



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y
POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN GEOPOLÍMERO EN EL RANGO
NO LINEAL

Trabajo de titulación para optar al título de:

Magister en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción.

Autor:

Ortiz Valencia, Adriana Catalina

Tutor:

Ing. Andrea Zárate Villacrés. MSc.

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Adriana Catalina Ortiz Valencia**, con cédula de ciudadanía No. **060389108-6**, autora del trabajo de investigación titulado: **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN GEOPOLÍMERO EN EL RANGO NO LINEAL**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Así mismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 02 de agosto de 2024

Adriana Catalina Ortiz Valencia

C.I: 060389108-6

DICTÁMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **MSc. Andrea Natali Zárate Villacrés**, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN GEOPOLÍMERO EN EL RANGO NO LINEAL**, bajo la autoría de **Adriana Catalina Ortiz Valencia**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 02 días del mes de agosto de 2024.

MSc. Andrea Natali Zárate Villacrés.

C.I: 060407977-2

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de **Posgrado** para la evaluación del trabajo de investigación **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN GEOPOLÍMERO EN EL RANGO NO LINEAL**, presentado **Adriana Catalina Ortiz Valencia**, con cédula de identidad No. 060389108-6, bajo la tutoría de **MSc. Andrea Natali Zárate Villacrés**; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a la fecha de su presentación.

Alexis Iván Andrade Valle, MSc.
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE
POSGRADO**

Firma

Luis Alejandro Velasteguí Cáceres, Mgs.
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
POSGRADO**

Firma

Ángel Edmundo Paredes García, Mgs.
**MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE
POSGRADO**

Firma



CERTIFICACIÓN

Que, **ORTIZ VALENCIA ADRIANA CATALINA** con CC: **060389108-6**, estudiante del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **“ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN GEOPOLÍMERO EN EL RANGO NO LINEAL”**, cumpliendo con el **9%**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **TURNITIN**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional; por consiguiente, autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 02 de agosto de 2024

Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés, MSc.

TUTOR

Adjunto:

- TURNITIN informe de originalidad.

DEDICATORIA

Al amor de mi vida, mi hija, Danna Martina, gracias por todo tu amor, por entenderme y estar junto a mí recibiendo clases, tú sabes cuán importante es este logro para nosotras. Eres mi mayor orgullo, mi felicidad, mi motor de lucha y superación; nunca dejes de perseguir tus sueños, cree en ti mismo y todo será posible; recuerda, que te amo con todo mi ser y que puedes contar con mamá siempre.

A mis padres Patricio y Norma que hicieron de mí una mujer valiente y decidida; a mis hermanas Fernanda y Tania mis mujercitas que siempre han estado pendientes de cada pasito que doy. A mis sobrinos Alex, Nicolás y Luciana, esos terremotos que alegran mis días y siempre me llenan de amor.

Adriana Catalina Ortiz Valencia.

AGRADECIMIENTO

El principal agradecimiento a Dios y a mi Virgen de Baños por darme salud y fortaleza para poder culminar mi sueño.

A mi familia, mi pilar fundamental, los que siempre han estado para apoyarme y que pese a cualquier dificultad nos hemos mantenido juntos.

A mi esposo Luis, por darme ese impulso que necesitaba para inscribirme y seguir mi sueño de niña.

A mis suegros Miguel y Nancy, que siempre están pendientes de mis avances y triunfos, gracias por estar en mi vida y la de mi hija.

A mi amigo Robert, gracias por los consejos y apoyo.

De manera especial, a mi tutora Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés, excelente profesional, quién me ha guiado con su paciencia y motivación durante este transcurso.

Y a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron para concluir con éxito este proceso.

Adriana Catalina Ortiz Valencia

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Problema	4
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo General	7
1.4.2 Objetivos Específicos.....	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Que es un Geopolímero	8
2.2 Propiedades Químicas de un geopolímero.....	9
2.3 Propiedades Físicas de un geopolímero.....	10
2.4 Proceso de elaboración de un geopolímero.	10
2.5 Materiales para crear un geopolímero.....	11
2.5.1 Escoria de Alto horno.....	12
2.5.2 Ceniza Volante.	12
2.5.3 Solución Alcalina	13
2.5.4 Piedra Pómez	14
2.6 Ventajas del geopolímero de hormigón.....	16
2.7 Riesgo sísmico	18
2.7.1 Sismicidad histórica de la ciudad de Riobamba	19

2.8 Análisis no lineal.....	21
2.9 Normativa a aplicar.....	23
2.10 Curva de capacidad.....	30
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	32
3.1 Metodología de la investigación	32
3.1.1 Tipo de investigación	32
3.1.2 Diseño de la investigación	32
3.1.3 Enfoque de investigación.....	32
3.1.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	32
3.2 Población y Muestra	33
3.2.1 Población.....	33
3.2.2 Muestra	33
3.2 Esquema Metodológico	36
3.3 Estudio del Geopolímero	37
3.4 Análisis por desempeño	39
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1 Estructura	41
4.2 Cargas	42
4.2.1 Cargas de gravedad.....	42
4.2.2 Carga Muerta	42
4.2.3 Cargas aplicadas en el pórtico.....	42

4.2.4 Consideraciones geométricas y diseño de elementos	44
4.3 Definición del modelo matemático de la edificación	44
4.3.1 Definición del material a utilizar	45
4.3.1.1 Hormigón armado	45
4.3.1.2 Geopolímero	48
4.3.2 Definición de los elementos estructurales.....	50
4.3.2.1 Definición de columnas	50
4.3.2.2 Definición de vigas	51
4.4. Creación de casos de cargas a aplicarse.....	53
4.5. Combinación de los casos de cargas	56
4.6. Distribución de la carga lateral (Cortante Basal).....	57
4.7 Creación del caso de carga gravitacional no lineal	57
4.8 Creación del caso Pushover	59
4.8.1. Asignación de Rótulas Plásticas.....	61
4.8.2 Asignación automática de rótulas plásticas.....	61
4.8.3 Aparición de las rótulas plásticas paso a paso.	63
4.9 Curva de capacidad	65
4.10. Cálculo de la ductilidad característica.	67
4.10.1. Clasificación por ductilidad	67
4.11. Discusión.....	70
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71

5.1 Conclusiones	71
5.2 Recomendaciones	72
BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de la ceniza volante según ASTM</i>	13
Tabla 2 <i>Efectos causados por los terremotos con intensidad VIII o superior</i>	20
Tabla 3 <i>Niveles de amenaza sísmica</i>	23
Tabla 4 <i>Propuesta del comité Vision2000</i>	24
Tabla 5 <i>Niveles de desempeño propuestos</i>	25
Tabla 6 <i>Matriz de objetivos de diseño</i>	26
Tabla 7 <i>Valores de desplazamiento objetivo máximo para niveles de desempeño</i>	27
Tabla 8 <i>Earthquake Hazard Levels</i>	28
Tabla 9 <i>Nivel de comportamiento FEMA 356</i>	29
Tabla 10 <i>Límites de distorsión de entrepiso para los niveles de desempeño</i>	29
Tabla 11 <i>Límites de comportamiento FEMA 356-ATC58</i>	30
Tabla 12 <i>Listado de Pórticos analizados por desempeño y sus características geométricas</i>	34
Tabla 13 <i>Elementos Columna y Viga del caso de estudio</i>	41
Tabla 14 <i>Determinación de cargas</i>	43
Tabla 15 <i>Factores considerados para el cálculo del cortante basal de diseño</i>	55
Tabla 16 <i>Cálculo de la distribución del cortante basal para cada piso</i>	57
Tabla 17 <i>Características de pórtico y cálculo de la ductilidad</i>	67
Tabla 18 <i>Clasificación de ductilidad</i>	67
Tabla 19 <i>Ductilidades de los pórticos del modelo – Hormigon Tradicional</i>	68
Tabla 20 <i>Ductilidades de los pórticos del modelo – Geopolimero</i>	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Composición química de las escorias</i>	12
Figura 2 <i>Mapa de Terremotos con intensidades VI y VII 1641-1890</i>	21
Figura 3 <i>Mapa de Terremotos con intensidades superiores a VIII 1541-1998</i>	21
Figura 4 <i>Curva de capacidad sectorizada</i>	26
Figura 5 <i>Representación gráfica de la curva de capacidad</i>	30
Figura 6 <i>Representación bilineal de la curva de capacidad</i>	31
Figura 7 <i>Mapeo del listado de pórticos analizados</i>	35
Figura 8 <i>Esquema Metodológico</i>	36
Figura 9 <i>Muestra del cubo de geopolímero estudiado</i>	37
Figura 10 <i>Resistencia Promedio alcanzada</i>	38
Figura 11 <i>Resistencia media a la compresión de los especímenes creados</i>	38
Figura 12 <i>Pórtico considerado para el análisis</i>	42
Figura 13 <i>Ingreso de las distancias de ejes y alturas de entrepiso</i>	44
Figura 14 <i>Ingreso de las distancias de ejes y alturas de entrepiso</i>	46
Figura 15 <i>Ingreso de las propiedades del Material-hormigón</i>	48
Figura 16 <i>Ingreso de las propiedades del Material-geopolímero</i>	49
Figura 17 <i>Definición de las secciones geométrica de columna</i>	50
Figura 18 <i>Ingreso del acero longitudinal y confinamiento en la columna</i>	51
Figura 19 <i>Definición de las secciones de la viga</i>	52
Figura 20 <i>Ingreso del acero superior e inferior en la viga</i>	52
Figura 21 <i>Ingreso de la carga viva</i>	53
Figura 22 <i>Pórtico con la carga viva asignada</i>	54
Figura 23 <i>Casos de cargas ingresados</i>	54
Figura 24 <i>Espectro</i>	56

Figura 25 Casos de cargas ingresados	56
Figura 26 Combinación de cargas según Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 y creación de la envolvente	57
Figura 27 Creación de la carga gravitacional no lineal (CGNL)	58
Figura 28 Ingreso de la junta a monitorearse.....	59
Figura 29 Creación del caso de carga Pushover (PUSH)	59
Figura 30 Ingreso del desplazamiento a monitorear en la junta del último piso	60
Figura 31 Distancia relativa en porcentajes donde se formaran las rótulas plásticas	61
Figura 32 Para ingresar las rótulas: menú Assign/Frame/Hinges.....	62
Figura 33 Rótulas Plásticas asignadas a vigas y columnas	63
Figura 34 Rótulas plásticas en el paso 2. (Las vigas están en el nivel de Cedencia: Color Lila).....	64
Figura 35 Rótulas plásticas en el paso 21. (Al alcanzar el desplazamiento indicado en el nudo de referencia, todas las vigas y columnas desarrollan su Capacidad Última: Color Amarillo.)	64
Figura 36 Puntos de cedencia y última en la curva de capacidad hormigon	65
Figura 37 Puntos de cedencia y última en la curva de capacidad geopolimero	66

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo analizar el desempeño de un geopolímero en el rango no lineal partiendo de resultados experimentales obtenidos por el método de elementos finitos. Con la aplicación de la Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC-2015 se determinará la parte de fuerzas sísmicas y espectros de diseño en pórticos de edificaciones reales de la ciudad de Riobamba ya sea del hormigón tradicional como del geopolímero, a partir de la curva de capacidad estructural obtenida con el programa estructural SAP2000 v16 se construye el espectro de capacidad, el cual es el resultado de un análisis estático no lineal Pushover.

Finalmente se realiza un análisis comparativo del desempeño compuesta por el hormigón tradicional vs un geopolímero, considerando los niveles de desempeño y las sectorizaciones propuestos por Vision2000 (SEAOC, 1995), con el fin de conocer la capacidad de ductilidad que presenta cada uno ante sollicitaciones de cargas monotónicas crecientes. Obteniendo como resultado que el geopolímero como sustituto de cemento en la formación de un hormigón tiene un comportamiento adecuado; sin embargo, no alcanza a un comportamiento óptimo en comparación con el hormigón.

Palabras clave: geopolímero; pushover; espectro; ductilidad, monotónicas.

ABSTRACT

This research aims to analyze a geopolymer's performance in the non-linear range based on experimental results obtained by the finite element method. Using the Ecuadorian Construction Standard NEC-2015, whether traditional concrete or geopolymer, the seismic force portion and design spectra in frames of actual buildings in the city of Riobamba will be determined. From the structural capacity curve obtained with the structural program SAP2000 v16, the capacity spectrum is constructed, resulting from a non-linear static Pushover analysis.

Finally, a comparative analysis of the performance of traditional concrete vs. a geopolymer is carried out, considering the performance levels and sectorizations proposed by Vision2000 (SEAOC, 1995) to know the ductility capacity that each one presents under increasing monotonic load requests. The result is that geopolymer as a substitute for cement in concrete formation has an adequate behavior; However, it only achieves optimal performance compared to concrete.

Keywords: Geopolymer; pushover; spectrum; ductility, monotonic.



Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Actualmente, el sector de la construcción no está al mismo nivel de innovación y desarrollo que otras industrias. Para lograr un futuro sostenible, es importante replantear la forma en que se construye y el uso de los edificios. Tras décadas de dependencia del carbón, el petróleo y el gas natural, los edificios se han convertido en uno de los principales emisores de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. La construcción y el uso de edificios representan casi el 40% de las emisiones mundiales de CO₂ y el 35% del consumo de energía (BBVA, 2024). Por ello una de las apuestas para reducir el impacto en el medio ambiente es la construcción sostenible, es decir el uso de métodos y materiales renovables. Las ventajas incluyen iluminación natural, control adecuado de la temperatura, buena calidad del aire y accesibilidad.

Esto ha dado lugar a investigaciones que promueven la creación de nuevos materiales o alternativas basadas en fibras de origen vegetal, bioplásticos e incluso materiales autorreparables gracias a la presencia de bacterias, destinados a optimizar el peso y la sección de los elementos estructurales sin afectar su resistencia, capaces de cumplir la normativa de nacional e internacional vigente.

En este contexto, en las últimas décadas los geopolímeros han surgido como una nueva alternativa para sustituir el uso del cemento Portland en muchas de sus aplicaciones, debido a su alta resistencia mecánica, durabilidad mejorada y baja emisión de CO₂ (McLellan et al. 2011; Provis et al. 2014; Pacheco-Torgal. 2014 et al; Palomo et al. 2014).

La producción de materias primas para la elaboración de geopolímeros requiere un nivel de consumo bajo de energía, esto promueve una menor liberación de gases de efecto invernadero principalmente de CO₂, por concepto de fabricación de estos materiales. De

hecho, se considera que la emisión de CO₂ puede ser hasta un 60% menor que la generada durante la producción de un volumen similar de Cemento Portland ordinario (Kong et al. 2008).

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos formados por la condensación de unidades tetraédricas de aluminio y silicio a temperatura ambiente y se obtienen disolviendo materias primas seleccionadas (que pueden ser desechos industriales y/o arcilla natural) en presencia de soluciones de alto pH. La adición de iones base como Na, K y Ca equilibra la carga estructural, dando como resultado un material cementoso que se endurece y fragua en condiciones normales de temperatura ambiente y cuyas propiedades mecánicas continúan mejorando con el tiempo (Provis et al. 2009). Se obtienen geles de aluminosilicato N-A-S-H como producto principal de la reacción y, en algunos casos, como productos secundarios se obtienen fases cristalinas tipo zeolita (Provis et al. 2009; Provis et al. 2014). En base a esto, se pueden obtener geopolímeros o cementos alternativos utilizando materias primas con estructura amorfa.

Investigaciones previas como Geopolymer Designed with Pumice Stone from Ecuador (Andrade A, Castillo T, Paredes M, 2022), evidenció que las piedras pómez de 3 minas estudiadas (Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua) se pueden utilizar en la creación de geopolímeros; siendo ésta una alternativa ecológica innovadora para reducir la producción de CO₂ en el Ecuador en el campo de la construcción, es por ello que se realizará un análisis comparativo del desempeño de una estructura compuesta por el hormigón tradicional vs un geopolímero, las 2 muestras; A: Hormigón armado y B: geopolímero se modelarán como pórticos, detallando las propiedades del material, su aplicación en estructuras y su comportamiento en el rango no lineal aplicando la metodología Pushover, para ello se

aplicará rotulas plásticas para definir el modelo no lineal de la estructura y conocer la diferencia en comportamiento de estos materiales.

1.2 Problema

Ecuador posee un menor grado de industrialización y menos población que Perú y Colombia; sin embargo, las emisiones de CO₂ por habitante son mayores. Las emisiones de CO₂ en Ecuador durante el año 2021 ha sido de 2,34 toneladas por habitante, es decir se ha tenido un aumento de 20,89% respecto al año 2020 (Datosmacro.com, 2021). Según las mediciones realizadas por el Banco Mundial, Ecuador se ubica como la sexta economía más contaminante en Sudamérica y la novena en toda América Latina (La Hora, 2021).

La transición al uso de materiales ecológicos puede abrir el camino al uso de tecnologías alternativas que pueden optimizar los procesos constructivos que se utilizan actualmente en el Ecuador (Andrade A, Castillo T, Paredes M, 2022), es por ello que con el fin de poner en marcha prácticas de construcción sostenibles y autosustentables, que ayuden a reducir anualmente las emisiones de CO₂ se realizará el análisis de desempeño de un geopolímero empleando el método estático no lineal Método pushover, este análisis constituye una parte fundamental dentro del diseño estructural, debido al comportamiento que las estructuras tendrán más allá del rango elástico teniendo como punto de partida los resultados obtenidos en la investigación de Geopolymer Designed with Pumice Stone from Ecuador (Andrade A, Castillo T, Paredes M, 2022); esta investigación se basa en la creación de un geopolímero, utilizando como material precursor la piedra pómez de nuestro país Ecuador, la composición química de la piedra pómez y la activación alcalina del geopolímero con NaOH y Na₂SiO₃ se validaron mediante un análisis multicriterio que permitió identificar la mejor mina entre las ubicadas en Cotopaxi, Chimborazo y Tungurahua. Mediante pruebas de laboratorio se evidenció que la mejor piedra pómez tenía presencia de óxido de aluminio y silicio en su composición, así como partículas amorfas, con un tamaño de 40 a 50µm. El porcentaje de aluminio que se encontró en las minas de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua fue de 0,60%, 0,68% y 1,50% respectivamente. En las pruebas de módulo de finura se

destaca que más del 80% pasa el tamiz de 75 μ m. En cuanto a la activación del geopolímero, la resistencia promedio de los depósitos fue Cotopaxi 22.60 MPa, Imbabura 23.03 MPa y Tungurahua 23.03 MPa.

En el concreto geopolímero los valores promedio de resistencia de cada uno de los depósitos fueron: Cotopaxi 4.21 MPa, Imbabura 8.05 MPa y Tungurahua 8.67 MPa. El análisis multicriterio arrojó que la mejor opción para crear concreto geopolímero proviene de la mina ubicada en Tungurahua. Cabe señalar, que el aumento de la concentración de NaOH, manteniendo la relación de 2,4 en cubos de geopolímero entre Na₂SiO₃/NaOH como solución activadora, induce un aumento de la resistencia a la compresión. El concreto elaborado en la mina Tungurahua, está compuesto por 50% de geopolímero y 50% de agregados. Es el que mejores propiedades mostró con una resistencia a la compresión de 16,16 MPa, curado en horno durante 24 horas y a una temperatura de 80°C. Recalca, además que el diseño de hormigón geopolímero que sustituya el uso de cemento portland es el primer paso para reducir la contaminación producida por el cemento hidráulico.

1.3 Justificación

El desarrollo de materiales compuestos geopoliméricos, parte de la necesidad de mejorar las propiedades mecánicas y minimizar los factores que afectan a la misma, como la retracción de la matriz, formación de grietas y la fragilidad, que son producto de la reacción exotérmica de los aluminosilicatos con el activador alcalino y, por esta razón la matriz sufre una rápida pérdida de agua (Collins & Sanjayan, 2000).

Dentro de otras aplicaciones para los geopolímeros se encontró que presentan (dependiendo su composición y manufactura) baja conductividad térmica, lo cual permite su uso como materiales que tienen características aislantes que consiguen ser usados en construcciones y recubrimientos que requieran menos peso. Los estudios también avanzan en relación con las propiedades hidrofóbicas, permitiendo su uso para aplicaciones más específicas además de la construcción.

Además, para la fabricación de geopolímeros, se busca disminuir la cantidad de residuos generados por las Industrias. Como fuente de aluminosilicatos se están utilizando residuos de los altos hornos, y de las centrales termoeléctricas, tales como la escoria, y la ceniza volante. Estos materiales suelen terminar en un vertedero, almacenándose sin ningún otro uso, pero gracias a este nuevo material, se reutilizarían, y así ayudarían a la sostenibilidad del planeta (Montagud, 2018).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Analizar el desempeño de un geopolímero en el rango no lineal.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Emplear el método Pushover para el análisis de resultados del comportamiento de un geopolímero como sustituto de cemento en la formación de un hormigón que formará parte de elementos estructurales para una edificación.
- Analizar el desempeño de un geopolímero en elementos estructurales de edificaciones reales como sustituto de hormigón tradicional compuesto por cemento portland.
- Realizar un análisis comparativo del desempeño de una estructura compuesta por el hormigón tradicional vs un geopolímero.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Que es un Geopolímero

Un geopolímero es un polímero sintético inorgánico de aluminosilicatos que se forma a través de la reacción química conocida como geopolimerización. Los geopolímeros son conocidos por su alta resistencia química y térmica, y su bajo impacto ambiental debido a las bajas emisiones de CO₂ en su producción. Estos compuestos tienen un gran potencial de aplicación en muchos campos, pero se utilizan principalmente como sustitutos del cemento Portland en la construcción de edificios, puentes, carreteras y otras estructuras.

Es un nuevo conglomerante sostenible alternativo. No sólo su producción requiere menos energía y emite pocas emisiones, sino que las matrices hidratadas del cemento geopolimérico tienen unas propiedades ingenieriles únicas que las distinguen de otros conglomerantes. Por ejemplo, el cemento geopolimérico puede tener una docilidad excelente mientras alcanza una resistencia a compresión a temprana edad y una durabilidad a largo plazo frente a diversos tipos de agresivos elevados comparado con las matrices hidratadas tradicionales del cemento portland. Más aún, existe la posibilidad de desarrollar cementos portland mezclados con geopolímeros con propiedades y prestaciones especiales (Omeman & Nehdi, 2007).

Los geopolímeros son una combinación de silicatos de aluminio activados por soluciones alcalinas, estos materiales tienen propiedades muy favorables en comparación con el hormigón tradicional, como buenas propiedades mecánicas, buena resistencia química y térmica y, lo más importante, sí, las emisiones de CO₂ durante el proceso de producción son bajas (Davidovits, 1994).

2.2 Propiedades Químicas de un geopolímero.

Alta resistencia a los efectos de sustancias degradantes, como ácidos y sulfatos, que afectan a los elementos del hormigón. El comportamiento de los geopolímeros frente a agentes degradantes se debe a que los enlaces de silicato (Si-O-Al) generados en los geopolímeros son más difíciles que reaccionen con los iones de los ácidos a diferencia de los enlaces de hidratos del Cemento Portland ordinario (Ghosh & Ghosh, 2009).

De una forma muy simplificada, se puede decir que el proceso de geopolimerización se produce cuando se combina:

- Agua, fuente de aluminosilicato, y una solución alcalina.

A esta combinación, se añade arena para obtener el mortero de geopolímero. También, se puede utilizar para fabricar hormigón con menores emisiones de CO₂, además, dependiendo de su composición, puede llegar a tener características iguales, o incluso superiores al hormigón tradicional. (Montagud, 2018)

Otra cualidad de los geopolímeros es su baja emisión de CO₂, según Davidovits (2005), ya que producir una tonelada de geopolímero libera 0,184 toneladas de dióxido de carbono; es decir, las cantidades son significativamente menores que las producidas en la producción de cemento portland ordinario. Además, otra excelente característica de los geopolímeros es su alta resistencia al ataque de sustancias degradantes que afectan a los elementos del hormigón, como ácidos y sulfatos. El buen desempeño de los geopolímeros contra los agentes de degradación se debe al hecho de que los enlaces de silicato (Si-O-Al) formados en el geopolímero son más difíciles de reaccionar con iones ácidos, a diferencia de los enlaces de hidrato en el cemento portland ordinario.

(Ghosh & Ghosh, 2009) en su investigación expusieron muestras de geopolímero a base de ceniza volante a soluciones de ácido sulfúrico al 10% en volumen y ácido nítrico al

10% durante 24 semanas y obtuvieron como resultado que las muestras perdieron peso solo en porcentajes de hasta 1.64% y 1.42% del peso original respectivamente; sin embargo, perdieron gran parte de su alcalinidad. No obstante, las muestras conservaron su forma y color original, también conservaron su resistencia a compresión equivalentes a 54.8% y 60.3% a la original, respectivamente.

2.3 Propiedades Físicas de un geopolímero.

Las propiedades físicas de los geopolímeros según Davidovits (1978) son los siguientes: Mezcla Cementante: Agrietamiento durante el fraguado menor al 0.05%; módulo de Young mayor a 2 GPa; elevada resistencia a edades tempranas: 90 MPa a 28 días, 20 MPa luego de 4 horas; alta resistencia a la flexión: 10-15 MPa luego de 28 días, 10 MPa luego de 24 horas; y alta resistencia los cambios de temperaturas: menos del 0.1% de pérdida de masa en ciclos de congelación y descongelación, y humedecimiento y secado abrupto. Concreto de Geopolímero: Expansión lineal: menor a 5×10^{-6} /K; conductividad al calor: 0.2 a 0.4 W/K. m; calor específico: 0.7 a 10 kJ/kg; conductividad eléctrica: depende fuertemente de la humedad; estabilidad térmica: menos de 5% de pérdida de masa y menos de 20% de pérdida de resistencia sobre los 1000°C; densidad estructural: 2.4 a 2.6 g/ml; densidad voluminosa: 1 a 1.9 g/ml; porosidad aparente: 15% a 30%; contracción geopolimérica: 0.2% a 0.4%; capacidad de calor específico: 0.2 cal/g°C.

2.4 Proceso de elaboración de un geopolímero.

El proceso de elaboración de un geopolímero se puede realizar mediante dos métodos, mezclado en seco y un mezclado húmedo (Assaedi, Shaikh, & baja, 2016).

El mezclado en seco es uno de los métodos más usados por los investigadores, donde la fuente de aluminosilicatos se mezcla en estado seco con algún otro tipo de agregado si fuere el caso, y el activador alcalino de igual forma, se prepara por separado un día antes del mezclado dejándolo reposar a temperatura ambiente; o a su vez, se puede preparar el mismo día del mezclado, pero, enfriando el contenedor del activador sobre agua fría hasta que la solución alcance la temperatura ambiente; para finalmente estas dos materias primas sean mezcladas hasta formar la matriz (Trindade, Borges, & Silva, 2018).

Mientras que el método de mezclado en húmedo consiste en verter en un recipiente todas las materias primas al mismo tiempo sin ninguna preparación previa y realizar el mezclado hasta alcanzar la homogeneidad de la pasta (Assaedi, Shaikh, & baja, 2016).

2.5 Materiales para crear un geopolímero.

Para la creación del geopolímero, se necesita materia prima, que tiene los aluminosilicatos, los cuales son la parte más llamativa de estos materiales, ya que generalmente se suelen utilizar residuos industriales como escoria, ceniza volante, metacaolín, ceniza de cáscaras de arroz, etc.

Las que más se están estudiando son la ceniza volante, la escoria y piedra pómez, entre otros. Ya que, además, son los materiales más abundantes y accesibles, porque se los puede encontrar generalmente en las industrias, y estas no los utilizan (Montagud, 2018).

Para obtener geopolímeros con mejores capacidades mecánicas, es mejor que la materia prima tenga una estructura vítrea, y un tamaño de partícula pequeño (Acuña, 2012).

2.5.1 Escoria de Alto horno.

Se obtienen fundiendo el mineral en altos hornos de la industria siderúrgica para purificar el metal, a altas temperaturas se liberan las impurezas del mineral y se separan del metal fundido. De estas impurezas aparece el arrabio y la escoria, que pasan a una balsa donde se separan por diferencia de densidad (Khale & Chaudhary, 2007).

Con los años se ha ido homogeneizando la variación en la composición de la escoria, llegando a marcar unos valores límites permitidos para su uso en la fabricación de cementos, como se muestra en la Figura 1 (Puertas, 1993).

Figura 1 Composición química de las escorias

SiO ₂	= 27-40 %.
Al ₂ O ₃	= 5-33 %.
CaO	= 30-50 %.
MgO	= 1-21 %.
Fe ₂ O ₃	= < 1 %.
S	= < 3 %.
Cr ₂ O ₃	= 0,003-0,007 %.
Cl	= 0,19-0,26 %.
TiO ₂	= < 3 %.
F	= 0,09-0,23 %.
MnO ₂	= < 2 %.
P ₂ O ₅	= 0,02-0,09 %.
Na ₂ O + K ₂ O	= 1-3 %.

2.5.2 Ceniza Volante.

La ceniza volante se obtiene de las centrales termoeléctricas, donde se pulveriza y quema el carbón, de esta combustión se utiliza el calor desprendido para evaporar agua y poner en movimiento una turbina, generando así electricidad. Los residuos de esta combustión pueden ser de dos tipos: cenizas volantes o cenizas duras, la diferencia entre los

dos es el tamaño de sus partículas. En la producción de geopolímeros nos interesan las cenizas volantes, una sustancia que retiene partículas más finas y una estructura vítrea.

Las cenizas volantes bajas en calcio, con las arcillas calcinadas, son los materiales más frecuentemente utilizados en la creación de geopolímeros (Albornoz, 2015).

Según la norma ASTM C618, existen tres tipos de ceniza volante. Las de clase N, clase F y clase C.

- Las de clase N (silicocalcáreas), son aquellas puzolanas naturales, que necesitan ser calcinadas para adquirir propiedades aceptables, como algunas arcillas y lutitas (ASTM, 2013).
- Las de clase F (silicoaluminosas), se producen generalmente por la combustión de antracita y carbones bituminosos (de alto poder calorífico), y tienen un contenido de óxido de calcio menor al 10%. El PH puede ser mayor a 10 (Cedex, 2011).
- Las de clase C (sulfocálcicas), se producen por la combustión de lignito y carbón sub-bituminoso (de baja calidad), y tienen más de un 10% de óxido de calcio (Cedex, 2011).

Tabla 1 *Clasificación de la ceniza volante según ASTM*

		Clase N	Clase F	Clase C
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	Min%	70	70	50
SO_3	Max%	4	5	5
Humedad	Mas%	3	3	3
Perdidas en Incineración	Max%	10	6	6

2.5.3 Solución Alcalina

Los aluminosilicatos que se utilizan para la creación de los geopolímeros, deben ser materiales que tengan un bajo contenido en calcio, por lo que, las soluciones que se deben

utilizar para activar estos productos son las activadoras alcalinas de bajo calcio (Albornoz, 2015).

Las soluciones más utilizadas generalmente, son el Hidróxido de Sodio (NaOH), el Silicato Sódico ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$), el Carbonato Sódico (Na_2CO_3) y el Sulfato de Sodio (Na_2SO_4)⁴.

Estos compuestos son lo más utilizados ya que son los más accesibles; es decir el hidróxido de sodio es el más económico, y el silicato sódico, se utiliza en la creación de geopolímeros de base escoria, ya que es la que mayor resistencia a compresión aporta en comparación a otros activadores (Acuña, 2012).

La activación alcalina se trata de un proceso químico en el que un material con alto contenido de Sílice y Aluminio (Aluminosilicatos), se combina con una solución alcalina, las cuales suelen tener un $\text{PH} > 7$, tales como las mencionadas en el párrafo anterior, creando una pasta que se endurece en un corto periodo de tiempo (Torres, 2017).

2.5.4 Piedra Pómez

Las cambiantes temperaturas de nuestro planeta requieren un valor agregado para la construcción, y la piedra pómez puede brindar la resistencia necesaria a cualquier tipo de estructura, y cuando se utiliza como agregado en la fabricación de bloques, también ofrece muchos beneficios, brinda aislamiento acústico y térmico, además de resultar mucho más ligero que un mortero tradicional disminuyendo la carga normal que los cimientos soportan haciéndolo ideal para grandes edificaciones (PRIMAC, S.F).

- Porosa: Gracias a sus microcélulas aporta propiedades de aislamiento acústico y térmico. Al mismo tiempo, tiene baja densidad y es muy ligero. (2.5 M3 x tonelada).
- Químicamente neutra y biológicamente inerte: Pudiendo trabajar como agregado en la construcción de morteros y prefabricados sin alterar las funciones del cemento y aditivos.
- Físicamente estable: No se desmenuza ni se desintegra, lo que lo convierte en un agregado ideal para su uso en la industria de la construcción.
- Disminuye el peso del mortero en un 30%, y/o cambiando el agregado de piedra de canto rodado o piedra chancada por piedra pómez; o en otra combinación donde participa la piedra pómez como agregado.
- El concreto con piedra pómez es un concreto con particularidades aislantes; tanto acústicas como térmicas manteniendo los ambientes donde se use este con un clima más agradable que el exterior, así como no permitiendo la difusión del sonido.
- Ambientales-Ecológicos: Por ser aislante térmico reduce el uso de energía para mantener un ambiente agradable en especial en zonas donde los climas son extremos tanto en calor como en frío (PRIMAC, S.F).
- Se puede utilizar en diversas aplicaciones, en la producción de materiales de cemento para decoración y bloques de hormigón.

El hormigón ligero de piedra pómez es ideal para las siguientes aplicaciones en la industria de la construcción:

- Para rellenar pisos interiores y dar forma a elevaciones e inclinaciones finales antes de colocar mármol, gres o membrana asfáltica.

- Como aislamientos, ya sea como capa final para formar inclinaciones o aislamiento térmico para cubiertas o aislamiento térmico-acústico de pavimentos interiores.
- Para construcciones y reparaciones, donde se requieran cargas permanentes reducidas y comportamiento sísmico mejorado (Refractory, 2021).

2.6 Ventajas del geopolímero de hormigón.

El hormigón geopolimérico brinda varios beneficios en relación con otros Cementos Portland ordinarios al margen de la reducción de emisiones de CO₂. Por ejemplo, aumenta la resistencia al fuego y es una forma viable de utilizar materiales de desecho que de otro modo acabarían en el vertedero (Comisión Europea, 2018).

El hormigón geopolimérico ofrece ventajas económicas y de sostenibilidad, pero existen ciertas dudas sobre su uso entre autoridades y científicos. En algunos casos, el contenido de subproductos puede afectar la salud humana y suponer un riesgo para el medio ambiente. Además de los compuestos potencialmente tóxicos, existe un mayor riesgo de isótopos radiactivos naturales (Comisión Europea, 2018).

Este nuevo material ha obtenido muy buenos resultados en las pruebas realizadas. Se ha comparado con el hormigón convencional con resultados variables, pero siempre muy inferiores al hormigón tradicional en términos de emisiones de CO₂, del rango de un 26-45% menos (STENGEL, Reger, J, & Heinz, D, 2009).

El hormigón geopolímero tiene el potencial de sustituir completamente al hormigón de cemento Portland, pero esto sólo sucederá si existe una cadena de suministro de materia prima eficiente y redes de distribución de productos adecuadas. Las recientes iniciativas comerciales en esta área son alentadoras, pero la producción global de hormigón geopolímero

llevará mucho más tiempo. Al mismo tiempo, es necesario demostrar los avances en la tecnología de geopolímeros. El hormigón geopolímero curado térmicamente a base de cenizas volantes con bajo contenido de calcio tiene una excelente resistencia a los sulfatos y buena resistencia a los ácidos (Martínez, 2022).

De acuerdo con (Salirrosas Tanta, 2020), se detallan los usos del geopolímero de hormigón en la industria de la construcción:

Construcción de Estructuras: Los geopolímeros se utilizan en la construcción de diversas estructuras, como edificios, puentes e infraestructuras de transporte.

Su mayor resistencia y durabilidad los convierten en una alternativa eficaz al hormigón tradicional.

Reparación y Reforzamiento: Los geopolímeros se emplean en proyectos de reparación y fortalecimiento de estructuras existentes. Su capacidad para unirse y mezclarse con el concreto existente ayuda a mejorar la integridad estructural y extender la vida útil del edificio.

Pavimentación Sostenible: Los geopolímeros ofrecen una opción más sostenible a la hora de pavimentar carreteras y zonas urbanas. La disminución de huella de carbono y su durabilidad los convierten en una solución adecuada para pavimentos de tráfico pesado (Ahlstrom, 2019).

Construcción de Elementos Prefabricados: Los geopolímeros se pueden utilizar para crear componentes prefabricados, como paneles y bloques, porque se les puede dar diferentes formas y tamaños. Esto acelera el proceso de construcción y reduce los residuos.

Proyectos Sostenibles y de Bajo Impacto Ambiental: Los geopolímeros son opciones valiosas en proyectos que apuntan a reducir el impacto ambiental. Al utilizar materiales

recicladados y generar menores emisiones de carbono durante la producción, ayudan a crear estructuras más sostenibles.

2.7 Peligro y riesgo sísmico

Un sismo es la liberación súbita, abrupta o repentina de energía, producto de la interacción dinámica entre las distintas placas tectónicas que conforman la Tierra o de la energía de deformación que se ha venido acumulando lentamente a lo largo de una falla, una superficie o una zona de fracturación en la corteza terrestre. Esta liberación produce varios efectos sobre el terreno (roca o suelo blando), el cual se deforma de distintas maneras dependiendo básicamente de las características físicas y dinámicas tales como su estratigrafía, la frecuencia natural de vibración, el amortiguamiento y el módulo de rigidez, entre otros (Farzad N, 2000).

El daño estructural causado por los terremotos es simplemente el resultado final de un proceso complejo que comienza simultáneamente con el movimiento sísmico. Sin embargo, la gravedad de los daños y el impacto inmediato, como el pánico público, llaman la atención sobre estos aspectos y reducen la importancia de las distintas etapas del proceso a un nivel secundario.

Para la ejecución de estos estudios de riesgos frente a sismos, se debe valorar la peligrosidad sísmica y la vulnerabilidad, y así, obtener el mapa de riesgos del territorio considerado.

El estudio de la vulnerabilidad debe tener en cuenta las construcciones cuya destrucción, con probabilidad razonable, pueda ocasionar víctimas, interrumpir un servicio

imprescindible para la comunidad o aumentar los daños por efectos catastróficos asociados (Hernández G, 2007).

2.7.1 Sismicidad histórica de la ciudad de Riobamba

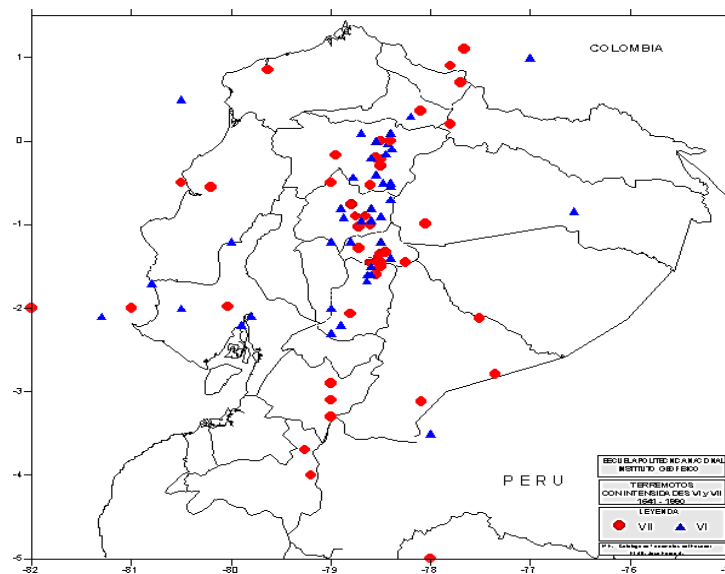
De acuerdo con el Catálogo de Terremotos del Ecuador del Instituto Geofísico de la E.P.N, elaborado por José Egred A., la ciudad de Riobamba ha sido afectada por sismos destructivos a lo largo de su historia (Ver Figuras 2 y 3). Debido a la falta de instrumentación de la época, no se disponen registros de dichos eventos sísmicos, tan solo se cuenta con relatos históricos que de forma subjetiva han permitido evaluar el daño de los mismos en la ciudad, como puede apreciarse en la siguiente tabla:

Tabla 2 *Efectos causados por los terremotos con intensidad VIII o superior*

FECHA	EFECTOS CAUSADOS POR LOS TERREMOTOS CON INTENSIDAD VIII O SUPERIOR
1645-03-15	<p>Muchos temblores al comienzo de este año, sentidos en Quito y Riobamba, hasta febrero en que ocurre un terremoto que causó graves estragos en toda la comarca. El terremoto originó desprendimientos internos en el volcán Tungurahua. Innumerables réplicas. Muchos muertos.</p>
1698-06-20	<p>Los daños materiales se extendieron desde el Nudo de Tiopullo hasta el Nudo del Azuay. Muertos: Ambato más de 3000; Latacunga aproximadamente 2000; en los pueblos de sus jurisdicciones se estimó unos 1500; en Patate alrededor de 200 y en Riobamba 100.</p> <p>Según algunos autores el número de víctimas ascendió a 8000. Gran destrucción de casas e iglesias en Ambato, Latacunga, Riobamba y todos los pueblos de la comarca.</p> <p>Grandes deslizamientos en montes, laderas y taludes. Represamientos de ríos y quebradas; desbordamiento y avalancha en el río Ambato. Derrumbes en el Carihuairazo. Grietas de 4 a 5 pies de ancho y 1 legua de longitud, en dirección N-S.</p> <p>En vista de la gran destrucción y efectos asociados, se intenta mudar de sitio a las ciudades de Ambato, Latacunga y Riobamba, lo cual no fue permitido por las autoridades de la Real Audiencia.</p>
1786-05-10	<p>Terremoto en Riobamba. Graves daños en la ciudad y pueblos vecinos. Destrucción total de muchas casas de adobe, Se efectuó un inventario detallado de los daños en Riobamba, casa por casa, incluyendo el costo aproximado de las reparaciones.</p>
1797-02-04	<p>Destrucción total de la Villa de Riobamba. El terremoto más destructivo en el territorio ecuatoriano y uno de los de mayor magnitud en toda su historia. Destrucción total de la antigua ciudad de Riobamba, razón por la cual no fue reconstruida en el mismo sitio y se mudó al lugar que actualmente ocupa. Daños muy severos en ciudades, pueblos y caseríos de lo que actualmente son las provincias de Chimborazo, Tungurahua y Cotopaxi y parte de Bolívar y Pichincha. Las trepidaciones y ondulaciones del suelo duraron aproximadamente 4 minutos. Inmensos deslizamientos de laderas y montes, uno de los cuales, sepultó por completo tres barrios de Riobamba.</p>

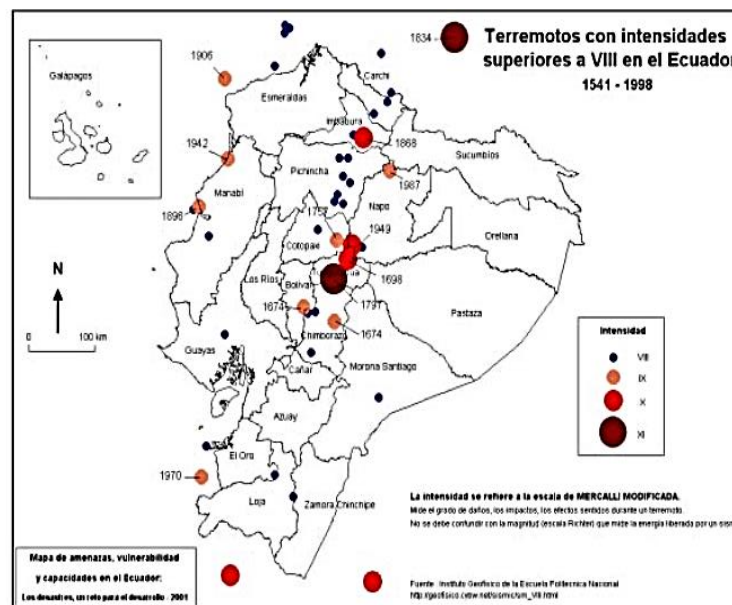
Nota: Tomado de Catálogo de Terremotos del Ecuador. - Intensidades- Instituto Geofísico, E.P.N; José Egred A (2009)

Figura 2 Mapa de Terremotos con intensidades VI y VII 1641-1890



Nota: Tomado de Instituto Geofísico EPN (2009)

Figura 3 Mapa de Terremotos con intensidades superiores a VIII 1541-1998



Nota: Tomado de Instituto Geofísico EPN (2009)

2.8 Análisis no lineal

Bondarenko (2018), define a una estructura civil como un sistema conformado por miembros finitos unidos entre sí, mediante un numero finito de juntas, capaz de resistir y

transmitir los esfuerzos originados por las cargas resultantes de su uso, peso propio y acciones dinámicas tales como; el viento, sismos y olas.

Además, señala que ningún material o elemento es 100% lineal; es decir, después de cierto grado de tensión o deformación, entran en la región no lineal o fallan inmediatamente, en cuyo caso se debe realizar un análisis no lineal, teniendo en cuenta el comportamiento más realista de materiales y cálculos más fiables de fuerzas y deformaciones.

El análisis estático no lineal implica aplicar cargas laterales distribuidas gradualmente a lo largo de la estructura hasta alcanzar su máximo desplazamiento y luego representar gráficamente la curva de resistencia de la estructura, (Elnashai, 2001, p. 51; Mazumder, 2014, p.2). Además de esto, también nos permite predecir el comportamiento sísmico real o casi real de una estructura en respuesta a demandas sísmicas, permitiéndonos determinar el comportamiento sísmico de dicha edificación.

2.8.1 Demanda sísmica y desempeño

Basados en el desempeño estructural de la ingeniería sísmica, existen 3 conceptos que se tienen que tomar en cuenta: niveles de desempeño, demanda sísmica y objetivos de desempeño.

Niveles de desempeño. - Los niveles de desempeño tienen en cuenta principalmente los siguientes aspectos: daño físico a elementos estructurales y no estructurales, riesgos para los ocupantes de la estructura o edificio en evaluación y funcionalidad, es decir, si los servicios básicos siguen o no operativos.

Demanda sísmica. – El peligro o amenaza sísmica se puede definir como la probabilidad de que se supere un determinado valor de intensidad en un lugar de interés en un período de tiempo determinado, es decir, para comprender la frecuencia y severidad de eventos potenciales.

Objetivos de desempeño. - Se define como una expresión del grado de daño esperado (nivel de desempeño) ante una intensidad de sismo (nivel de demanda sísmica).

2.9 Normativa a aplicar

Norma Ecuatoriana de la Construcción-15

Para este proyecto investigativo se empleará el capítulo NEC-SE-DS en la cual se presentan los requerimientos y metodologías que deberán ser aplicados al diseño sismo resistente de edificios.

Conforme lo señalado en el numeral 4.3.2. Niveles de amenaza sísmica, la verificación de desempeño se hace para los niveles de amenaza sísmica presentados a seguir. Se clasifican los sismos según los niveles de peligro y período medio de retorno tal como en la tabla siguiente:

Tabla 3 *Niveles de amenaza sísmica*

Nivel de sismo	Sismo	Probabilidad de excedencia en 50 años	Período de retorno Tr (años)	Tasa de excedencia (1/Tr)
1	Frecuente (menor)	50%	72	0,01389
2	Ocasional (moderado)	20%	225	0,00444
3	Raro (severo)	10%	475	0,00211
4	Muy raro* (extremo)	2%	2500	0,00040

Nota: Tomado de NEC 2015

Vision2000

Conceptual Framework for Performance Based Seismic Engineering of Building (SEAOC-Vision 2000, 1995), es un proceso que comienza con los primeros conceptos del proyecto y dura toda la vida de la edificación, incluye la identificación del peligro sísmico, selección de los niveles y objetivos del diseño para un comportamiento deseado.

La selección de criterios de diseño, sistema estructural apropiado, proporcionalidad y detallado de una estructura y su componente no estructural y contenido, para asegurar y controlar la calidad de la construcción y mantenimiento para cada nivel especificado de movimiento sísmico y con niveles definidos de confiabilidad, la estructura no superará los daños ante ciertos estados límites u otros límites inusuales.

Niveles de amenaza sísmica. - VISION 2000 (SEAOC, 1995) detalla cuatro niveles de demanda definidos según su probabilidad de ocurrencia y período de retorno. Definidos como: movimientos sísmicos de diseño frecuente, ocasional, raro y muy raro.

Tabla 4 Propuesta del comité Vision2000

Movimiento sísmico de diseño	Intervalo de recurrencia	Probabilidad de excedencia
Frecuente	43 años	50% en 30 años
Ocasional	72 años	50% en 50 años
Raro	475 años	10% en 50 años
Muy raro	950 años	10% en 100 años

Niveles de desempeño. - (SEAOC, 1995) Establece cinco niveles de desempeño:

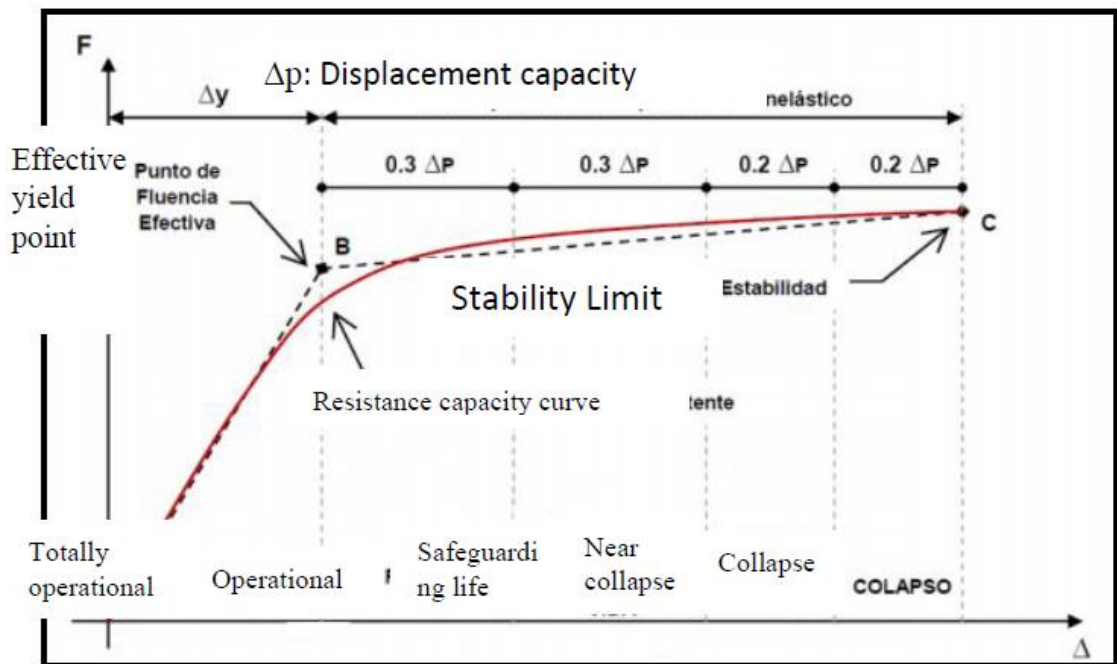
Tabla 5 Niveles de desempeño propuestos

SEAO VISION 2000, establece los niveles de desempeño según la capacidad de desplazamiento inelástico (Δ_p):

Estado de daño	Nivel de desempeño	Descripción de los daños	Rango sectorizado
Despreciable	Totalmente Operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Los sistemas de evacuación y todas las instalaciones continúan prestando sus servicios.	$\leq 0,20$
Leve	Operacional	Agrietamientos en elementos estructurales. Daño entre leve y moderado en contenidos y elementos arquitectónicos. Los sistemas de seguridad y evacuación funcionan con normalidad.	$\leq 0,50$
Moderado	Seguridad	Daños moderados en algunos elementos. Pérdida de resistencia y rigidez del sistema resistente de cargas laterales. El sistema permanece funcional. Algunos elementos no estructurales y contenidos pueden dañarse. Puede ser necesario cerrar el edificio temporalmente.	$\leq 1,50$
Severo	Pre- colapso	Daños severos en elementos estructurales. Fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos. Puede llegar a ser necesario demoler el edificio.	$\leq 2,50$
Completo	Colapso	Pérdida parcial o total de soporte. Colapso parcial o total. No es posible la reparación.	$> 2,50$

Nota: Tomado de Vision2000 (Medina, 2018)

Figura 4 Curva de capacidad sectorizada



Nota: Tomado de Comité SEAOC Visión 2000, 1995

Objetivos de desempeño: Considerando los diferentes tipos de estructuras y su impacto en la seguridad poblacional. Vision2000 propone objetivos múltiples mínimos de desempeño:

Tabla 6 Matriz de objetivos de diseño

Nivel de demanda sísmica	Nivel de desempeño sísmico			
	Totalmente Operacional	Operacional	Seguridad de vida	Pre colapso
Frecuente	OB	X	X	X
Ocasional	OEP	OB	X	X
Raro	OSC	OEP	OB	X
Muy raro	-	OSC	OEP	OB

Nota: Tomado de Vision2000 (Medina, 2018)

Siendo:

OB: Objetivo Básico: edificio habitacional y de oficinas,

X: objetivo inaceptable

OEP: Objetivo Esencial y Peligroso: edificios esenciales (hospital, policía) e instalaciones peligrosas

OSC: Objetivo de Seguridad Crítica: edificios con elementos tóxicos, explosivos, radiactivos, etc.

En la Tabla 7 se muestran los desplazamientos objetivos para cada uno de los niveles de desempeño propuestos por Vision2000, los cuales representan la relación Dt/H , en que Dt es el desplazamiento lateral máximo del nivel superior del edificio con respecto a la base (desplazamiento de techo) y H es la altura del edificio. Para cumplir con los objetivos de desempeño, los desplazamientos objetivos deben ser inferiores a cada uno de estos valores señalados en la Tabla.

Tabla 7 *Valores de desplazamiento objetivo máximo para niveles de desempeño*

Nivel de desempeño	Desplazamiento objetivo Dt/H , %
Totalmente Operacional	$\leq 0,2$
Operacional	$\leq 0,5$
Seguridad de vida	$\leq 1,5$
Pre Colapso	$\leq 2,5$
Colapso	$> 2,5$

Nota: Tomado de Vision2000 (Medina, 2018)

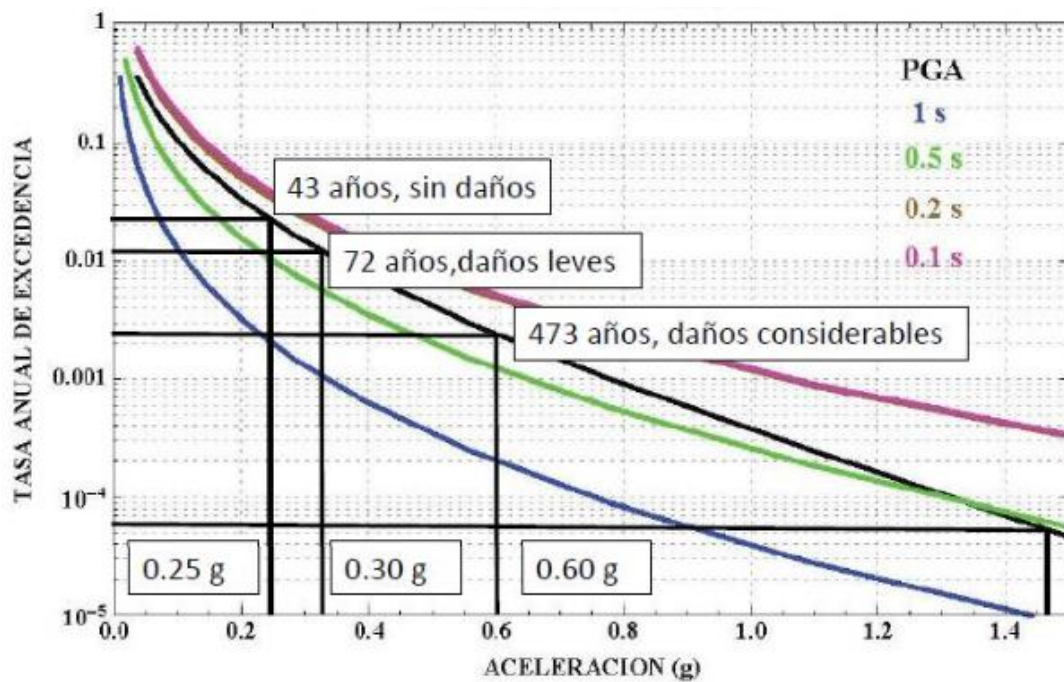
FEMA

Los fundamentos para el análisis Pushover se encuentran en los códigos FEMA 273, 356, FEMA 440, ATC – 58, documentos del comité Vision2000 del SEAOC; que, si bien no son normas ecuatorianas, su aplicación es de uso internacional.

Tabla 8 *Earthquake Hazard Levels*

Probability	MRI	Frequency
50% - 50 year	72 Years	Frequent
20% - 50 Year	225 Years	Occasional
10% - 50 Year (BSE-1)	474 Years	Rare
2% - 50 Year* (BSE-2)	2475 Years	Very Rare

Nota: Tomado de FEMA 273



FEMA 356

Tabla 9 Nivel de comportamiento FEMA 356

Parámetros	Ocupación inmediata (IO)	Seguridad de vidas (LS)	Prevención de colapso (CP)
Elementos Estructurales	Fluencia local en algunos elementos; no fracturas, pandeo menor en elementos que pueden ocasionar leves distorsiones.	Formación de articulaciones; pandeo local en algunos elementos, considerable distorsión en los nodos, algunas fracturas parciales en elementos; fracturas aisladas en conexiones de momento, pero sin comprometer ninguna conexión a cortante.	Severa distorsión en las vigas y paneles de columnas; numerosas fracturas en conexiones a momento, pero las conexiones a cortante permanecen intactas.
Deriva	0,7 % transitoria 0 % permanente	2.5 % transitoria 1 % permanente	5 % transitoria o permanente*

LÍMITES DE COMPORTAMIENTO

Tabla 10 Límites de distorsión de entrepiso para los niveles de desempeño

Nivel de desempeño	ATC-40	FEMA 273	BERTERO	VISION 2000
Ocupación inmediata	0,01	0,01	0,002-0,005	0,002-0,005
Seguridad de vida	0,01 - 0,02	0,01- 0,02	0,01- 0,02	0,015
Prevención del colapso	0,33 Vi/Pi	0,04	0,02- 0,04	0,025

FEMA 440

Para definir los casos de carga según FEMA 440, el análisis estático no lineal puede ser utilizado para una amplia variedad de propósitos, tales como analizar una estructura a partir de un material o geometría no lineal, para estudiar una construcción según sus etapas, o para realizar un análisis para cargas incrementales pushover. SAP2000 V16 permite aplicar tres tipos de sollicitaciones monotónicas; a partir de un estado de carga estático (previamente

definido), un patrón modal (dependiente del análisis dinámico de la estructura estudiada) o un patrón de aceleraciones (Meneses 2006).

FEMA 356-ATC58

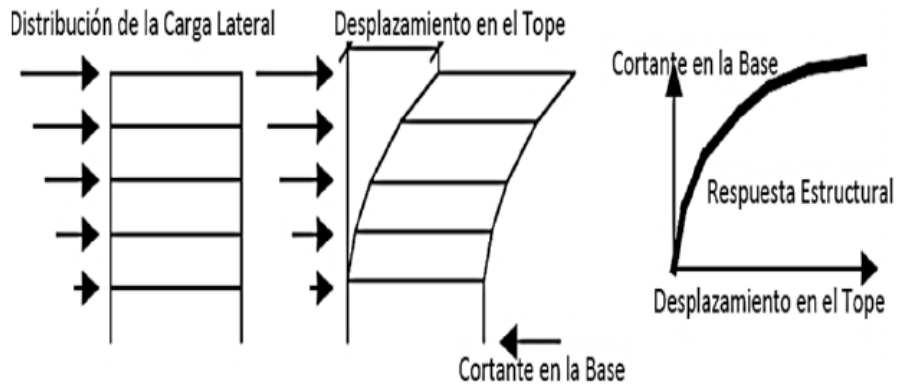
Tabla 11 *Límites de comportamiento FEMA 356-ATC58*

Component	Category	Type	Performance Levels			
			Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention	
Structural	Plastic Hinges	Plastic Rotation (θ_p)	0,003	0,018	0,024	
		Max inter-story Drift %	0,70	2,50	5,00	
	Residual Drift %	0,10	1,00	5,00		
Non-Structural	Floor Acceleration		Operational	Immediate Occupancy	Life Safety	Hazards
		Ceiling Systems	0,6	0,75	0,9	1,25
		Desktop Computers	0,5	0,75	1,1	1,6
		Tall File Cabinet	0,4	0,6	0,8	1,3

2.10 Curva de capacidad.

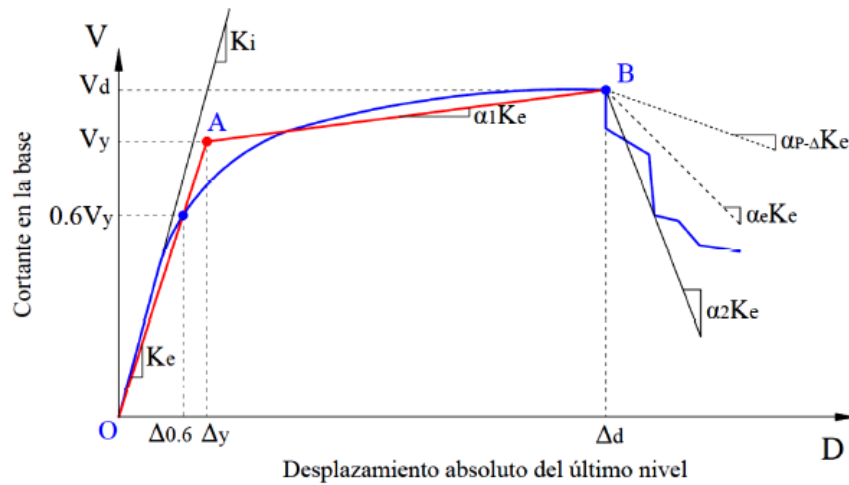
La curva de capacidad representa la relación de la fuerza cortante en la base con el desplazamiento del techo de una edificación, se representa a través de sistema de ejes coordenados realizando el análisis estático no lineal, determinando el progresivo deterioro de la rigidez de una edificación (Erdem et, 2011, p.611).

Figura 5 *Representación gráfica de la curva de capacidad*



Nota: Tomado de Bondarenko (2018).

Figura 6 Representación bilineal de la curva de capacidad



Nota: Tomado de FEMA 440 (2005).

2.11 Rótulas plásticas

Las rótulas plásticas se emplean para definir el modelo no lineal de la estructura, el cual describe la manera como se genera la fluencia de los elementos estructurales, una rótula se presenta en determinadas partes de las estructuras, el cual tiene como fin crear mecanismo de fallas en la que la capacidad fue superada, y suele presentarse en las zonas adyacentes en una viga y en un extremo de una columna (Vasco López, 2016).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Metodología de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, que mediante conocimientos de la Normativa Ecuatoriana de Construcción vigente y el uso del programa SAP 2000 v16, se aplicó en el caso de estudio, en las etapas de diseño y análisis de resultados.

3.1.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, con un enlace descriptivo correlacional, considerando que con los datos obtenidos se puede comparar el desempeño de una estructura compuesta por el hormigón tradicional vs un geopolímero y determinar las cortantes máximas y desplazamientos, evidenciando cual estructura cumple con lo requerido.

3.1.3 Enfoque de investigación

La investigación tiene un enfoque mixto, en la que se recopila información bibliográfica sobre geopolímeros, se analiza el comportamiento por desempeño en las muestras reales de elementos estructurales de pórticos de viviendas de la ciudad de Riobamba, se define los materiales y elementos para hormigón tradicional y geopolímero y se analiza el nivel de desempeño empleando normativa legal vigente.

3.1.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

El alcance para lograr la comparación del nivel de desempeño con los dos tipos de materiales, fue el ingreso de datos en los modelos de elementos finitos Software (SAP 2000 v16).

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población

La Universidad Nacional de Chimborazo a través de sus diferentes proyectos posee información de los estudios de Vulnerabilidad Sísmica sobre el tipo de estructura, calidad y resistencia de los materiales con las que están construidas las viviendas en la zona oriental de la ciudad de Riobamba (Noriega Rivera, 2013); información necesaria para el desarrollo de esta investigación, en este caso tenemos 26 viviendas.

3.2.2 Muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra se empleará la siguiente expresión:

$$n = \frac{N}{E^2(N - 1) + 1}$$

Dónde:

n= Tamaño de la muestra

N= Población adoptada

E= Error admitido = 10%

$$n = \frac{26}{0.10^2(26 - 1) + 1}$$

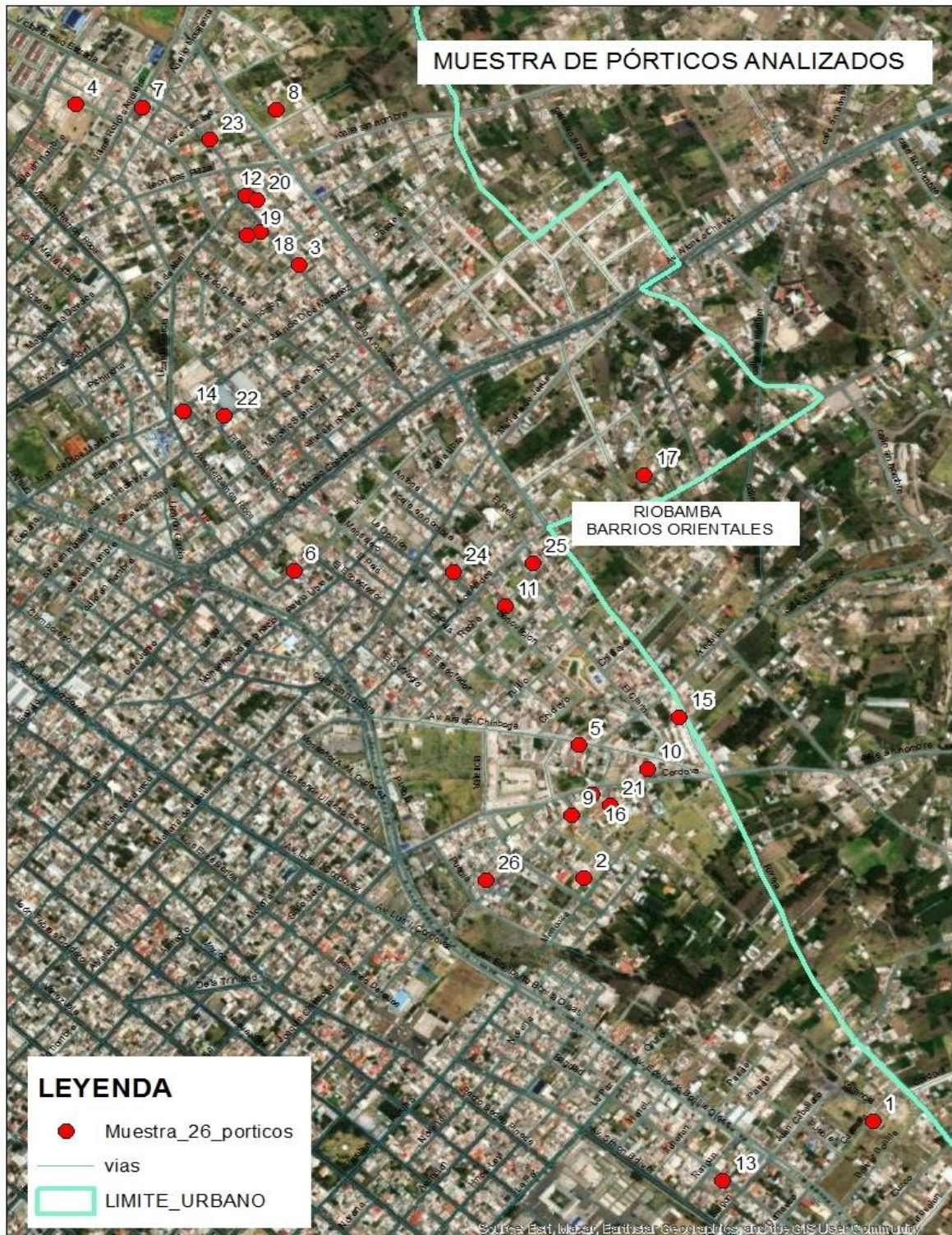
$$n = 20 \text{ muestras}$$

Conforme la población, se tiene una muestra de 20 viviendas, es decir se tiene 20 pórticos, cada una con su respectiva información tanto de configuración estructural, geométrica y de resistencia de materiales; datos necesarios para realizar un análisis por desempeño actualizando únicamente el valor de resistencia obtenido por el geopolímero para evaluar su comportamiento.

Tabla 12 Listado de Pórticos analizados por desempeño y sus características geométricas.

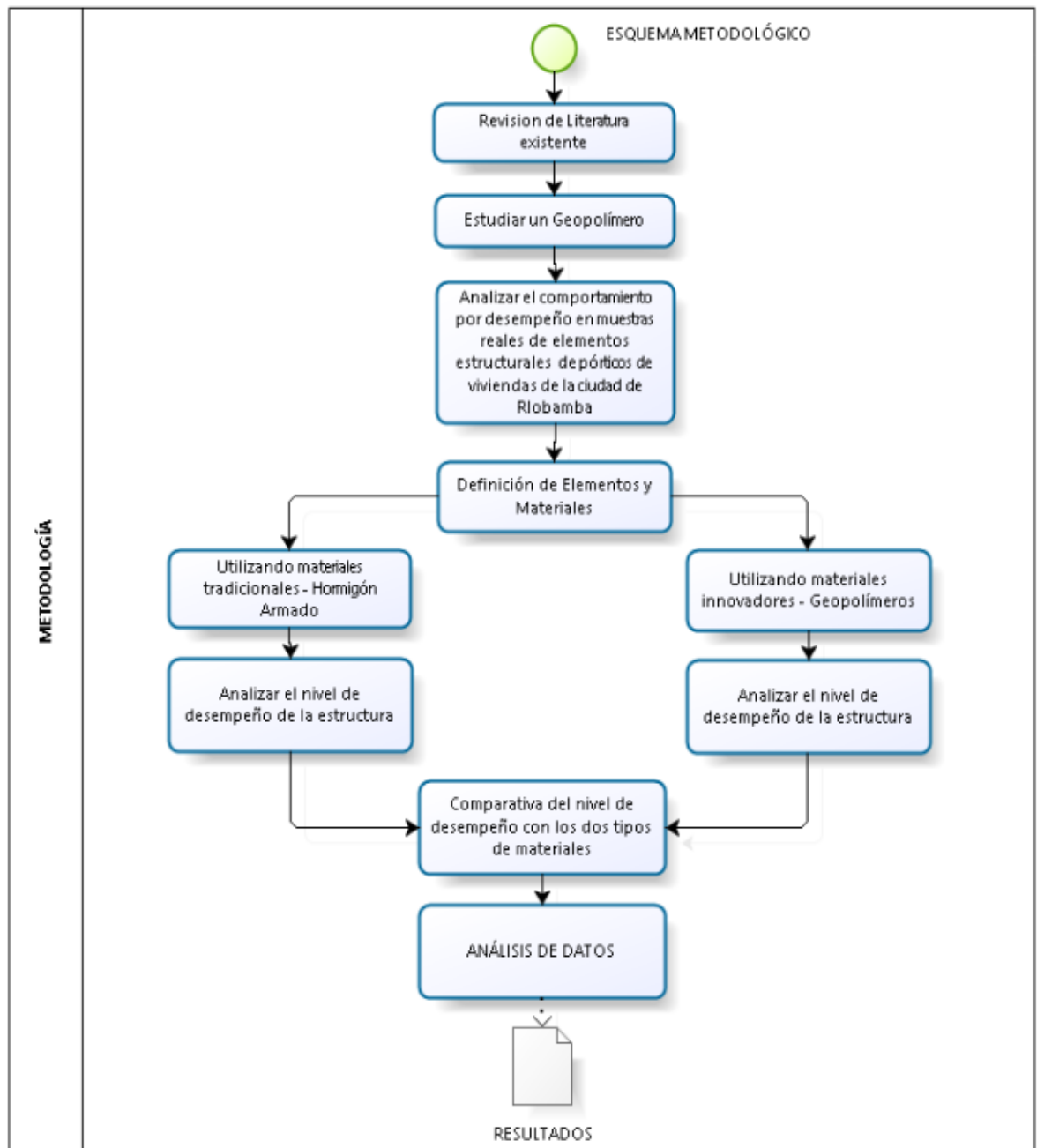
No.	MODELO	A (m)	B (m)	C (m)	Z (m)	SECC. VIGA		SECC. COLUMNA	
						b (m)	h (m)	b (m)	h (m)
1	11,1	2,50	2,50	2,50	2,05	0,20	0,30	0,30	0,25
2	11,2	2,50	3,50	4,50	2,10	0,25	0,30	0,30	0,30
3	11,3	2,50	3,50	4,50	2,10	0,25	0,35	0,35	0,35
4	11,4	2,80	4,50	3,00	2,40	0,20	0,30	0,25	0,25
5	11,5	2,50	2,70	2,90	2,15	0,20	0,25	0,25	0,25
6	11,6	2,80	4,50	3,00	2,25	0,25	0,30	0,30	0,35
7	11,7	2,50	2,60	2,80	2,35	0,20	0,30	0,25	0,30
8	11,8	3,00	2,50	3,00	2,55	0,20	0,25	0,25	0,25
9	11,9	2,50	2,50	2,50	2,20	0,20	0,25	0,25	0,25
10	11,10	2,90	2,60	3,20	2,50	0,20	0,25	0,25	0,25
11	11,11	2,50	3,20	4,50	2,30	0,25	0,35	0,35	0,30
12	11,12	2,80	3,00	3,20	2,20	0,20	0,30	0,25	0,30
13	11,13	2,50	2,70	2,90	2,30	0,20	0,25	0,30	0,25
14	11,14	2,80	3,10	3,30	2,15	0,25	0,30	0,30	0,30
15	11,15	3,40	3,60	3,80	2,40	0,20	0,35	0,25	0,35
16	11,16	3,60	2,60	4,20	2,55	0,25	0,30	0,30	0,35
17	11,17	3,20	2,50	4,00	2,45	0,20	0,30	0,30	0,30
18	11,18	3,20	4,50	3,20	2,20	0,25	0,35	0,35	0,35
19	11,19	3,10	3,30	2,80	2,30	0,25	0,30	0,30	0,30
20	11,20	2,80	3,20	3,40	2,45	0,25	0,30	0,30	0,30
21	11,21	4,50	3,00	4,00	2,1	0,25	0,30	0,30	0,30
22	11,22	2,50	2,90	3,30	2,3	0,20	0,25	0,25	0,25
23	11,23	3,30	4,50	3,30	2,2	0,25	0,30	0,30	0,30
24	11,24	3,30	4,50	3,30	2,2	0,25	0,35	0,35	0,35
25	11,25	4,50	2,50	4,50	2,55	0,20	0,30	0,30	0,30
26	11,26	4,50	2,50	4,50	2,55	0,25	0,35	0,40	0,40

Figura 7 Mapeo del listado de pórticos analizados



3.2 Esquema Metodológico

Figura 8 Esquema Metodológico



3.3 Estudio del Geopolímero

Como punto base para este estudio, se tomó en consideración el estudio de geopolímeros a base de piedra pómez en Ecuador en tres minas distintas de piedra pómez en las Provincias de Imbabura, Cotopaxi e Imbabura, en las cuales se realizó una mezcla sencilla de estos materiales, con la densidad esperada de 2200 kg/m³ en la mezcla. La relación silicato/hidróxido de sodio, se estableció con un valor de 2 para luego aumentar a 2,5; la molaridad del hidróxido de sodio se experimentó con valores de 8 moles a 20 moles.

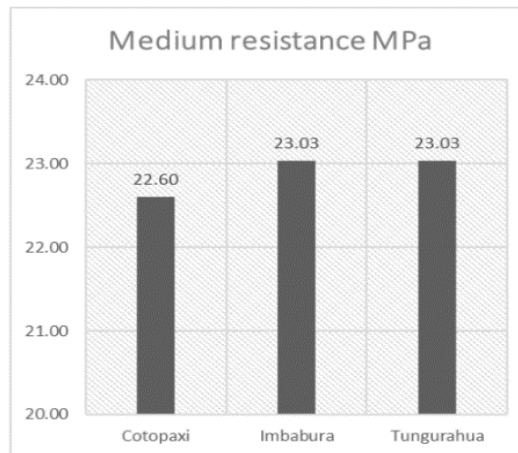
En la investigación, se fabricaron varios cubos para cada mina estudiada, variando la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio en cada uno de ellos. Cada ejemplar fue evaluado por la tensión de compresión que resistió después de curar durante 24 horas a una temperatura de curado de 60 y 80 grados centígrados. Teniendo los siguientes resultados:

Figura 9 Muestra del cubo de geopolímero estudiado



Nota: Tomado de Andrade A, Castillo T, Paredes M, 2022

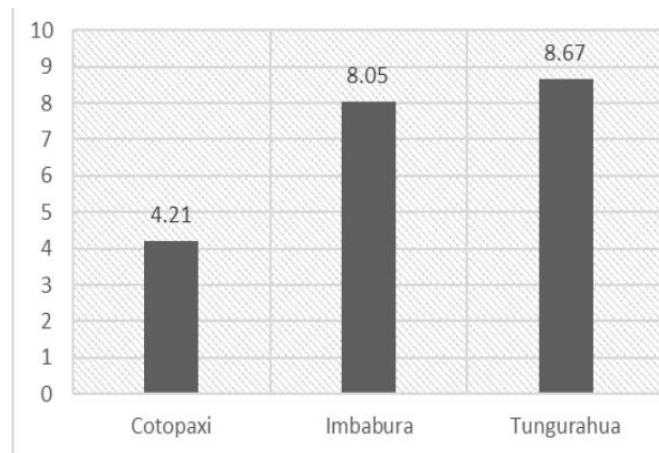
Figura 10 Resistencia Promedio alcanzada



Nota: Tomado de Andrade A, Castillo T, Paredes M, 2022

Con la dosificación lograda se realizaron 12 cilindros, éstos fueron ensayados en laboratorio para determinar su resistencia a la compresión y analizar su comportamiento, dando como resultados los siguientes datos:

Figura 11 Resistencia media a la compresión de los especímenes creados



Con los resultados de la resistencia media a la compresión del modelo de concreto con la aplicación de geopolímeros se establece el punto de partida para realizar el análisis por desempeño de este elemento, este dato de resistencia nos permitirá ingresar al programa de

análisis para implementar la metodología Pushover y conocer el comportamiento de este elemento en pórticos reales de la ciudad de Riobamba.

Las propiedades de los geopolímeros generalmente se comparan con el cemento Portland, ya que es el cemento más utilizado mundialmente.

(González Acuña, 2012) encontró que estos materiales tienen módulos de elasticidad moderados, con valores muy semejantes al de hormigón tradicional y se unen mejor al acero de refuerzo que el cemento Portland. De acuerdo con este criterio se tomará la formulación contenida en la Norma Nec-15 para determinar este valor e ingresarlo en el programa para realizar el análisis por desempeño.

De acuerdo a la premisa mencionada anteriormente y de acuerdo a la investigación elaborada por (Andrade Valle, 2024), en la presente investigación se tomará el valor de 14.10 MPa, de resistencia a la compresión del geopolímero para realizar el análisis por desempeño.

3.4 Análisis por desempeño

Para analizar el desempeño se toma 20 pórticos de los 26, con sus materiales tradicionales y también con geopolímeros.

Para realizar el análisis por desempeño se parte definiendo la geometría de los elementos que forman parte de la estructura a analizar, una vez definida la geometría se determina la materialidad del mismo tanto para el pórtico tradicional, así como para el pórtico si se utilizaría un geopolímero de estos dos resultados se analizará su comportamiento y desempeño aplicando el método Pushover.

Considerando datos base de resistencia a compresión de dicho elemento, se realizará el análisis por desempeño aplicando un análisis no lineal (Pushover) en muestras reales de

elementos estructurales que forman parte de edificaciones de viviendas en la ciudad de Riobamba, de las cuales se caracterizaron en función de sus propiedades geométricas, dando como resultado 26 pórticos, cada análisis que será realizado contará con su propio algoritmo de asignación de cargas.

Una vez modelados los distintos pórticos con las distintas características geométricas, de los distintos elementos estructurales y la materialidad de los mismos se realizará un análisis de ductilidad de los mismos para identificar el comportamiento paso a paso de estos pórticos de acuerdo a la aplicación de carga y sollicitaciones normales de la edificación (peso propio y carga viva) así como la de la carga lateral o carga sísmica.

Con la finalidad de conocer si un geopolímero cumple con las condiciones mínimas para reemplazar el modo tradicional de edificación en nuestro país sin que esto afecte o reduzca la seguridad de las edificaciones que sean ejecutadas con este nuevo material innovador.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estructura

El pórtico de la vivienda que se tomará como ejemplo para el estudio, es parte de una muestra de 26 edificaciones de la Ciudad de Riobamba.

Número de pisos:	3
Altura de entrepiso para todos los niveles:	2.10 m
Sistema Estructural:	Pórtico de hormigón armado
Zonificación sísmica:	Zona IV (NEC-15)
La planta tiene 3 vanos de: la dirección longitudinal X	4.50 m, 3.00 m y 4.00 m (total 11.50 m)

Las vigas y columnas para el presente análisis se tomaron considerando las características geométricas y estructurales de cada vivienda de la muestra:

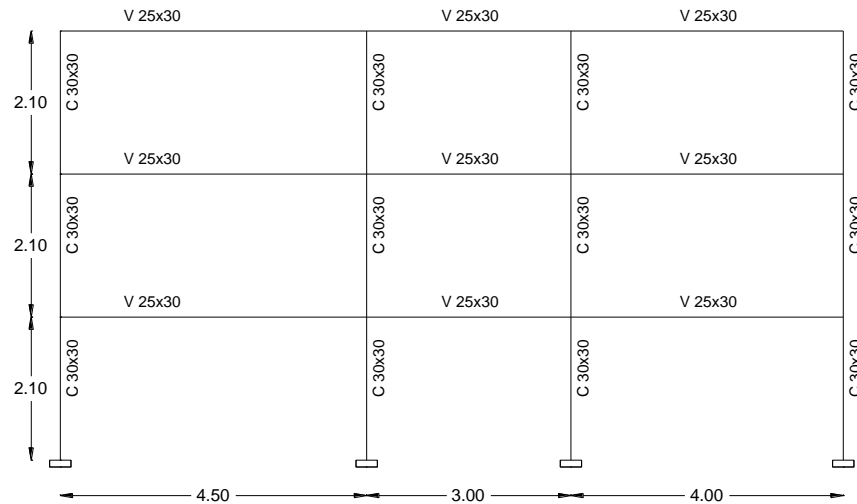
Vigas:	0.25m x 0.30m
Columnas:	0.30m x 0.30m
Losa:	h=20 cm (altura que predomina en las edificaciones de la ciudad de Riobamba y es lo que se presenta en cada vivienda analizada).

Tabla 13 Elementos Columna y Viga del caso de estudio

PISOS	ELEMENTO	ASIGNACIÓN	CARACTERÍSTICAS	
			b (cm.)	h (cm)
1,2,3	VIGA	V25x30	25	30
1,2,3	COLUMNA	C30x30	30	30
1,2,3	LOSA		Altura 20 cm	

De esta forma la disposición de vigas y columnas queda detallada en la Figura 12.

Figura 12 *Pórtico considerado para el análisis*



4.2 Cargas

4.2.1 Cargas de gravedad

Las cargas verticales fueron evaluadas con la NEC-15, y los pesos de los elementos no estructurales fueron evaluados a partir de sus dimensiones reales con su correspondiente peso específico. A continuación, se detallan las cargas asignadas al programa SAP 2000 v16.

4.2.2 Carga Muerta

- Losas aligeradas- hormigón armado (h=0.20m): 300.00 kg/m²
- Acabados: 120.00 kg/m²

4.2.3 Cargas aplicadas en el pórtico

Para la asignación de cargas, se consideró la carga viva aplicada en cada piso de 0.20 T/m², conforme señala la NEC – 15 para edificaciones destinadas a vivienda, para determinar la carga permanente se utilizó el área cooperante de la losa y el peso de las vigas; para optimizar el tiempo se hizo uso de hojas de cálculo electrónicas.

Tabla 14 *Determinación de cargas*

1.- Carga Muerta (D):		
1.1.- Losa:	E = 20 cm	
	Nervios:	0,130 T/m ²
	Carpeta:	0,120 T/m ²
	Bloques:	0,096 T/m ²
1.2.- Mampostería:		
	Ladrillo:	0,025 T/m ²
1.3.- Enlucido y masillado:		
	Enlucido=	0,044 T/m ²
	Masillado=	0,044 T/m ²
1.4.- Acabados:		
	Cerámica de piso:	0,016 T/m ²
1.5.- Instalaciones:		0,01 T/m ²
1.6.- Vigas y Columnas:		0,000 T/m ²
2.- Carga Viva (L):		
2.1.- Uso:	Vivienda	0,200 T/m ²
3.- Cargas Totales		
	D:	0,485 T/m ²
	L:	0,200 T/m ²

En el caso de la distribución de solicitaciones de carga se empleó el área colaborante del vano menos favorable.

Se considera el pórtico más cargado en el sentido localizado en el eje “X”. Las solicitaciones de carga para establecer serán:

- Carga Viva.
- Carga Muerta.
- Carga Sísmica.

4.2.4 Consideraciones geométricas y diseño de elementos

Como la presente tesis trata de comparar la aplicación de un material tradicional (hormigón) con un material innovador (geopolímero) se realizará esa comparativa en edificaciones aporricadas de concreto reforzado de la Ciudad de Riobamba, los pórticos que se analizarán están en el plano XZ.

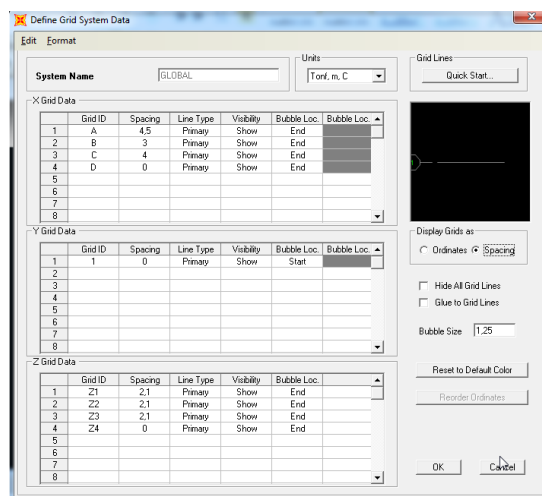
Si bien es cierto se trata de un modelo matemático considerado en el plano, la geometría en planta interviene en el análisis de cargas y disposición de los elementos estructurales, para el análisis en sí, se tomará en cuenta el vano más desfavorable.

4.3 Definición del modelo matemático de la edificación

Para el diseño del modelo matemático se debe especificar los ejes y las distancia entre ellos. De igual forma se define la altura de cada entrepiso. Y finalmente las unidades con las cuales se va a trabajar

- Unidades de fuerza = Toneladas fuerza.
- Unidades de longitud = metro

Figura 13 Ingreso de las distancias de ejes y alturas de entrepiso



Nota: Tomado de SAP 2000 v16

4.3.1 Definición del material a utilizar

Una vez definido las distancias entre ejes y el número de entrepisos de la edificación se procede a definir el material a utilizar en la estructura, para lo cual se realizaron los siguientes cálculos y posteriormente se introdujeron en el programa SAP 2000 v16.

4.3.1.1 Hormigón armado

Masa por unidad de volumen

Se incluyó el peso propio de la viga realizando el cálculo de la siguiente manera.

- Carga Permanente = CP

$$CP = D * \left(\frac{L1}{2} + \frac{L2}{2} \right) = 0.48 \frac{T}{m^2} * \left(\frac{4.50m}{2} + \frac{4.50m}{2} \right) = 2.18 \frac{T}{m}$$

$$Peso \ equiv = CP * Lviga = 2.18 \frac{T}{m} * 4.50 \ m = 9.8135 \ T$$

$$\frac{Peso \ equiv}{(b * h)viga} = \frac{9.8135 \ T}{0.25 * 0.30 \ m^2} = 130.842 \frac{T}{m^2}$$

$$Peso \ Específico = \frac{130.842 \ \frac{T}{m^2}}{4.50 \ m} + 2.4 \ \frac{T}{m^3} = 31.476 \ \frac{T}{m^3}$$

$$Masa = \frac{Punitario \ Conc}{Gravedad} = \frac{31,476}{9,8} = 3,212$$

Mediante una matriz de cálculo realizar en Excel se obtuvieron dos valores importantes, el peso y la masa específica para a continuación ingresar como dato en el programa de modelación estructural SAP 2000 V16.

Para realizar este cálculo es necesario tener varios valores entre los cuales encontramos: la carga muerta, las secciones de la viga y las propiedades del material como es: $f'c$ y fy .

Figura 14 Ingreso de las longitudes de ejes y elevaciones de entrepiso

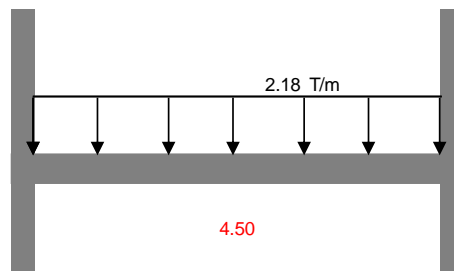
DATOS DE CARGA

D= 0.48 T/m²
L= 0.20 T/m²

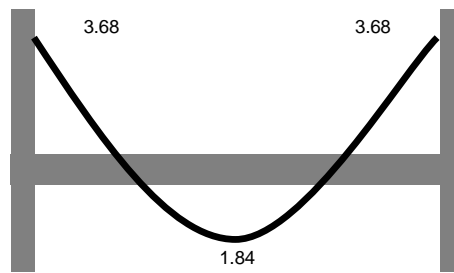
MATERIALES

f'c = 210 Kg/cm²
fy = 4200 Kg/cm²

EMPOTRADO-EMPOTRADO



CP= 2.18
L= 0.9



Mu = 3.68 T m
 ρb = 0.021423
 ρ_{max} = 0.010712
 ρ = 0.008034
SAP2000
b = 0.25 m
h = 0.30 m

Para SAP 2000:
 Pequiv = 9.81315
 39.253
 130.842
Wespec = 31.476
 Mespec = 3.212
 C = 0.112 CEC
 K = 1 CEC

Materialidad de los pórticos a analizar

Acero de refuerzo:

- Módulo de Fluencia: $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Hormigón Armado Tradicional.

- Resistencia a la compresión: $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$
- Peso específico: $\gamma_m = 2400 \text{ kg/m}^3$
- Módulo de corte: $G_c = 94508.9788 \text{ kg/cm}^2$

Cálculo de elasticidad y corte:

$$E'c = 15000\sqrt{f'c}$$

$$E'c = 15000\sqrt{210\text{kg/cm}^2}$$

$$E'c = 217370.6512 \text{ kg/cm}^2$$

$$G_c = \frac{E'c}{2(v + 1)}$$

$$G_c = \frac{217370.6512 \text{ kg/cm}^2}{2(0.15 + 1)}$$

$$G_c = 94508.9788 \text{ kg/cm}^2$$

Para el hormigón tradicional.

Para el ingreso del módulo de elasticidad, considerar la resistencia a la compresión medida con esclerómetro de la edificación analizada:

$$E = 15000 * \sqrt{(f'c) \frac{Kgf}{cm^2}} * 10 = \frac{Tnf}{m^2}$$

$$E = 15000 * \sqrt{(210) \frac{Kgf}{cm^2}} * 10 = 2173706,512 \frac{Tnf}{m^2}$$

Figura 15 Ingreso de las propiedades del Material-hormigón

The screenshot shows the 'Material Properties' dialog box in SAP 2000 v16. The fields are as follows:

- General Data:** Material Name and Display Color: ConViga; Material Type: Concrete; Material Grade: (empty); Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:** Weight per Unit Volume: 26.63; Mass per Unit Volume: 2.7155
- Units:** Tonf, m, C
- Isotropic Property Data:** Modulus Of Elasticity, E: 2173706.5; Poisson, U: 0.2; Coefficient Of Thermal Expansion, A: 9.900E-06; Shear Modulus, G: 905711.
- Other Properties For Concrete Materials:** Specified Concrete Compressive Strength, f_c: 880; Expected Concrete Compressive Strength: 880; Lightweight Concrete; Shear Strength Reduction Factor: (empty)
- Switch To Advanced Property Display
- Buttons: OK, Cancel

Nota: Tomado de SAP 2000 v16

4.3.1.2 Geopolímero

4.3.1.2.1 Materialidad con la aplicación de geopolímero de los pórticos a analizar

- Resistencia a la compresión: $f'_c = 14.1 \text{ MPa} = 143.78 \text{ kg/cm}^2$
- Peso específico: $\gamma_m = 2400 \text{ kg/m}^3$
- Módulo de elasticidad: $E'_c = 1798624,474 \text{ kg/cm}^2$

4.3.1.2.2 Módulo de elasticidad

Para el ingreso del módulo de elasticidad se considera la resistencia a la compresión del concreto elaborado con geopolímeros según estudios efectuados en el cual se toma la resistencia más alta de la cual se obtuvo los siguientes resultados:

$$E = 15000 * \sqrt{(f'c) \frac{Kgf}{cm^2} * 10} = \frac{Tnf}{m^2}$$
$$E = 15000 * \sqrt{(143,78) \frac{Kgf}{cm^2} * 10} = 1798624,474 \frac{Tnf}{m^2}$$

Figura 16 Ingreso de las propiedades del Material-geopolimero

Section	Property	Value
General Data	Material Name and Display Color	A615Gr60
	Material Type	Rebar
	Material Grade	1407124.728
Weight and Mass	Weight per Unit Volume	7.849
	Mass per Unit Volume	0.8004
Uniaxial Property Data	Modulus Of Elasticity, E	20389019
	Poisson, U	0
	Coefficient Of Thermal Expansion, A	1.170E-05
	Shear Modulus, G	
Other Properties For Rebar Materials	Minimum Yield Stress, Fy	42184.18
	Minimum Tensile Stress, Fu	63278.27
	Expected Yield Stress, Fye	48402.6
	Expected Tensile Stress, Fue	69603.89

Nota: Tomado de SAP 2000 v16

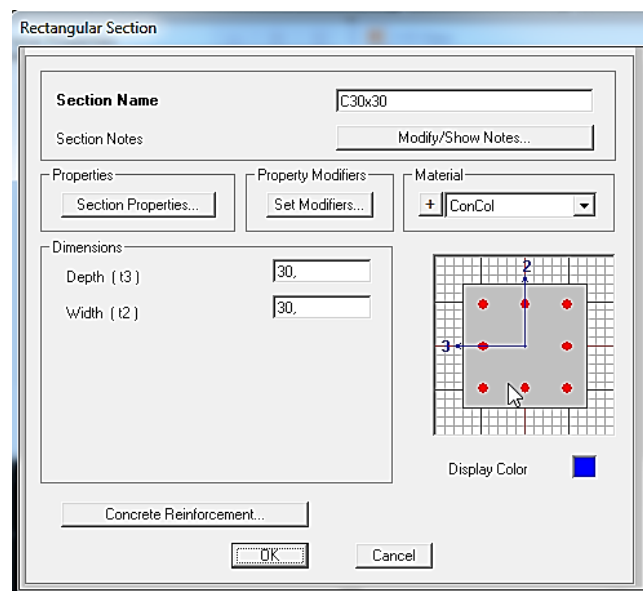
4.3.2 Definición de los elementos estructurales

Al concretar las características de los materiales, a continuación, se deben establecer las secciones con que está construida la edificación, donde las columnas y vigas tienen un recubrimiento de cinco centímetros, cumpliendo con lo establecido en la NEC-15.

4.3.2.1 Definición de elementos longitudinales (columnas)

Se establecieron columnas de acuerdo con las secciones que presentan las viviendas a analizarse, de acuerdo con el levantamiento y estudio levantado por (Noriega Rivera, 2013); y considerando la información provista por planos estructurales se asigna el armado que dispone el elemento estructural, de no disponer esta información se define según la cuantía mínima establecida en la normativa vigente.

Figura 17 Definición de la geometría de columnas



Nota: Tomado de SAP 2000 v16

$$A_s = 1\% (b * h) = 0.01 * (30 * 30)cm^2 = 9 cm^2 = 8 \phi 12mm$$

Figura 18 Ingreso del refuerzo longitudinal y confinamiento en la columna

Nota: Tomado de SAP 2000 v16

4.3.2.2 Definición de elementos transversales (vigas)

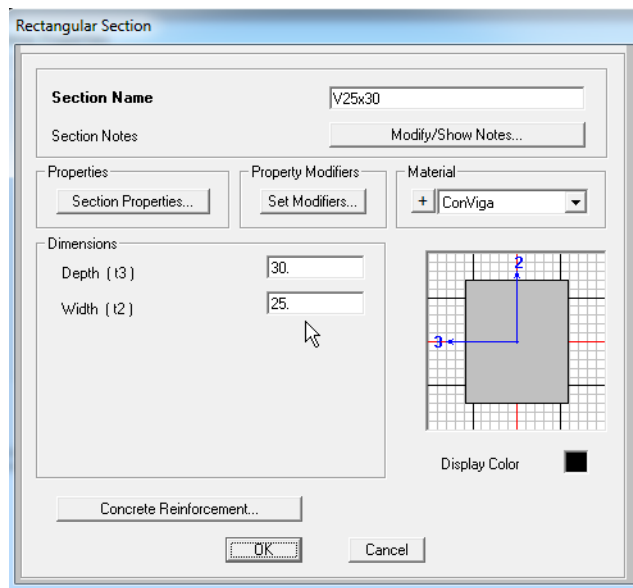
Se asignaron los elementos transversales (vigas) según las secciones de las edificaciones a analizarse, para su armado se toma en consideración la información provista en planos estructurales de acuerdo con el levantamiento y estudio levantado por (Noriega Rivera, 2013), en caso de no existir esta información se define según la cuantía mínima detallada en la norma NEC-15, a continuación, se tiene la sección con sus respectivas áreas de acero.

$$\rho_{\min} = \frac{14}{F_y} = \frac{14}{4200} = 0.0033$$

$$A_{s_{\min}} = \rho_{\min} * b * d$$

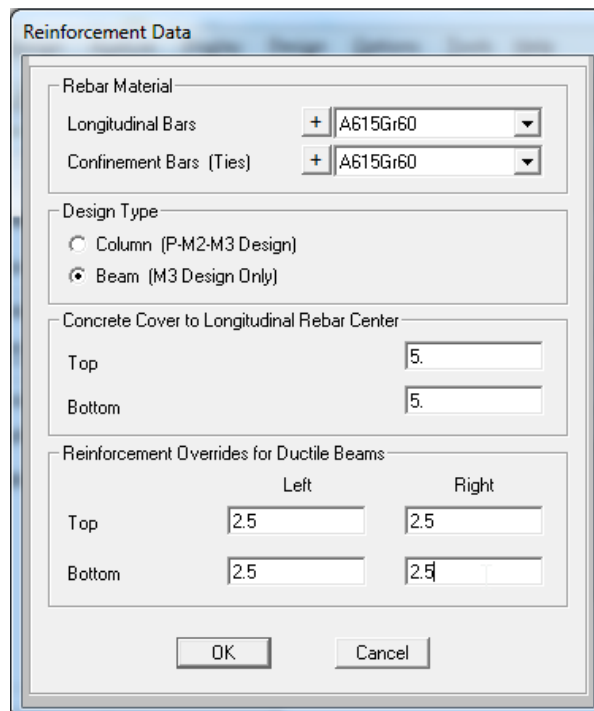
$$A_{s_{\min}} = 0.0033 * 25 * 30 = 2.5 \text{ cm}^2$$

Figura 19 Definición de las secciones de elementos transversales (vigas)



Nota: Tomado de SAP 2000 v16

Figura 20 Ingreso del refuerzo (acero superior e inferior en la viga)



Nota: Tomado de SAP 2000 v16

4.4. Creación de casos de cargas a aplicarse

Se crearon y generaron las cargas que actúan en la estructura de edificación en función de lo establecido en la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC-15).

- CM: Peso Propio de los elementos de la estructura.
- VIVA: Carga Variable (según uso de la estructura).

La carga viva que se asignarán a las vigas del pórtico es el que se calculó con la ayuda de una matriz de cálculo desarrollada en Microsoft Excel que se puede ver en la figura 18.

(L=0.9) que corresponde a una infraestructura de edificación.

- Cálculo de la carga viva:

L=Carga viva (vivienda)*área de aportación del pórtico

$$L = 0.20 \frac{T}{m^2} * \left(\frac{4.50}{2} + \frac{4.50}{2} \right) m = 0.90 \frac{T}{m}$$

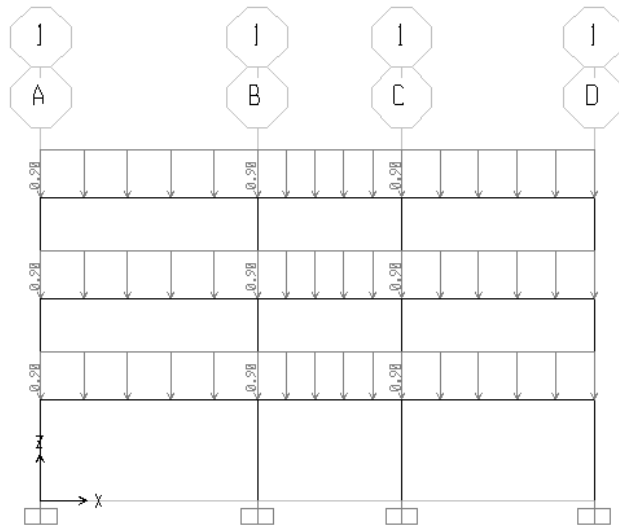
Para asignar la carga viva primero se debe seleccionar la viga del pórtico objeto de análisis para luego dar clic en el menú assign/Frame Loads/Distributed, elegir la carga viva e insertar su valor.

Figura 21 Ingreso de la carga viva

Load Pattern Name		Units	
+ VIVA		Tonf, m, C	
Load Type and Direction		Options	
<input checked="" type="radio"/> Forces <input type="radio"/> Moments		<input type="radio"/> Add to Existing Loads	
Coord Sys: GLOBAL		<input checked="" type="radio"/> Replace Existing Loads	
Direction: Gravity		<input type="radio"/> Delete Existing Loads	
Trapezoidal Loads			
1.	2.	3.	4.
Distance: 0.	0.25	0.75	1.
Load: 0.	0.	0.	0.
<input checked="" type="radio"/> Relative Distance from End-I		<input type="radio"/> Absolute Distance from End-I	
Uniform Load			
Load: 0.9		OK Cancel	

Nota: Tomado de SAP 2000 v16

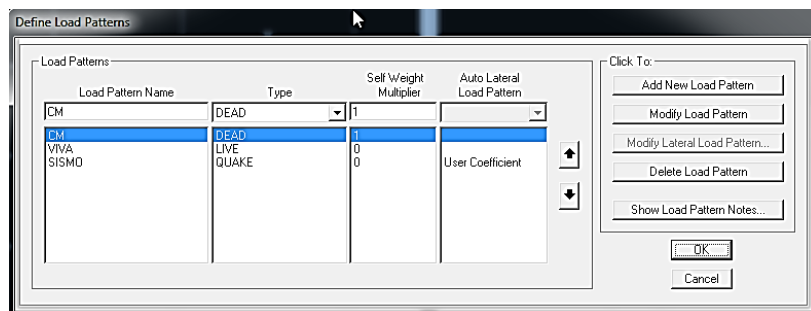
Figura 22 Pórtico con la carga viva asignada



Nota: Tomado de SAP 2000 v16

SISMO: Carga Lateral (carga requerida para ejecutar el análisis estático no lineal).

Figura 23 Casos de cargas ingresados



Nota: Tomado de SAP 2000 v16

Mediante la aplicación de los criterios establecidos en la NEC – 15, se realiza el cálculo de la fuerza sísmica para el pórtico.

$$V = \frac{I * S_a(T_a)}{R * \phi_p * \phi_e} * W$$

Por lo tanto, para nuestro análisis se tiene los siguientes factores, los cuales se desprenden de la consideración de la norma:

Tabla 15 Consideraciones para el cálculo del cortante basal de diseño

ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO EN ACELERACIONES (NEC-SE-DS)				
Parámetro	Variable	Valor	Unidades	Referencia
Factor de importancia	I	1.00	s.u	Tabla 6, Sec.4.1
Factor de reducción de respuesta	R	8.00	s.u	Tabla 15, Sec.6.3.4
Zonificación Sísmica		V		Tabla 1, Sec.3.1.1
Región del Ecuador	Sierra, Esmeraldas y Galápagos			Sec.3.3.1
Factor de aceleración de la zona sísmica	Z	0.40	s.u	Tabla 1, Sec.3.1.1
Relación de amplificación espectral	n	2.48	s.u	Sec.3.3.1
Coefficiente Ct	Ct	0.072	s.u	Sec.6.3.3
Altura total del elemento	hn	9.08	m	Planos
Coefficiente para Calculo de Periodo	α	0.80	s.u	Sec.6.3.3
Tipo de Suelo		D		Tabla 2, Sec.3.2.1
factor de sitio Fa	Fa	1.20	s.u	Tabla 3, Sec.3.2.2
factor de sitio Fd	Fd	1.19	s.u	Tabla 4, Sec.3.2.2
factor de comportam. inelástico suelo	Fs	1.28	s.u	Tabla 5, Sec.3.2.2
Factor asociado al periodo de retorno	r	1.00	s.u	Sec 3.3.1
Factor de irregularidad en planta	\emptyset_p	1.00	s.u	Tabla 13, Sec.5.2.3
Factor de irregularidad en elevación	\emptyset_e	1.00	s.u	Tabla 14, Sec.5.2.3
Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s ²	
Período teórico método 1	T1	0.42	seg.	Sec.6.3.3
Período teórico método 1 mayorado	T2	0.55	seg.	Sec.6.3.3
Período fundamental dirección x	Tx	0.44	seg.	ETABS
Período fundamental dirección y	Ty	0.43	seg.	ETABS
Periodo Límite en T=To	TO	0.25	seg.	Sec.3.3.1
Periodo Límite en T=Tc	TC	1.39	seg.	Sec.3.3.1
Periodo Límite en T=TL	TL	3.84	seg.	Sec.3.3.1
Aceleración en T=0	Sa	0.48	g	Sec.3.3.1
Aceleración en T=To	Sao	1.19	g	Sec.3.3.1
% de reducción de respuesta	f	0.13	s.u	

Nota: Tomado de Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC – 15)

Figura 24 Espectro

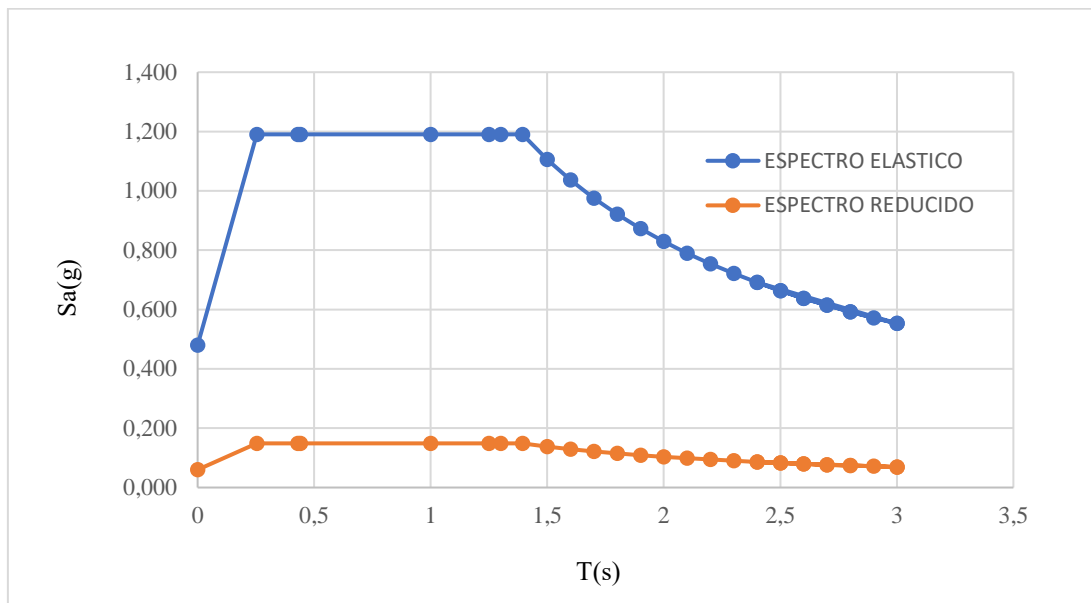
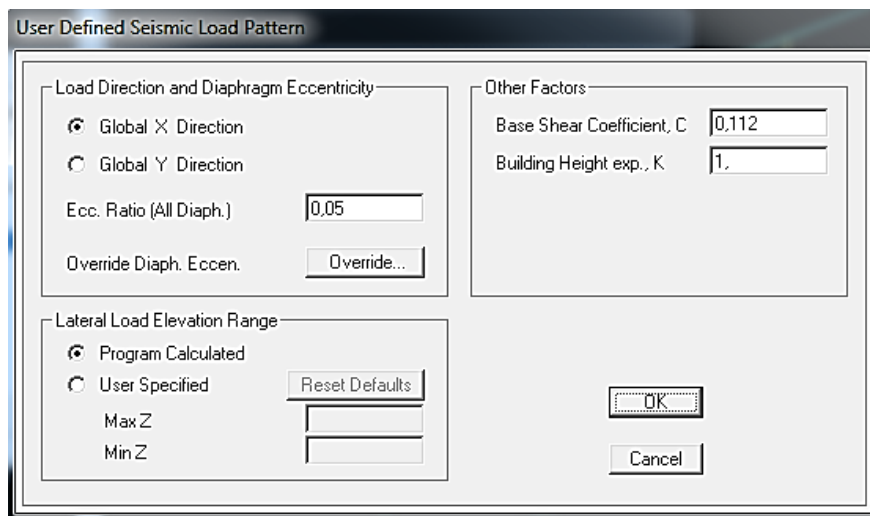


Figura 25 Casos de cargas ingresados

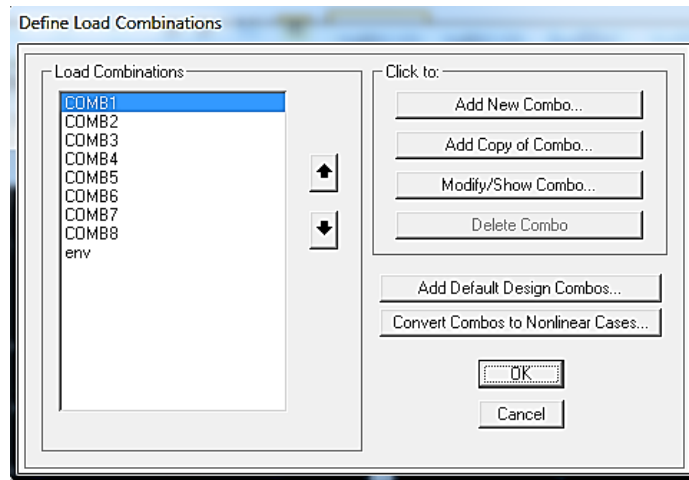


Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

4.5. Combinación de los casos de cargas

De acuerdo con lo establecido en la norma NEC-15, se generaron las combinaciones de carga, además se creó una envolvente con todas las combinaciones de los casos de cargas.

Figura 26 Combinación de cargas según Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 y creación de la envolvente



Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

4.6. Distribución de la carga lateral (Cortante Basal)

Tabla 16 Cálculo de la distribución del cortante basal para cada piso

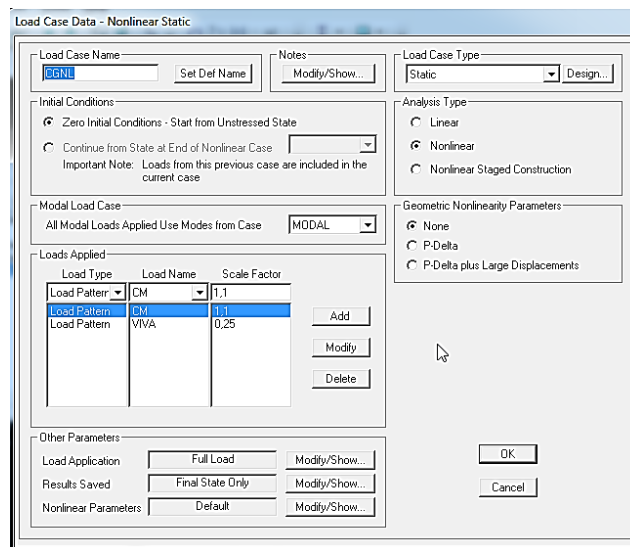
MÉTODO ESTÁTICO		
Ta	0.44	s
Sa		
(Ta)	1.190	g
I	1.00	s.u
R	8.00	s.u
Øp	1.00	s.u
Øe	1.00	s.u
Cv	0.149	s.u
k	0.97	

Cvx	0.149	s.u
Cvy	0.149	s.u
Kx	0.97	s.u
Ky	0.97	s.u

4.7 Generación del caso de carga no lineal

En la siguiente ilustración se muestran los casos de carga manejados en el análisis elástico lineal. Estos serán de provecho para convertir en casos no lineales.

Figura 27 Creación de la carga gravitacional no lineal (CGNL)



Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

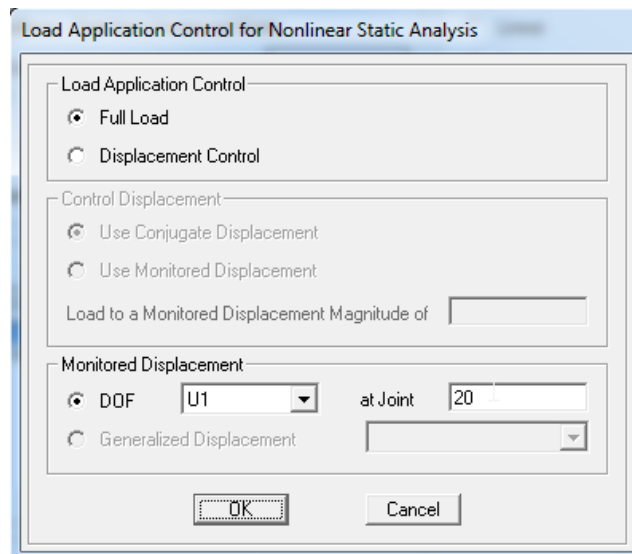
Primero se crea el caso de carga gravitacional no lineal (CGNL), para este caso conformado por la carga muerta y la carga viva. En la parte superior derecha, tipos de casos de carga (Load Case Type), se selecciona estático (Static), y en el tipo de análisis (Analysis Type) se escoge no lineal (Nonlinear).

Se colocan, en condiciones iniciales (initial conditions) se selecciona condiciones iniciales que parten de cero (zero initials conditions), ya que esta será la primera carga que afectará a la estructura.

En aplicación de cargas (Load Applied), se considera carga muerta (CM) con un factor de escala de 1.1 y para carga viva (VIVA) con un factor de escala 0.25, las demás opciones se dejan por defecto (default).

Para la carga gravitacional No Lineal se especifica “Full Load” debido a que no se realiza un control de desplazamiento.

Figura 28 Ingreso de la junta a monitorearse

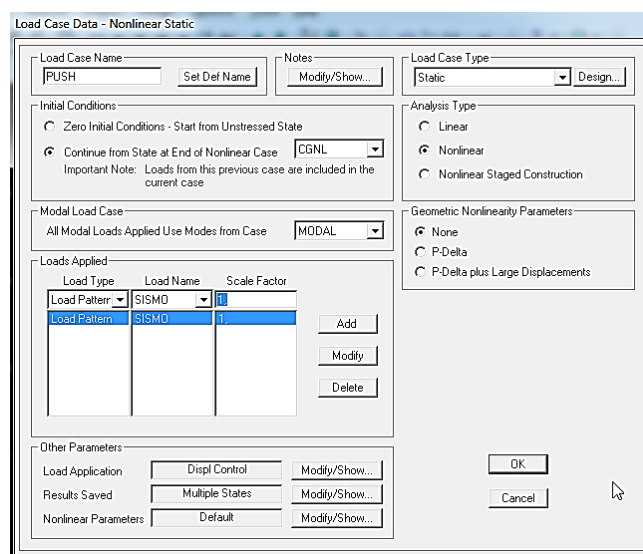


Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

4.8 Creación del caso Pushover

Se precisó un caso de carga estática no lineal llamada PUSH, según la carga sísmica anteriormente definida. Este caso trabaja como un estado tensional primario de la etapa final del estado de carga estático no lineal producto de las cargas aplicadas gravitacionalmente.

Figura 29 Creación del caso de carga Pushover (PUSH)



Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

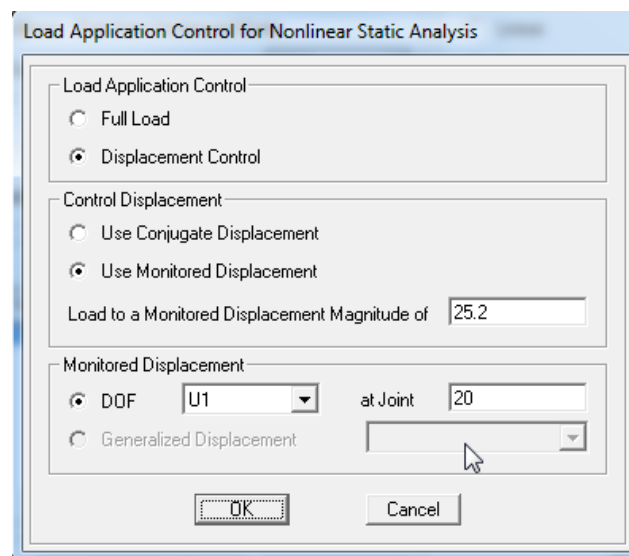
La aplicación de la carga sísmica creciente se define como controlada por el desplazamiento. El nudo de referencia corresponde al último nivel de toda la estructura estudiada (el nudo de referencia es el 20 como se indica en la figura 33), hasta alcanzar un desplazamiento total de 25.2 cm. Este valor se obtiene de aplicar el 4% de la altura total de la edificación.

$$\text{Desplaz. en la junta del ultimo piso} = 4\% * H_n$$

- H_n = altura total de la edificación
- $\Rightarrow H_n = 2.10 \text{ m} * 3 \text{ pisos} = 6.30 \text{ m}$

$$\text{Desplaz. en la junta del ultimo piso} = 4\% * 6.30 \text{ m} = 0.252 \text{ m} = 25.2 \text{ cm}$$

Figura 30 Ingreso del desplazamiento a monitorear en la junta del último piso



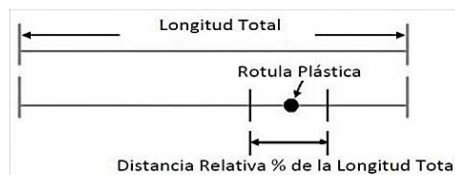
Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

Para llegar a un estudio decisivo del comportamiento de la estructura, se define múltiples estados a guardar durante el proceso del análisis del Pushover, esto permite percibir el proceso completo en cada una de sus fases.

4.8.1. Asignación de Rótulas Plásticas.

Para la asignación de la rotulas plásticas tanto en vigas y en columnas, se toma en consideración que a cada miembro se le asigna un valor unitario como 100% de inicio a fin de ese miembro. En el caso del presente trabajo de investigación se tomó un 10% para el punto inicial del miembro y 90% para el punto final.

Figura 31 Distancia relativa en porcentajes donde se formaran las rótulas plásticas



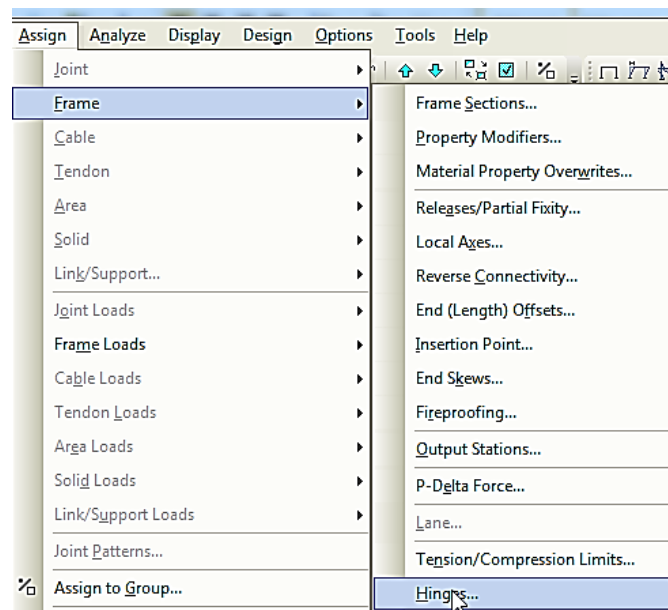
Nota: Tomado de Alemán- Naranjo (2011)

Para la asignación de las rótulas plásticas, se selecciona por separado las vigas y columnas.

4.8.2 Asignación automática de rótulas plásticas

Los valores de los parámetros numéricos a, b y c, y de aceptación IO, CP y LS, que definen la curva constitutiva de las rótulas plásticas por flexión son extraídos y calculados automáticamente según la tabla 6-7 del FEMA 356. A continuación, se ilustra el ingreso de las rótulas plásticas.

Figura 32 Para ingresar las rótulas: menú Assign/Frame/Hinges

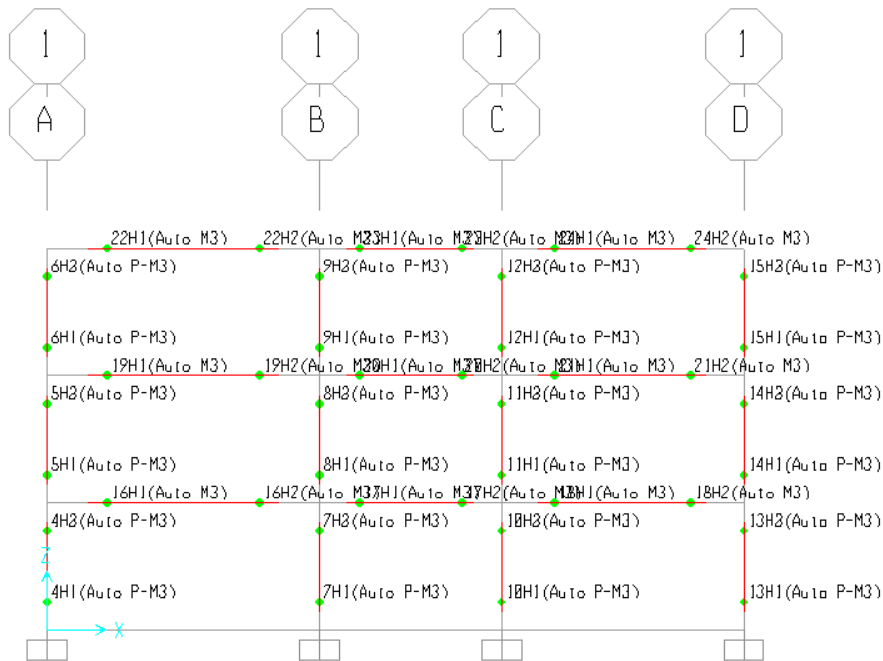


Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

Se asigna las rótulas plásticas en los extremos de la viga a un 10% para el punto inicial del miembro y 90% para el punto final. Se selecciona la tabla 6-7 que es para las vigas y en caso/combo y se señala CGNL.

Como resultado de la asignación de las rótulas plásticas tanto en vigas y columnas se tiene la siguiente figura.

Figura 33 *Rótulas Plásticas asignadas a vigas y columnas*



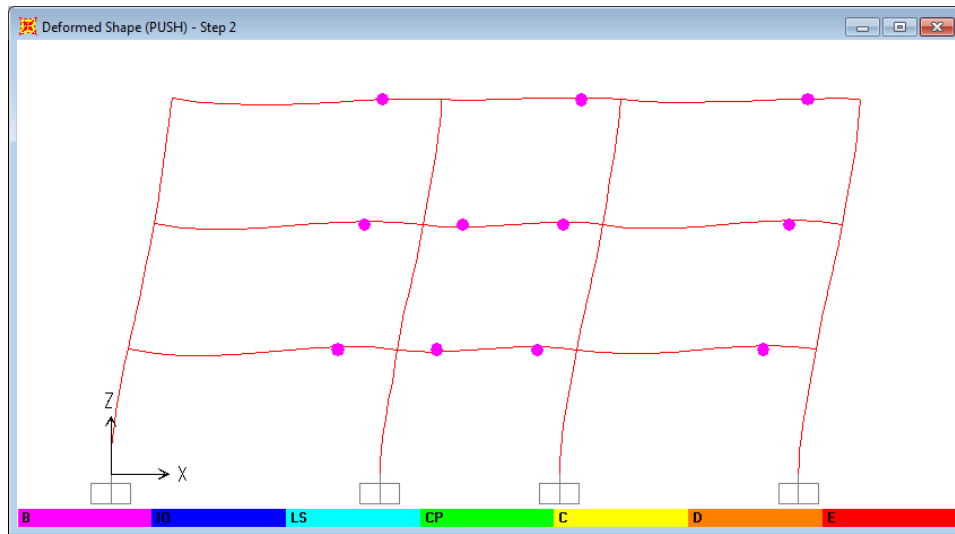
Nota: Tomado de SAP 2000 v16.

4.8.3 Aparición de las rótulas plásticas paso a paso.

Eligiendo el caso PUSH se estima que a medida que avanzan los pasos se siguen generando las rótulas plásticas en los elementos estructurales de la edificación con sus colores característicos, que indican el nivel de desempeño basado en el FEMA-356.

Figura 34 Rótulas plásticas en el paso 2. (Las vigas están en el nivel de Cedencia:

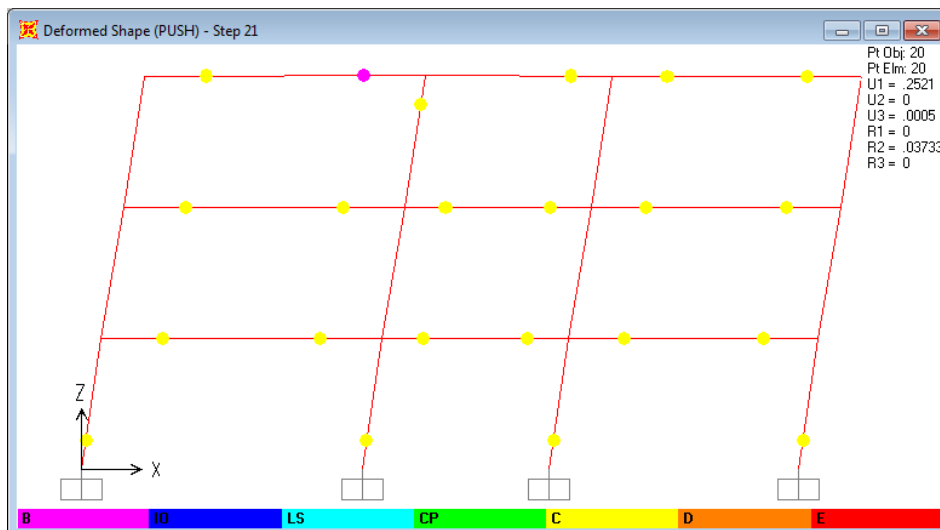
Color Lila)



Nota: Tomado de SAP 2000 V16

Figura 35 Rótulas plásticas en el paso 21. (Al alcanzar el desplazamiento indicado

en el nudo de referencia, todas las vigas y columnas desarrollan su Capacidad Última: Color Amarillo.)



Nota: Tomado de SAP 2000 V16

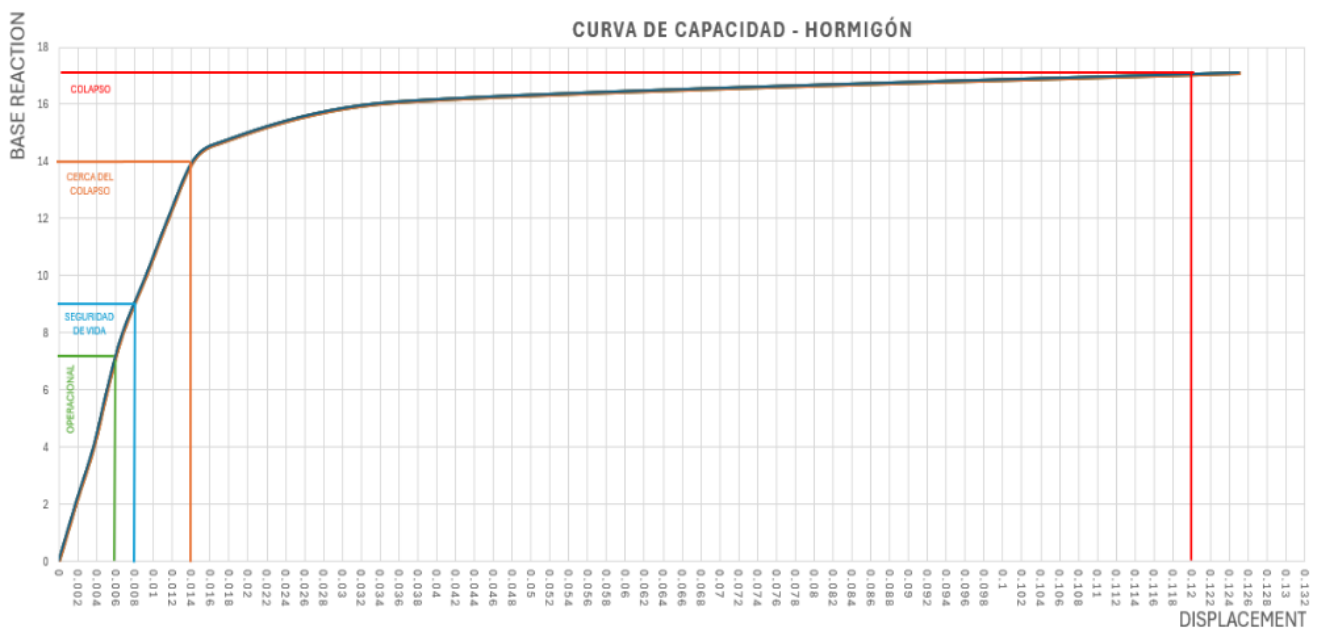
4.9 Curva de capacidad

4.9.1 Hormigón armado

Luego de haber ejecutado el Análisis del pórtico, SAP 2000 v16 nos provee de una herramienta muy útil que es Show Static Pushover Curve, la cual presenta la curva de capacidad, es decir una gráfica Cortante Basal vs. Desplazamiento Controlado.

En la siguiente imagen se muestra cual fue la capacidad de la estructura y de la misma manera en qué punto pasa a convertirse del comportamiento elástico al inelástico en un pórtico con hormigón tradicional.

Figura 36 Curva de capacidad sectorizada del hormigón de acuerdo a la norma visión 2000

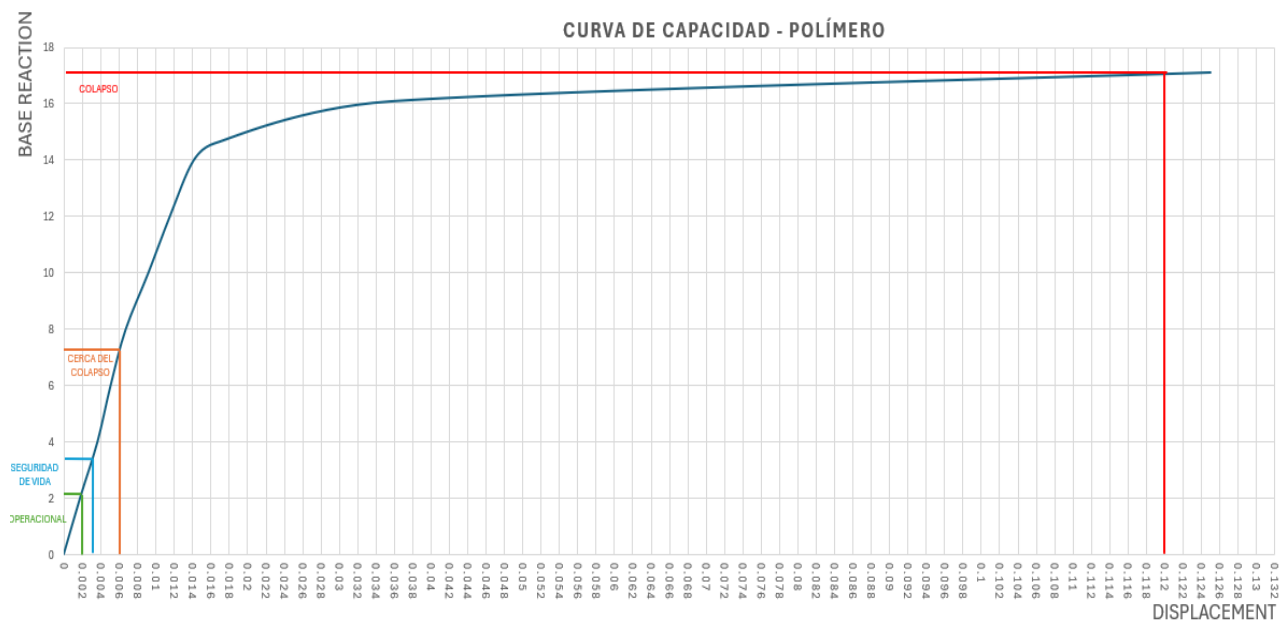


4.9.2 Geopolímero

Luego de haber ejecutado el Análisis del pórtico, SAP 2000 v16 nos provee de una herramienta muy útil que es Show Static Pushover Curve, la cual presenta la curva de capacidad, es decir una gráfica Cortante Basal vs. Desplazamiento Controlado.

En la siguiente imagen se muestra cual fue la capacidad de la estructura y de la misma manera en qué punto pasa a convertirse del comportamiento elástico al inelástico en un pórtico con geopolímeros.

Figura 37 Curva de capacidad sectorizada del geopolímero de acuerdo a la norma visión 2000



4.10. Cálculo de la ductilidad característica.

Para el cálculo de la ductilidad es necesario obtener los puntos de la condición cedente (Limite Plástico) y la condición última (Limite Inelástico). Estos valores son obtenidos de la curva presentada anteriormente:

Tabla 17 Características de pórtico y cálculo de la ductilidad

$$u = \frac{U_u}{U_y} = \frac{13.78 \text{ cm}}{2.32 \text{ cm}} = 5.94$$

MODELO	A (m)	B (m)	C (m)	Z (m)	SECC. VIGA		SECC. COLUMNA		CONDICION CEDENTE (Y)		CONDICION ULTIMA (U)		$\mu=U_u/U_y$
					b (m)	h (m)	b (m)	h (m)	desplaz. (cm)	cortante (t)	desplaz. (cm)	cortante (t)	
11.21	4.50	3.00	4.00	2.1	0.25	0.30	0.30	0.30	2.32	17.58	13.78	18.46	5.94

Fuente: Hoja de cálculo "Cálculo de Ductilidad"

4.10.1. Clasificación por ductilidad

En estos procedimientos de evaluación, la capacidad de ductilidad y la demanda se clasifica como bajo, moderado o alto.

La siguiente relación aproximada puede ser asumida:

Tabla 18 Clasificación de ductilidad

<u>CLASIFICACIÓN</u>	<u>DUCTILIDAD</u>
BAJO	$u < 2$
MODERADO	$2 \leq u \leq 4$
ALTO	$u > 4$

Fuente: FEMA 273, Tabla 6-5

Los resultados se muestran en la tabla 19 y 20:

Tabla 19 Ductilidades de los pórticos del modelo – Hormigón Tradicional.

MODELO	SECC. VIGA				SECC. COLUMNA				CONDICION CEDENTE (Y)		CONDICION ULTIMA (U)		DUCTILIDAD	CONDICIÓN
	A (m)	B (m)	C (m)	Z (m)	b (m)	h (m)	b (m)	h (m)	desplaz. (cm)	cortante (t)	desplaz. (cm)	cortante (t)		
11.1	3.87	3.77	3.67	2.05	0.20	0.30	0.30	0.25	1.15	11.09	4.04	12.76	3.51	MODERADO
11.2	2.50	3.50	4.50	2.10	0.25	0.30	0.30	0.30	1.33	15.32	10.55	16.62	7.90	ALTO
11.3	2.50	3.50	4.50	2.10	0.25	0.35	0.35	0.35	1.11	21.46	6.45	23.04	5.80	ALTO
11.4	2.80	4.50	3.00	2.40	0.20	0.30	0.25	0.25	2.54	14.25	16.26	14.97	3.61	MODERADO
11.5	2.50	2.70	2.90	2.15	0.20	0.25	0.25	0.25	1.81	5.05	11.12	9.73	6.13	ALTO
11.6	2.80	4.50	3.00	2.25	0.25	0.30	0.30	0.35	2.00	17.86	11.41	19.48	5.70	ALTO
11.7	2.50	2.60	2.80	2.35	0.20	0.30	0.25	0.30	1.45	11.31	7.03	12.56	4.85	ALTO
11.8	3.00	2.50	3.00	2.55	0.20	0.25	0.25	0.25	2.57	7.72	16.47	8.20	6.41	ALTO
11.9	2.50	2.50	2.50	2.20	0.20	0.25	0.25	0.25	1.61	8.49	8.61	9.35	3.82	MODERADO
11.10	2.90	2.60	3.20	2.50	0.20	0.25	0.25	0.25	2.73	8.13	16.78	8.48	6.15	ALTO
11.11	2.50	3.20	4.50	2.30	0.25	0.35	0.35	0.30	1.82	20.07	9.66	22.25	5.32	ALTO
11.12	2.80	3.00	3.20	2.20	0.20	0.30	0.25	0.30	1.63	12.78	8.56	13.79	3.70	MODERADO
11.13	2.50	2.70	2.90	2.30	0.20	0.25	0.30	0.25	1.93	8.68	12.32	9.41	6.40	ALTO
11.14	2.80	3.10	3.30	2.15	0.25	0.30	0.30	0.30	1.49	15.82	6.85	17.37	4.58	ALTO
11.15	3.40	3.60	3.80	2.40	0.20	0.35	0.25	0.35	1.89	16.42	10.63	17.49	5.62	ALTO
11.16	3.60	2.60	4.20	2.55	0.25	0.30	0.30	0.35	2.31	15.89	14.05	17.26	6.08	ALTO
11.17	3.20	2.50	4.00	2.45	0.20	0.30	0.30	0.30	2.25	12.76	15.46	13.72	6.87	ALTO
11.18	3.20	4.50	3.20	2.20	0.25	0.35	0.35	0.35	1.64	23.04	7.97	24.66	4.87	ALTO
11.19	3.10	3.30	2.80	2.30	0.25	0.30	0.30	0.30	1.43	13.87	9.84	15.03	6.88	ALTO
11.20	2.80	3.20	3.40	2.45	0.25	0.30	0.30	0.30	1.93	14.14	10.08	15.46	2.80	MODERADO
11.21	4.50	3.00	4.00	2.1	0.25	0.30	0.30	0.30	2.32	17.58	13.78	18.46	5.94	ALTO
11.22	2.50	2.90	3.00	2.3	0.20	0.25	0.25	0.25	2.46	8.94	15.25	22.83	3.18	MODERADO
11.23	3.30	4.50	3.30	2.2	0.25	0.30	0.30	0.30	2.39	16.80	14.93	17.54	6.24	ALTO
11.24	3.30	4.50	3.30	2.2	0.25	0.35	0.35	0.35	1.81	23.37	10.02	25.00	5.54	ALTO
11.25	4.50	2.50	4.50	2.55	0.20	0.30	0.30	0.30	3.61	12.81	18.19	13.07	5.04	ALTO
11.26	4.50	2.50	4.50	2.55	0.25	0.35	0.40	0.40	1.97	23.09	10.03	24.88	5.08	ALTO

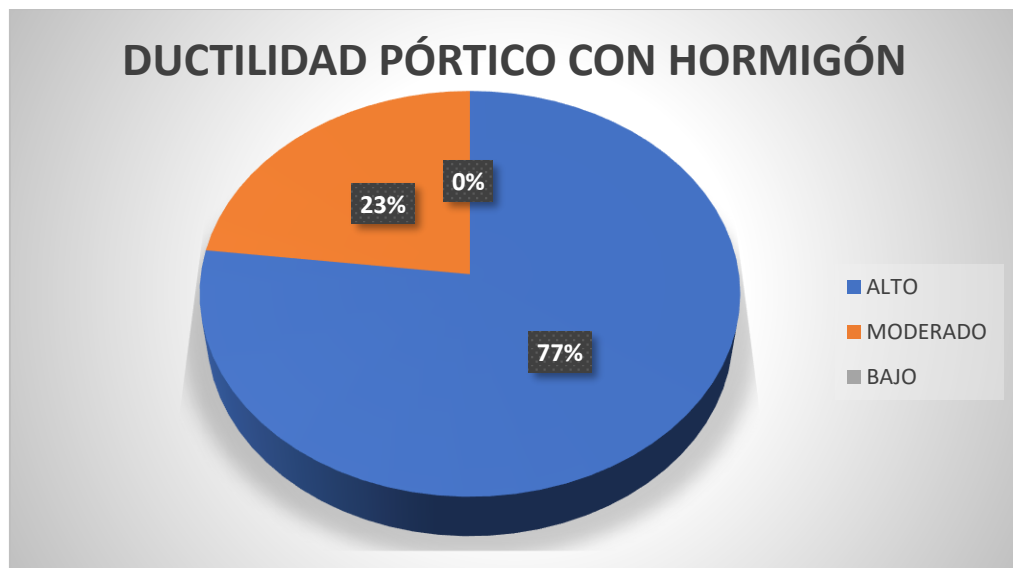
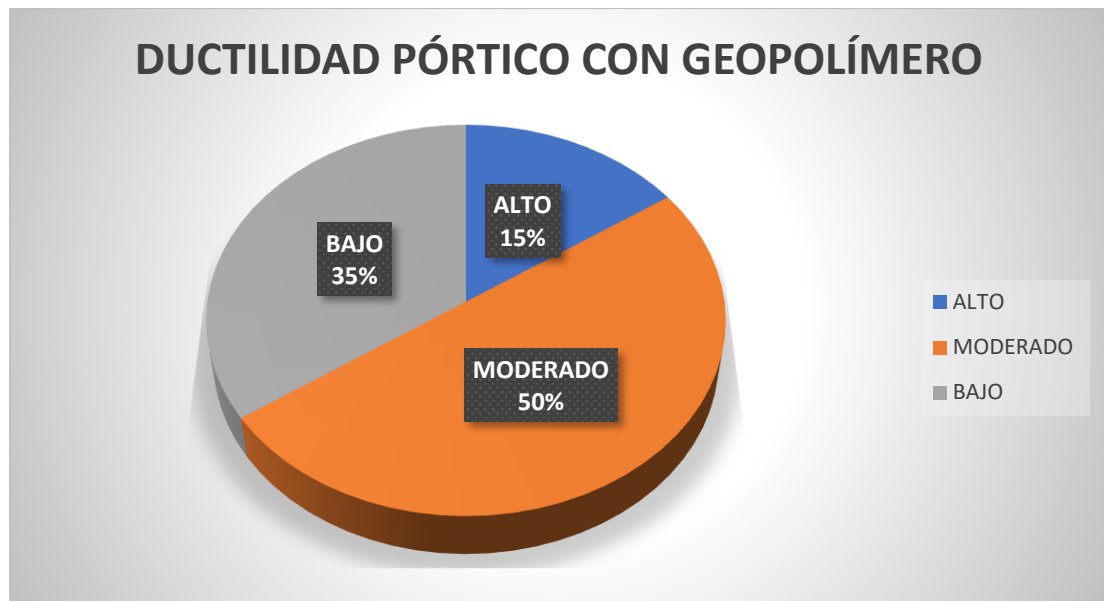


Tabla 20 Ductilidades de los pórticos del modelo – Geopolímero.

MODELO	A (m)	B (m)	C (m)	Z (m)	SECC. VIGA		SECC. COLUMNA		CONDICION CEDENTE (Y)		CONDICION ULTIMA (U)		DUCTILIDAD	CONDICIÓN
					b (m)	h (m)	b (m)	h (m)	desplaz. (cm)	cortante (t)	desplaz. (cm)	cortante (t)		
11.1	3.87	3.77	3.67	2.05	0.20	0.30	0.30	0.25	0.85	11.09	2.32	12.76	2.73	MODERADO
11.2	2.50	3.50	4.50	2.10	0.25	0.30	0.30	0.30	1.79	15.32	8.34	16.62	4.66	ALTO
11.3	2.50	3.50	4.50	2.10	0.25	0.35	0.35	0.35	0.55	21.46	1.03	23.04	1.87	BAJO
11.4	2.80	4.50	3.00	2.40	0.20	0.30	0.25	0.25	1.67	14.25	6.45	14.97	3.61	MODERADO
11.5	2.50	2.70	2.90	2.15	0.20	0.25	0.25	0.25	1.81	5.05	0.72	9.73	0.40	BAJO
11.6	2.80	4.50	3.00	2.25	0.25	0.30	0.30	0.35	0.46	17.86	1.79	19.48	3.89	MODERADO
11.7	2.50	2.60	2.80	2.35	0.20	0.30	0.25	0.30	0.94	11.31	4.44	12.56	4.72	ALTO
11.8	3.00	2.50	3.00	2.55	0.20	0.25	0.25	0.25	1.08	7.72	10.68	8.20	9.89	ALTO
11.9	2.50	2.50	2.50	2.20	0.20	0.25	0.25	0.25	2.50	8.49	3.44	9.35	3.82	MODERADO
11.10	2.90	2.60	3.20	2.50	0.20	0.25	0.25	0.25	1.28	8.13	3.88	8.48	3.03	MODERADO
11.11	2.50	3.20	4.50	2.30	0.25	0.35	0.35	0.30	1.02	20.07	4.50	22.25	4.41	ALTO
11.12	2.80	3.00	3.20	2.20	0.20	0.30	0.25	0.30	1.30	12.78	3.68	13.79	3.70	MODERADO
11.13	2.50	2.70	2.90	2.30	0.20	0.25	0.30	0.25	1.08	8.68	2.63	9.41	2.44	MODERADO
11.14	2.80	3.10	3.30	2.15	0.25	0.30	0.30	0.30	1.49	15.82	2.00	17.37	1.34	BAJO
11.15	3.40	3.60	3.80	2.40	0.20	0.35	0.25	0.35	1.89	16.42	3.00	17.49	1.58	BAJO
11.16	3.60	2.60	4.20	2.55	0.25	0.30	0.30	0.35	2.31	15.89	5.00	17.26	2.16	MODERADO
11.17	3.20	2.50	4.00	2.45	0.20	0.30	0.30	0.30	2.25	12.76	4.00	13.72	1.78	BAJO
11.18	3.20	4.50	3.20	2.20	0.25	0.35	0.35	0.35	1.64	23.04	3.00	24.66	1.83	BAJO
11.19	3.10	3.30	2.80	2.30	0.25	0.30	0.30	0.30	1.43	13.87	5.00	15.03	3.50	MODERADO
11.20	2.80	3.20	3.40	2.45	0.25	0.30	0.30	0.30	1.93	14.14	8.00	15.46	2.80	MODERADO
11.21	4.50	3.00	4.00	2.1	0.25	0.30	0.30	0.30	2.32	17.58	6.00	18.46	2.58	MODERADO
11.22	2.50	2.90	3.30	2.3	0.20	0.25	0.25	0.25	2.46	8.94	0.80	22.83	3.18	MODERADO
11.23	3.30	4.50	3.30	2.2	0.25	0.30	0.30	0.30	2.39	16.80	4.00	17.54	1.67	BAJO
11.24	3.30	4.50	3.30	2.2	0.25	0.35	0.35	0.35	1.81	23.37	3.50	25.00	1.94	BAJO
11.25	4.50	2.50	4.50	2.55	0.20	0.30	0.30	0.30	3.61	12.81	2.50	13.07	0.69	BAJO
11.26	4.50	2.50	4.50	2.55	0.25	0.35	0.40	0.40	1.97	23.09	4.50	24.88	2.28	MODERADO



4.11. Discusión

De los resultados obtenidos se puede evidenciar un comportamiento adecuado por parte del pórtico en donde se aplica la modelación de un geopolímero, se realiza la evaluación de acuerdo al comportamiento dúctil de estos pórticos. Del cual se obtiene una ductilidad alta en un 15% para el geopolímero vs 77% de los pórticos tradicionales de hormigón armado, si bien existe una brecha importante aún, los pórticos que presentaron una ductilidad baja son mínimos, lo que no indica que puede llegar a ser factible la aplicación de este material con un desarrollo adicional que permita acortar aún más la diferencia entre los materiales tradicionales utilizados en la construcción actualmente.

De la misma forma analizando la curva de capacidad de los dos elementos, se mantiene la tendencia que el hormigón presenta un comportamiento favorable con mejores prestaciones, tal es así que de acuerdo con el esfuerzo al que es sometido el pórtico presenta un mayor desplazamiento en el rango elástico, lo que nos demuestra que pueden soportar mayores licitaciones de carga, deformarse y volver a su estado original. Aplicando la normativa visión 2000 tenemos valores en el hormigón que se encuentran dentro de la zona Operacional y seguridad de vida en rangos mucho más amplios que el geopolímero.

Estos resultados nos muestran el desarrollo y conocimiento mas amplio que tiene el material hormigón, si bien el geopolímero arroja valores bajos en comparación al material tradicional nos muestra importantes avances en el desarrollo del mismo y resultados que nos hacen pensar que con un mayor estudio e investigación se puede alcanzar un mejor comportamiento y aplicaciones reales en infraestructuras de la industria de la construcción que necesita de nuevos materiales por la carencia de los materiales tradicionales.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se analizó el desempeño de un geopolímero en el rango no lineal, teniendo valores de ductilidad menores a los obtenidos por el hormigón tradicional, de la totalidad de pórticos analizados el 15% alcanza una ductilidad alta vs el 77% de ductilidad alta en pórticos de hormigón tradicional.
- Se aplicó la metodología Pushover, en pórticos de edificaciones reales de la ciudad de Riobamba en los cuales se determina el comportamiento de un geopolímero como sustituto de cemento en la formación de un hormigón y su capacidad frente a solicitaciones de carga que establecen en el marco normativo vigente, del cual podemos establecer que si bien tiene un comportamiento adecuado no alcanza a un comportamiento óptimo en comparación con el hormigón.
- De acuerdo con la curva de capacidad obtenidas, los pórticos de hormigón presentan mayor desplazamiento de acuerdo a la carga lateral aplicada, lo que nos indica que dicho material presenta un mejor comportamiento frente a eventos sísmicos, caso contrario, los pórticos con geopolímeros presentan un menor desplazamiento por tal razón son más vulnerables ante eventos sísmicos ya que sus elementos presentan fallas y condición de cedencia en los primeros modos de vibración.
 - En resumen, los geopolímeros ofrecen ventajas en términos de durabilidad ambiental y reducción de la huella de carbono, pero pueden ser más costosos y requerir técnicas de producción más especializadas. El hormigón tradicional, por otro lado, es más económico y tiene una larga historia de aplicación y estándares bien establecidos y un comportamiento más confiable en zonas de alto riesgo sísmico.

5.2 Recomendaciones

- Para obtener resultados de mayor fiabilidad se recomienda realizar un análisis dinámico que nos permita identificar los puntos fuertes de la aplicación de un geopolímero como sustituto del cemento Portland.
- Analizar nuevas zonas que tengan otras condiciones de suelo y riesgo sísmico donde se pueda evaluar el comportamiento de este material, en los cuales se podría tener un mejor desempeño.
- Realizar ensayos y probar la aplicación de otros materiales como ceniza o escorias, con la finalidad que puedan otorgar otras características de desempeño al hormigón

BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, G. E. (2012). *Caracterización de geopolímeros base ceniza volante y escoria granulada de alto horno*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Ahlstrom, G. (2019). Soluciones para una pavimentación ecológica y materiales sostenibles. *World Road Association* , 62.
- Albornoz, J. F. (2015). *Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile*. Universidad de Chile.
- Alcazar, M., Alvarez, C., Escrivá, G., & Domijan, A. (2012). Evaluation and assessment of demand response potential applied to the meat industry. pág. 92.
- Andrade Valle, C. C. (2024). Use of pumice stone and silica fume as precursor material for the design of a geopolymer. *Universidad Nacional de Chimborazon*, 26.
- Assaedi, H., Shaikh, F., & baja, I. (2016). Influence of mixing methods of nano silica on the microstructural and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 541–552.
- Collins, F., & Sanjayan, J. (2000). Cracking tendency of alkali-activated slag concrete subjected to restrained shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 791-798.
- Davidovits, J. (1978). Geopolymer: Chemistry and Applications. *Institute Geopolymer*.
- Davidovits, J. (1994). PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS GEOPOLÍMEROS. págs. 131-149.
- Ghosh, P., & Ghosh, S. (2009). Acid Resistance of Fly ash based Geopolymer mortars . *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 36-40.

- González Acuña, R. (2012). Caracterización de Geopolímeros base ceniza volante y escoria granulada de alto horno. *Monterrey Nuevo Leon* , 92.
- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development. *Journal of Materials Science*, 729–746.
- Medina, R. (2018). Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado en base a muros de hormigón armado y diseñado según normativa chilena. *Obras y Proyectos* , 20.
- Montagud, J. T. (2018). *La necesidad de nuevos hormigones para una construcción más sostenible: LOS GEOPOLIMEROS*. Universidad Técnica de Valencia.
- Noriega Rivera, D. (2013). Determinación del nivel de desempeño teórico de estructuras de edificación aporricadas de hormigón armado de la ciudad de Riobamba. *Universidad Nacional de Chimborazo*, 161.
- Omeman, Z., & Nehdi, M. (2007). El cemento de geopolímeros en el hormigón. *Dialnet*, 4-19.
- PRIMAC, G. (S.F). Obtenido de <https://www.grupoprimal.com/piedra-pomez-agregado-ligero>
- Refractory, R. (11 de abril de 2021). Obtenido de <https://roka-refractory.com/es/piedra-pomez-o-piedra-de-lava/>
- Salirrosas Tanta, J. (2020). *GEOPOLÍMEROS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN: APLICACIONES CON CENIZA VOLANTE Y PUZOLANA NATURAL*. LIMA, PERU: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE PERU.

Torres, A. G. (2017). *Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland.*

Universidad Nacional de Colombia.

Trindade, A. C., Borges, P. H., & Silva, F. d. (2018). MECHANICAL RESPONSE OF GEOPOLYMER COMPOSITES REINFORCED WITH DISTINCT TYPES OF FIBERS. 505-512.

Vasco López, P. (2016). Sismo resistencia en edificios de hormigón y acero para zonas de alta peligrosidad sísmica en el Ecuador. *Universidad Técnica de Ambato*, 94.