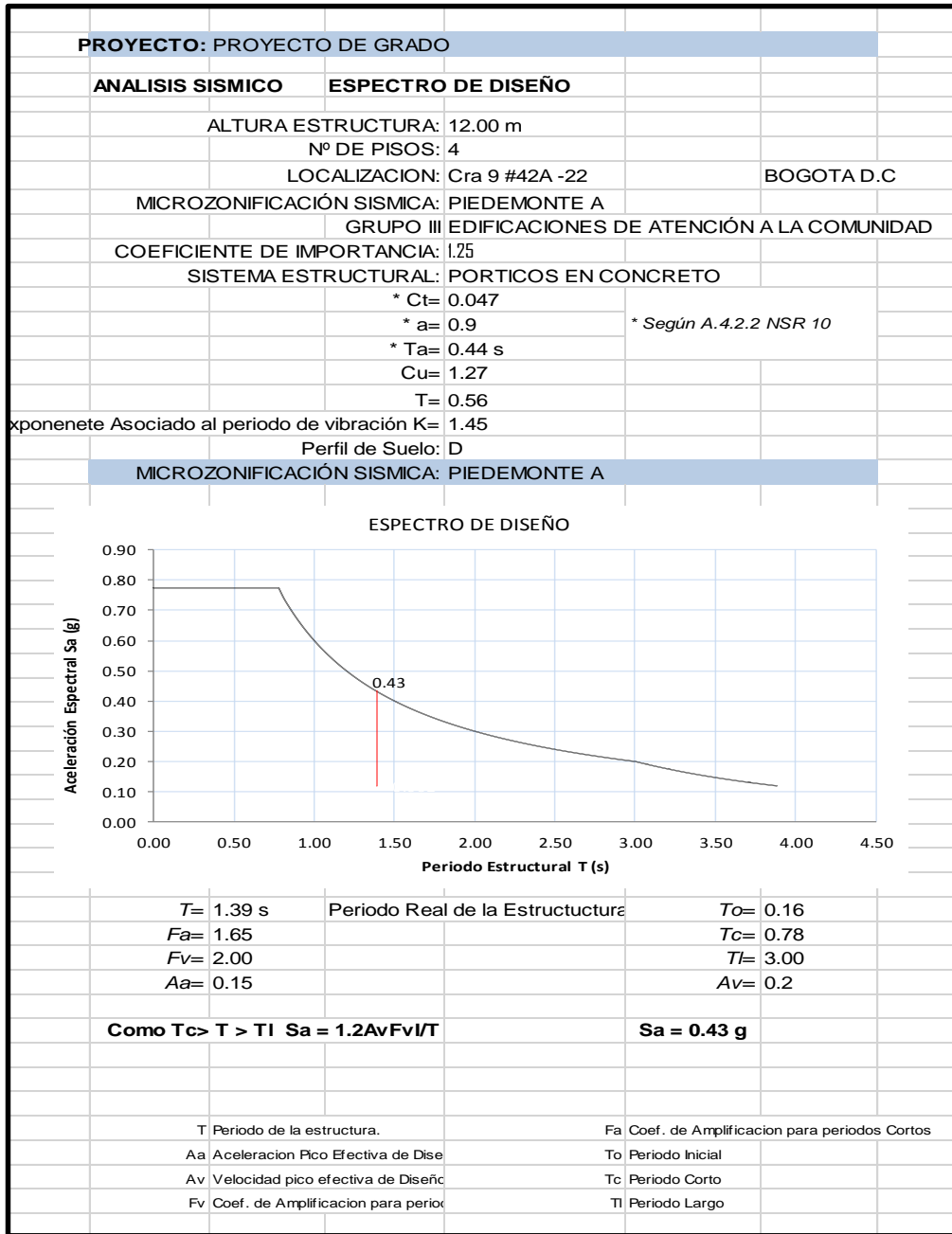


Figura 29. Análisis dinámico.

PROYECTO: PROYECTO DE GRADO						
METODO DE ANALISIS SIMICO		ANALISIS DINAMICO				
COEFICIENTE DE DISIPACION DE ENERGÍA R						
R=R _o *fp*fa*fr		R _o = 5.00				
		R= 3.00				
φp= 0.80						
φa= 1.00						
φr= 0.75						
FUERZAS APLICADAS A LA ESTRUCTURA						
	H (m)	Ha (m)	W (Ton)	W*Ha^k	Cvx	FH (Ton)
	12.00	12.00	1603.64	58146.53	1.00	692.22
	W=		1603.64		1.00	692.22
Sa = 0.43 g			Vs = Sa*W		692.22	
			Vs = Sa*W		692.22	
			Sa 90%		623.00	
1 ITERACION						
	Vx	203.25	Factor de Amplificacion x		3.0652	
	Vy	179.28	Factor de Amplificacion y		3.4750	
2 ITERACION						
	Vx	609.76	Factor de Amplificacion x		1.0217	
	Vy	537.86	Factor de Amplificacion y		1.1583	

7.2.3. Combinaciones de Carga

De acuerdo con las Normas NSR-10, el análisis estructural debe realizarse mediante un modelo matemático linealmente elástico con el cual se determinan las fuerzas internas en cada uno de los elementos estructurales. Con el uso de programas propios de la actual tecnología del análisis matricial se analizó y confeccionó mediante el programa ETABS.

Mediante un proceso interactivo se creó un modelo, en dicho modelo se definió la geometría y conformación de la estructura. El programa calcula inicialmente la matriz de rigidez considerando deformaciones axiales y de corte, y a partir de ella,

obtiene las deformaciones, reacciones y elementos mecánicos para el correspondiente diseño.

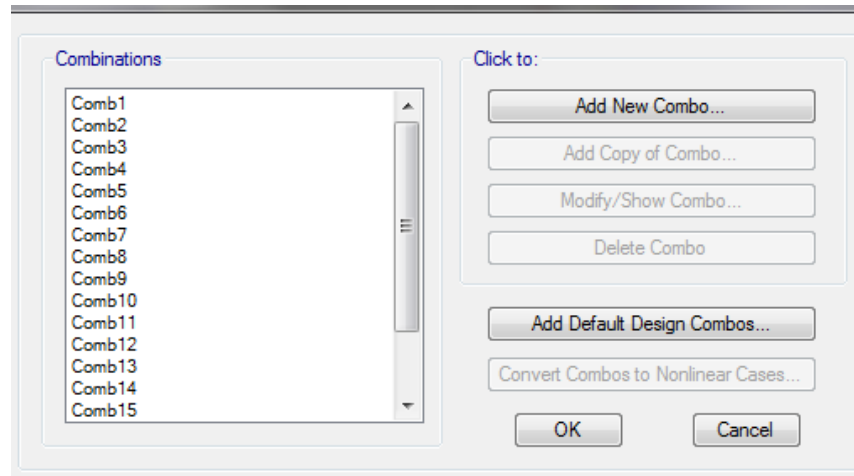
Cada nudo posee seis grados de libertad (tres desplazamientos y tres rotaciones). La solución se obtiene a partir del equilibrio de las fuerzas y de la compatibilidad de los desplazamientos en los nudos.

- COMBINACIONES DE CARGA

1. $1.4D_0 + 1.4DL$
2. $1.2D_0 + 1.2DL + 1.6LL$
3. $1.2D_0 + 1.2DL + LL + EQX + .3EQY$
4. $1.2D_0 + 1.2DL + LL - EQX - .3EQY$
5. $1.2D_0 + 1.2DL + LL + EQX - .3EQY$
6. $1.2D_0 + 1.2DL + LL - EQX + .3EQY$
7. $1.2D_0 + 1.2DL + LL + .3EQX + EQY$
8. $1.2D_0 + 1.2DL + LL - .3EQX - EQY$
9. $1.2D_0 + 1.2DL + LL - .3EQX + EQY$
10. $1.2D_0 + 1.2DL + LL + .3EQX - EQY$
11. $.9D_0 + .9DL + EQX + .3EQY$
12. $.9D_0 + .9DL - EQX - .3EQY$
13. $.9D_0 + .9DL + EQX - .3EQY$
14. $.9D_0 + .9DL - EQX + .3EQY$
15. $.9D_0 + .9DL + .3EQX + EQY$
16. $.9D_0 + .9DL - .3EQX - EQY$
17. $.9D_0 + .9DL - .3EQX + EQY$
18. $.9D_0 + .9DL + .3EQX - EQY$

Donde D es la carga muerta, L la carga viva, E carga sísmica, D_0 es el peso propio de los elementos estructurales, DL el peso adicional que soportara la estructura, LL la carga viva, EQX la carga sísmica en sentido X y EQY la carga sísmica en el sentido Y.

Figura 30. Combinaciones de cargas en SAP2000



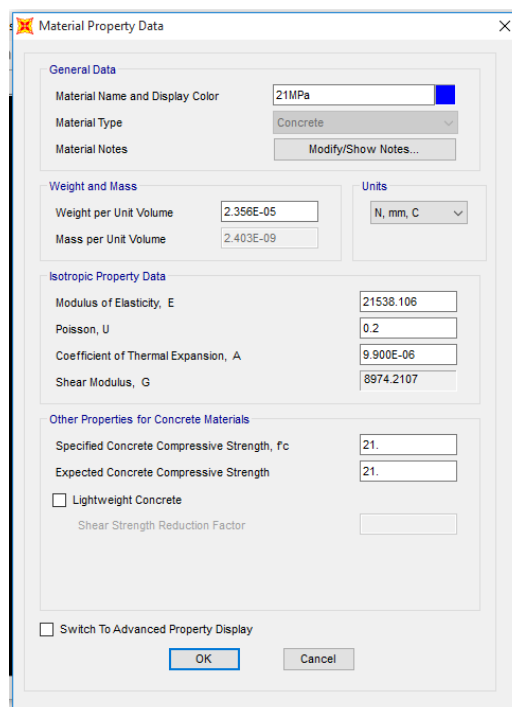
7.2.4. Materiales y secciones

Los materiales con los cuales se utilizaron para la modelación deben ser los identificados mediante los ensayos previamente nombrados:

Concreto $f'c=21$ MPa

Módulo de elasticidad = $4700x \sqrt{21} = 21538.106$ MPa

Figura 30. Propiedades de los materiales SAP 200



Las secciones de columnas utilizadas en el modelo fueron de 30x30 cm, ingresando los datos de cuantías halladas mediante el ferrosacan.

Figura 32. Secciones utilizadas SAP 2000

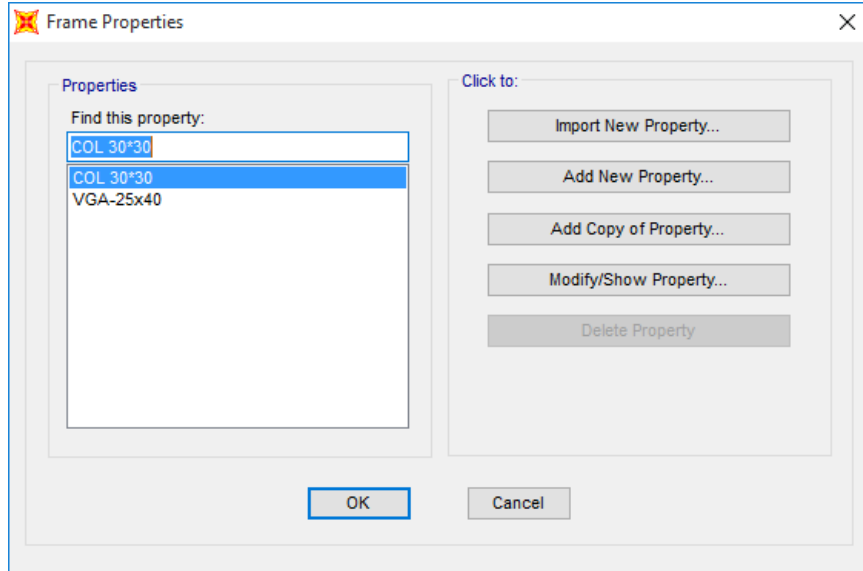


Figura 33. Sección columna SAP 2000

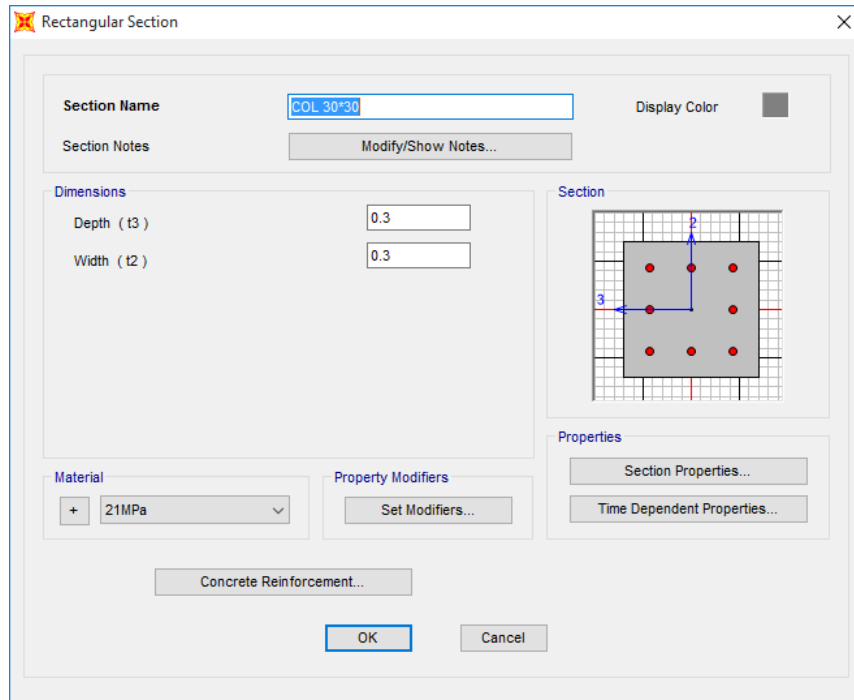


Figura 34. Datos de refuerzo SAP 2000

Reinforcement Data

Rebar Material

Longitudinal Bars + A615Gr60

Confinement Bars (Ties) + A615Gr60

Design Type

Column (P-M2-M3 Design)

Beam (M3 Design Only)

Reinforcement Configuration

Rectangular

Circular

Confinement Bars

Ties

Spiral

Longitudinal Bars - Rectangular Configuration

Clear Cover for Confinement Bars 0.04

Number of Longit Bars Along 3-dir Face 3

Number of Longit Bars Along 2-dir Face 3

Longitudinal Bar Size + #5

Confinement Bars

Confinement Bar Size + #3

Longitudinal Spacing of Confinement Bars 0.2

Number of Confinement Bars in 3-dir 3

Number of Confinement Bars in 2-dir 3

Check/Design

Reinforcement to be Checked

Reinforcement to be Designed

OK

Cancel

Las vigas utilizadas en el proyecto son de 25x40 cm

Figura 35. Sección de vigas SAP 2000

Rectangular Section

Section Name VGA-25x40

Display Color

Section Notes Modify/Show Notes...

Dimensions

Depth (t3) 0.4

Width (t2) 0.25

Section

Properties

Section Properties...

Time Dependent Properties...

Material + 21MPa

Property Modifiers Set Modifiers...

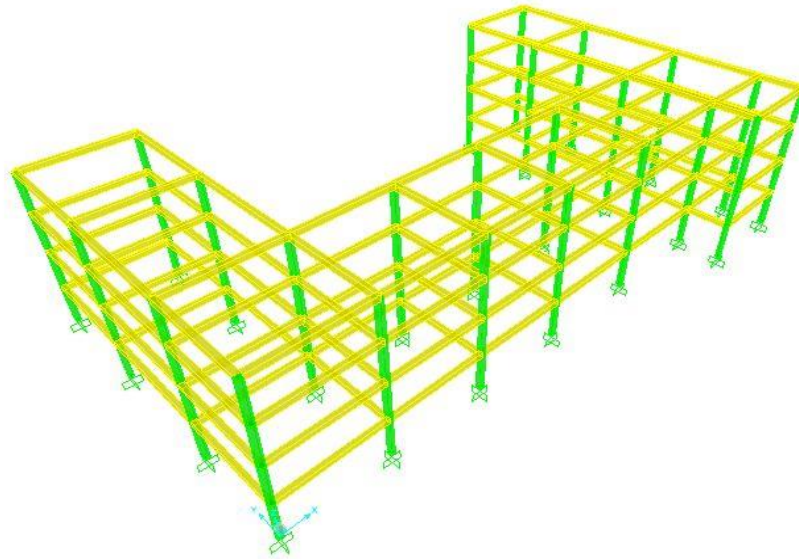
Concrete Reinforcement...

OK

Cancel

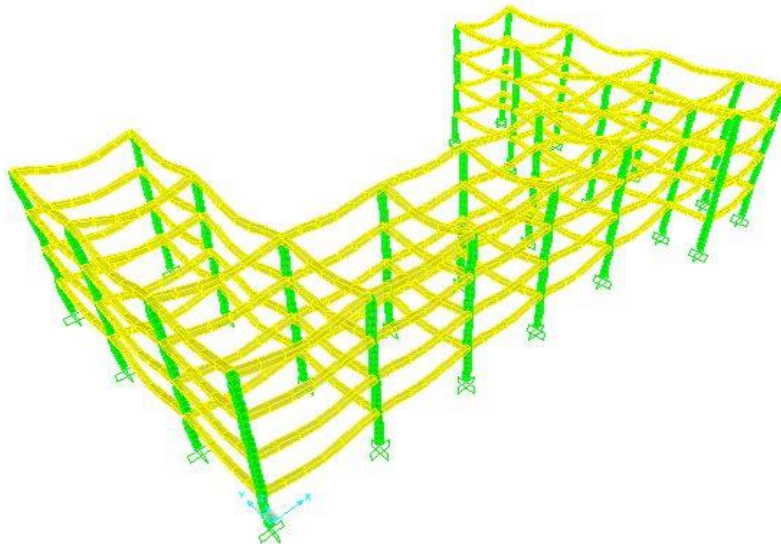
En las siguientes figuras se muestra el modelo estructural en el software SAP2000 donde las secciones de color verde son las columnas y las secciones de color amarillo son las vigas:

Figura 36: Geometría General del Modelo SAP2000



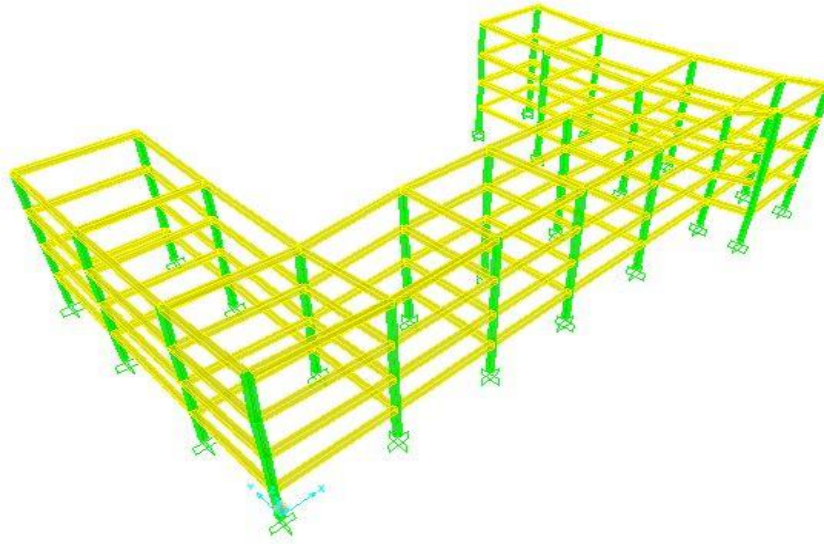
Fuente: Propia

Figura 37: Deflexiones SAP2000



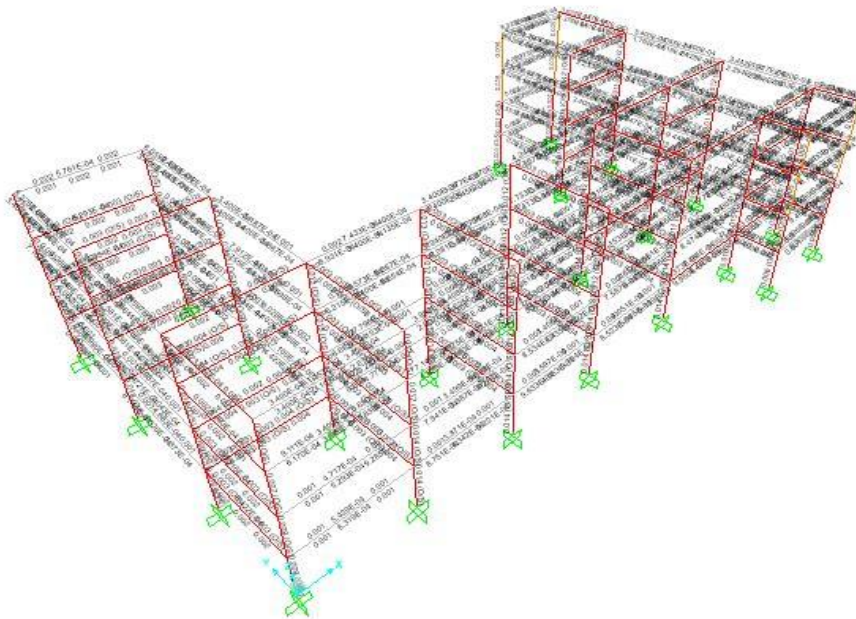
Fuente: Propia

Figura 38: Desplazamientos Horizontales SAP2000



Fuente: Propia

Figura 39: Resultado de secciones



Fuente: Propia

7.3. ANALISIS ESTRUCTURA EXISTENTE

Para determinar la capacidad de la estructura a soportar y responder adecuadamente ante la eventualidad de nuevos sismos, se define el índice de sobreesfuerzo y el índice de flexibilidad según la NSR-10.

Teniendo en cuenta los resultados dados por SAP2000 de desplazamientos horizontales y resistencias de cada uno de los elementos del modelo, se hizo el análisis correspondiente según la NSR-10 A.10.4.3 para determinarse los índices de flexibilidad y sobreesfuerzo, que permitan definir la capacidad de la estructura existente de soportar y responder adecuadamente ante las sollicitaciones establecidas.

7.3.1. Índice de flexibilidad

Indica la susceptibilidad de la estructura a tener deflexiones o derivas excesivas, con respecto a las permitidas por el reglamento. Los índices de flexibilidad para la estructura actual muestran que no cumple con lo establecido en la norma A.10.4.3.5. Esta se obtiene teniendo en cuenta las derivas obtenidas en el programa SAP 2000, resultados los cuales fueron registrados en las siguientes tablas para poder encontrar el índice de flexibilidad de la estructura.

Figura 40. Calculo de derivas e índice de flexibilidad columna eje G-1

VULNERABILIDAD SISMICA								
CALCULO DE DERIVAS E INDICE DE FLEXIBILIDAD DE LA ESTRUCTURA								
PROYECTO FIC UGC								
FECHA: 27/01/2017								
COLUMNA EJE G-1 $I_{flexib} = \frac{\Delta_{obtenida}}{\Delta_{permitida}} \leq 1.00$								
Hpiso = 0.00 m								
Punto	Combinación	dx cm	dy cm	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I_{flexib}	OK
3	D1	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.50	2.50	No cumple
3	D2	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.50	2.50	No cumple
3	D3	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.50	2.50	No cumple
3	D4	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.50	2.50	No cumple
3	D5	0.00000	0.00000	0.00	0.00	6.88	2.29	No cumple
3	D6	0.00000	0.00000	0.00	0.00	6.88	2.29	No cumple
3	D7	0.00000	0.00000	0.00	0.00	6.88	2.29	No cumple
3	D8	0.00000	0.00000	0.00	0.00	6.88	2.29	No cumple
Hpiso = 3.00 m								
Punto	Combinación	dx cm	dy cm	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I_{flexib}	OK
4	D1	-7.155828	-2.237079	7.50	3.00	9.61	3.20	No cumple
4	D2	-7.155828	-2.237079	7.50	3.00	9.61	3.20	No cumple
4	D3	-7.155828	-2.237079	7.50	3.00	9.61	3.20	No cumple
4	D4	-7.155828	-2.237079	7.50	3.00	9.61	3.20	No cumple
4	D5	-4.001985	-5.599517	6.88	3.00	8.69	2.90	No cumple
4	D6	-4.001985	-5.599517	6.88	3.00	8.69	2.90	No cumple
4	D7	-4.001985	-5.599517	6.88	3.00	8.69	2.90	No cumple
4	D8	-4.001985	-5.599517	6.88	3.00	8.69	2.90	No cumple
Hpiso = 3.00 m								

Punto	Combinación	dx	dy	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I_{flexib}	OK
		cm	cm					
5	D1	-16.326507	-5.118485	17.11	3.00	7.50	2.50	No cumple
5	D2	-16.326507	-5.118485	17.11	3.00	7.50	2.50	No cumple
5	D3	-16.326507	-5.118485	17.11	3.00	7.50	2.50	No cumple
5	D4	-16.326507	-5.118485	17.11	3.00	7.50	2.50	No cumple
5	D5	-9.119099	-12.624419	15.57	3.00	6.78	2.26	No cumple
5	D6	-9.119099	-12.624419	15.57	3.00	6.78	2.26	No cumple
5	D7	-9.119099	-12.624419	15.57	3.00	6.78	2.26	No cumple
5	D8	-9.119099	-12.624419	15.57	3.00	6.78	2.26	No cumple
Hpiso = 3.00 m								
Punto	Combinación	dx	dy	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I_{flexib}	OK
		cm	cm					
6	D1	-23.475569	-7.380727	24.61	3.00	4.33	1.44	No cumple
6	D2	-23.475569	-7.380727	24.61	0.00	4.33	1.44	No cumple
6	D3	-23.475569	-7.380727	24.61	0.00	4.33	1.44	No cumple
6	D4	-23.475569	-7.380727	24.61	0.00	4.33	1.44	No cumple
6	D5	-13.103263	-18.106878	22.35	0.00	3.93	1.31	No cumple
6	D6	-13.103263	-18.106878	22.35	0.00	3.93	1.31	No cumple
6	D7	-13.103263	-18.106878	22.35	0.00	3.93	1.31	No cumple
6	D8	-13.103263	-18.106878	22.35	0.00	3.93	1.31	No cumple
Hpiso = 3.00 m								
Punto	Combinación	dx	dy	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)		
		cm	cm					
7	D1	-27.592257	-8.713597	28.94	3.00			
7	D2	-27.592257	-8.713597	28.94	3.00			
7	D3	-27.592257	-8.713597	28.94	3.00			
7	D4	-27.592257	-8.713597	28.94	3.00			
7	D5	-15.390362	-21.303137	26.28	3.00			
7	D6	-15.390362	-21.303137	26.28	3.00			
7	D7	-15.390362	-21.303137	26.28	3.00			
7	D8	-15.390362	-21.303137	26.28	3.00			
Indice de flexibilidad de la estructura : 3.20 <= 1.00								

Figura 41. Calculo de derivas e índice de flexibilidad columna eje A-1

VULNERABILIDAD SISMICA								
CALCULO DE DERIVAS E INDICE DE FLEXIBILIDAD DE LA ESTRUCTURA								
PROYECTO FIC UGC								
FECHA: 27/01/2017								
COLUMNA EJE A-1					$I_{flexib} = \frac{\Delta_{obtenida}}{\Delta_{permitida}} \leq 1.00$			
Hpiso = 0.00 m								
Punto	Combinación	dx cm	dy cm	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I _{flexib}	OK
118	D1	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.71	2.57	No cumple
118	D2	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.71	2.57	No cumple
118	D3	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.71	2.57	No cumple
118	D4	0.00000	0.00000	0.00	0.00	7.71	2.57	No cumple
118	D5	0.00000	0.00000	0.00	0.00	9.19	3.06	No cumple
118	D6	0.00000	0.00000	0.00	0.00	9.19	3.06	No cumple
118	D7	0.00000	0.00000	0.00	0.00	9.19	3.06	No cumple
118	D8	0.00000	0.00000	0.00	0.00	9.19	3.06	No cumple
Hpiso = 3.00 m								
Punto	Combinación	dx cm	dy cm	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I _{flexib}	OK
119	D1	-7.01178	-3.215346	7.71	3.00	9.95	3.32	No cumple
119	D2	-7.01178	-3.215346	7.71	3.00	9.95	3.32	No cumple
119	D3	-7.01178	-3.215346	7.71	3.00	9.95	3.32	No cumple
119	D4	-7.01178	-3.215346	7.71	3.00	9.95	3.32	No cumple
119	D5	-3.459592	-8.511706	9.19	3.00	12.00	4.00	No cumple
119	D6	-3.459592	-8.511706	9.19	3.00	12.00	4.00	No cumple
119	D7	-3.459592	-8.511706	9.19	3.00	12.00	4.00	No cumple
119	D8	-3.459592	-8.511706	9.19	3.00	12.00	4.00	No cumple
Hpiso = 3.00 m								

Punto	Combinación	dx	dy	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I_{flexib}	OK
		cm	cm					
120	D1	-16.014966	-7.447221	17.66	3.00	7.77	2.59	No cumple
120	D2	-16.014966	-7.447221	17.66	3.00	7.77	2.59	No cumple
120	D3	-16.014966	-7.447221	17.66	3.00	7.77	2.59	No cumple
120	D4	-16.014966	-7.447221	17.66	3.00	7.77	2.59	No cumple
120	D5	-7.877076	-19.668602	21.19	3.00	9.41	3.14	No cumple
120	D6	-7.877076	-19.668602	21.19	3.00	9.41	3.14	No cumple
120	D7	-7.877076	-19.668602	21.19	3.00	9.41	3.14	No cumple
120	D8	-7.877076	-19.668602	21.19	3.00	9.41	3.14	No cumple
Hpiso = 3.00 m								
Punto	Combinación	dx	dy	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)	I_{flexib}	OK
		cm	cm					
121	D1	-23.038467	-10.780294	25.44	3.00	4.48	1.49	No cumple
121	D2	-23.038467	-10.780294	25.44	0.00	4.48	1.49	No cumple
121	D3	-23.038467	-10.780294	25.44	0.00	4.48	1.49	No cumple
121	D4	-23.038467	-10.780294	25.44	0.00	4.48	1.49	No cumple
121	D5	-11.314932	-28.428719	30.60	0.00	5.45	1.82	No cumple
121	D6	-11.314932	-28.428719	30.60	0.00	5.45	1.82	No cumple
121	D7	-11.314932	-28.428719	30.60	0.00	5.45	1.82	No cumple
121	D8	-11.314932	-28.428719	30.60	0.00	5.45	1.82	No cumple
Hpiso = 3.00 m								
Punto	Combinación	dx	dy	δr (cm)	Desplazamiento Permitido (cm)	Δ (cm)		
		cm	cm					
122	D1	-27.08536	-12.712556	29.92	3.00			
122	D2	-27.08536	-12.712556	29.92	3.00			
122	D3	-27.08536	-12.712556	29.92	3.00			
122	D4	-27.08536	-12.712556	29.92	3.00			
122	D5	-13.286468	-33.513836	36.05	3.00			
122	D6	-13.286468	-33.513836	36.05	3.00			
122	D7	-13.286468	-33.513836	36.05	3.00			
122	D8	-13.286468	-33.513836	36.05	3.00			
Indice de flexibilidad de la estructura : 4.00 <= 1.00								

7.3.2. Índice de sobreesfuerzo de los elementos

Se refiere al índice de sobreesfuerzo de cada uno de los elementos estructurales individuales. Dicho índice se calcula comparando la resistencia efectiva que posee el elemento actual contra los nuevos esfuerzos que produce la aplicación de la fuerza sísmica bajo los criterios de las normas vigentes.

En resumen, al dividir el esfuerzo actuante por la resistencia efectiva del elemento, se obtiene un índice que, si supera la unidad, significa que a dicho elemento (columna o viga) le hace falta determinada cantidad de refuerzo para absorber satisfactoriamente las nuevas solicitaciones. La resistencia efectiva de los

elementos existentes se evaluó teniendo en cuenta la calificación en cuanto a calidad y estado de la construcción, afectándola por los siguientes factores de reducción:

- Reducción de resistencia por calidad de la obra: $\phi_c = 0.6$
- Reducción de resistencia por estado de la estructura: $\phi_e = 0.6$

En las memorias de cálculo de SAP anexas se presentan los índices de sobreesfuerzo de la estructura, algunos elementos presentan un índice que supera la unidad (valor no permitido por la norma), lo cual evidencia la necesidad de realizar una intervención en la estructura para incluir nuevos elementos que sean capaces de aportar rigidez, ductilidad y resistencia ante fuerzas horizontales.

7.3.3. Índice de sobreesfuerzo de la estructura

Se determina para toda la estructura, evaluando los elementos con un mayor índice de sobreesfuerzo individual y tomando en consideración su importancia dentro de la resistencia general de la estructura como un conjunto. El inverso del índice de sobreesfuerzo general expresa la vulnerabilidad de la edificación, como una fracción de la resistencia que tendría una edificación nueva construida de acuerdo con los requisitos del Reglamento NSR-10.

Se revisaron los elementos de la estructura actual (columnas y vigas principales - secundarias) que se ven sometidos a las mayores acciones (momentos, cortantes y axiales) bajo las nuevas acciones sísmicas y su combinación con las cargas muertas y vivas de diseño. El índice de sobreesfuerzo de la estructura corresponde al mayor valor obtenido de los índices para los elementos, el cual corresponde a $5.00 > 1.00$.

8. CONCLUSIONES

- Se identificaron las siguientes características y fallencias estructurales en el edificio de la facultad:
 1. Las secciones de las columnas no son suficientemente grandes para las cargas de servicio del edificio.
 2. El edificio posee irregularidad en planta.
 3. No se evidencian juntas de construcción para una correcta división y distribución en planta.
 4. Las columnas terminan en el cuarto nivel, lo cual significa que el quinto nivel del edificio no hace parte del sistema de pórticos de la estructura.
 5. Los índices de flexibilidad y de sobre esfuerzo para la estructura actual muestran que no cumple con lo establecido en la norma. NSR-10 A.10.
 6. Según los ensayos realizados para determinar la calidad y resistencia de los materiales se concluye que el concreto que conforma los elementos principales de la estructura (Vigas y Columnas) cumple con la resistencia mínima establecida por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

- Se elaboró el modelo de la estructura existente teniendo en cuenta la geometría, dimensiones y características de los materiales del edificio.

- Se analizó que la estructura no cumple con los requerimientos mínimos establecidos dentro del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

9. RECOMENDACIONES

- Reforzar la estructura o demolerla y re construirla, para que cumpla con los parámetros establecidos por el reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.
- Realizar juntas de construcción entre la estructura de dos pisos y la estructura principal del edificio para que estas tengan un sistema estructural independiente entre ellas.
- Unir el quinto nivel al sistema estructural del edificio ya que en este no hay continuación de las columnas por lo tanto no tiene un sistema de pórticos resistente a momentos.

10. BIBLIOGRAFICAS.

AHUMA VILLAFañE, José Luis. MORENO RODRIGUEZ, Nayib. Estudio de vulnerabilidad sísmica usando el método del índice de vulnerabilidad en viviendas construidas en el barrio la paz. Agosto 3-5, 2011, Medellín, Colombia.

AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica). Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sismo Resistente de Viviendas de Mampostería.

An Introduction to Earthquakes and Earthquake Hazard SLU EAS-A193 Glogau, O.A., Masory Performance in Earthquakes. Bull. N.Z. natn. Soc. Earthq. Engng, vol. 7, núm. 4, págs. 149-166 (1974).

BASUALDO SALINAS, Rafael. Fundamentos del análisis dinámico de estructuras. Curso de segunda especialización en ingeniería sismo resistente. Lima Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil, 24h.

CAMACHO PUELLO, Juan Carlos. ROMERO TORRES, Marlon de Jesús. Análisis estructural con el método de elementos finitos asistido por computadora. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Cartagena: Universidad Tecnológica de Bolívar. Facultad de Ingenierías, 2012. 253h.

DANIEL CHAVARRÍA Y DANIEL GOMEZ PIZANO. Estudio Piloto de Vulnerabilidad Sísmica en Viviendas de 1 y 2 Pisos del Barrio Cuarto de Legua en el Cono de Cañaveralejo (Cali, Colombia).

LABEST, Universidad Nacional de Colombia facultad de minas, Vulnerabilidad sísmica y patológico de la institución universitaria, tecnológico de Antioquia. 2011.

MALDONADO RONDÓN Esperanza, CHIO CHO Gustavo, GÓMEZ ARAUJO Iván. Índice de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de mampostería basado en la opinión de expertos. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 11 (2): 149-168, julio-diciembre de 2007.

NAVIA LLORENTE Jorge Andrés, Elkin Mauricio BARRERA ROA. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL DE UNO Y DOS PISOS CONSTRUIDAS CON MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. Bogotá. 2007

PÁEZ MORENO Diego Fernando, HERNÁNDEZ DELGADILLO Javier Hugo. Metodología para el estudio de la vulnerabilidad estructural de edificaciones. Boyacá.

PRIESTLAY, Nigel. Diseño de estructuras resistentes a sismos. 1ra ed. México D.F.: Limusa: 1991. p.273.

Ramos Q., Julio. "ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DEL EDIFICIO CENTRAL BLOQUE NORTE DE LA UNIVERSIDAD DE CALDAS", 2003

San Salvador: LA RED (La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina), 2001.

SANDI, H. Vulnerability and risk analysis for individual structures and systems. Proceeding of the Eight European Conference on Earthquake Engineering, 8EECE. Vol. 7, Topic 2. Lisboa: 1986.

Superintendencia de Notariado y Registro ESTUDIOS DE VULNERABILIDAD SISMICA Y REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL BANCO DE PROYECTOS AÑO 2012

UNDRO United Nations Disaster Relief Coordinator. Natural disasters and vulnerability analysis. Report of expert group. 1979.

WONGD., D.; SAMUDIO, R. Y MORA, H. determinación de la vulnerabilidad y estimación de daños ante los desastres naturales en los centros educativos en la república de Panamá. Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de proyectos. Panamá 1997

[Citado el 29 de agosto de 2013] disponible en <http://www.construdata.com/Bc/Construccion/Noticias/reforzamiento_estructural_para_reducir_la_vulnerabilidad_sismica_de_un_hospital.asp>