

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO Y MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS  
VIVIENDAS DE EMERGENCIA TECHO EN LAS LOCALIDADES CIUDAD BOLIVAR Y  
USME DE BOGOTÁ D.C.



KEVIN FERNANDO PÁRAMO CRUZ  
LIZETH FERNANDA VILLEGAS ZULUAGA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ  
2021

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO Y MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS  
VIVIENDAS DE EMERGENCIA TECHO EN LAS LOCALIDADES CIUDAD BOLIVAR Y  
USME DE BOGOTÁ D.C.



KEVIN FERNANDO PÁRAMO CRUZ  
LIZETH FERNANDA VILLEGAS ZULUAGA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:  
OSCAR CONTRERAS BEJARANO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ  
2021



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



**No Comercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**Sin Derivadas** — Si [remezcla](#), [transforma](#) o [crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente](#) a otras a [hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 25 de junio 2021

## RESUMEN

Esta investigación se basa en la ejecución del análisis estático no lineal Pushover a una estructura que maneja la fundación Techo, la cual busca brindar refugio a través de programas de vivienda de emergencia a las comunidades vulnerables de Bogotá D.C. en las localidades de Ciudad Bolívar y Usme. Esta investigación tiene la finalidad de establecer alternativas estructurales que mejoren el desempeño de la estructura frente a eventualidades sísmicas. El análisis estático no lineal se realiza mediante el software OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation) del cual se obtienen las curvas de capacidad, a su vez el decreto de microzonificación sísmica de Bogotá sirvió de apoyo para la determinación de las curvas de demanda de los suelos que cobijan las zonas mencionadas con anterioridad. Los resultados evidencian que el sistema estructural que maneja Techo no es adecuado frente a acontecimientos que requieran estabilidad estructural en relación a movimientos del suelo, por otro lado se demuestra la superioridad de una alternativa basada en arriostradores la cual mejora el desempeño de la estructura actual, representando una opción para la modificación de la misma considerando fuerza sísmica.

## **DEDICATORIA**

A Dios por mantenernos vivos y con ganas de seguir adelante, a nuestros padres quienes nos dieron la vida y aquellos que también como si fueran nuestros padres han estado a nuestro lado incondicionalmente, a nuestros compañeros, nuestros maestros y amigos, en especial al ingeniero Oscar Contreras quien siempre estrecho sus manos para brindarnos su ayuda y consejos.

Una especial dedicación a mi tío Orley Cardona quien desde el cielo guiará mis pasos en el camino del bien.

A todos se los agradecemos desde lo más profundo de nuestros corazones, y por todos ellos hacemos esta dedicatoria.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar queremos agradecer a Dios por permitirnos estar vivos, seguidamente a nuestro tutor Oscar Contreras, quien a partir de sus conocimientos y apoyo nos guio a través de las diferentes etapas del trabajo de grado para alcanzar los resultados que se buscaban.

También queremos agradecer a los ingenieros Yelinca Saldeño y Camilo Torres por brindarnos la oportunidad de orientar nuestro proyecto en el entorno del aporte estructural en programas de desarrollo social en términos de necesidades habitacionales. Además damos gracias al ingeniero Camilo Higuera quien en su momento nos apoyó cuando lo necesitamos y nos dio sus consejos y conocimientos.

Por ultimo queremos agradecer a nuestros compañeros y a nuestras familias, por su incondicional apoyo en los momentos en que los ánimos bajaban por naturaleza humana. En especial queremos mencionar a nuestros padres, quienes siempre estuvieron ahí para darnos palabras de apoyo.

¡Muchas gracias a todos!

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b>	<b>17</b>
2.1. ANTECEDENTES . . . . .	17
2.2. JUSTIFICACIÓN . . . . .	20
<b>3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>25</b>
<b>4. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>30</b>
4.1. MARCO TEÓRICO . . . . .	30
4.1.1. Determinación de la capacidad de una estructura . . . . .	30
4.1.2. Demanda sísmica NSR-10 . . . . .	31
4.1.3. Espectro de capacidad . . . . .	33
4.1.4. Punto de desempeño . . . . .	38
4.1.5. Validez del modelo planteado . . . . .	40
4.2. MARCO CONCEPTUAL . . . . .	51
<b>5. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>58</b>
<b>6. OBJETIVOS</b>	<b>64</b>
6.1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	64
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	64
<b>7. ALCANCES Y LIMITACIONES</b>	<b>65</b>
7.1. ALCANCES . . . . .	65
7.2. LIMITACIONES . . . . .	65
<b>8. METODOLOGÍA</b>	<b>67</b>
8.1. PROCESO METODOLÓGICO . . . . .	67
8.1.1. Fase 1. Recolección de información sobre las características por analizar de la estructura. . . . .	68
8.1.2. Fase 2. Modelación de Opensees. . . . .	68



8.1.3. Fase 3. Análisis punto de desempeño. . . . .	70
8.1.4. Fase 4. . . . .	72
8.1.5. Fase 5. . . . .	72
8.1.6. Fase 6. . . . .	72
8.1.7. Fase 7. . . . .	72
8.1.8. Fase 8. . . . .	72
<b>9. DESCRIPCIÓN DEL MODELO</b>	<b>73</b>
9.1. PROYECTO TECHO . . . . .	73
9.2. VIVIENDAS DE EMERGENCIA . . . . .	75
<b>10. MODIFICACIONES AL MODELO</b>	<b>82</b>
10.1. AMPLIACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL . . . . .	82
10.1.1. Dimensionamiento 15x15 . . . . .	82
10.1.2. Dimensionamiento 20x20 . . . . .	82
10.2. COLUMNAS DE CONCRETO REFORZADO . . . . .	83
10.2.1. Concreto confinado cada 5 cm . . . . .	84
10.2.2. Concreto confinado cada 10 cm . . . . .	85
10.3. ARRIOSTRAMIENTOS DE MADERA . . . . .	85
10.3.1. Arriostramiento de 15x15 . . . . .	86
10.3.2. Arriostramiento de 20x20 . . . . .	86
<b>11. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>87</b>
11.1. CAPACIDAD . . . . .	87
11.2. DEMANDA . . . . .	95
11.3. PUNTO DE DESEMPEÑO . . . . .	100
11.3.1. Impactos de los mejoramientos estructurales presentados . . .	106
11.4. ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN . . . . .	107
<b>12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>108</b>

# Índice de figuras

2.1. Análisis de porcentajes de asentamientos por localidad . . . . .	21
2.2. Configuración de la muestra de pared CLT . . . . .	23
3.1. Arbol de problemas . . . . .	25
3.2. Mapa Temático déficit de vivienda en Bogotá . . . . .	27
3.3. Bogotá, déficit de vivienda cuantitativo . . . . .	27
3.4. Bogotá, déficit de vivienda cualitativo . . . . .	28
4.1. Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño . . . . .	33
4.2. Representación bilineal de la curva de capacidad . . . . .	38
4.3. Componentes de una estructura de madera de un solo piso . . . . .	41
4.4. Vista en planta de la estructura de prueba que muestra los componentes estructurales principales . . . . .	42
4.5. Vistas de elevación de las estructuras de prueba mostrando los principales componentes estructurales . . . . .	43
4.6. Estructura de prueba fase 9 . . . . .	44
4.7. Estructura de prueba fase 10 . . . . .	44
4.8. Aceleración en el Tiempo de los eventos sísmicos tomados para la simulación . . . . .	46
4.9. Movimientos de tierra de terremotos utilizados en las pruebas sísmicas y su valor absoluto en los espectros de respuesta de aceleración para un 5% de amortiguación . . . . .	47
4.10. Ubicación de las medidas de desplazamiento relativo (C14, C16 Y 18) y la aceleración absoluta (D14, D16 y D18) a lo largo de la pared sur de la estructura de prueba . . . . .	47
4.11. Modelo SAWS de la estructura de prueba de la mesa vibratoria de la fase 9 . . . . .	48
4.12. Predicciones CASHEW de la respuesta cíclica de la cizalladura del muro de corte este de 1er y 2do Nivel (fase 9) . . . . .	49
4.13. Espectro de capacidad experimental de fase 9 y predicciones de empuje SAWS . . . . .	50
4.14. Estado inicial y final análisis pushover para una estructura . . . . .	54
4.15. No linealidad estructural . . . . .	55

5.1. Mapa de clusters (ecuación de búsqueda: Wood AND Pushover) . . . .	59
8.1. Descripción de la metodología por medio del diagrama de flujo . . . .	67
8.2. Curva de Histéresis construcción de madera para mitigación de amenaza sísmica . . . . .	69
9.1. Vivienda construida por Techo . . . . .	74
9.2. Panel Frontal Izquierdo . . . . .	76
9.3. Panel Frontal Derecho . . . . .	76
9.4. Paneles Laterales . . . . .	77
9.5. Panel Trasero . . . . .	77
9.6. Esquema Elementos Rígidos y Nodo de Control . . . . .	78
9.7. Ubicación y Dimensionamiento de Elementos tipo Frame . . . . .	79
9.8. Esquema: Articulados (azules) y Nodos (verdes) . . . . .	79
9.9. Esquema Elementos Tipo Frame y Nodo de Control . . . . .	80
9.10. Esquema General: Modelo con Elementos tipo Frame . . . . .	81
10.1. Esquema General: Modelo Columnas de Concreto Reforzado . . . . .	83
10.2. Curva esfuerzo vs deformación concreto no confinado . . . . .	84
10.3. Curva esfuerzo vs deformación concreto confinado cada 5 cm . . . . .	84
10.4. Curva esfuerzo vs deformación concreto confinado cada 10 cm . . . . .	85
10.5. Esquema General: Modelo Arriostadores de madera . . . . .	86
11.1. Curva de capacidad modelo 0 . . . . .	88
11.2. Curva de capacidad modelo 1 . . . . .	89
11.3. Curva de capacidad modelo 2 . . . . .	90
11.4. Curva de capacidad modelo 3 . . . . .	90
11.5. Curva de capacidad modelo 4 . . . . .	91
11.6. Curva de capacidad modelo 5 . . . . .	92
11.7. Curva de capacidad modelo 6 . . . . .	92
11.8. Curva de capacidad modelo 7 . . . . .	93
11.9. Curva de capacidad modelo 8 . . . . .	94
11.10. Delimitación localidad Ciudad Bolivar y Usme . . . . .	95
11.11. Curva de Demanda Cerros . . . . .	96
11.12. Curva de Demanda Depósitos de Ladera . . . . .	96
11.13. Curva de Demanda Piedemonte C . . . . .	97
11.14. Curva de Demanda Aluvial 50 . . . . .	98
11.15. Curva de Demanda Aluvial 200 . . . . .	99
11.16. Curva de Demanda Aluvial 300 . . . . .	100
11.17. Punto de desempeño entre modelo 7 y suelo aluvial 300 . . . . .	101
11.18. Punto de desempeño modelo 8, Cerros . . . . .	102
11.19. Punto de desempeño modelo 8, deposito de ladera . . . . .	102
11.20. Punto de desempeño modelo 8, pie de monte c . . . . .	103

11.21	Punto de desempeño modelo 8, aluvial 50 . . . . .	103
11.22	Punto de desempeño modelo 8, aluvial 200 . . . . .	104
11.23	Punto de desempeño modelo 8, aluvial 300 . . . . .	104
11.24	Comportamiento modelo 8 para cada tipo de suelo . . . . .	105
11.25	Mapa de Bogota, comportamiento sismico del modelo 8 en las localidades de Ciudad Bolivar y Usme . . . . .	106

# Índice de cuadros

4.1. Coeficiente $k$ en función del tipo de comportamiento estructural . . .	39
4.2. Coeficiente mínimos $SR_A$ & $SR_V$ . . . . .	40
8.1. Coeficientes de diseño [1] . . . . .	71
9.1. Propiedades mecánicas <i>PinusPatula</i> [2] . . . . .	80
11.1. Datos del Análisis Modal . . . . .	88
11.2. Rendimiento sísmico en orden descendente . . . . .	94
11.3. Normalización de puntos de desempeño - Modelo 8 . . . . .	105

Considerando el acuerdo 213 del año 2015 de la Universidad Católica de Colombia y las líneas de investigación aprobadas por la Universidad se establece que:

**Alternativa:** Trabajo de investigación.

**Línea de investigación:** Gestión y Tecnología para la sustentabilidad de las comunidades.

**Eje temático:** Análisis sísmico de viviendas de emergencia.

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

Para poseer una mejor perspectiva respecto a la cantidad de personas que tienen necesidades habitacionales y requieren la oportunidad de recuperarse es importante tener en cuenta factores como el desplazamiento forzado que se ha vivido a través de los años en Colombia, la calidad de vida de los habitantes de calle y la población de estratos bajos en el país, siendo estos grupos, los más afectados y con menos probabilidad de costear una vivienda digna.

En el año 2016 el gobierno de Colombia firmó un acuerdo de paz con las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia (FARC), visualizando el fin del conflicto armado, se estima que este conflicto dejó 8307777 víctimas donde el 88 % sufrió de desplazamiento forzado. En el intervalo del 2013-2018 este fenómeno no ha cesado, aunque si ha disminuido parcialmente, según los Registros Únicos de Víctimas (RUV) casi el 93 % del total de los municipios son receptores y expulsores, afectando especialmente a las comunidades que hacen parte de los grupos étnicos deteriorando sus condiciones de vida [3].

El punto de destino de estas familias desplazadas son las grandes ciudades y la mayoría de las veces estas no están en condiciones de brindar las ayudas y oportunidades necesarias para la recuperación de estas familias, por este motivo no logran una calidad de vida digna y son las más propensas a ser atropelladas por la pobreza contribuyendo al aumento del déficit de vivienda e incluso al porcentaje de indigencia.

Dado que una de las misiones directas de Techo es contribuir a la recuperación de calidad de vida digna para las personas, es importante considerar aquellas “personas sin distinción de sexo, raza o edad, que hacen de la calle su lugar de habitación, ya sea de forma permanente o transitoria y que han roto vínculos con su entorno familiar” [4]. estas son parte de la emergencia social de habitabilidad de atención inmediata. El hecho de que existan desplazados quienes no tienen más opción que vivir en la calle rompe con prejuicios de que los habitantes de calle solo son personas

en el mundo de la drogadicción, el VII censo de habitabilidad de calle deja ver un número de 9538 personas, resultados que revelan la persistencia del fenómeno en 2011 (9614), 2007 (8385) y en 2004 (10077) [5].

Se tiene la necesidad de encontrar alternativas que busquen mejorar la calidad de vida de las personas más vulnerables del país, principalmente asegurándoles una vivienda digna. Una de las estrategias más populares a nivel Internacional son las denominadas viviendas de emergencia con proyección de adquisición de vivienda social. Techo es una fundación en Colombia que realiza un aporte a este ámbito, trabajando para superar la pobreza a través de la colaboración de los mismos pobladores, voluntarios, donadores entre otros actores. Dicha fundación ejecuta planes después de realizar un estudio y entablar diálogos con la comunidad afectada, materializando desde salones comunitarios y calles pavimentadas hasta viviendas que contribuyen a un mejor desarrollo social [6].

En el desarrollo de este trabajo se busca identificar formas de aportar al mejoramiento del desempeño sísmico del modelo constructivo actual de Techo. Partiendo de la modelación de la estructura actual utilizada por esta fundación y deducir su capacidad sísmica, con el fin de proponer alternativas que mejoren dicha capacidad. La capacidad sísmica de una vivienda está estrechamente ligada con el tipo del suelo. Las zonas de Bogotá en donde es más frecuente la ejecución de la construcción de estas viviendas son las localidades de Ciudad Bolívar y Usme, estas localidades como se evidencia más adelante están entre las que tienen mayor porcentaje de crisis habitacional y son localidades donde ya ha venido trabajando la fundación, para atacar esta problemática se necesita generar una construcción con el rendimiento sísmico adecuado y así disminuir la incertidumbre del estado de desempeño de esta, por dicha razón se busca especificar por medio de mapas de estas localidades la identificación del impacto de construir este tipo de viviendas en diferentes tipos de suelos. Con este trabajo se espera que la fundación Techo pueda tener otras alternativas en la construcción de estas viviendas considerando los efectos sísmicos.



# Capítulo 2

## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

### 2.1. ANTECEDENTES

La búsqueda de alternativas habitacionales eficientes y económicas para mejorar en cierta medida la calidad de vida de las familias vulnerables es una lucha constante. Una de las soluciones que se consideran para mitigar esta problemática es la utilización de la madera para la construcción de viviendas de emergencia, este material ha sido utilizado permanentemente en este ámbito y al ser un recurso natural renovable brinda ventajas ambientales, favoreciendo procesos de soporte al ecosistema, además cuenta con características favorables por ser una materia prima de alto potencial físico, mecánico y estético. Las viviendas realizadas con materia prima forestal son una alternativa como solución habitacional, porque es un producto de acceso inmediato [6].

La madera como material de construcción ha tomado importancia y paulatinamente se han venido realizando investigaciones al respecto, uno de estos estudios se evidencia en el artículo titulado “Seismic performance of structural frames and joints in wood tall buildings“ realizado por el Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectónica y Ambiental del Instituto de Tecnología de Illinois (Chicago, Estados Unidos) [7]. Desarrolla un estudio de los sistemas de construcción en madera; uno de los sistemas investigados es la construcción de marco ligero que es el tradicional, por otra parte también es analizado el sistema basado en construcciones de madera en masa, como por ejemplo la madera laminada cruzada CLT (Cross Laminated Timber – CLT), la cual está hecha de capas de tablas de madera que se amplían transversalmente, este material posee características como peso ligero, bajo costo y buenas funciones térmicas. La metodología que usa CLT posee factores que convierten el uso de este modelo constructivo en una ejecución óptima a la hora de elegir qué tipo de estructura se desea ejecutar, algunos de estos ítems pueden ser: las propiedades mecánicas de los tipos de conectores, la relación de aspecto de los paneles, las condiciones de contorno, la presencia de juntas verticales o aberturas en las subestructuras y las cargas verticales. El estudio para comprender el compor-

tamiento sísmico de pórticos formados por paneles y muros CLT están en progreso actualmente como lo evidencia este artículo, los modelos de interacción para tensión y cortante son especialmente útiles para modelar pórticos de madera sujetos a análisis estáticos no lineales resaltando que la ductilidad necesaria para los pórticos se puede lograr mediante un diseño adecuado de las conexiones y sus componentes (sujeciones y soportes angulares).

En Chile se han realizado proyectos que buscan modificar convicciones que apuntan a que el desempeño de las viviendas en madera es deficiente, enfatizando en que se debería mejorar el estudio y la enseñanza de la madera en el entorno universitario como profesionales técnicos [8]. El diseño y uso de una envolvente de madera con mantenimiento especial es una estrategia que contribuye al mejoramiento de la metodología de construcción convencional debido a que superan algunas patologías que atacan el uso directo de la madera, tales como las termitas (factores biológicos), la humedad y la protección al fuego aumentando la calidad del material a largo plazo lo cual describe la optimización de la vivienda a través del uso de una circundante que cubre casi toda la edificación y aumenta la vida útil de esta misma.

En el artículo titulado “A successful pushover example” se describe un estudio de un caso en el que se realizaron predicciones de demanda de empuje para nueve movimientos de tierra diferentes sujeto a un análisis no lineal dinámico y estático de una estructura de cuatro pisos, el análisis arrojó resultados con los cuales el autor explica que: “La conclusión que se puede extraer es que para las estructuras regulares de poca altura independiente del material, en las que los efectos de los modos más altos no son importantes y en las que la inelasticidad se distribuye de manera uniforme sobre la altura, el análisis pushover proporciona buenas predicciones a las demandas sísmicas comparando directamente con los datos de un análisis dinámico” [9]. Analizando la información del título mencionado el análisis pushover es una opción eficaz en cuanto a tiempo y complejidad del modelamiento estructural en comparación al análisis no lineal dinámico cuando se trata de estructuras de pocos niveles como es el caso de la edificación propuesta por Techo la cual consta de un solo nivel.

La implementación de modelos numéricos inspirados en el principio del análisis pushover cada vez se utiliza más, esto da origen al denominado “pancake model”. El pancake model se desarrolla mediante una guía que simula una respuesta sísmica tridimensional, cada pared en la estructura es modelada por un solo resorte de corte en plano no lineal, utilizando una regla histerética que permite la simulación de la degradación de la rigidez, comparando las predicciones de este modelo numérico con los resultados de las pruebas de mesa vibratorias realizadas en una casa de estructura de madera de dos pisos a gran escala, se concluye que este modelo puede predecir con suficiente precisión la respuesta sísmica de la madera en edificios enmarcados y

podrían utilizarse para el diseño sísmico basado en el desplazamiento. Este modelo se utilizó luego para desarrollar una ecuación simple para el equivalente de índice de amortiguación de edificios con estructura de madera basados en el resultado de análisis pushover cíclicos [10].

Otro ejemplo se desarrolla a través de un enfoque eficiente y preciso para el modelado no lineal monótono y cíclico de muros de corte de estructura de madera resistente que tiene en cuenta los efectos de resistencia y la demanda de deformación en el sistema de anclaje, las pruebas demostraron que la metodología propuesta es capaz de reproducir la respuesta no lineal de una amplia gama de paredes, también se demostró que fenómenos complejos como la fuerza y la degradación de la rigidez en paredes fuertes se podían capturar razonablemente usando este modelo. Además, el modelo se utilizó para realizar un análisis profundo del comportamiento no lineal de las paredes con armazón de madera, entre los hallazgos de este método se puede resaltar el hecho de que, en las paredes de estructuras de madera fuerte con relaciones de aspecto altas, el porcentaje de su deformación lateral global debido al levantamiento del anclaje en el sistema es de aproximadamente el 50%. Este alto nivel de contribución no se debe a una gran demanda de tracción, sino a la esbelta geometría de la pared [11].

El concepto de vivienda de emergencia abarca un entorno amplio desde brindar una atención inmediata a personas damnificadas por algún desastre natural, hasta dedicarse a atender a personas “refugiadas” o incluso ocuparse de zonas en donde la pobreza crea hacinamiento por distintos factores sociales, apoyando con un alojamiento transitorio mientras se atacan las problemáticas desde la raíz, este tipo de programas es usado ampliamente en distintos países para disminuir las condiciones habitacionales inestables de una comunidad, cumpliendo con el propósito social de esta clase de obras.

En Finlandia se plantea un modelo de vivienda de emergencia que busca brindar un alojamiento transicional a un gran número de refugiados durante situaciones de crisis en cualquier parte del mundo, su diseño y construcción está basada principalmente en madera con vida útil de cinco años y puede ser ensamblado por dos adultos en seis horas con solo herramientas comunes y diagramas de dibujos, para que sea albergada por cinco personas, el modelo consiste en paneles prefabricados que se transportan y ensamblan o desensamblan fácilmente, además de un dosel en forma de tienda que protege del agua y los rayos ultravioleta, la modularidad del diseño permite quitar o agregar pórticos para aumentar o disminuir el tamaño del refugio adaptándose a las necesidades de los habitantes sin dejar de lado el aislamiento térmico razonablemente bueno debido a la madera de chapa laminada [12]. La solución planteada en este artículo es similar a la que plantea Techo, sin embargo, no hay evidencia de que este diseño este basado en el análisis sísmico de la edificación des-

crita, lo cual es un punto importante para considerar en términos de vivienda digna ya que la protección a nivel estructural a una posible amenaza sísmica es insuficiente.

La evaluación del efecto causal del programa de vivienda de emergencia Techo en cuanto al bienestar de los hogares se enfoca en el análisis de estadísticas que permiten entrever el impacto de este tipo de proyectos en la prosperidad de una comunidad, encontrando resultados positivos en entornos de privacidad, seguridad, relaciones interpersonales, bienestar psicológico y percepción de calidad de vida. Como prueba de esto se adelantaron estudios de evaluación de los efectos del programa accionado por la fundación Techo a través de comparaciones antes-después de una parte de la población que aplicó al proyecto, en donde los resultados arrojan índices de las características de vivienda que deben ser reconsiderados y la mayoría apuntan al mejoramiento de la calidad de esta misma conservando percepciones de una mayor integridad y dignidad humana como efecto de la oportunidad brindada [13].

La creación de indicadores para establecer el “bienestar” que generan este tipo de proyectos se enfocó en ítems que hablan sobre el verse libre de enfermedades, sentirse seguro, experimentar privacidad, disfrutar de un sueño adecuado, tener oportunidades de socialización, incluyendo también la percepción individual de cada persona que accedió al proceso del programa. Los resultados de la evaluación de los indicadores muestran que el programa de vivienda Techo es una intervención efectiva para el mejoramiento de la calidad de vida de los hogares que viven en situaciones de extrema pobreza en asentamientos informales.

## 2.2. JUSTIFICACIÓN

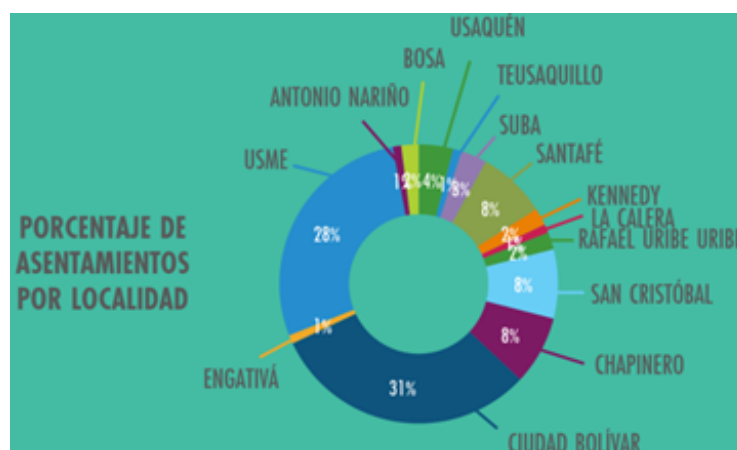
Esta investigación surge bajo la necesidad de mejorar la integridad estructural del modelo de vivienda de emergencia que lleva a cabo Techo, (organización sin ánimo de lucro centrada en la ejecución de proyectos en la ciudad de Bogotá D.C), estas viviendas están construidas a base de madera y tienen como objetivo brindar una solución eficaz de alojamiento a personas con necesidades habitacionales precarias, generando así un mayor bienestar social, estos proyectos traen consigo situaciones de vulnerabilidad que pueden ser analizadas a través de distintos aspectos, como por ejemplo las condiciones climatológicas del lugar o el manejo de materiales de construcción, además, según el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER): “La ciudad de Bogotá está expuesta a la actividad sísmica generada por los diversos sistemas de fallas geológicas activas existentes en el país” [14]. El riesgo sísmico depende de la susceptibilidad de este tipo de viviendas a sufrir daños, la cual está ligada al potencial del sismo que puede ocurrir. Cobra importancia enfatizar la participación que posee el estado en la expansión de proyectos de vivienda en Colombia tal como cita la Constitución Política Colombiana en su artículo 51:

“Todos los colombianos tienen derecho a vivienda digna. El Estado fijará las condiciones necesarias para hacer efectivo este derecho y promoverá planes de vivienda de interés social, sistemas adecuados de financiación a largo plazo y formas asociativas de ejecución de estos programas de vivienda” [15].

El derecho a la vivienda digna, posee dos palabras especiales “vivienda” y “digna”, de allí se origina la finalidad de la vivienda de emergencia en estudio, lo cual consiste según Esperanza Ferrando en su artículo “El derecho a una vivienda digna y adecuada” donde vivienda hace referencia a: “El refugio natural, o construido por la mano del hombre, en el que éste habita de modo temporal o permanente” [16] y el que ésta sea digna significa que: “Es aquella vivienda que da cumplimiento a las más básicas necesidades del hombre, como pueden ser una cierta privacidad, intimidad y un elemental equipamiento” [16] sin dejar de lado que al mencionar las necesidades básicas del hombre se hace referencia principalmente a un refugio de los agentes externos como la lluvia, el calor, el viento, o el sismo. Esta última cobra su valor, dada la amenaza que representa a la vida de las personas.

Según la siguiente figura los asentamientos informales de comunidades en la ciudad de Bogotá se concentran en un 59% en las localidades de Ciudad Bolívar y Usme mostrando un gran auge de pobreza en el sur periférico de la capital, razón por la cual el proyecto se enfoca en la microzonificación de mejoramiento estructural en dichas localidades ya que son las zonas identificadas por Techo para la ejecución de su labor.

Figura 2.1: Análisis de porcentajes de asentamientos por localidad



Fuente: Adaptado de [17].

En estos modelos de vivienda se utiliza como material principal la madera, porque favorece la economía del proyecto y agrega facilidad de manejo de acuerdo a la versatilidad que se requiere en la construcción, contribuyendo a que su composición favorezca propiedades de eficacia en la unión de los diferentes elementos estructurales, y de la misma manera la separación de estos mismos con el fin de desplazar la vivienda a una nueva ubicación (después de cumplir el periodo de tiempo determinado) en donde se identifiquen poblaciones en situaciones de emergencia, dando “un alojamiento temporal a personas con necesidades habitacionales graves” [18], siendo esta metodología una forma de brindar atención inmediata a problemáticas de pobreza, buscando que la población beneficiada durante un periodo de tiempo establecido logre recuperarse y mejorar su calidad de vida.

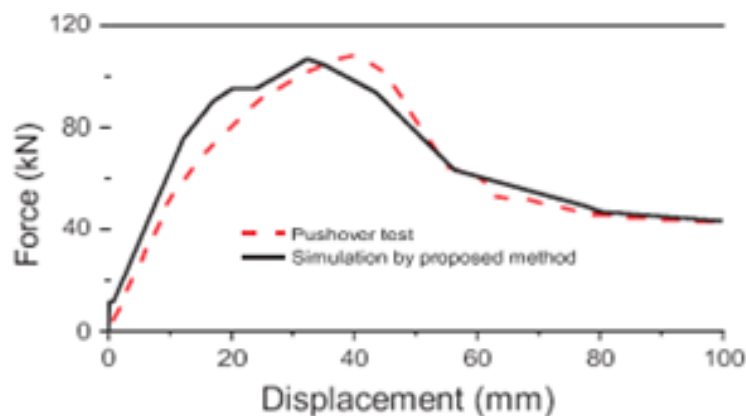
La madera generalmente es utilizada como material de revestimiento, aislante o decoración. Entre sus ventajas esta su capacidad de absorber y expulsar la humedad de las construcciones regularizando el ambiente interior, es un material estructural ecológico que causa menos contaminación del agua y del aire, también genera un ahorro en sus costos de transporte debido a su bajo peso, representa un ahorro en el tiempo de construcción respecto a una casa con otro material, cuenta con una resistencia a incendios significativa, brinda la facilidad de realizar elementos prefabricados que se pueden transportar y después ensamblar en el sitio de la obra. En el auge de la construcción bioclimática que busca traer beneficios económicos, ecológicos y de confort, la madera es perfecta como material constructivo. Sin embargo también se debe tener en cuenta sus desventajas entre las cuales se encuentra el hecho de que si no se le da un tratamiento preservador, queda expuesta al ataque de agentes externos perjudicando su durabilidad, la madera deja de ser una buena opción de construcción cuando se habla de edificios altos, también es importante resaltar que la madera es un material que no presenta los mismos módulos de resistencia mecánica en todas sus direcciones y necesita de un mantenimiento regular [19]. A parte de la economía, la madera posee una sinergia entre el entorno tanto rural como urbano beneficiando a la estética de la estructura, también teniendo un buen comportamiento como aislante térmico y acústico [20].

“La necesidad de un método simple para predecir el comportamiento no lineal de una estructura bajo cargas sísmicas vio la luz en lo que se conoce ahora como el Análisis Pushover (PA)” [21]. Este análisis trae a favor la demostración de la ocurrencia de la falla progresiva en las edificaciones y la identificación del modo de la falla final. En recopilación de todo lo dicho anteriormente “PA es un procedimiento de análisis no lineal para estimar la capacidad de resistencia de una estructura más allá de su límite elástico hasta su resistencia máxima en el rango post-elástico ” [22].

Uno de los aspectos relevantes cuando se plantea una metodología de construcción es analizar el comportamiento estructural de está respecto a eventualidades

sísmicas, en función de las propiedades de los materiales que conforman la estructura, en este caso el modelo de vivienda de Techo. Una de las técnicas de análisis estructural no lineal más usadas se denomina método de plastificación progresiva como es conocida en Colombia o Pushover, el cual muestra el aumento progresivo del desplazamiento en función de la pérdida de rigidez de la estructura. La figura 2.2 muestra la curva de capacidad típica de una estructura de madera obtenida por esta metodología de análisis, este tipo de análisis presenta ventajas frente al análisis elástico lineal, dado que puede predecir con mayor precisión los mecanismos de falla de la estructura, la detección de la posibilidad y ubicación de una falla prematura y la redistribución de fuerzas durante la deformación progresiva, ya que considera el comportamiento inelástico de la misma, además el método permite identificar miembros claves que pueden llegar a estados críticos durante una eventualidad sísmica, lo cual sirve para optimizar el diseño y los detalles en determinado elemento estructural.

Figura 2.2: Configuración de la muestra de pared CLT



Fuente: Adaptado de [23].

La curva observada en la figura 2.2 es obtenida a partir del sometimiento de una pared de madera contra laminada CLT a una carga constante vertical distribuida de 10 kN/m la cual fue agregada en la parte superior del Techo a través de actuadores controlados por fuerza, conectada mediante cuatro soportes metálicos con 18 clavos en espiral a la cimentación, la respuesta del análisis Pushover se evidencia en la línea punteada roja, la línea continua negra muestra la evaluación del método propuesto en la investigación citada [23]. Como se puede observar en la figura el método propuesto captura la curva Pushover con una diferencia en la rigidez inicial la cual puede ser causada debido a los espacios de instalación de la muestra CLT.

El PA es un método para predecir la redistribución de las fuerzas internas que se producen cuando la estructura está sometida a fuerzas de inercia que ya no se

resisten dentro del rango elástico, se espera que esta metodología proporcione información sobre varias características como: La estimación de las deformaciones de elementos que tienden a actuar de manera inelástica para disipar la energía impartida a la estructura por los movimientos del suelo a través de daño.

Esta metodología incorpora todos los elementos ya sean estructurales o no estructurales, es importante destacar que los beneficios que se pueden obtener del PA requieren un mayor esfuerzo analítico en comparación al análisis lineal, por el hecho de incorporar todos los elementos, modelando su comportamiento mediante carga - deformación. La ejecución del análisis inelástico preferiblemente se debe realizar con modelos analíticos tridimensionales. En la actualidad las herramientas analíticas para este propósito son muy arduas, pero se están desarrollando varias alternativas debido a que este tipo de análisis se está convirtiendo en una herramienta popular y muy solicitada ya que es recomendable para estructuras de acero estructural, hormigón armado, madera y mampostería.

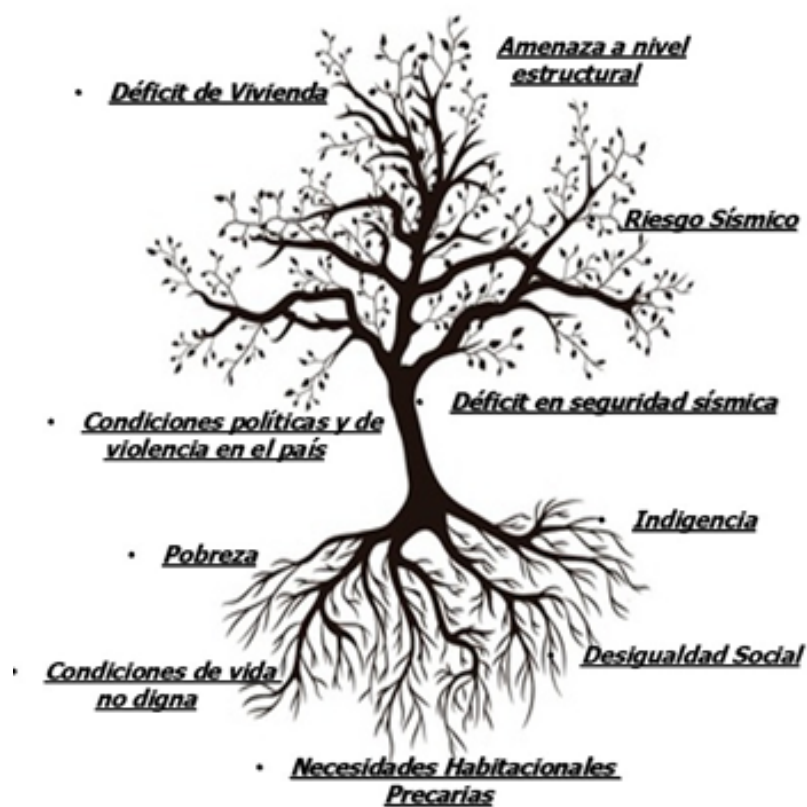
El procedimiento de análisis estático no lineal posee ventajas en calcular el posible desplazamiento que experimentará una construcción para un nivel dado de movimiento del suelo, además es una herramienta que evalúa el daño en las edificaciones y los posibles requerimientos de refuerzo que estas deban tener [24]. Los principales objetivos de la metodología PA es generar un procedimiento simple para estimar la confiabilidad de las edificaciones de madera sometidas a movimientos del suelo en un sistema equivalente no lineal inelástico de un grado de libertad, en donde se determinan patrones de carga horizontales a partir de vibración de balanceo en las direcciones  $x$  e  $y$ , de esta manera genera una ventaja sobre el análisis dinámico ya que el último mencionado requiere de factores de intensidad y rangos de valores para la aceleración del suelo en un historial de tiempo, tarea que requeriría de mayor tiempo computacional sin dejar de lado que la variabilidad de estos datos afecta la superficie de capacidad obtenida, además de que según [25] y [26] las curvas de capacidad por el método PA presentan una diferencia de menos del 15 % en donde la mayoría de los datos de esta diferencia es menor al 5 %, indicando de esta manera que PA es un método adecuado para aplicaciones simples y prácticas en edificaciones de madera.



# Capítulo 3

## PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Figura 3.1: Arbol de problemas



Fuente: propia

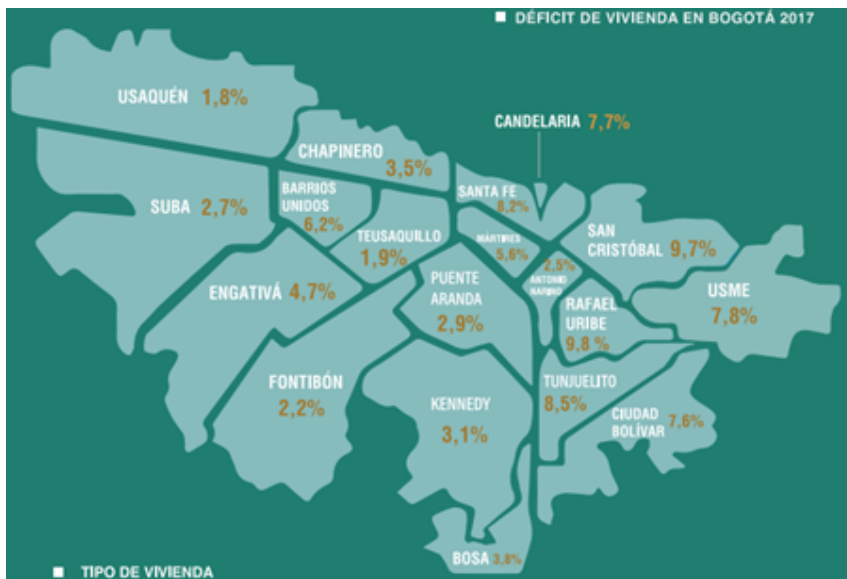
La figura 3.1 describe las principales problemáticas que conciernen al proyecto, identificadas en la raíz del árbol. Estas temáticas tienden a ser disminuidas con la producción de las viviendas de Techo y están apoyadas por la proyección del desarrollo de este trabajo de grado reforzando el entorno sísmico y estructural de la construcción.

A lo largo de los años y del proceso de desarrollo humano, la pobreza se ha convertido en un ámbito estudiado por ser una importante problemática mundial, ocupando el ítem número uno de los objetivos de desarrollo sostenible propuesto por el programa de las Naciones Unidas, el cual corresponde a: el “Fin de la Pobreza”, en su descripción se deja en claro que la crisis del COVID-19 ha puesto en riesgo décadas de progreso, llegando a tal punto de incrementar la pobreza en todo el mundo, afectando a 500 millones de personas [27]. Por esto es importante concretar e implementar la mayor cantidad de medidas posibles que ayuden a disminuir la pobreza.

Los índices de pobreza afectan principalmente la vivienda, la educación, el entorno social de la niñez y juventud, el trabajo, la salud o el acceso a servicios públicos, en pocas palabras la calidad de vida del hombre. Según un artículo publicado por el tiempo “Aumento de la pobreza en Colombia no debe subestimarse” en donde se evidencia que las personas que viven en estado de pobreza en el año 2018 alcanzan una cifra de 9.6 millones con una tasa de aumento de 1.1 millones con respecto al 2016. El índice de pobreza que se puede estimar para el año 2020 y los años próximos es desalentador, el escenario proyectado como consecuencia entre otras cosas de los temas que encierra la emergencia sanitaria [28].

Específicamente para el caso de Bogotá la Encuesta Multipropósito del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) busca dar una visión de la pobreza en el distrito capital. La cobertura de esta encuesta está centrada en 19 localidades del Área urbana de Bogotá (Usaquén, Chapinero, Santafé, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Los Mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, La Candelaria, Rafael Uribe Uribe y Ciudad Bolívar). Como también en centros rurales a sus alrededores, los datos se recolectaron entre septiembre de 2017 y Febrero de 2018, se encuestaron en total 109111 hogares (77025 en Bogotá y 32086 en municipios de Cundinamarca), esta encuesta tiene una confiabilidad de 95 % [29].

Figura 3.2: Mapa Temático déficit de vivienda en Bogotá



Fuente: Adaptado de [30].

Como se puede evidenciar en la figura 3.2 las localidades con mayor déficit de vivienda son San Cristóbal con un porcentaje de 9.7% y Rafael Uribe con un porcentaje del 9.8%. Techo ha realizado algunos proyectos de vivienda de emergencia en las localidades de Ciudad Bolívar, Soacha y Usme. El déficit de vivienda en esta encuesta multipropósito se puede dividir en un déficit cuantitativo y déficit cualitativo:

Figura 3.3: Bogotá, déficit de vivienda cuantitativo



Fuente: Adaptado de [30].

Según esta encuesta el déficit cuantitativo se refiere a la cantidad de viviendas que se deben construir porque cuentan con déficit no mitigable, el cual se enfoca en las características de la estructura como la calidad y durabilidad de los materiales de las paredes exteriores, por otro lado, el hacinamiento no mitigable se refiere a la convivencia de 5 o más personas por cuarto o también el hecho de varias familias viviendo en la misma casa.

Figura 3.4: Bogotá, déficit de vivienda cualitativo



Fuente: Adaptado de [30].

El déficit cualitativo se refiere a la falta de espacio, estructura del piso, aspectos que se pueden mejorar dentro de la vivienda basándose específicamente en las siguientes características: respecto a la estructura se refiere a la composición del piso, si es de tierra o arena, el hacinamiento mitigable es cuando hay más de 3 personas, pero menos de 5 por habitación, también examina si la vivienda tiene un espacio exclusivo para la cocina y el acceso a servicios públicos.

Techo es una fundación que aporta una solución parcial a esta problemática por medio de un modelo constructivo para casas de madera que realiza la población misma, sin embargo, no se realizan bajo la normativa sísmica lo cual genera una metodología de construcción inadecuada, que puede y debe ser mejorada dado que es necesario que estas viviendas aparte de brindar refugio también tengan la capacidad de soportar la demanda sísmica, por esto se vuelve importante realizar un análisis del desempeño sísmico a estas viviendas y determinar las medidas necesarias de adaptabilidad del sistema constructivo en el caso que la edificación no cumpla con los requerimientos de resistencia según la ubicación de la construcción.

Teniendo en cuenta lo anterior, donde se evidencia el déficit de vivienda en la ciudad de Bogotá según la encuesta multipropósito y el aporte que hace la fundación de Techo a dicho déficit, se puede decir que las casas de emergencia que esta fundación realiza no cuentan con un análisis sísmico adecuado, por dicha razón en

el desarrollo de este documento se desea conocer el estado del sistema constructivo actual y el de las posibles adaptaciones que busquen mejorar el rendimiento sísmico de estas viviendas, según el carácter investigativo y los resultados que se esperan conseguir, se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede mejorar el desempeño sísmico de las viviendas construidas por Techo en las localidades de Ciudad Bolívar y Usme, mediante el análisis estático no lineal de las alternativas propuestas?

# Capítulo 4

## MARCO DE REFERENCIA

### 4.1. MARCO TEÓRICO

La teoría que se maneja en esta investigación está sujeta a la normativa generada por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC) y la Comisión de Seguridad Sísmica del Estado de California (CSSC), ATC-40 para análisis estático no lineal [22].

#### 4.1.1. Determinación de la capacidad de una estructura

La capacidad estructural es representada a través de una curva que es graficada por el rastreamiento del cortante en la base y el desplazamiento del Techo generada por dicha fuerza.

La obtención de las curvas de capacidad estructural se basan generalmente en la creación de modelos matemáticos de la estructura y la clasificación de los elementos del modelo como primario o secundario. Por otro lado se debe realizar una recolección de información de las dimensiones de los elementos estructurales y las propiedades de los materiales.

La aplicación de fuerzas laterales mediante patrones de carga para el desarrollo del análisis Pushover se determina a partir de la aplicación de por lo menos dos 2 distribuciones de cargas laterales, éstas se seleccionan del patrón modal y el patrón de fuerzas laterales adaptativas. El patrón modal considera las siguientes distribuciones de fuerzas laterales:

- Distribución de fuerzas empleadas en el análisis estático.
- Distribución vertical proporcional a la forma del modo fundamental de vibración.
- Distribución vertical proporcional al cortante obtenido de la combinación.

El patrón de fuerzas laterales adaptativas define las siguientes distribuciones:

- Distribución uniforme que consiste en fuerzas laterales a la masa de cada nivel.
- Distribución de fuerzas laterales adaptativo que cambia en medida que se deforma la estructura considerando propiedades de la incursión inelástica (cambio de rigidez).

En la ejecución del modelo computacional este provee el cálculo de las fuerzas internas en cada uno de los miembros debido a la acción de fuerzas gravitacionales y fuerzas laterales externas. Toda esta información es recopilada junto con los datos de los cortantes en la base y los desplazamientos del Techo, también es útil recopilar las fuerzas y rotaciones de los miembros para revisar los desempeños locales de la estructura.

Se debe repetir el incremento de carga lateral hasta que la estructura sea inestable o las distorsiones sobrepasen considerablemente el nivel de desempeño deseado en donde se ocasionen daños graves a la estructura.

#### 4.1.2. Demanda sísmica NSR-10

Según Jaime Suarez [31] para la creación de la curva de demanda, la identificación del tipo de suelo es fundamental debido a los factores de amplificación de la onda sísmica ya que se producen cambios en las características del movimiento de la zona en el momento en que dicha onda pase a través de un depósito de suelos blandos, estos factores hacen referencia al aumento de la aceleración de la onda en la superficie del terreno comparada con la aceleración en la roca, muchas veces las amplificaciones en arcillas blandas puede ser el doble que en gravas o arenas compactadas.

Para la creación del espectro de demanda se deben determinar los coeficientes para: la aceleración horizontal pico efectiva de diseño ( $A_a$ ), la aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva de diseño ( $A_v$ ), el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos ( $F_a$ ) y el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios ( $F_v$ ).

La determinación del coeficiente de importancia según el grupo de uso de la estructura hace referencia al sobredimensionamiento estructural que cualquier edificación como consecuencia de su uso deberá tener para su diseño y disminuir la incertidumbre de falla. Los grupos de uso de la estructura pueden ser: Grupo IV Edificaciones Indispensables, Grupo III Edificaciones de atención a la comunidad, Grupo II Estructuras de ocupación especial y el grupo al que pertenece la estructura analizada Grupo I Estructuras de ocupación normal.

Por consiguiente, la construcción del espectro elástico de aceleraciones ( $S_a$ ) expresada como fracción de la gravedad para un coeficiente de cinco por ciento (5%)

del amortiguamiento crítico se determina con la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{1,2 * A_v * F_v * I}{T} \quad (4.1)$$

El espectro elástico de aceleraciones se compone de la siguiente manera: Para periodos de vibraciones menores a  $T_C$ , el valor de  $S_a$  puede definirse con la siguiente ecuación.

$$T_c = 0,48 \frac{A_v * F_v}{A_a * F_a} \quad (4.2)$$

Para periodos de vibraciones mayores a  $T_L$ , el valor de  $S_a$  puede definirse con la siguiente ecuación.

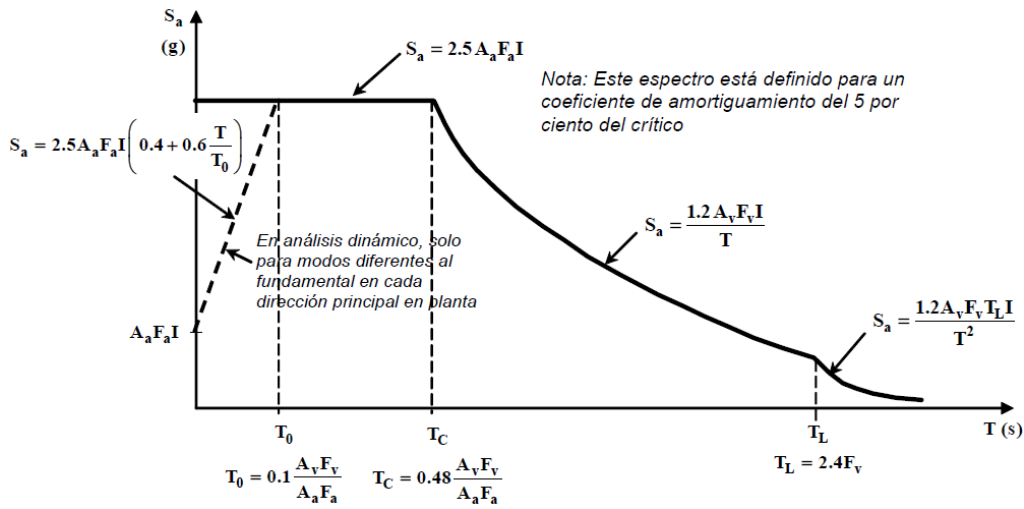
$$S_a = \frac{1,2 * A_v * F_v * T_L * I}{T^2} \quad (4.3)$$

$$T_L = 2,4 * F_v \quad (4.4)$$

A partir de la ejecución de las ecuaciones de 1 a 5 se construye una gráfica con una forma aproximada a la de la siguiente figura.



Figura 4.1: Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño



### 4.1.3. Espectro de capacidad

Para emplear el método de espectro de capacidad se requiere convertir las unidades de la curva de capacidad (Cortante Basal  $V$  – Desplazamiento  $d$ ) a una curva llamada espectro de capacidad en unidades de (Espectro de aceleración  $S_a$  – Espectro de desplazamiento  $S_d$ ).

La conversión de la curva de capacidad a espectro de capacidad se analiza a partir de la ecuación planteada para realizar un análisis por superposición modal debido a un movimiento en la base.

$$[M]u'' + [C]u' + [K]u = -[M]u_g'' \quad (4.5)$$

Cuya solución se da a partir de la siguiente combinación lineal de vectores.

$$u = \sum_i a_{i(t)} \phi_i \quad (4.6)$$

Donde:

$a_{i(t)}$ : Coeficientes que dependen del tiempo.

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$\sum_i^n [M]\phi_i a''_{i(t)} + \sum_i^n [M]\phi_i a'_{i(t)} + \sum_i^n [M]\phi_i a_{i(t)} = -[M]u''_g \quad (4.7)$$

Pre multiplicando y modificando los términos de cada expresión.

$$\sum_i^n \phi_i^T [M]\phi_i a''_{i(t)} + \sum_i^n \phi_i^T [M]\phi_i a'_{i(t)} + \sum_i^n \phi_i^T [M]\phi_i a_{i(t)} = -\phi_i^T [M]u''_g \quad (4.8)$$

Aplicando las condiciones de ortogonalidad y asumiendo un amortiguamiento clásico se tiene:

$$\phi_i^T [M]\phi_i a''_{i(t)} + \phi_i^T [C]\phi_i a'_{i(t)} + \phi_i^T [K]\phi_i a_{i(t)} \quad (4.9)$$

Dividiendo entre  $\phi_i^T [M]\phi_i$ .

$$a''_{i(t)} + \frac{\phi_i^T [C]\phi_i}{\phi_i^T [M]\phi_i} a'_{i(t)} + \frac{\phi_i^T [K]\phi_i}{\phi_i^T [M]\phi_i} a_{i(t)} = \frac{\phi_i^T [M]\phi_i}{\phi_i^T [M]\phi_i} u''_g \quad (4.10)$$

Se definen:

$$\frac{\phi_i^T [C]\phi_i}{\phi_i^T [M]\phi_i} = 2\beta_i \omega_i \quad (4.11)$$

$$\frac{\phi_i^T [K]\phi_i}{\phi_i^T [M]\phi_i} = \omega_i^2 \quad (4.12)$$

$$\frac{\phi_i^T [M]\phi_i}{\phi_i^T [M]\phi_i} = T_i \quad (4.13)$$

Posteriormente se ha desacoplado un sistema de VGDL en varios sistemas de 1GDL, según el nivel de pisos de la estructura.

$$a''_{i_i} + 2\beta_i \omega_i a'_{i_i(t)} + \omega_i^2 a_{i_i(t)} = -T_{i_i} u''_g \quad (4.14)$$

Donde:

$T_i$  : Coeficiente de participación estática modo  $i$ .

El factor de participación estática para el modo  $i = 1$ , es:

$$T_1 = \frac{\phi_1^T [M]}{\phi_1^T [M] \phi_1} \quad (4.15)$$

Contribución modal a la fuerza sísmica del modo 1.

$$F_1 = S_{a_1} T_1 [M] \phi_1 \quad (4.16)$$

Donde:

$F_1$  :Es el vector de fuerzas modales obtenidas para el modo 1.

$S_{a_1}$  :Es la aceleración espectral correspondiente al periodo del modo 1.

Luego el cortante basal debido a estas fuerzas es:

$$V_1 = 1^T F = S_{a_1} T_1 1^T [M] \phi_1 \quad (4.17)$$

Reemplazando  $T_1$ :

$$V_1 = S_{a_1} \frac{(\phi_1^T [M])^2}{\phi_1^T [M] \phi_1} \quad (4.18)$$

Donde:

El término se multiplica a  $S_{A_1}$  se denomina masa efectiva, que es la masa involucrada en la vibración del modo 1.

$$M_{efectiva_1} = \frac{(\phi_1^T [M])^2}{\phi_1^T [M] \phi_1} \quad (4.19)$$

Si se tiene un sistema de un grado de libertad (1GDL) y una fuerza externa actuando sobre él se produciría un cortante en la base de igual magnitud, por tanto para construir un sistema equivalente de 1GDL, se adoptara el cortante basal de la estructura completa, como el cortante basal en el sistema equivalente.

$$V_1 = S_{a_1} M_{efectiva_1} \quad (4.20)$$

Y como se requiere obtener un formato Sa-Sd, definiremos la pseudo - aceleración que experimentaría el sistema de 1GDL equivalente de la estructura como:

$$S_{a_1} = \frac{V_1}{M_{efectiva_1}} \quad (4.21)$$

Contribución modal al desplazamiento del modo 1.

$$d_1 = Sd_1 T_1 \phi_i \quad (4.22)$$

Donde:

$\phi_i$ : es el vector de desplazamientos modales obtenidos para el modo 1.

$Sd_1$ : Es el desplazamiento espectral correspondiente al periodo del modo 1.

Debido a que  $d_1$  es un vector con la contribución modal para el desplazamiento del modo 1, solo interesaría el desplazamiento del último nivel, de manera que se pueda definir un sistema de 1GDL equivalente. Se debe observar que para realizar esto, se está asumiendo que solo el modo 1 es el único que contribuye y que representa a la respuesta de toda la estructura.

Por tanto, se tiene la siguiente ecuación:

$$d_{Techo} = Sd_1 T_1 \phi_{Techo_1} \quad (4.23)$$

$$Sd_1 = \frac{d_{Techo}}{T_1 \phi_{Techo_1}} \quad (4.24)$$

Por último, para desarrollar el espectro de capacidad es necesaria una conversión punto por punto a sus coordenadas espectrales de su primer modo. Es decir, todos los puntos de la curva de capacidad deben ser convertidos a coordenadas de espectro de capacidad. A través de las siguientes ecuaciones.

$$S_a = \frac{V_b/W}{M_k/M} g \quad (4.25)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{rooftop}}{P_k \phi_{k,rooftop}} \quad (4.26)$$

Donde:

$V_b$ : Cortante en la base.

$W$ : Peso total de la estructura.

$M_k$ : Masa Modal.

$M$ : Masa Total de la estructura.

$P_k$ : Factor de participación del modo.

$\Delta_{rooftop}$ : Desplazamiento Techo.

$\phi_{k,rooftop}$ : Amplitud modal en el Techo.

Los valores con subíndice k son arrojados por el software SAP-2000 luego de realizar un análisis modal. La conversión del espectro de aceleraciones ( $S_a$ -T) se trabaja a partir de un sistema de un grado de libertad (1GDL).

Todos los puntos del espectro de diseño deben ser convertidos a coordenadas de espectro capacidad, a través de la siguiente ecuación:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (4.27)$$

Donde:  $T$ : Periodo

$S_a$  Aceleración Espectral

#### 4.1.4. Punto de desempeño

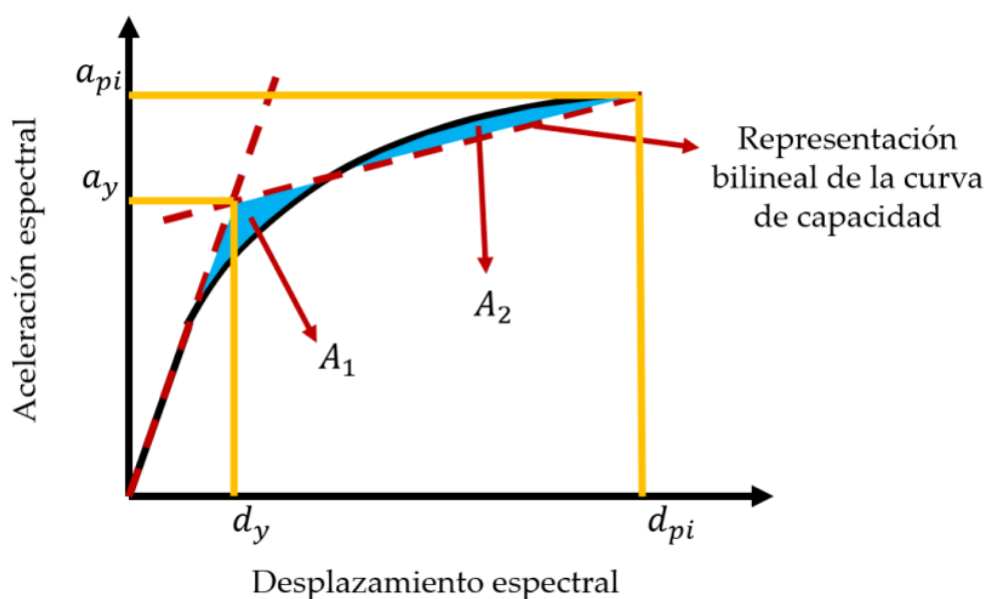
El punto de desempeño depende del desarrollo del espectro de demanda con las condiciones determinadas y a través de la obtención de la curva de capacidad sísmica por medio del modelo computacional, se deben transformar la curva de capacidad en una curva de espectro capacidad y el espectro de aceleraciones en unidades de aceleración espectral y desplazamiento, establecer la grafica de ambas curvas y seleccionar el punto de intersección.

El punto de intersección indica el desempeño estructural de la edificación. No obstante antes de realizar la identificación del punto de desempeño, se debe realizar la reducción de la curva de demanda sísmica siguiendo el procedimiento que se indica en [22].

#### Reducción de la curva de demanda

La reducción de la curva de demanda se lleva a cabo, inicialmente calculando la curva bilineal de capacidad, mediante la intersección de dos líneas, la primera está determinada por la tangente al rango elástico, y la segunda ubicada tal que  $A_1$  sea igual que  $A_2$  como se observa en la figura 4.2.

Figura 4.2: Representación bilineal de la curva de capacidad



Fuente: Adaptado de [22]

Por consiguiente se determina el coeficiente de amortiguación viscosa equivalente  $\beta_0$ . Adicionalmente se debe determinar el coeficiente  $k$  en función del tipo de

comportamiento estructural los cuales se dividen en tres:

- Tipo A: Representa ciclos de histéresis estables, razonablemente completos, y se le asigna un  $k$  de 1.0.
- Tipo B: Representa una reducción moderada de área y se le asigna un  $k$  básico de  $2/3$ .
- Tipo C: Representa un ciclo histerético deficiente con una reducción sustancial del área del ciclo y se le asigna un  $k$  de  $1/3$ .

$$k = 1,13 * \frac{0,51(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} \quad (4.28)$$

$$k = 0,845 * \frac{0,446(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} \quad (4.29)$$

Cuadro 4.1: Coeficiente  $k$  en función del tipo de comportamiento estructural

Tipo de comportamiento estructural	$\beta_0$ (porcentaje)	$k$
Tipo A	$\leq 16.25$	1.0
	$\leq 16.25$	Ecuación 4.28
Tipo B	$\leq 25$	0.67
	$\geq 25$	Ecuación 4.29
Tipo c	Cualquier valor	0.33

Una vez determinado  $k$ , se obtiene el coeficiente de amortiguación viscosa equivalente  $\beta_0$  y el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\beta_0 = \frac{63,7(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} \quad (4.30)$$

$$\beta_{eff} = k\beta_0 + 5 \quad (4.31)$$

Una vez determinado el coeficiente de amortiguación viscosa efectivo, se deben obtener los coeficientes de reducción SRA para la zona de la meseta de la curva de demanda y SRV para el resto de valores de la curva mediante las siguientes ecuaciones.

$$SR_A = \frac{3,21 - 0,681 \ln \beta_{eff}}{2,12} \quad (4.32)$$

$$SR_V = \frac{3,31 - 0,41 \ln \beta_{eff}}{1,65} \quad (4.33)$$

También existen valores mínimos admisibles para dichos coeficientes de reducción, en función al tipo de comportamiento estructural que se pueden observar en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2: Coeficiente mínimos  $SR_A$  &  $SR_V$

Tipo de comportamiento estructural	$SR_A$	$SR_V$
Tipo A	0.33	0.5
Tipo B	0.44	0.56
Tipo c	0.56	0.67

Finalmente se reduce la curva de demanda en unidades de aceleración espectral ( $S_a$ ) y desplazamiento espectral ( $S_d$ ), con las siguientes ecuaciones.

$$S_a(\text{reducido}) = SR_A * S_a \quad (4.34)$$

$$S_d(\text{reducido}) = SR_V * S_d \quad (4.35)$$

#### 4.1.5. Validez del modelo planteado

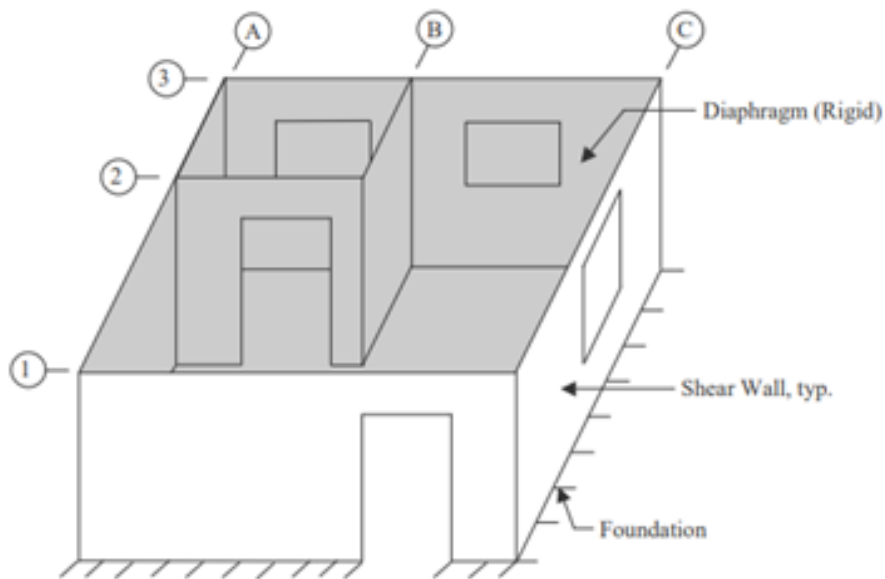
El procedimiento experimental en el cual se basa el desarrollo del proyecto fue desarrollado por el Consorcio de Universidades para la Investigación en Ingeniería Sísmica (CUREE – “Consortium Universities for Research in Earthquake Engineering”) el cual trabajó de la mano con el Instituto Tecnológico de California (CALTECH) [32], en donde a través del Software OpenSees se presenta un modelo numérico que predice la respuesta sísmica de edificaciones de madera.



### Configuración estructural del modelo de construcción

La figura 4.3 muestra la configuración estructural de un edificio típico con estructura de madera con diseño simplificado de la construcción a un solo nivel, los principales elementos estructurales que componen la edificación son: muros de corte exteriores e interiores, tabiques interiores, y diafragmas de suelo y Techo. La estructura del edificio está unida a una fundación rígida.

Figura 4.3: Componentes de una estructura de madera de un solo piso



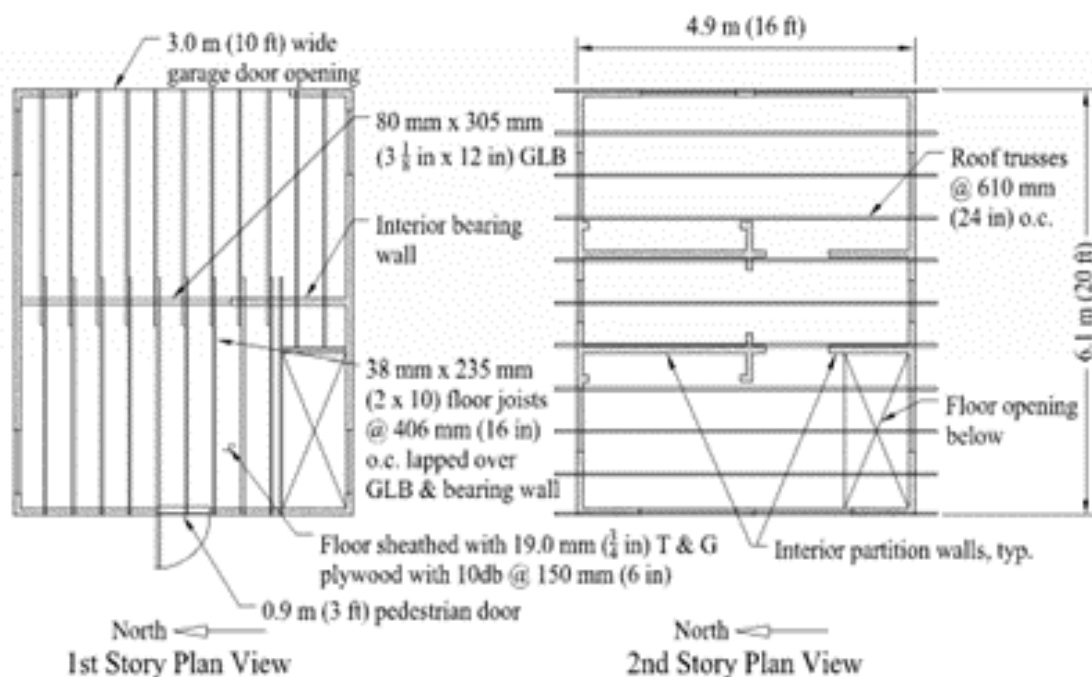
Fuente: Adaptado de [32]

### Análisis no lineal de edificios WoodFrame

La ejecución de pruebas de mesa vibratoria a una casa de dos niveles con sistema de construcción WoodFrame hace parte de uno de los proyectos de investigación de CUREE-CALTECH, el cual presenta un modelo a escala de la vivienda que posee características de las viviendas de emergencia que se someten al estudio.

La Figura 4.4 muestra la vista en planta del primer y segundo piso de la estructura de prueba y la figura 4.5 muestra la vista de elevación de la edificación, en ambas figuras se identifican los principales componentes estructurales de la construcción de prueba.

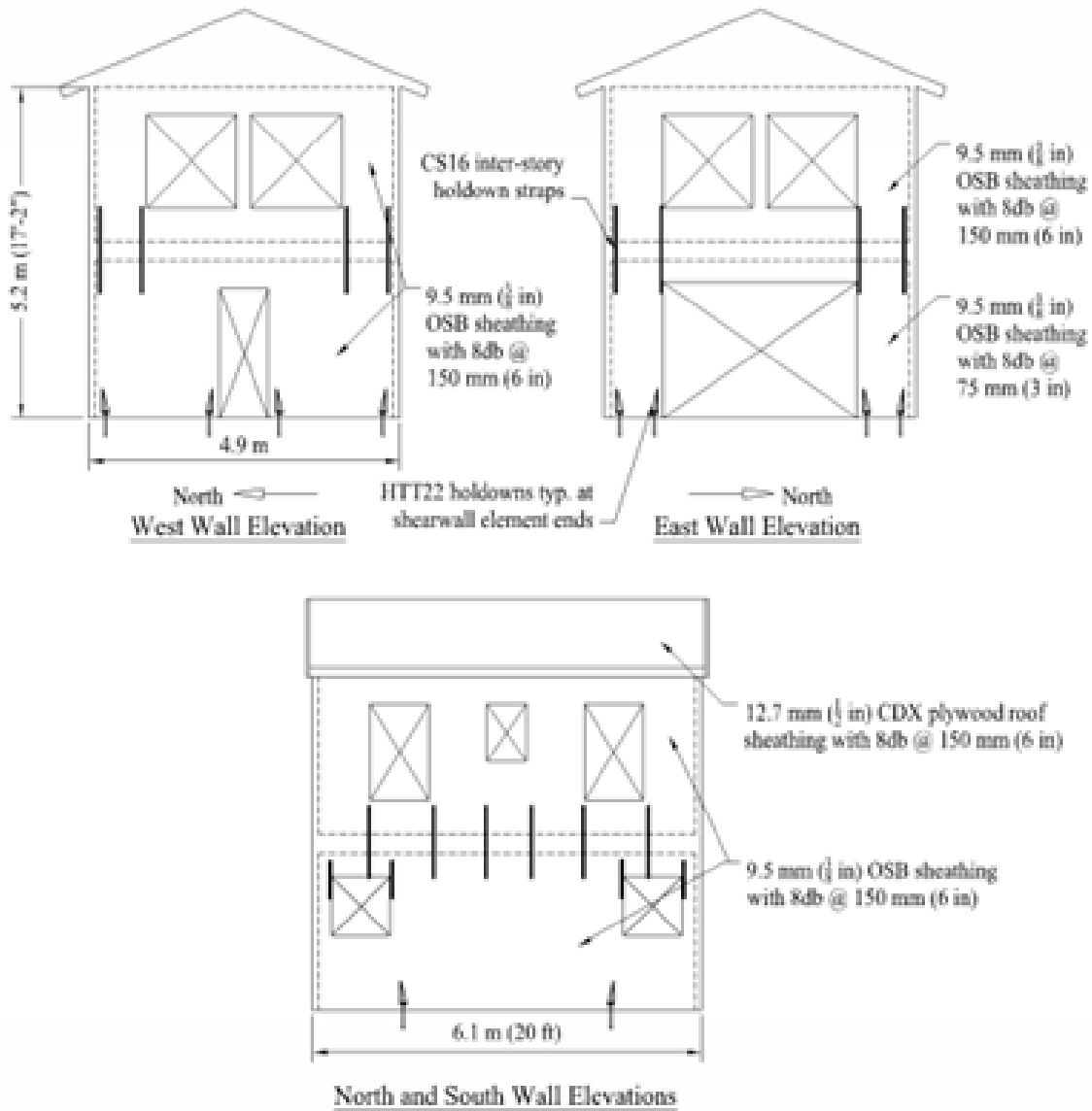
Figura 4.4: Vista en planta de la estructura de prueba que muestra los componentes estructurales principales



Fuente: Adaptado de [32]

El desarrollo del modelo a gran escala se dio en 10 fases de construcción diferentes, para la fase 9 y 10 la estructura comparte el mismo diseño del edificio, aunque la fase 9 consistía en la estructura de madera desnuda como se muestra en la figura 4.6 mientras que la fase 10 incluye acabados de paredes exteriores e interiores (paneles de yeso y estuco) junto con detalles completos de puertas y ventanas como se muestra en la figura 4.7.

Figura 4.5: Vistas de elevación de las estructuras de prueba mostrando los principales componentes estructurales



Fuente: Adaptado de [32]

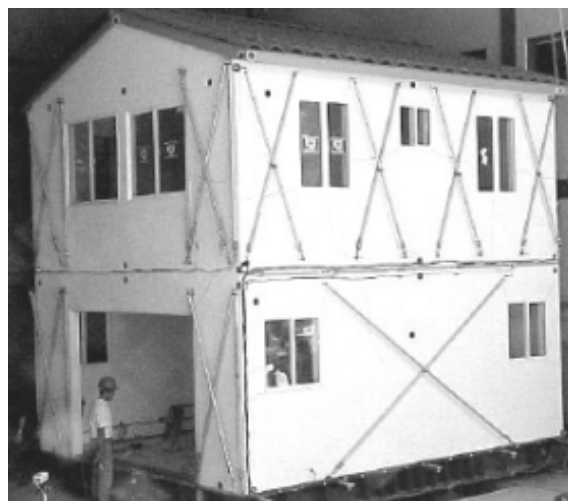
Los muros de corte exteriores están diseñados para soportar las cargas por gravedad junto con muro interior portante del primer piso y la viga laminada encolada al nivel de suelo. Todos los muros de corte fueron enfundados con paneles de tablero de fibra orientada (OSB) de 9.5 mm de espesor sujetos al marco estructural con 8 clavos instalados por pistola.

Figura 4.6: Estructura de prueba fase 9



**Fuente:** Adaptado de [32]

Figura 4.7: Estructura de prueba fase 10



**Fuente:** Adaptado de [32]

Las paredes exteriores del segundo piso estaban unidas a las paredes del primer piso a través de las correas, y las paredes del primer piso estaba atadas a los cimientos mediante herrajes de conectores de acero tales como pernos de anclaje distribuidos alrededor de la cimentación como se muestra en la figura 10.

El peso sísmico de la estructura fue de 110 kN y el periodo de vibración estimado por el Código Uniforme de Construcción (ICBO-1994) fue de 0.18 s para una zona sísmica 4 y un factor de reducción de fuerzas de 8.

### **Descripción del proyecto (fase 9 y 10)**

Durante las fases 9 y 10 la estructura de prueba fue sometida a extensas series de pruebas que incluyeron un estado estacionario y movimientos sísmicos del suelo, la entrada de estado estable se utilizó para determinar las características de amortiguación y los movimientos sísmicos del suelo fueron usados para determinar la respuesta inelástica de la estructura bajo intensidades crecientes de agitación.

La estructura de prueba se ancló a la mesa vibratoria mediante una base rígida de acero especialmente ajustada la cual estaba atornillada a la parte superior de la mesa vibratoria. Esta base tenía incorporados brazos estabilizadores que cumplían la función de acomodar la huella de la estructura de prueba.

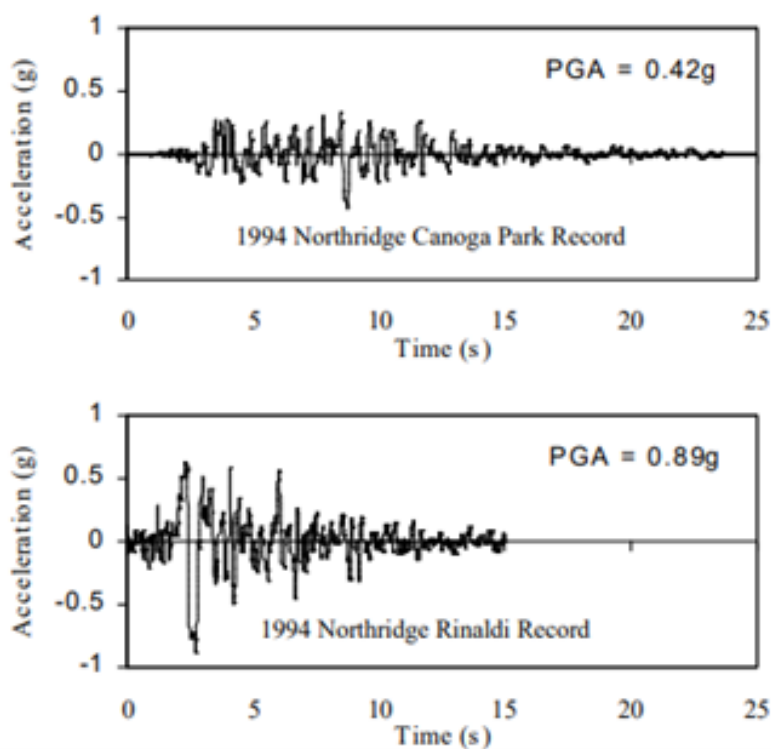
Tanto para la fase 9 como para la 10 se realizaron cinco niveles de pruebas sísmicas en la estructura de prueba, los niveles de prueba sísmica están determinados a partir de representaciones de eventos sísmicos que han ocurrido en lo largo de la historia en la zona de estudio. Como parte del programa de prueba se repitió una prueba sísmica una vez que el la deriva del muro excedió el 0.5 % de su altura, para la fase 9 esto sucedió en el nivel 3, mientras en que la fase 10 ocurrió en el nivel 4, la designación para estas pruebas son 9.S.3R y 10.S.4R, respectivamente.

Durante la fase 9 la estructura de prueba fue sometida, a su vez a cada uno de estos movimientos del terreno sin ninguna reparación o modificación de la estructura, para la fase 10 la estructura fue extensamente reparada para devolverla tanto como sea posible a su estado inicial sin daños, las pruebas en la fase 10 continuaron sin reparaciones de la estructura de prueba en la ejecución del método de la mesa vibratoria.

La estructura fue monitoreada con casi trescientos instrumentos digitales para medir fuerzas, desplazamientos y aceleraciones en la estructura durante las pruebas de mesa vibratoria, la información de interés es que aquella que describe el desplazamiento en un historial de tiempo y la aceleración absoluta a nivel del Techo.

La figura 4.8 muestra la aceleración de los eventos sísmicos que fueron tomados para realizar la simulación en la estructura de prueba través de la mesa vibratoria.

Figura 4.8: Aceleración en el Tiempo de los eventos sísmicos tomados para la simulación

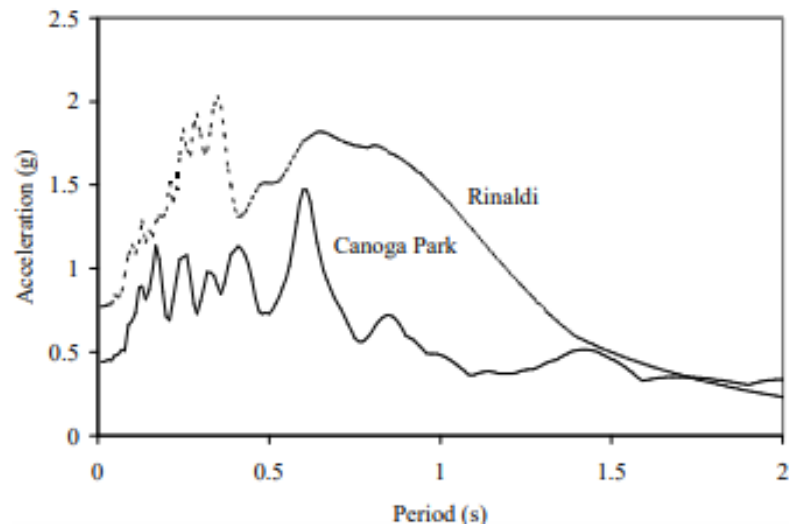


Fuente: Adaptado de [32]

La figura 4.9 muestra la gráfica de los movimientos de tierra de terremotos utilizados en las pruebas sísmicas y su valor absoluto en los espectros de respuesta de aceleración para un 5% de amortiguación.

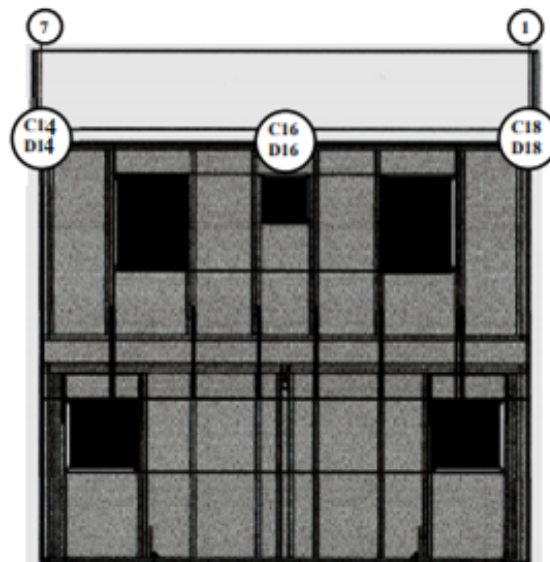
La figura 4.10 muestra la ubicación de los puntos que serán tomados para la determinación de comparación de resultados con el modelo SAWS y la prueba de mesa vibratoria ejecutada.

Figura 4.9: Movimientos de tierra de terremotos utilizados en las pruebas sísmicas y su valor absoluto en los espectros de respuesta de aceleración para un 5% de amortiguación



Fuente: Adaptado de [32]

Figura 4.10: Ubicación de las medidas de desplazamiento relativo (C14, C16 Y 18) y la aceleración absoluta (D14, D16 y D18) a lo largo de la pared sur de la estructura de prueba



Fuente: Adaptado de [32]

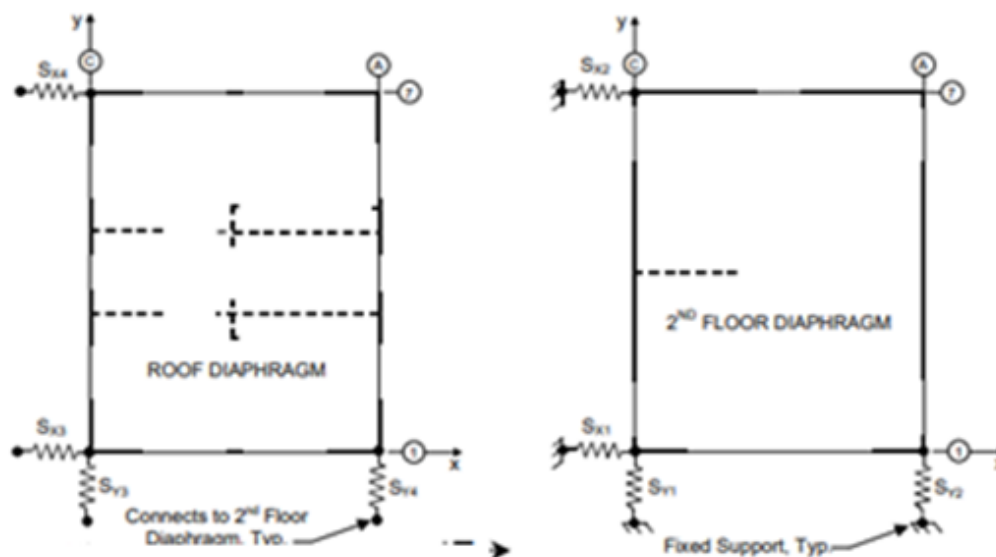
### Implementación del modelo de análisis sísmico

La implementación de este modelo tiene la finalidad de proporcionar la implementación de un modelo histerético unidimensional desarrollado por parte del proyecto marco de madera de CUREE-CALTECH que cuenta con información de la respuesta sísmica de los componentes estructurales principales en las edificaciones de madera.

Con el modelo a gran escala se determina el modelo SAWS mostrado esquemáticamente en la figura 4.11, está compuesto por ocho elementos de resorte en los muros de corte y dos diafragmas rígidos, uno para el segundo piso y otro para el nivel del Techo. No obstante la respuesta de fuerza - deformación de cada resorte en la pared requiere la especificación de diez parámetros histerético los cuales se determinan a partir del análisis complementario de análisis cíclico de muros de corte (CASHEW – “Cyclic Analysis of SHEar Walls”).

Los datos de entrada a CASHEW requieren la especificación de la geometría de la pared, la rigidez de los paneles de revestimiento si es el caso y las propiedades histerética de los conectores los cuales consisten en clavos, situación que posee similitud a la estructura que es objeto estudio en este documento.

Figura 4.11: Modelo SAWS de la estructura de prueba de la mesa vibratoria de la fase 9

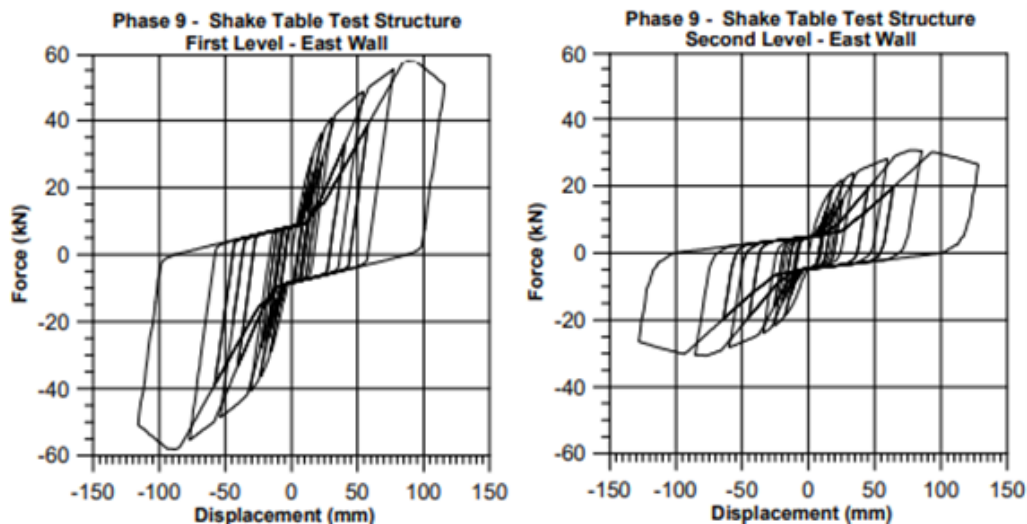


Fuente: Adaptado de [32]



La figura 4.12 muestra las predicciones CASHEW de la respuesta cíclica de la cizalladura para los muros de corte de madera del 1er y 2do nivel de la estructura sometida a la prueba de la mesa vibratoria.

Figura 4.12: Predicciones CASHEW de la respuesta cíclica de la cizalladura del muro de corte este de 1er y 2do Nivel (fase 9)



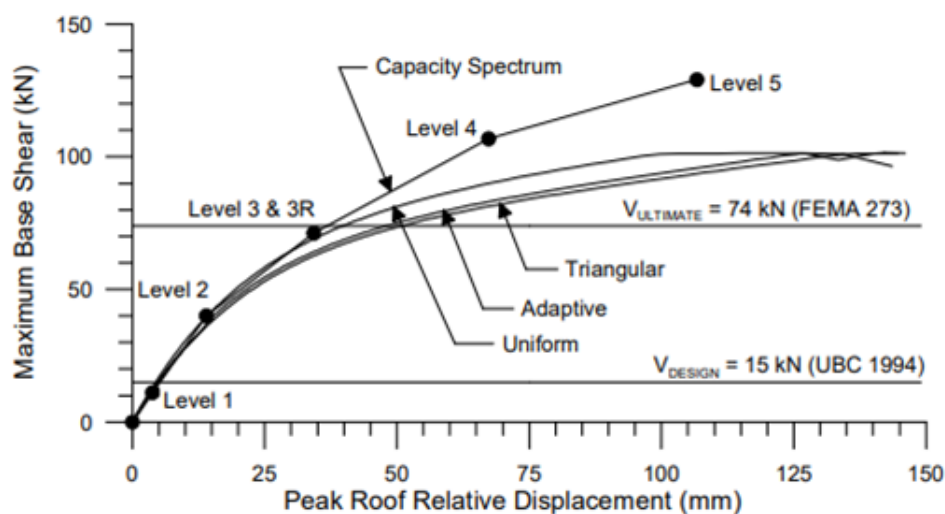
Fuente: Adaptado de [32]

Con relación a los resultados obtenidos se realiza la comparación de los parámetros histeréticos para los elementos resorte del muro de corte de madera, información que relaciona datos de aceleración absoluta máxima y desplazamiento relativo máximo en los puntos de ubicación que son identificados en la prueba de mesa vibratoria.

Con todos los datos arrojados por SAWS se puede crear el espectro de capacidad experimental de la fase 9 y las predicciones Pushover SAWS, a partir de las correspondientes distribuciones de carga lateral que son adaptable, uniforme, triangular y modal como se puede observar en la figura 4.1 lo cual contribuye a establecer que cualquier patrón de carga usado en viviendas de un solo nivel arroja el mismo resultado al aplicar el 100% del cortante basal en el Techo de la edificación.

El análisis de la fase 10 es descartado debido a que generalmente las casas que están incluidas en el programa de la fundación Techo no poseen acabados con estuco o yeso sino se asemejan al modelo descrito en la fase 9 el cual consiste en madera desnuda.

Figura 4.13: Espectro de capacidad experimental de fase 9 y predicciones de empuje SAWS



Fuente: Adaptado de [32]

Una vez obtenidos los resultados de las características dinámicas, el empuje estático y las respuestas sísmicas de la estructura, los autores del proyecto argumentan que para la fase 9 CASHEW se puede utilizar directamente para calibrar los elementos resorte del muro de corte en el modelo SAWS. Aunque también demuestran que el análisis de la fase 9 y 10 ilustra la flexibilidad y facilidad de la implementación de SAWS para modelar estructuras de madera con o sin acabados en las paredes.

Las capacidades predictivas de SAWS se demostraron a partir del análisis de las predicciones numéricas sobre las características dinámicas, el empuje estático (Pushover) y las respuestas sísmicas de la estructura concluyendo que estas son buenas ya que muestran buena concordancia con los resultados obtenidos experimentalmente, por ejemplo, la diferencia porcentual del desplazamiento relativo máximo estuvo dentro del 10 % en relación con las respuestas medidas experimentalmente.

El programa SAWS ha sido escrito en lenguaje de programación FORTRAN 77 y fue una de las primeras versiones que se desarrolló para definir las características de la madera en un software computacional, más adelante se desarrolla OpenSees, y se empiezan a agregar las curvas de histéresis del comportamiento de los diferentes materiales entre esos la madera, convirtiendo el código desarrollado en lenguaje FORTRAN a lenguaje TCL [33].

Los resultados obtenidos a partir del modelamiento estructural por medio del software no se alejan de la realidad en comparación a los obtenidos por la prueba de mesa vibratoria que se ejecuta en el modelo a gran escala sometido lo que genera validez en los procedimientos que se describen en el documento para la resolución del problema, además el sistema evaluado es similar al de Techo el cual está compuesto por muros de corte, láminas de madera y un sistema de uniones clavadas y los resultados más críticos de edificaciones hasta con cinco niveles no muestran diferencias grandes lo que conlleva a deducir que estas diferencias tienden a disminuir al tratarse una estructura de un nivel.

La información de la literatura es usada para el desarrollo de la metodología que da solución a la problemática del proyecto, en donde se utiliza la curva de histéresis para la madera que proporciona SAWS MATERIAL convertida al lenguaje de programación de OpenSees TCL.

## **4.2. MARCO CONCEPTUAL**

### **Desigualdad social**

La desigualdad social según la organización de las naciones unidas (ONU) [34] no se trata solo de la riqueza, o se resume en el patrimonio o en los ingresos de un individuo sino también en la facilidad de adquisición de los servicios de salud, educación de calidad y servicios públicos. Haciendo referencia al abismo creciente entre el bienestar de las distintas clases sociales existentes en la humanidad.

### **Necesidades habitacionales precarias**

Las necesidades habitacionales son aquellas que carecen de los atributos planteados en la Observación General 7 del comité de La Red Internacional para los Derechos Económicos, Sociales y Culturales (DESC), en donde se plantea “El derecho a una vivienda adecuada” [35]. Los atributos hacen referencia a:

### **Seguridad jurídica de tenencia**

Este atributo genera una gran relevancia frente a la protección contra desalojos forzosos, expropiaciones, acorralamientos, contemplaciones en los costos relacionados a la ocupación de la vivienda reconociendo las distintas alternativas de tenencia de una vivienda [35].

### **Disponibilidad de servicios, materiales, facilidades e infraestructura en las viviendas**

Se refiere al suministro de los servicios relacionados a la vivienda: agua potable, recolección de basuras, alcantarillado, electricidad, gas natural entre otros, ofreciendo todo lo necesario para desarrollo plenamente la vida de un ser humano [35].

### **Gastos soportables**

Referido a las cargas económicas relacionadas con la habitación de una vivienda, que éstas no sean elevadas y logren afectar otras necesidades básicas del hogar [35].

### **Habitabilidad**

Este atributo hace referencia a la seguridad y salubridad, que hacen apropiado un lugar para que un ser humano se desarrolle en unas condiciones mínimas de dignidad y desarrolle de forma libre su proyecto de vida, también requisitos de higiene, calidad y espacio en donde no se atente con la integridad física y salud de la humanidad [35].

### **Localización adecuada**

Se refiere a una localización que permita el acceso a oportunidades de empleo y de atención para niños, servicios de educación, salud o la vida de las personas por razones de contaminación [35].

### **Adecuación cultural**

Reconocimiento de la vivienda como espacio de construcción social que refleje las costumbres, tradiciones y cultura familiar [35].

### **Déficit de vivienda en Bogotá**

El déficit de vivienda es la base para medir el estudio de las necesidades habitacionales de los seres humanos. El problema de la vivienda no se limita a los asuntos del ambiente físico y del interior del hogar, sino se deben tener en cuenta los atributos anteriormente mencionados en donde se aprecian factores como: alto riesgo geológico y tecnológico, vulnerabilidad estructural de las viviendas, obsolescencia, localización en áreas de protección ambiental, uso del suelo incompatibles con el residencial, inseguridad de tenencia, precariedades en el equipamiento urbano, esto y algunos otros factores no son tenidos en cuenta en las mediciones de déficit de vivienda convencional [36].

## **Vivienda de emergencia**

El principio fundamental de las viviendas de emergencia según la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio Interior (ONEMI) es dar solución en corto plazo o de manera temporal al problema de habitabilidad a raíz de un evento catastrófico que inhabilita su hogar [37], sin embargo por la necesidad habitacional en Colombia, Techo usa este tipo de vivienda para abarcar áreas de vulnerabilidad en Bogotá y de esta manera brindar una mano amiga en forma de oportunidad en el mejoramiento de la calidad de vida de las familias beneficiadas por el programa.

## **Madera**

La madera estructural es aquella que posee un uso específico en el planteamiento de sistemas de construcción de estructuras y por tanto posee propiedades mecánicas en exclusivas especies de madera que permiten la ejecución de los métodos establecidos. Entre algunos sistemas de construcción de madera más utilizados están: Sistema Plataforma, Sistema de panel SIP, Sistema Block, Sistema Poste-Viga y CLT (Paneles de Madera laminada) [38].

## **Riesgo sísmico**

El riesgo sísmico esta intrínsecamente relacionado con la peligrosidad y la vulnerabilidad sísmica. La relación de estos factores es la que crea el núcleo de las consecuencias potenciales provocadas por un evento sísmico como resultado de las fallas estructurales [39].

## **Peligrosidad sísmica**

La peligrosidad sísmica se defina como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que provoca efectos desfavorables a la actividad humana, estos fenómenos además del movimiento de terreno, pueden estar relacionados a fallas del terreno, deformación tectónica, licuefacción, inundaciones y tsunamis. El tamaño y la localización de estos efectos dependen de factores principalmente geológicos y geotécnicos del lugar, pero indudablemente las características del evento sísmico son las que contribuyen a que exista una caracterización de las zonas sismo-tectónicas con el fin de hacer identificación del comportamiento sísmico probabilístico de una zona.[39].

## **Vulnerabilidad sísmica**

La vulnerabilidad sísmica es una forma en la que se clasifica la susceptibilidad de la calidad estructural de una edificación en donde se definen rangos de vulnerabilidad ante la acción de un terremoto, es decir la calidad estructural o capacidad

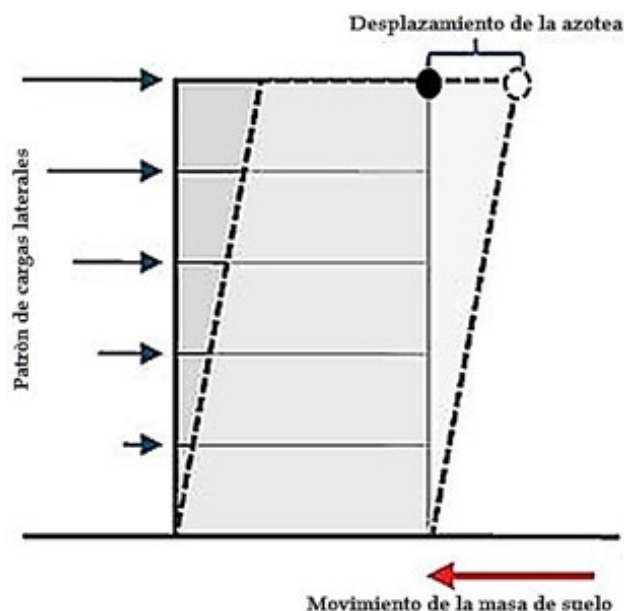
que poseen los elementos para resistir un terremoto [39].

### Análisis estático no lineal (Pushover)

Es un método de análisis simplificado que se encuentra dentro de los análisis sísmicos inelásticos los cuales ayudan a entender cómo será el comportamiento estructural de determinada edificación una vez su sollicitación exceda su capacidad elástica determinando la capacidad de resistencia de la estructura y comparándola con la demanda ante un evento natural, es necesario recibir información específica sobre la estructura tales como características de los materiales, geometría, patrones de carga, resistencia en elementos estructurales entre otros [40].

La denominación PUSHOVER se traduce como “empuje” o “hacer caer” [40], haciendo referencia al proceso iterativo de forma secuencial hasta la falla estructural total de la estructura en dos instantes al no generar un análisis no lineal en el tiempo historia de la edificación, sino enfocándose en su estado inicial y estado final una vez ocurrida la eventualidad sísmica tal como se ve en la figura 4.14 . El PA es un método capacidad-espectro en donde la determinación del punto de desempeño estructural posee unas raíces en la capacidad, la demanda y el desempeño de la construcción.

Figura 4.14: Estado inicial y final análisis pushover para una estructura



Fuente: Adaptado de [41]

## Rigidez

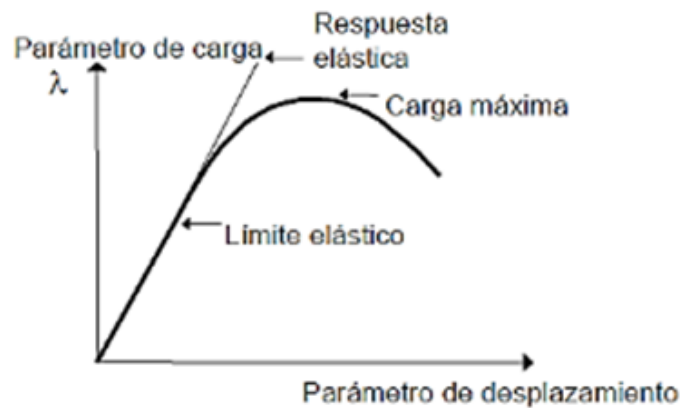
La rigidez es el término que crea una diferencia entre un análisis lineal y uno no lineal, definiéndose como la capacidad para soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones en un elemento estructural interviniendo el soporte o apoyo del elemento, la forma y material, no obstante la diferencia radica en que en el análisis no lineal se contemplan cambios en la rigidez debido a cargas externas incrementales, contrario a esto en el análisis lineal se conserva la rigidez estructural inicial en todo el proceso de desplazamiento [41].

## Curva de capacidad

La capacidad de la estructura depende de la rigidez, la deformación y la resistencia de cada uno de los elementos individualmente, para la obtención del diagrama fuerza-desplazamiento se realiza la modificación de cada rigidez de los componentes que alcanzan el límite elástico hasta alcanzar la inestabilidad estructural o un límite establecido [41].

La curva de capacidad es una demostración gráfica de la habilidad de una estructura para resistir la deformación partiendo de la determinación de una demanda sísmica.

Figura 4.15: No linealidad estructural



Fuente: Adaptado de [41]

La curva de capacidad es generada a partir de la relación entre el cortante en el base generado por las fuerzas y los desplazamientos en el nivel superior de la estructura, considerando el primer modo de vibración estructural de una edificación [41].

### **Demanda sísmica**

La demanda sísmica en los métodos de análisis no lineal emplea desplazamientos laterales como condición de diseño, estableciendo la respuesta máxima esperada del edificio durante la eventualidad sísmica como la demanda de desplazamiento para una determinada estructura y una sollicitación sísmica. La demanda se relaciona intrínsecamente con la amenaza sísmica y con el sitio de ubicación de la estructura [40].

La demanda sísmica es presentada a través de un espectro de respuesta en formato aceleración-desplazamiento (AD), el cual representa la respuesta máxima en sistemas de un grado de libertad con efecto de péndulo invertido, permitiendo superponer la capacidad y la demanda en un mismo diagrama e identificar el nivel de desempeño de una estructura [22].

### **Desempeño**

El desempeño se determina a partir de la curva de capacidad y el desplazamiento de demanda (espectro) de la estructura, consiste en una verificación de que el daño causado a los elementos estructurales y no estructurales este en el rango aceptable del desempeño objetivo, lo cual consiste en predeterminedar el comportamiento estructural adecuado con el fin de proteger la vida de los ocupantes, los daños estructurales y su reparabilidad, definiendo la condición limite que se espera en el funcionamiento de la edificación posteriormente al evento telúrico [40].

### **Patrones de carga**

Conjunto de cargas al que se somete un modelo estructural analítico a través de un software de análisis estructural actuando en cada diafragma de cada nivel de la estructura [40].

### **Elementos estructurales**

Son elementos y componentes los cuales aportan capacidad de resistencia al colapso estructural sometidos a fuerzas externas inducidas por un movimiento sísmico en cualquier dirección, aunque si existe un grado de permisibilidad de daño esto no debe comprometer la funcionalidad de resistencia al colapso estructural manteniendo en pie la estructura en el momento de un evento sísmico [40].

### **Elementos no estructurales**



Los elementos no estructurales son aquellos que no contribuyen de manera significativa a la resistencia al colapso de la edificación, por esto se permiten que experimenten daños considerables y grandes deformaciones generando un riesgo reducido a la caída de elementos pesados a los ocupantes de la edificación [40].

### **Nodo de control**

Es un punto de coordenadas conocidas dentro del sistema estructural principal, que se forma por la intersección de una viga-columna y su desplazamiento es monitoreado en el momento de ocurrencia de un sismo, la ubicación debe ser en el centro de masa del Techo o azotea de la edificación [40].

### **Mapa de microzonificación**

Un mapa de microzonificación es una representación gráfica de un territorio en donde se define una característica en determinada zona y está se identifica en un cuadro de convenciones de manera simple, organizada y con facilidad de comprensión [14].

# Capítulo 5

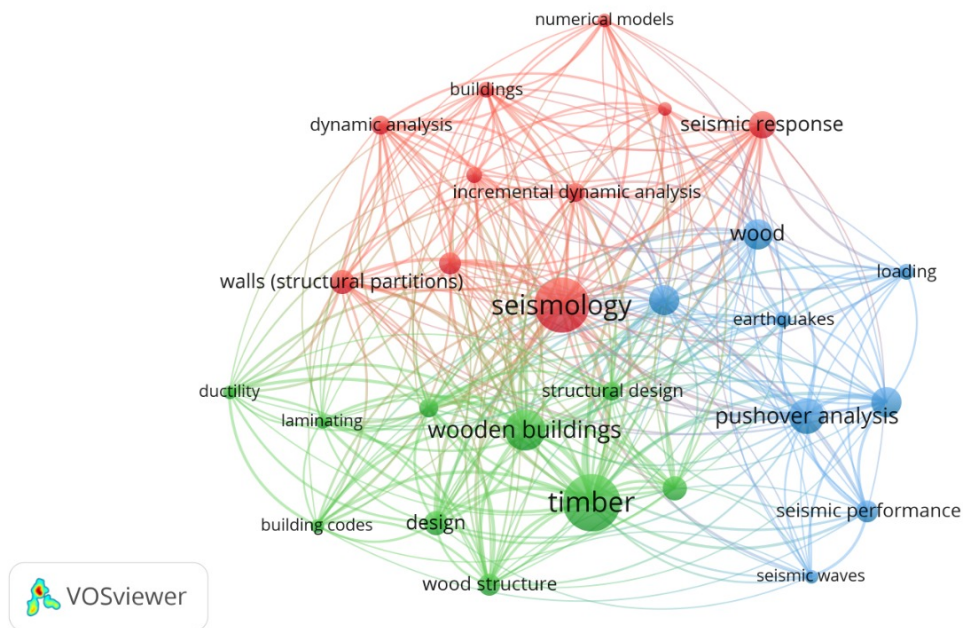
## ESTADO DEL ARTE

Como uno de los materiales de construcción más antiguos del mundo, la madera ha jugado un papel importante en las construcciones ligeras, debido a que es duradera, reciclable, sostenible y fácil de usar. En todo el mundo se están empezando a promover las investigaciones en madera cada vez más.

A través del software VOSviewer el cual permite construir y visualizar redes bibliométricas, es decir, que analiza la actividad científica alrededor de una temática o una ecuación de búsqueda que en este caso fue “ Wood AND pushover”, logra brindar la información sobre que tanto se ha estudiado sobre esta temática y según lo quiera el investigador muestra las palabras que más se han repetido en los artículos que analiza, permitiendo una perspectiva generalizada del estado del arte, en este caso arroja núcleos complementarios sobre temas como sismología, construcciones de madera, analisis pushover, diseño y codificación de sistemas estructurales de madera como se observa en la figura 5.1.

Entre estas investigaciones se ha evidenciado la importancia del análisis de las propiedades mecánicas de la madera a lo largo del tiempo como en el artículo titulado “Propiedades mecánicas de los materiales de construcción de madera de un Edificio del siglo XIX [42]. el cual se enfoca en el estudio de las propiedades mecánicas de las maderas antiguas con el fin de definir las debilidades del material y en qué áreas del mismo se deberían establecer técnicas y medidas de rehabilitación que sean adecuadas para garantizar la seguridad de estos procesos en la actualidad, la ejecución de los diferentes ensayos arroja que el contenido de agua de la madera posee influencia debido al cambio en la retracción y expansión de esta misma, induciendo la variación en la resistencia y el módulo de elasticidad, además de que la madera llega a su capacidad máxima bajo resistencia a la tracción, brindando información sobre las propiedades que tiene la madera como material principal de la metodología de construcción por estudiar.

Figura 5.1: Mapa de clusters (ecuación de búsqueda: Wood AND Pushover)



**Fuente:** Fuente propia

En todo el mundo se han realizado investigaciones para establecer medidas y mejoras de este material con el fin de poder aumentar su eficiencia para construcciones más seguras y grandes, como por ejemplo, el Código Nacional de Construcción de Canadá, permite estructuras de madera de marco ligero (LFWS) hasta seis pisos de altura. Los LFWS cuentan con un bajo costo y un rendimiento superior a la respuesta sísmica, porque la no linealidad de su estructura le permite absorber más energía. Una de las alternativas y características de mejoramiento que se están proponiendo es el revestimiento de las paredes con paneles de yeso (GWB) para proporcionar una mejor resistencia al fuego, por otra parte, los estudios relacionados con el modelo matemático de LFWS se pueden dividir en FEM (Método de elementos finitos) detallado y FEM simplificado. En el FEM detallado los miembros entramados se modelan de una forma isotrópica lineal donde los elementos y los paneles de revestimiento se modelan utilizando elementos de carcasa, este FEM detallado consume una cantidad significativa de tiempo, para el modelado y análisis, por algunas características como: múltiples conexiones no lineales de resorte de los nodos, por esto este método detallado presenta una clara deficiencia para su implementación en el ámbito académico e industrial, por otro lado el FEM simplificado se basa en el uso de resortes laterales o diagonales donde las propiedades de histéresis se derivan del ajuste de resultados de análisis de carga- desplazamiento del FEM experimental o detallado, llevando un análisis de FEM simplificado modelando muros con elementos

de viga vertical y elementos de resorte diagonales [43].

Otro análisis importante de realizar en la literatura son los estudios alrededor de las construcciones en madera a partir sistemas constructivos CLT (Cross Laminated Timber) los cuales son similares al sistema usado por la fundación basándose en su comportamiento sísmico lateral, el modelo constructivo estudiado consta de un CLT enmarcado entre los diafragmas del piso y del Techo con conectores de metal. Tamagnone [44] propuso un método no lineal para el diseño sísmico de muros CLT, que proporciona la capacidad de balanceo, Dujic y Aicher [45] probaron una serie de configuraciones de pared CLT diferentes, para estudiar los efectos de las condiciones de contorno en el desempeño del muro, Popovski en [46] realizo pruebas cíclicas de una serie de paneles de pared CLT utilizando diferentes tipos de conectores, concluyendo que el comportamiento lateral de la pared CLT bajo una carga lateral se puede ver como un panel rígido que gira alrededor de su esquina inferior o sea de forma balanceada. Actualmente la forma más común de modelar los factores más influyentes para las paredes CLT es a través de procedimientos finitos no lineales como el análisis pushover, en este caso el supuesto principal es el mínimo de resistencia, el análisis de este estudio se implementó aplicando un desplazamiento lateral monótonicamente creciente en una masa del Techo, la pared está conectada tanto al Techo como al piso mediante conectores que exhiben un comportamiento de resistencia a la tensión y al corte. También se supone que hay una fricción constante aplicada entre la parte inferior del panel de la pared y el piso, con la magnitud de la fricción proporcional a la carga de gravedad. El modelo se simplifica aún más asumiendo que el deslizamiento solo ocurre en la interfaz inferior, este modelo ayuda para poder predecir en qué medida el comportamiento de balanceo contribuye a la deriva general del muro de CLT, este método propuesto fue validado contra datos experimentales mostrando que puede reflejar adecuadamente las tasas de contribución y proporcionar predicciones precisas sobre la capacidad de carga última de la pared CLT cuando los elementos delimitadores son casi rígidos [23].

Una investigación sobre este tipo de muros nombrados anteriormente es la de “Diseño de conexión de madera laminada cruzada atornillada con punta y modelado no lineal” esta investigación se centra en las características mecánicas de las conexiones de madera laminada cruzada (CLT) fijadas con tornillo autorroscantes (STS) a 45° sometidos cíclicamente a tensión y cortante logrando la evaluación de los modos de falla y aplicabilidad de estos mismos como conexiones sísmicas en muros, el análisis sísmico usado para obtener los resultados fue de tipo no lineal con un diseño basado en el rendimiento de las conexiones encontrando una efectividad superior en los tornillos con cabeza-arandela respecto a los tornillos completamente roscados, debido a que su capacidad de deformación final fue 15 veces mayor, la disipación de energía fue más eficiente y tanto la resistencia máxima como la rigidez elástica fueron similares, sin embargo el límite elástico del tornillo parcialmente roscado era

el 48 % del STS totalmente roscado, aportando que los procedimientos estáticos no lineales se pueden emplear para modelar las conexiones probadas y obtener datos con una precisión razonable que permitirían dar un resultado con bastante solidez analítica en el entorno estructural [47]. Este artículo aporta una visión a una posible consideración de mejoramiento estructural el cual es evidenciado a partir de la modificación de las conexiones que posea determinada edificación.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta en cualquier tipo de construcción es el comportamiento sísmico de las edificaciones de lo cual no se posee información local en entornos de construcción de viviendas de madera, una de las investigaciones en este aspecto es la que se desarrolla en el artículo “Revisión del estado del arte de la técnica del diseño sísmico de madera basado en el desplazamiento edificios.” En el cual se desarrolla un esfuerzo por estudiar el comportamiento sísmico y realizar procedimientos de diseño ampliando el uso estructural de la madera, demostrando además un balance ambiental positivo cuando se usa madera como material de construcción, asegurando que los desarrollos de la madera en la ingeniería deben satisfacer las necesidades y desafíos demandados por quienes ocupan el edificio y los compromisos sociales que esto trae consigo. Tales demandas siempre están regidas por normativas de construcción y especificaciones técnicas para los materiales [48].

En la rama de la ingeniería estructural es fundamental realizar los estudios de desempeño sísmico de cualquier edificación para lograr un diseño adecuado frente a los requerimientos que se establecen en la normativa nacional por eso el siguiente artículo se encarga de desarrollar un análisis de fragilidad sísmica de edificios de madera, teniendo en cuenta que esa fragilidad se intensifica en construcciones mal hechas como lo indica el artículo “Análisis de fragilidad sísmica de edificios de madera mal contruidos” el cual plantea el objetivo de realizar un análisis de fragilidad sísmica en edificios de madera contruidos en Yangón-Birmania proporcionando un método adecuado a través de orientaciones experimentales y numéricas. En la ejecución de la investigación se llevan a cabo pruebas para evaluar la capacidad de carga y desplazamiento de la estructura desarrollando un análisis de fragilidad el cual se convierte en un componente fundamental a la hora de referirse a temas de reducción de riesgo sísmico, teniendo en cuenta la sismicidad de la región, características de la edificación y propiedades de los materiales. Existe una gran área de estructuras en madera en barrios marginales a las cuales se les realiza la evaluación del análisis Pushover con el fin de identificar el desempeño estructural de estas mismas respecto a una posible eventualidad sísmica de VII a IX según la escala de Mercalli en ausencia de la seguridad sísmica que deberían poseer estas edificaciones, en donde se alcanza una evaluación de la capacidad del edificio en su estado real [49].

El comportamiento sísmico depende del tipo y nivel de construcción, en el artículo “Evaluación sísmica de un edificio de madera de tres pisos con un sistema CLT.”

se presentan los resultados de un estudio experimental de un sistema construido híbrido que combina la madera contralaminada (CLT) con sus propiedades de resistencia lateral y de apoyo junto con el armazón de madera tradicional (LiFS) el cual es liviano, se supuso una estructura de 3 pisos con huella rectangular de 18 x 36 pies, con una altura total de 24 pies, el esfuerzo aplicado fue de 20 psf de carga muerta y 50 psf de carga viva considerando diferentes protocolos de carga, dando resultados en la capacidad de autocentrado proporcionada por el panel CLT postensado y la gran cantidad de disipación de energía proporcionada por la pared LiFS, concluyendo en el uso de estos sistemas híbridos de dos sistemas de construcciones de madera que es prometedor y debe investigarse en diversos sistemas incluso bajo carga biaxial [50].

En [51] se hace referencia al comportamiento sísmico del edificio NEESWood mediante un análisis dinámico incremental, las respuestas estructurales se examinaron en términos de relación máxima de deriva entre pisos, y el índice de daño Park y Ang, en donde se resaltan algunas conclusiones que describen que la capacidad media de colapso del edificio NEESWood se redujo en un 18 % por movimientos de larga duración en comparación con la capacidad bajo movimientos de corta duración. La cuantificación de los efectos de la duración depende del nivel de temblor de tierra y medida de daño utilizada. En la intensidad del diseño MCE, la duración del movimiento del suelo no tiene efectos considerables sobre el rendimiento en términos de deriva. El uso de medidas acumulativas de daño Park y Ang mostró que los movimientos de larga duración tienen un efecto significativo en su rendimiento.

“Respuestas y curvas de capacidad de edificios de madera de altura media y alta sometidos a excitaciones sísmicas.” El sistema analizado consiste en una construcción de 10, 15 y 20 pisos, tipo plataforma con un núcleo de madera laminada cruzada, paredes perimetrales como resistencia de carga lateral y columnas de madera como sistemas de gravedad, la evaluación de la resistencia sísmica no lineal inelástica y la curva de capacidad de los edificios se llevan a cabo utilizando varias metodologías en donde se describe el análisis de empuje estático no lineal (Non-linear Static Pushover Analysis- NSPA), indicando en los resultados que el diseño para cada uno de los casos se rige por la deriva entre pisos causada por terremotos o cargas de viento que otorgan los requerimientos para resistencia sísmica de los diferentes modelos sometidos al método, las curvas de capacidad NSPA tienen una aproximación razonable a las curvas del análisis dinámico incremental, pero el método NSPA no permite visualizar la incertidumbre por la versatilidad de cada registro tomado por el método dinámico, aunque la relación entre la rigidez inicial y la posterior a la fluencia de los edificios en las curvas fluctúa entre 0.35 a 0.55 [25].

En Brasil se realizó una investigación de técnicas constructivas de habitación en madera, dicha investigación se enfoca en dar un diagnóstico de la productividad de viviendas de madera en Brasil, por medio de recolección de datos a través de métodos

como búsqueda en sitios web y entrevistas personales, uno de los aspectos que más compete en el artículo de la revista son los métodos constructivos contemporáneos de madera en Brasil, y la proyección que establece que una alta productividad de casas de madera ajustadas a las condiciones de habitabilidad humana podría llegar a resolver necesidades de vivienda. El método constructivo de mayor interés para esta investigación se reduce a las casas modulares CLT, debido a las semejanzas que tiene con el modelo de vivienda propuesto por Techo, ya que también tiene como núcleo los paneles de madera, los cuales componen cada sección bidimensional de cada pared y pueden ser levantados rápidamente, reduciendo el tiempo de montaje y la mano de obra en el sitio de la construcción, además de permitir conexiones entre paneles o con vigas estructurales a través de distintos mecanismos [52].

En la actualidad es importante pensar en el beneficio del medio ambiente y esta es una de las razones por las que se desea reemplazar los materiales de construcción tradicionales, como el acero y el concreto, por la madera, este material se presta de una forma eficiente para un sistema constructivo tipo LEGO, similar a los proyectos realizados por Techo. Mostrar este tipo de construcciones prueba que cuando existe la elevación del ingenio, el desarrollo deja de ser utópico para convertirse en un desarrollo con objetividad, el concepto de este sistema esta basado en bloques independientes, junto con un suelo adecuado, vigas y dinteles aislados. La “simplicidad” de estas metodologías de construcción aportan factores positivos al enfoque del presente proyecto ya que muestra que el concepto de vivienda desarmable no está alejado de la realidad que a muchos otros profesionales en el área se les ha pasado por sus cabezas, el proceso constructivo se basa en el desarrollo del ingenio de una casa de madera tipo lego que posee bloques preparados además para instalación de servicios de vivienda.

La metodología planteada no posee evidencia de investigación en Bogotá, de allí la importancia de adelantar estudios que permitan complementar información existente, debido a la falta de literatura y a la existencia de la incertidumbre del comportamiento sísmico de este tipo de sistemas constructivos que poseen como material principal la madera, no se conoce con certeza la validez de estas construcciones en ninguna zona de Bogotá.

# Capítulo 6

## OBJETIVOS

### 6.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño sísmico de las viviendas de emergencia realizadas por la fundación de Techo en las localidades de Ciudad Bolívar y Usme en Bogotá considerando diferentes posibilidades de mejora.

### 6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelar el sistema estructural utilizado por Techo de las casas de emergencia.
2. Evaluar el comportamiento sísmico actual del sistema estructural propuesto por Techo.
3. Identificar diferentes formas para mejorar la capacidad sísmica del modelo constructivo utilizado actualmente por Techo
4. Realizar un mapa que represente el desempeño de las mejoras y el modelo constructivo actual utilizado por techo , de acuerdo con la amenaza sísmica en las localidades de Usme y Ciudad bolívar en la ciudad de Bogotá.



# Capítulo 7

## ALCANCES Y LIMITACIONES

### 7.1. ALCANCES

Esta investigación cuenta con un alcance correlacional lo que se describe en la participación de determinadas variables como el material de una estructura, las características de demanda sísmica de la zona de ubicación de la estructura, la capacidad estructural de acuerdo al sistema estructural, y que a su vez cualquier modificación puede generar un efecto en las otras directamente, el desarrollo del trabajo de grado busca realizar la predicción de la capacidad sísmica del modelo constructivo actual de Techo por medio de un software de modelación, para a su vez identificar el punto de desempeño y poder proponer varios tipos de mejoras según la necesidad del suelo, amenaza sísmica y zonificación de algunas localidades de la ciudad de Bogotá, esto se logra con la relación y control de las variables sin cambiar la naturaleza del fenómeno analizado, es decir aunque se tiene un control de las variables, dicho control no es deliberado en el proceso de modelación, finalmente se presentan mapas de microzonificación según cada tipo de mejora planteada.

### 7.2. LIMITACIONES

En el desarrollo de este proyecto se deben tener en cuenta algunas limitaciones debido a que en el proyecto se plantea una metodología de análisis sísmico estático, es decir que no se obtendrán los cambios de la rigidez estructural en un historial de tiempo determinado, ya que tales resultados los arroja un análisis dinámico involucrando mayor tiempo de computación y modelación.

Este análisis puede predecir de forma eficiente las demandas locales y globales de una estructura, sin embargo es necesario conocer las limitaciones que este análisis presenta, su mayor limitación es el hecho de que no se debe tomar este método como técnica de solución general para todos los casos, aunque es irrefutable que esta es una herramienta útil es necesario aclarar que no es infalible debido a que en algunos casos puede presentar una falsa sensación de seguridad ya que el análisis se basa en

la carga estática y no puede representar fenómenos dinámicos con un alto grado de precisión, esto hace que posiblemente no detecte algunas deformaciones importantes en una estructura sujeta a terremotos severos, así como puede exagerar otras [9].

Sería contraproducente interceder por este método como una técnica de solución general para todos los casos de respuesta estructural de una edificación. Uno de los aspectos más críticos del PA es la detección solo del primer mecanismo local que se formará en la ejecución de la actividad sísmica, dejando de exponer las debilidades que se generan por las características dinámicas estructurales de la edificación, se espera regularmente que el PA proporcione muchas características de respuesta que no se puedan obtener de un análisis estático o dinámico elástico [9].

En Opensees las conexiones de los paneles y elementos se modelaron con transmisión de momento, efecto que no se conoce a ciencia cierta si sucede, ya que el tipo de conexión de la fundación es a través de clavos, y no se comprende si las uniones clavadas transfieren el momento perfectamente.

Otra limitación que tiene el proyecto es el desconocimiento de manera exacta de la curva de histéresis que describa las propiedades mecánicas de la madera utilizada, aunque se conocen las características de la madera por medio de información que brinda directamente la fundación, el software solo permite introducir estas características por medio de una curva de histéresis la cual es desconocida y en el propósito de este proyecto no está la realización de la misma, por esta razón en este aspecto se optó por utilizar información secundaria obtenida de la literatura buscando la mayor similitud con la madera que se está utilizando, dicha aproximación se define y explica en el marco teórico.

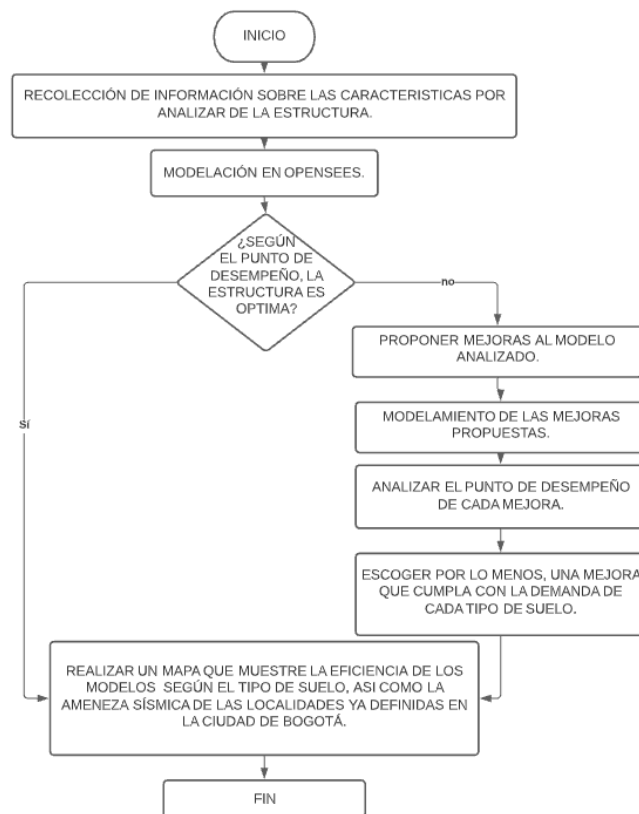
# Capítulo 8

## METODOLOGÍA

### 8.1. PROCESO METODOLÓGICO

El proceso metodológico se puede ver de manera general en la figura 8.1.

Figura 8.1: Descripción de la metodología por medio del diagrama de flujo



Fuente: Propia

En este diagrama de flujo se evidencia el proceso que se va a realizar para llegar al cumplimiento de los objetivos planteados, planeando y diferenciando las fases necesarias para el desarrollo adecuado de este proyecto.

Con base en lo anterior se plantean 8 fases:

### **8.1.1. Fase 1. Recolección de información sobre las características por analizar de la estructura.**

En esta fase inicial se pretende recolectar la información de la geometría y dimensionamiento de los elementos estructurales de la vivienda a través del manual de construcción proporcionado por Techo, los cuales indican de manera muy precisa estos aspectos, además de la ubicación, colocación y luces de los elementos necesarios, por otro lado en esta fase también es necesario definir la información en cuanto a las propiedades mecánicas del material, que en este caso es la madera de tipo PinusPatula, esta es la madera utilizada por la fundación Techo en el desarrollo de las viviendas de emergencia, se necesita resumir las propiedades mecánicas de este material por medio de la curva de histéresis debido a que es esta la que necesita el programa Opensees para poder modelar y analizar la estructura que es uno de los puntos principales para la realización de este proyecto.

### **8.1.2. Fase 2. Modelación de Opensees.**

En esta segunda fase se busca proceder con el análisis pushover por medio de Opensees, siendo esta una plataforma informática para la aplicación de simulaciones de sistemas estructurales y geotécnicos sometidos a fuerzas sísmicas, dicha plataforma cuenta con capacidades avanzadas para la modelación de la respuesta no lineal de sistemas estructurales, este software se programa en un lenguaje Tool Command Language o lenguaje de herramientas de comando (TCL).

Se espera seguir una serie de pasos específicos, los cuales se pueden dividir de la siguiente forma:

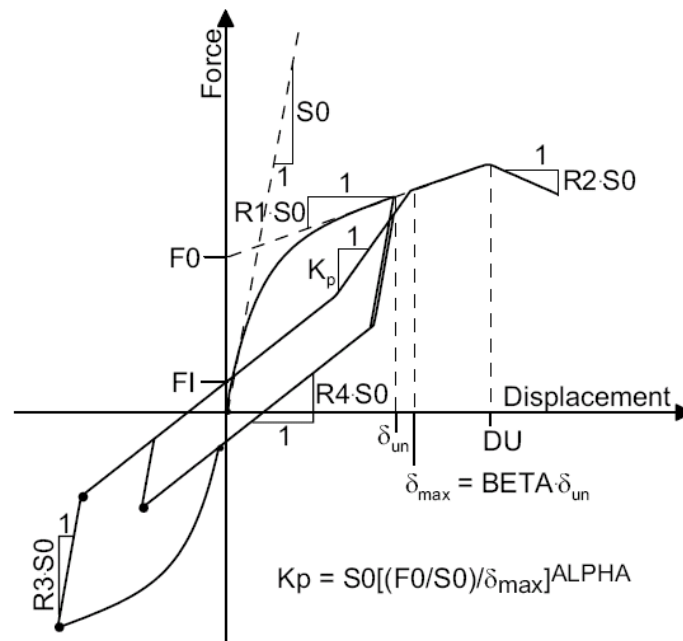
1. El paso número uno para realizar la modelación en Opensees es introducir la curva de histéresis que resume las propiedades mecánicas de la madera Pinus-Patula, esto se realiza por medio del siguiente comando:

“uniaxialMaterial SAWS \$tag \$F0 \$FI \$DU \$S0 \$R1 \$R2 \$R3 \$R4 \$alph [33].

Donde \$F0 y \$FI son fuerzas y \$DU es el desplazamiento, estos valores se extraen de la curva de histéresis del material, como se muestra en la figura 8.2.

Este comando agrega la grafica de la forma representada en la figura 8.2. Esta grafica es el producto de un proyecto de construcción en madera para mitigación de amenaza sísmica realizado en Fortran que fue el primer lenguaje de programación, con el título "Elementos de madera tipo frame", procedimiento que ha sido validado en el marco teorico de la investigación.

Figura 8.2: Curva de Histéresis construcción de madera para mitigación de amenaza sísmica



Fuente: Adaptado de [32]

2. El paso siguiente es definir las secciones por fibras [53], es decir separar por cuadros la sección transversal, esto permite un análisis más preciso y que abarca la totalidad de la sección trasversal.
3. Después de esto se debe asignar el material, la sección transversal y las cargas con parámetros gravitacionales.
4. En este paso se procede a realizar la asignación de los parámetros para el análisis pushover, donde debe definirse el nodo de control, el desplazamiento de control, el incremento del desplazamiento y el patrón de aplicación de la carga lateral.

El nodo de control es un nodo en el Techo, el desplazamiento de control es una magnitud que mide el valor límite del desplazamiento en el análisis. Teniendo

en cuenta que La construcción a modelar es de un piso, solo se utiliza un patrón de carga, en dónde el 100 % de la fuerza se aplica en el Techo.

5. El análisis pushover por medio del programa Opensees arroja como resultado un block de notas donde se tienen dos columnas, una de ellas es la fuerza y la otra el desplazamiento.
6. Después de tener los resultados arrojados por el programa se procede a realizar la curva de capacidad Fuerza vs Deformación por medio de la herramienta Excel, con esta curva terminaría el análisis por medio de Opensees de la capacidad del modelo.

### 8.1.3. Fase 3. Análisis punto de desempeño.

Para analizar la capacidad de la estructura en relación con los tipos de suelo y amenaza sísmica es necesario hacerlo por medio de lo denominado “Punto de desempeño”.

El punto de desempeño es aquel que indica cuanta energía es capaz de absorber la estructura antes de fallar. Este punto de desempeño es el cruce que se genera cuando se intersecan las curvas de capacidad y las curvas de demanda, las curvas de demanda son aquellas que dependen del tipo de suelo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas dos curvas no se encuentran en las mismas unidades, la curva de capacidad está dada en fuerza vs deformación y la curva de demanda está dada en aceleración espectral vs periodo. Por ende, se deben convertir estas dos curvas a las mismas unidades, que en este caso serán aceleración espectral ( $S_a$ ) vs desplazamiento espectral ( $S_d$ ).

Los pasos para seguir en esta fase son los siguientes:

1. Obtenciones curvas de demanda: Para obtener la curva de demanda que es aquella que se puede ver en la figura 4.8, el cual también se define como espectro que esta relacionado directamente con el tipo de suelo y la microzonificación de Bogotá, el cual se define por el decreto N° 523 de 16 diciembre del 2010. se adopta ”la microzonificación sísmica de Bogotá D.C”.

Según la NSR-10 la ciudad de Bogotá se encuentra en una ubicación con amenaza sísmica intermedia estableciendo coeficientes de  $A_a$  (coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva) equivalente a 0.15 y  $A_v$  (coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva) igual a 0.20.

Se tendrán tantas curvas de demanda como tipos de suelo a analizar, los tipos de suelo que se analizaran según la microzonificación de Bogotá y las locali-

dades definidas a lo largo del proyecto son: Aluvial 50, 200 y 300, Piedemonte C, Cerros y Deposito Ladera.

Para cada tipo de suelo se tienen que utilizar unos coeficientes determinados los cuales se pueden evidenciar en el cuadro 8.1 adoptados de [1].

Cuadro 8.1: Coeficientes de diseño [1]

Zona	Fa	Fc	Tc	TI	Ao
Cerros	1.35	1.30	0.62	3.0	0.18
Piedemonte A	1.65	2.0	0.78	3.0	0.22
Piedemonte B	1.95	1.70	0.56	3.0	0.26
Piedemonte C	1.80	1.70	0.60	3.0	0.24
Lacustre 50	1.40	2.90	1.33	4.0	0.21
Lacustre 100	1.30	3.20	1.58	4.0	0.20
Lacustre 200	1.20	3.50	1.87	4.0	0.18
Lacustre 300	1.05	2.90	1.77	5.0	0.16
Lacustre 500	0.95	2.70	1.82	5.0	0.14
Lacustre aluvial 200	1.10	2.80	1.63	4.0	0.17
Lacustre aluvial 300	1.00	2.50	1.60	5.0	0.15
aluvial 50	1.35	1.80	0.85	3.5	0.20
aluvial 100	1.20	2.10	1.12	3.5	0.18
aluvial 200	1.05	2.10	1.28	3.5	0.16
aluvial 300	0.95	2.10	1.41	3.5	0.14
Depósito ladera	1.65	1.70	0.66	3.0	0.22

- Después de obtener las curvas de demanda se procederá a realizar los cambios necesarios para dejarlas en términos de  $S_a$  y  $S_d$  con la ecuación 4.27 definida en el marco teórico.
- A continuación, se realizará el análisis modal por medio de SAP 2000, para obtener las variables faltantes para reducir y dejar en términos de  $S_a$  y  $S_d$  la curva de capacidad obtenida por medio de Opensees, estas reducciones se realizan con las ecuaciones 4.25 y 4.26.
- Después de realizar estos pasos, tanto la curva de demanda como la curva de capacidad quedan en términos de  $S_d$  y  $S_a$ , pero aun no se pueden cruzar, como se esta trabajando con madera es necesario realizar una reducción de la curva de demanda, dicha reducción dependerá de la curva de capacidad como se definió en el marco teórico, con la descripción mostrada en la Figura 4.2 y las ecuaciones 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 y 4.35.

5. Finalmente se podrá realizar la intersección de estas dos curvas y así definir el punto de desempeño y analizar si el modelo constructivo actual de Techo cumple con la demanda sísmica de la zona.

#### **8.1.4. Fase 4.**

En esta fase suponiendo que el modelo actual de Techo no cumple con las demandas sísmicas de la zona, se buscara proponer tipos de mejoramiento estructural sin un gran aumento en la inversión económica de cada vivienda.

#### **8.1.5. Fase 5.**

En esta fase se procederá a hacer la modelación de las alternativas de mejoramiento definidas en la fase anterior, esta modelación se realizará de la misma manera que se hizo para el modelo actual es decir con los mismos pasos de la Fase 2.

#### **8.1.6. Fase 6.**

La fase 6 consiste en encontrar y analizar el punto de desempeño de cada mejora propuesta con cada tipo de suelo identificado en la zona analizada, como se realizo en la fase 3 para el modelo original.

#### **8.1.7. Fase 7.**

En esta fase se realiza un análisis y comparación del modelo actual de techo y las mejoras propuestas, en este análisis se busca identificar que estructuras y que características son funcionales para mejorar la capacidad sísmica de estas viviendas y así mismo las que no son funcionales, se espera encontrar por lo menos una mejora que tenga un buen funcionamiento y cumpla con la demanda sísmica de cada tipo de suelo, asegurando su desempeño y resiliencia ante un sismo o catástrofe.

#### **8.1.8. Fase 8.**

Esta es la fase final de la investigación, en esta fase se quiere realizar un mapa que muestre la eficiencia de los modelos según el tipo de suelo y amenaza sísmica de las localidades ya definidas en la ciudad de Bogotá, dicho mapa debe contar con unas convenciones que permitirán visualizar y comparar los puntos de desempeño, para así llegar a categorizar el desempeño de las viviendas según cada tipo de suelo.



# Capítulo 9

## DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 9.1. PROYECTO TECHO

Techo es una organización que se encuentra en 19 países de Latinoamérica fundada en 1997 en Curanilahue Chile, nace a partir del reconocimiento de emergencia social que tenía presencia en una injusta realidad para familias en condiciones de pobreza extrema generando consecuencias de habitabilidad precaria, fue una iniciativa ejecutada por un grupo de jóvenes universitarios inspirados y guiados por Felipe Berríos SJ, llega a Colombia en el año 2002 con la réplica de la experiencia en la implementación de este tipo de viviendas y realiza su establecimiento formal para el año 2006 [5].

Los pilares del programa Techo se basan en la fomentación del desarrollo comunitario en donde se buscan fortalecer las capacidades comunitarias que impulsen el ejercicio de la ciudadanía, esencialmente en el entorno de hábitat y habitabilidad, también juega un papel fundamental la promoción de la conciencia y acción social, desarrollándose a partir de la inclusión de un voluntariado crítico y propositivo que durante la ejecución de su rol en la organización trabaje en pro de amplificar la participación ciudadana, otro pilar de Techo es la incidencia en política, factor que busca el equilibrio social en el ejercicio pleno de los derechos ciudadanos, contribuyendo a generar cambios estructurales para la comunidades en situaciones de denuncia por exclusión y vulneración de los derechos de la población perteneciente a asentamientos informales, por último se tiene el desarrollo institucional que consiste en el mejoramiento constante del trabajo realizado por la organización.

#### Geometría de las viviendas

La geometría y el dimensionamiento de los elementos estructurales de la vivienda se obtuvieron a través del manual de construcción proporcionado por esta fundación en los cuales se indican las dimensiones de los elementos, la ubicación, colocación

y las luces necesarias para generar el modelo analítico de la estructura, como se muestra en el ítem siguiente [54].

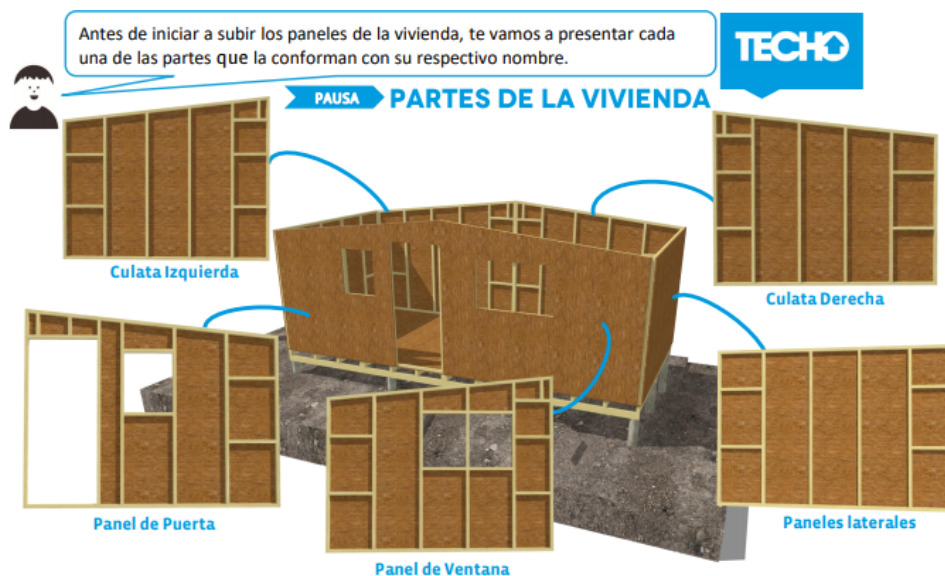
### Modelo sometido al análisis

La vivienda es de  $18 m^2$  pero el terreno manejado para el ensamble debe ser como mínimo de  $24 m^2$  para poder trabajar de manera óptima y por las salientes de las tejas. Cuenta con una escuadra de 12 pilotes de manera rectangular sobre los cuales descansan un total de 3 vigas de piso sobre cada eje, quienes reciben los paneles de pisos que se unen por medio de clavos asegurando el descanso de los bordes de los paneles sobre los pilotes y que no exista ninguna luz entre estos mismos.

La vivienda cuenta con cinco tipos de paneles denominados de la siguiente manera:

- Culata izquierda
- Culata derecha
- Panel de puerta
- Panel de ventana
- Dos paneles laterales

Figura 9.1: Vivienda construida por Techo



Fuente: Adaptado de [54]

Los paneles son unidos por medio de clavos realizando la alineación a pisos para dejar el recubrimiento de estos por fuera alrededor de toda la casa con el fin de evitar filtraciones de humedad y generar escorrentía de lluvia. El aplome de los paneles se realiza con una pita al igual que la verificación de su verticalidad.

La estructura del Techo se ensambla colocando correas (listones de madera de 2.92 m de longitud) las cuales quedan al mismo nivel de los paneles de madera los cuales son clavados desde afuera realizando una prueba de fijación con una fuerza hacia abajo sobre los listones, seguido de esto, una cubierta aislante sobre las correas y el sistema de tejado. La puerta y ventanas se ajustan con tres o dos bisagras asegurando cada elemento con el durmiente de determinado en cada panel.

En las siguientes secciones se presentará el análisis sísmico de 9 modelos, donde los modelos 0 y 1 describen el sistema constructivo en la actualidad utilizado por Techo, para el modelo 0 se usa SAWS (elementos rígidos: paneles), y para el resto se analiza por medio de la curva de histéresis, los modelos 2 y 3 pertenecen a las mejoras propuestas en cuanto a la ampliación de las secciones transversales, los modelos 4 y 5 son cambios en el material de las columnas principales ubicadas en cada esquina de la edificación que pasan de madera a concreto, y los modelos 6,7 y 8 son modelos con arriostramientos de madera modificando la sección transversal.

## 9.2. VIVIENDAS DE EMERGENCIA

Las viviendas de emergencia son consideradas como un recurso social en el instante de ejecución de labores de responsabilidad y servicio comunitario, con el fin de acobijar, proteger y reestablecer a determinada población en condiciones de vulnerabilidad, suelen ser la principal herramienta de ayuda y asistencia ante desastres producidos por catástrofes naturales o incluso en entornos poblacionales de abandono, inequidad y extrema pobreza, todo esto dentro de un periodo de tiempo determinado para la superación del factor de vulnerabilidad presente en la comunidad creando un eje de equilibrio colectivo que brinde soluciones sociales y urbanas que logren de forma inmediata y práctica suplir las necesidades básicas de la población afectada.

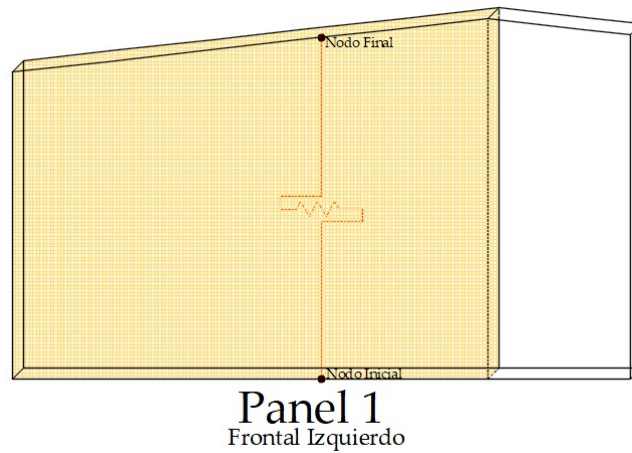
### Modelo: Elementos Rígidos

El modelamiento de elementos rígidos a partir del material SAWS perteneciente a la biblioteca propia de OpenSees, se basa en un resorte medio (comando: TwoNo-DeLink) que se une desde un nodo inicial hasta un nodo final, en donde el resorte representa el modulo de la madera para los distintos paneles.

Para el desarrollo del modelamiento se tienen en cuenta cinco modulos en cada panel, dos en los paneles frontales, dos en los paneles laterales y uno en el panel

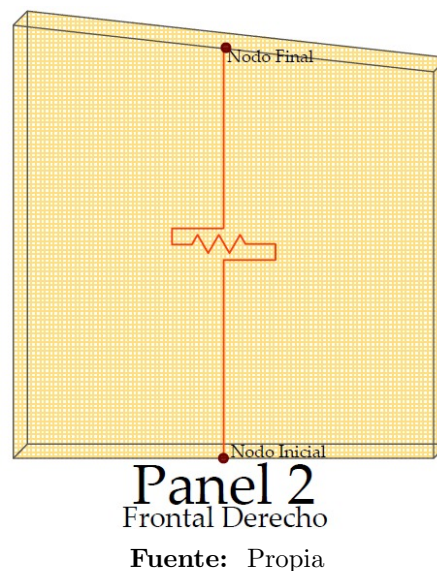
trasero del prototipo de vivienda de Techo, la distribución de los resortes en los paneles se puede observar en las figuras 9.2, 9.3, 9.4 y 9.5.

Figura 9.2: Panel Frontal Izquierdo



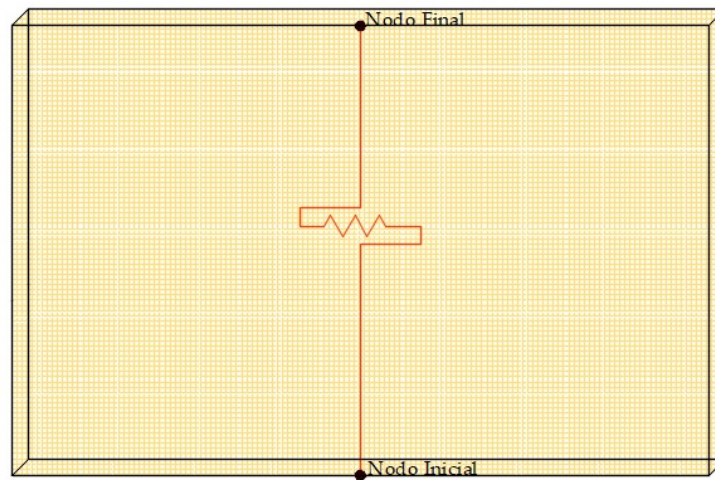
Fuente: Propia

Figura 9.3: Panel Frontal Derecho



Fuente: Propia

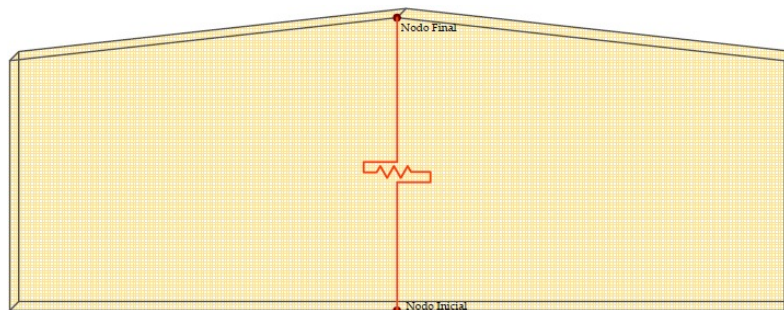
Figura 9.4: Paneles Laterales



### Panel 3 Laterales (Son 2)

Fuente: Propia

Figura 9.5: Panel Trasero

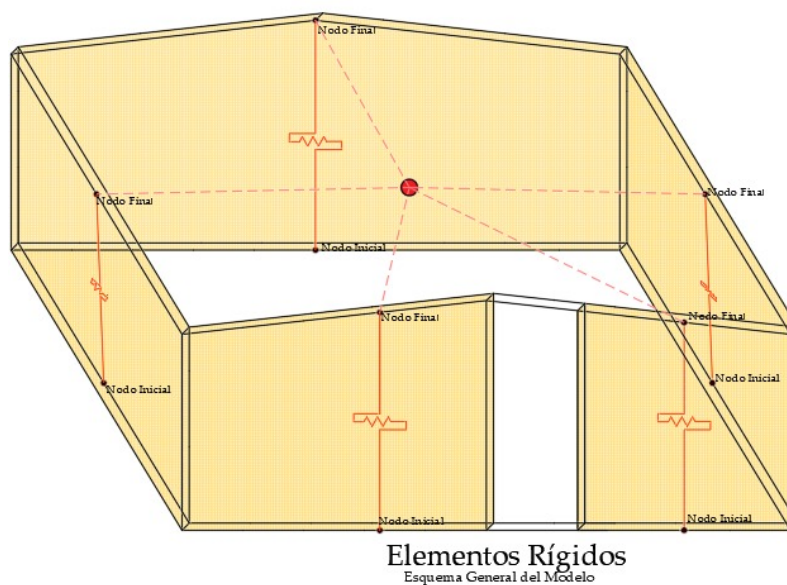


### Panel 4 Trasero

Fuente: Propia

Se ubica un nodo de control como se muestra en la figura 9.6 el cual se une a los nodos de los resortes, a través de elementos rígidos (comando: RigidLink), y luego aplicando la fuerza determinada al nodo de control se encuentra el desplazamiento de la edificación.

Figura 9.6: Esquema Elementos Rígidos y Nodo de Control



Fuente: Propia

### Modelo: Elementos Tipo Frame

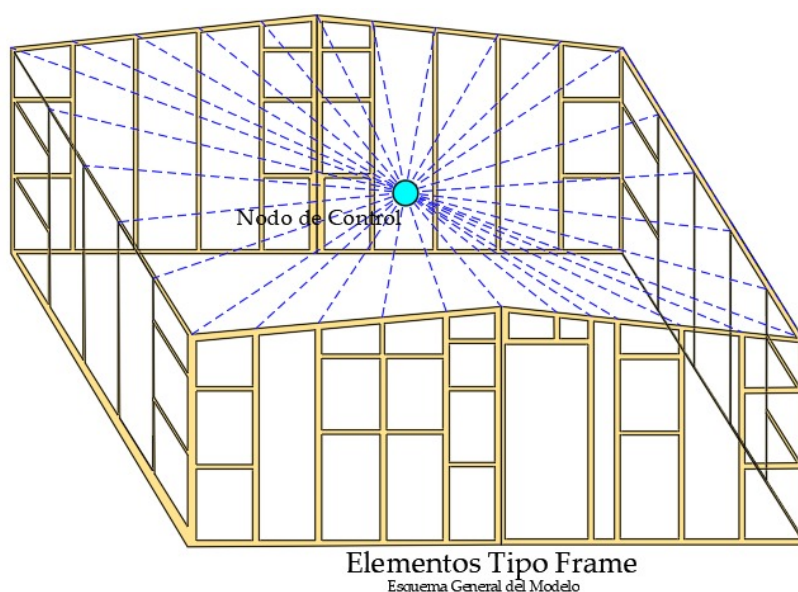
El modelamiento se desarrolla a partir del marco vertical de madera interno que contiene la vivienda (comando: ForceBeamColumn), realizando la ubicación de los nodos respecto a un eje de coordenadas, y la ubicación de los elementos estructurales entre los nodos con las coordenadas respectivas, lo cual se evidencia en la figura 9.7.

Los elementos tipo frame tienen asignadas las propiedades mecánicas de la madera utilizada para el proyecto. Los elementos horizontales del marco de madera son conocidos como riostras y se modelaron a partir del comando: CorotationalTruss, los nodos que unen estos elementos se comportan como articulaciones con la finalidad de que aporten rigidez pero no haya transmisión de momento, se identifican en la figura 9.8 .





Figura 9.9: Esquema Elementos Tipo Frame y Nodo de Control



Fuente: Propia

La organización Techo utiliza la madera *Pinus patula* para la formación de los elementos prefabricados que componen el marco estructural de la vivienda descritos en el documento con antelación, las propiedades mecánicas que pide el código de modelación para obtener la curva de capacidad sísmica a través del análisis Pushover referente a esta tipología de madera se adquieren a partir de la investigación de la ejecución del ensayo de compresión paralela en *Pinus patula* en cinco probetas, a partir de los valores obtenidos en el ensayo, se toman los valores promedio encontrados en [2] los cuales se pueden observar en el cuadro 9.1.

Las propiedades mecánicas de la madera tomadas de la ejecución del ensayo [2] generan validez en el modelamiento y la configuración del código en OpenSees a través de algoritmos formados por comandos y patrones que se desarrollan en foros por la Universidad de California, OpenSees ha sido promovido por el Pacific Earthquake Research Center a través de la Fundación Nacional de Ciencia de Estados Unidos, todo el desarrollo del código está acompañado a través del manual de instrucciones que posee el software principal.

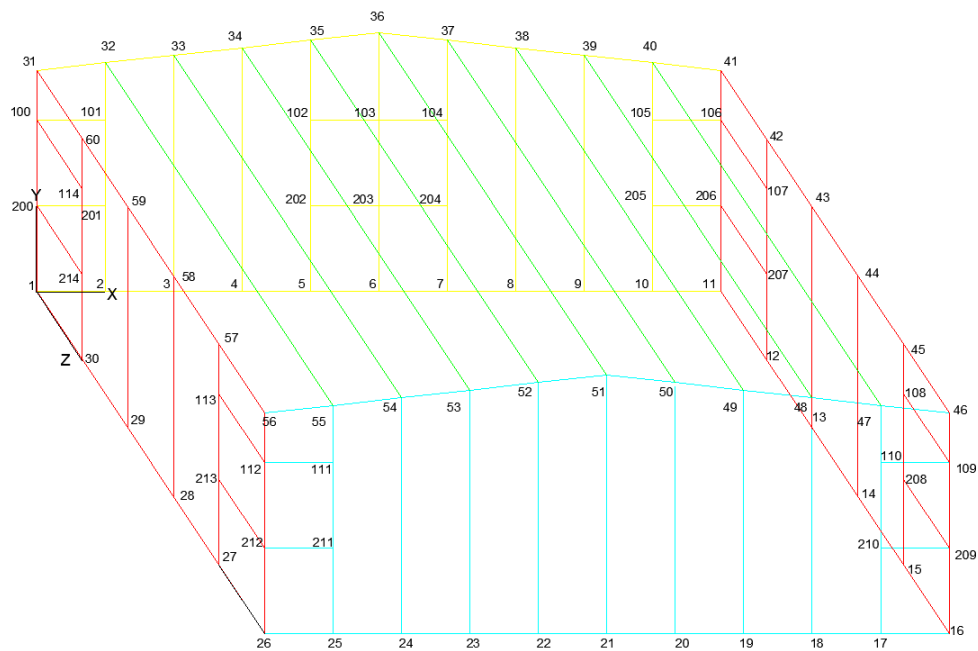
Cuadro 9.1: Propiedades mecánicas *PinusPatula* [2]

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Esfuerzo Máximo ( $\text{Ton}/\text{m}^2$ )	2082	Def. unitaria	0.02
Esfuerzo Máximo ( $\text{Ton}/\text{m}^2$ )	1671.1	Def. unitaria	0.0275



La figura 9.10 muestra el esquema general de elementos y nodos de la edificación, además se añade la vista del sistema de correas sobre el cual descansan las tejas que forman la cubierta de la vivienda.

Figura 9.10: Esquema General: Modelo con Elementos tipo Frame



Fuente: Propia

# Capítulo 10

## MODIFICACIONES AL MODELO

### 10.1. AMPLIACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

Según [55] luego de someter 1733 vigas de tamaño variable entre 100x40x2.500 mm y 200x70x4.500 mm se realiza un análisis de la influencia de la altura ( $h$ ) y el espesor ( $t$ ) de la sección transversal de la pieza de madera de pino a partir de ensayos de resistencia, en donde se determina que al aumentar  $h$ , lo que se traduce como tener una sección más rectangular la resistencia actúa de forma decreciente, caso contrario sucede con el aumento de  $t$  en donde la resistencia aumenta de manera proporcional a la ampliación de la sección transversal con lados simétricos (cuadrada), todo esto lleva a deducir que el área de sección transversal posee un efecto considerable sobre la resistencia de la madera.

#### 10.1.1. Dimensionamiento 15x15

Teniendo en cuenta que el esquema original modelado tiene unas dimensiones en sus columnas y vigas de 10 x 10, en esta modificación se propone aumentar la sección transversal de las columnas a 15 x 15 cm, utilizando el modelo de elementos tipo frame que se describe en el capítulo anterior y el mismo código en Opensees en donde se realiza la modificación en la sección transversal.

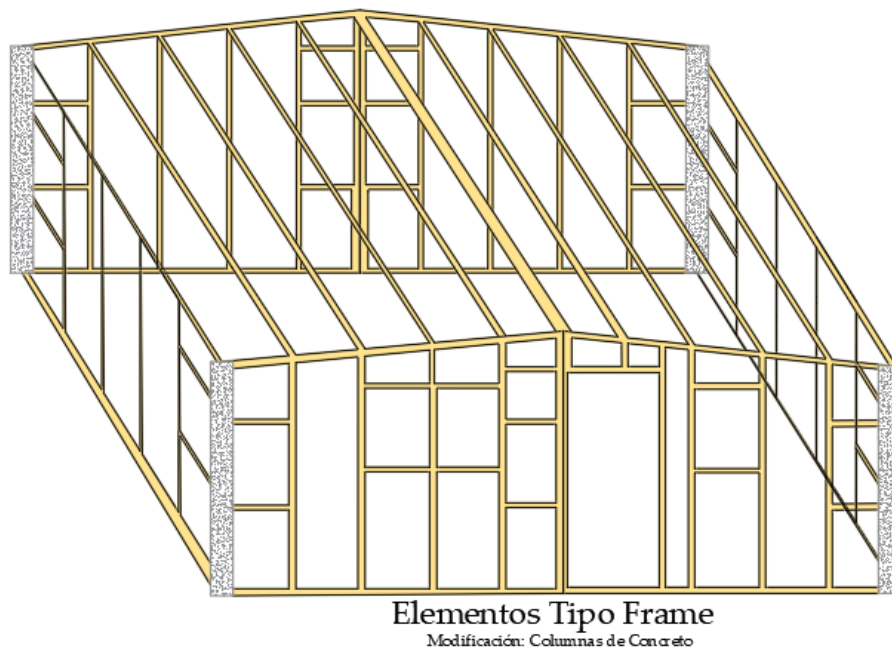
#### 10.1.2. Dimensionamiento 20x20

De manera semejante al anterior título, en esta modificación se propone aumentar la sección transversal de las columnas a 20 x 20 cm, utilizando el modelo de elementos tipo frame que se describe en el capítulo anterior y el mismo código en OpenSees en donde se realiza la modificación en la sección transversal.

## 10.2. COLUMNAS DE CONCRETO REFORZADO

En esta modificación se propone cambiar el material de las columnas ubicadas en cada esquina del modelo por concreto, modelando con confinamiento cada 5 cm y cada 10 cm. Para modelar el esquema general que se puede observar en la figura 10.1, se toman las cargas del modelo y se distribuyen de forma equivalente sobre las cuatro columnas de concreto.

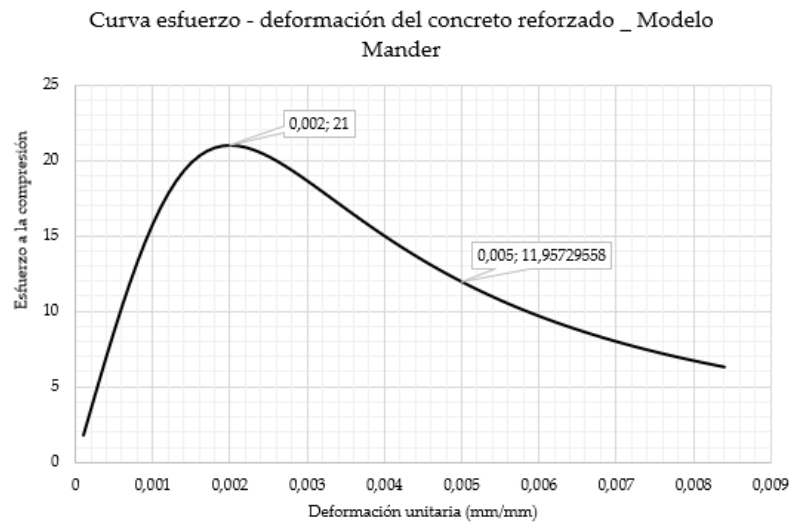
Figura 10.1: Esquema General: Modelo Columnas de Concreto Reforzado



**Fuente:** Propia

Para modelar en Opensees se necesita la curva de esfuerzo vs deformación del material utilizado, la cual se obtiene partir del desarrollo del procedimiento del modelo de Mander descrito en [56], a continuación en la figura 10.2 se muestra la curva que representa el comportamiento del concreto no confinado.

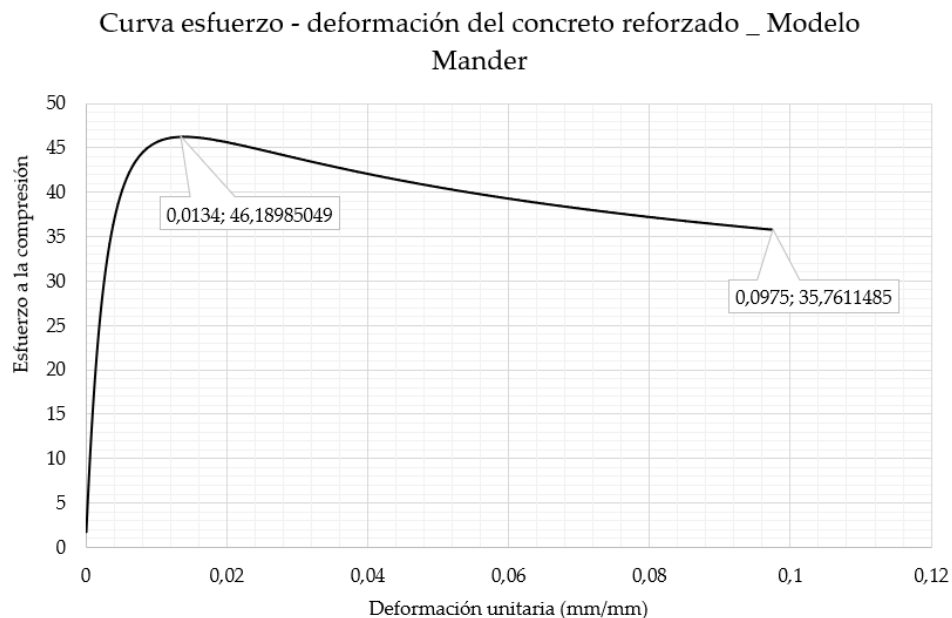
Figura 10.2: Curva esfuerzo vs deformación concreto no confinado



Fuente: Propia

### 10.2.1. Concreto confinado cada 5 cm

Figura 10.3: Curva esfuerzo vs deformación concreto confinado cada 5 cm



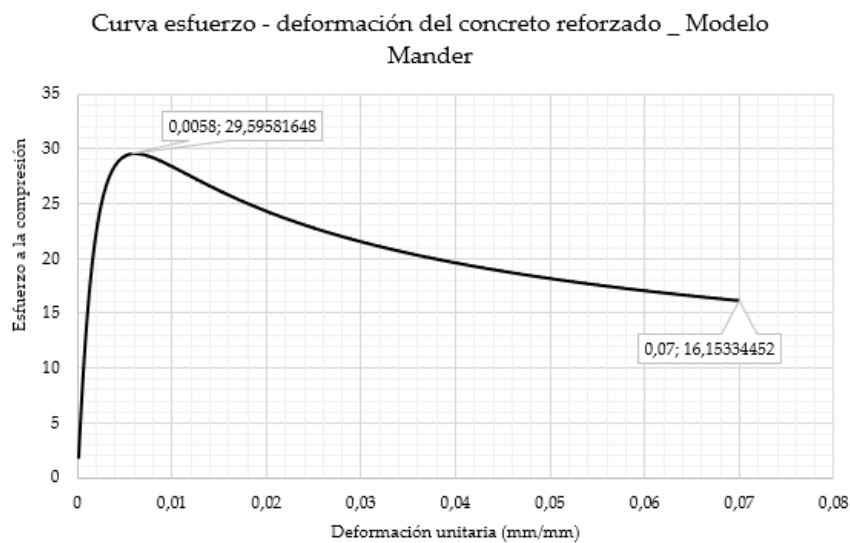
Fuente: Propia

En cuestión al modelamiento en Opensees la única diferencia en cuanto a esta modificación es que se deben asignar los valores de la figura 10.3 que muestra la curva de esfuerzo vs deformación, a los elementos que se componen del material.

### 10.2.2. Concreto confinado cada 10 cm

En este caso igual que en el anterior, la diferencia radica en que se deben asignar los valores observados en la figura 10.4 a las columnas de cada esquina del modelo para obtener la curva de capacidad, valores que pertenecen a la curva esfuerzo vs deformación del concreto confinado a 10 cm.

Figura 10.4: Curva esfuerzo vs deformación concreto confinado cada 10 cm



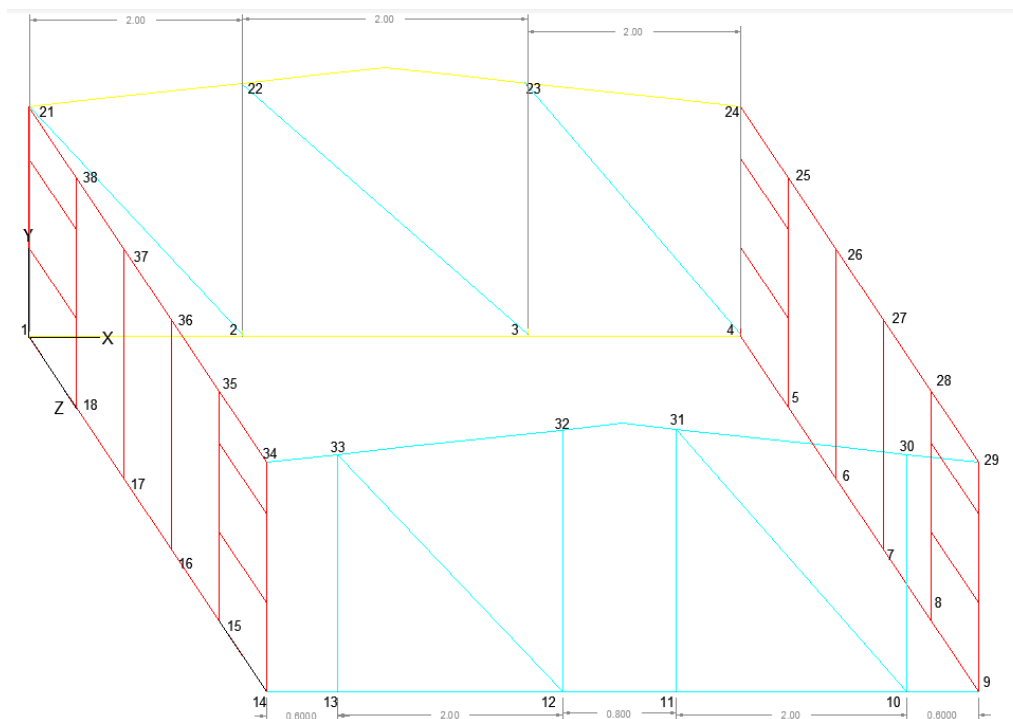
Fuente: Propia

## 10.3. ARRIOSTRAMIENTOS DE MADERA

Los arriostramientos o riostras son aquellos elementos que contribuyen a rigidizar o estabilizar la estructura impidiendo o limitando parcialmente los desplazamientos/deformaciones de la misma, en [57] se muestra como los arriostradres en X o diagonales son los que contribuyen a generar un comportamiento uniforme a nivel estructural, aportando estabilidad estructural lo que contribuye en la adquisición de capacidad para soportar un sismo.

Esta modificación propone quitar algunas columnas de madera y arriostrar de forma diagonal como se muestra en la figura 10.5, donde se puede ver la nueva redistribución de los nodos que se introdujeron al modelo en Opensees.

Figura 10.5: Esquema General: Modelo Arriostradores de madera



Fuente: Propia

### 10.3.1. Arriostramiento de 15x15

En el modelo de arriostradores de madera, se tiene en cuenta una sección transversal de 10x10cm, en esta modificación se aumenta la sección transversal a 15x15cm.

### 10.3.2. Arriostramiento de 20x20

En esta modificación se propone aumentar la sección transversal a 20x20, el resto de las condiciones siguen siendo las mismas en comparación al esquema general con arriostradores de madera.

# Capítulo 11

## ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

### 11.1. CAPACIDAD

Como ya se ha nombrado anteriormente se realizó el análisis de 9 modelos por medio de Opensees, estos modelos se enumeraron de 0 a 8, donde el modelo 0 y 1 son aquellos donde se analiza el comportamiento de la estructura realizada actualmente por la fundación de Techo, y los modelos 2 al 9 son las mejoras propuestas, específicamente el modelo 0 se realiza a partir del material SAWS por medio de elementos rígidos como se describió anteriormente y como se puede evidenciar en la figura 9.6.

El modelo 1 se realiza a partir de elementos tipo frame ubicando los nodos como lo muestra la figura 9.9 y la figura 9.10, el resto de los modelos desde el 2 hasta el 8 se realizan por medio de elementos tipo frame igual que el modelo 1 cambiando sus dimensiones, geometría o materiales respectivamente. Después de realizar el código correspondiente el programa Opensees, este arroja los datos necesarios para realizar la grafica de fuerza vs desplazamiento, como se describió en la metodología estos valores se deben cambiar a  $S_a$  vs  $S_d$ , para convertir esta gráfica a las unidades que se respectivas donde las constanstes son obtenidas a partir del análisis modal en SAP2000, como se describe a continuación.

#### Análisis modal

Para obtener los valores  $M_k$ ,  $P_k$  y  $\phi_{k,rooftop}$ , se debe realizar un análisis modal, el cual se encarga de determinar las frecuencias naturales y el modo de vibración de una estructura, esto se llevó a cabo a través del software SAP2000 en donde se establecieron los parámetros de los diferentes modelos estructurales ajustandolos al dimensionamiento, la geometría y las cargas establecidas en el algoritmo de OpenSees, obteniendo los valores motrados en el cuadro 11.1

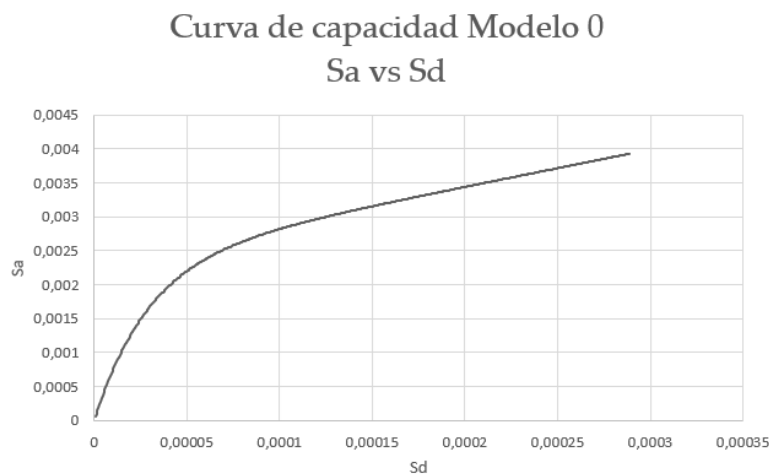
Cuadro 11.1: Datos del Análisis Modal

Modelo	$M_k$	$P_k$	$\phi_{k,rooftop}$
Saws	0.815	99.434	0.287
Frame 10X10	0.992	99.254	0.066
Frame 15X15	0.985	99.779	0.059
Frame 20X20	0.981	99.779	0.054
Concreto confinado 5 CM	1	100	0.4273
Concreto confinado 10 CM	1	100	0.4273
Arriostramientos 10X10	0.805	100	0.074
Arriostramientos 15X15	0.952	100	0.062
Arriostramientos 20X20	0.959	100	0.061

### Espectro de capacidad modelo 0

La figura 11.1 describe la capacidad estructural en unidades de aceleración y desplazamiento espectral del modelamiento a partir de elementos rígidos convertido desde FORTRAN el cual se denomina *SAWSmaterial*. La degradación de la rigidez del espectro de capacidad de este modelo se observa cuando se tiene una aceleración espectral de 0.0023 generando un desplazamiento de 0.00005 en fracciones de la gravedad.

Figura 11.1: Curva de capacidad modelo 0



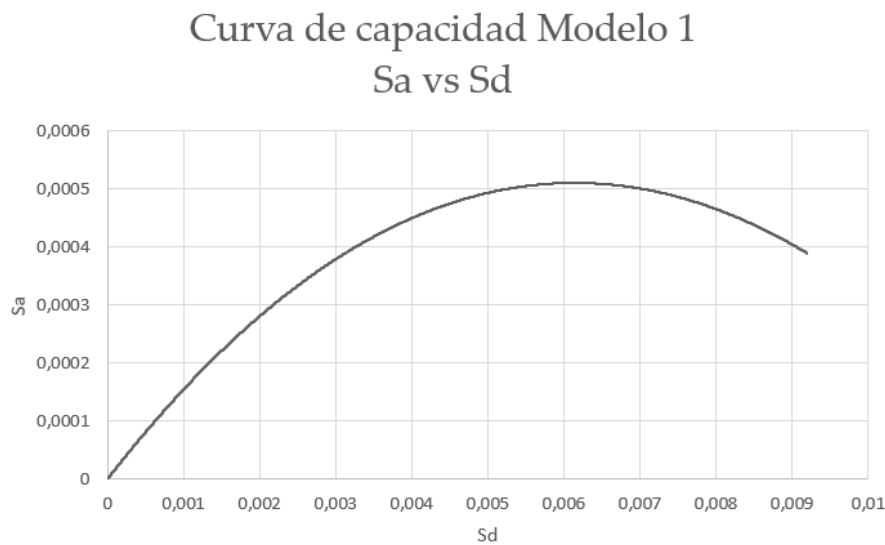
Fuente: propia



### Espectro de capacidad modelo 1

La figura 11.2 muestra el espectro de capacidad del sistema tipo frame que es ejecutado actualmente por Techo Colombia, en donde se tiene un menor rendimiento sísmico en comparación al modelo 0, que es modelado como paneles, alcanzando una aceleración espectral de 0.0005 y un desplazamiento de 0.006, lo que permite deducir que una menor cantidad de fuerza está provocando un mayor desplazamiento de la estructura en comparación con el modelo analizado anteriormente.

Figura 11.2: Curva de capacidad modelo 1

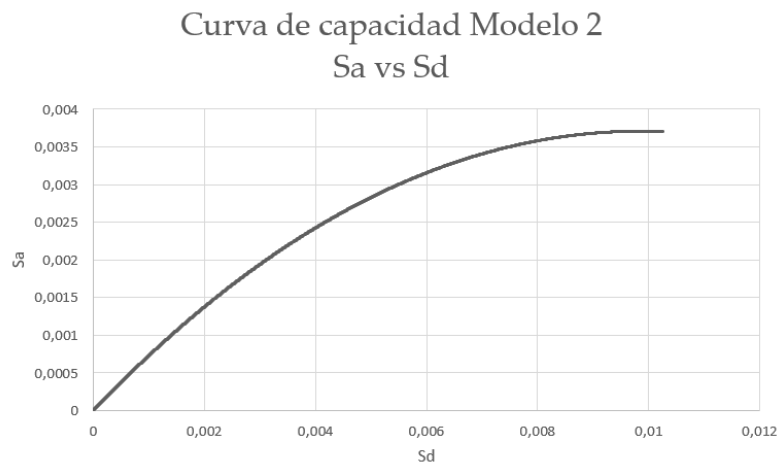


Fuente: propia

### Espectro de capacidad modelo 2

La figura 11.3 muestra el espectro de capacidad estructural ante la vibración del suelo, de la ampliación de las secciones transversales que pasan de ser de 10 x 10 cm como en el modelo 1 a 15x15 cm en este modelo, aumentando el rendimiento sísmico con respecto al modelo anterior, ya que para un mismo desplazamiento espectral de 0.006 se debe aumentar aproximadamente 7 veces la aceleración espectral a 0.0034 con respecto al modelo 1.

Figura 11.3: Curva de capacidad modelo 2

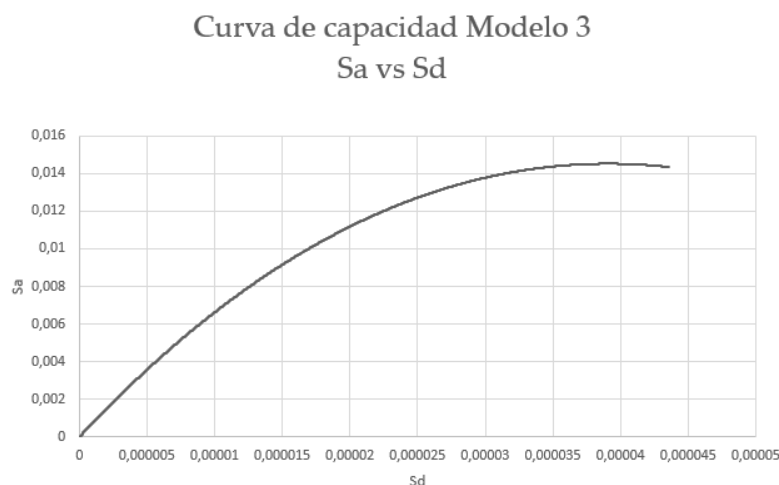


Fuente: propia

### Espectro de capacidad modelo 3

En la figura 11.4 se describe el espectro de capacidad del aumento de las secciones transversales hasta 20x20 cm. Este modelo permite analizar un aumento considerable del rendimiento sísmico de la estructura en comparación a los modelos 1 y 2, ya que necesita de una aceleración espectral aproximadamente de 0.014 para generar un desplazamiento espectral de 0.00003, de lo cual se deduce también un mejor rendimiento en comparación al modelo 0.

Figura 11.4: Curva de capacidad modelo 3



Fuente: propia

### Espectro de capacidad modelo 4

En el modelo cuatro se cambian las columnas de madera de las esquinas por columnas de concreto confinado cada 5 cm. La figura 11.5 muestra la curva de capacidad en donde el desplazamiento espectral de 0.0004 es producido por una aceleración espectral de 0.01 aproximadamente sin que se produzca una degradación de la rigidez, de lo que se deduce que este mejoramiento posee un menor rendimiento en comparación al modelo 3 el cual para una aceleración de 0.01 tiene un desplazamiento espectral aproximado de 0.000017 lo cual es 24 veces menor al desplazamiento obtenido en el modelo 4 con la misma fuerza.

Figura 11.5: Curva de capacidad modelo 4

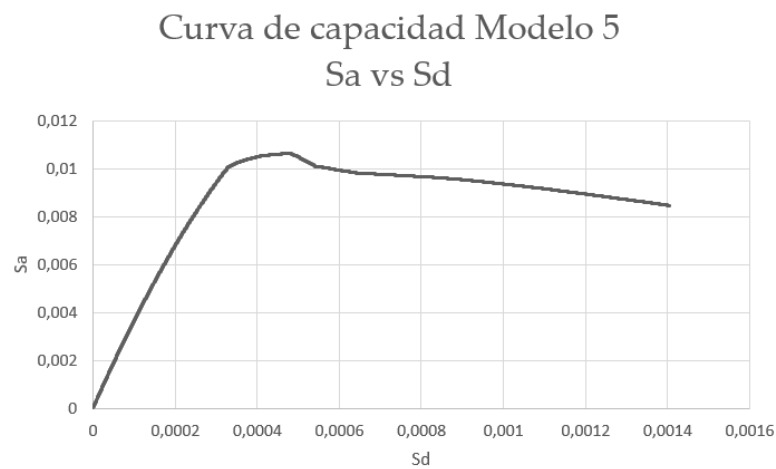


**Fuente:** propia

### Espectro de capacidad modelo 5

En el modelo cinco se cambian las columnas de madera de las esquinas por columnas de concreto confinado cada 10 cm. La figura 11.6 muestra un leve aumento de la capacidad estructural del modelo respecto al anterior, sin embargo no se aprecia un aumento del rendimiento sísmico de la estructurable considerable.

Figura 11.6: Curva de capacidad modelo 5

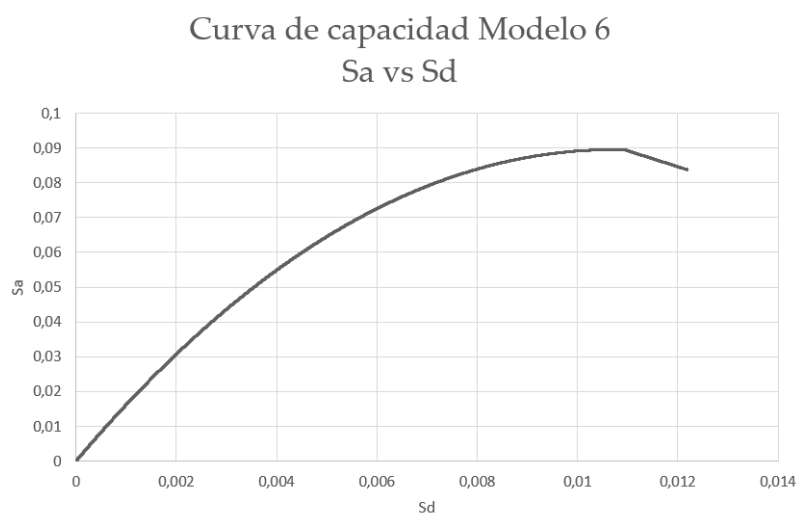


Fuente: propia

### Espectro de capacidad modelo 6

En el modelo seis se eliminan algunas columnas para poner arriostramientos como se ve en la figura 11.7, en este modelo las dimensiones son de 10x 10 cm. Para obtener un desplazamiento espectral de 0.01 este modelo necesita 95.98 % y 90 % de aceleramiento espectral respecto a los modelos 2 y 5 respectivamente, descritos con anterioridad.

Figura 11.7: Curva de capacidad modelo 6

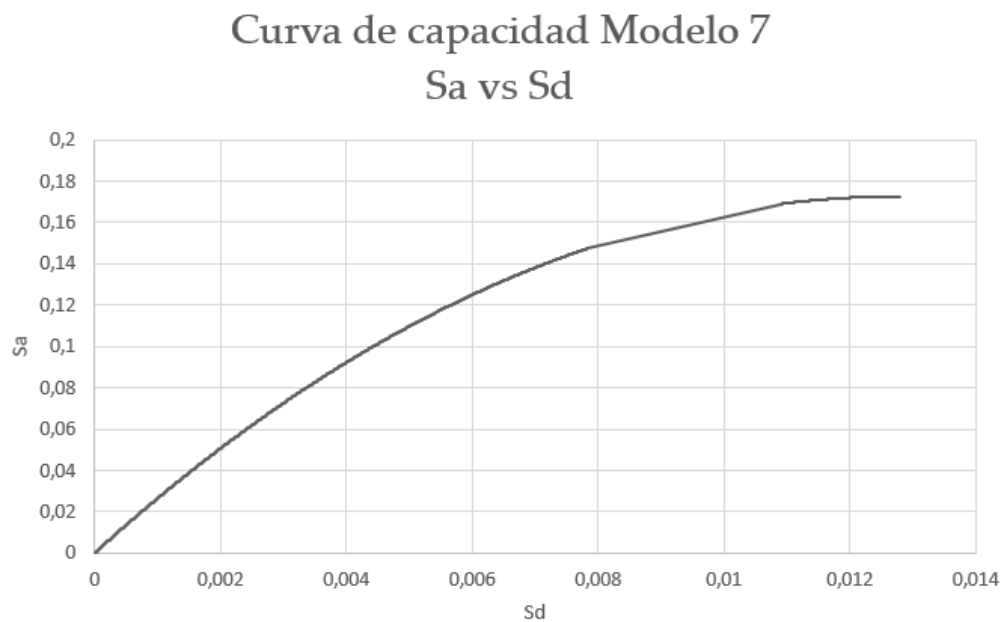


Fuente: propia

### Espectro de capacidad modelo 7

En el modelo siete se eliminan algunas columnas para poner arriostramientos de madera al igual que en el modelo seis, en este modelo las dimensiones son de 15x 15 cm. La figura 11.8 muestra que el aumento de la sección transversal más el sistema de arriostradores, mejora el rendimiento de la capacidad estructural en 43.75 % respecto al anterior modelo.

Figura 11.8: Curva de capacidad modelo 7

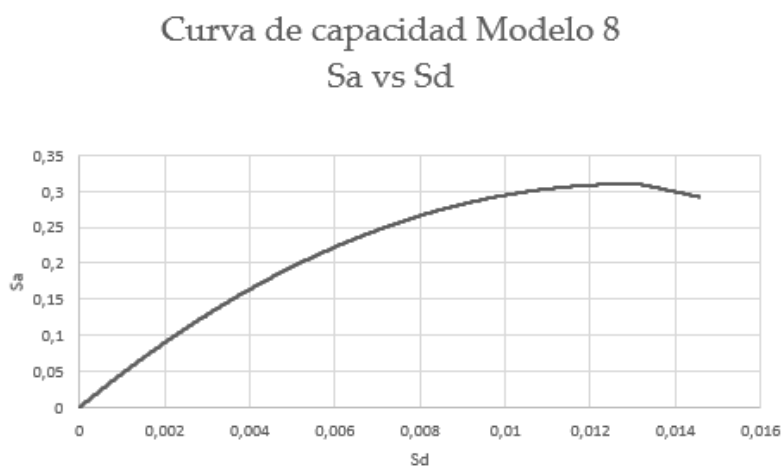


Fuente: propia

### Espectro de capacidad modelo 8

Este modelo es igual al 7 y 8 cambiando las secciones transversales por 20 x 20 cm, mejorando un 47 % la capacidad estructural para un desplazamiento espectral de 0.01 con relación al modelo anterior.

Figura 11.9: Curva de capacidad modelo 8



Fuente: propia

En el cuadro 11.2 se puede observar el orden de los modelos planteados en la investigación en términos de eficiencia de la capacidad estructural para soportar una eventualidad sísmica.

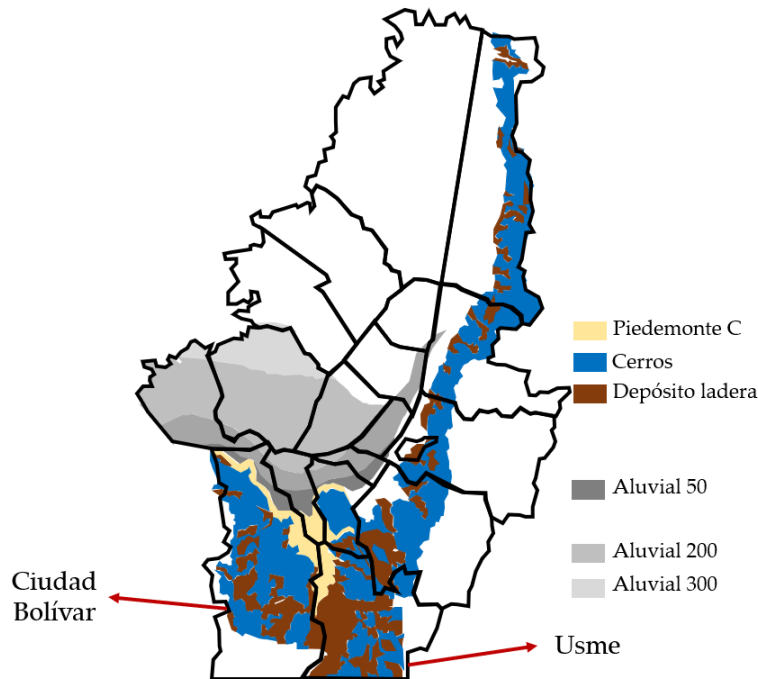
Cuadro 11.2: Rendimiento sísmico en orden descendente

Posición	Modelo	Descripción
1	Modelo 8	Arriostramientos 20X20
2	Modelo 7	Arriostrameintos 15X15
3	Modelo 6	Arriostramientos 10X10
4	Modelo 5	Concreto confinado 10 cm
5	Modelo 4	Concreto confinado 5 cm
6	Modelo 3	Frame 20X20
7	Modelo 0	Saws
8	Modelo 2	Frame 15X15
9	Modelo 1	Frame 10X10

## 11.2. DEMANDA

Para las curvas de demanda teniendo en cuenta que solo se está trabajando en las dos localidades de Ciudad Bolívar y Usme, se determinan así mismo solo los suelos definidos en estas dos zonas como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 11.10: Delimitación localidad Ciudad Bolívar y Usme



Fuente: propia

En la localidad de Ciudad Bolívar se identifican 6 tipos de suelos que son: Cerros, Depósito ladera, Piedemonte C, Aluvial 50, Aluvial 200 y Aluvial 300 y en la localidad de Usme se identifican los suelos: Cerros, Depósito ladera y Piedemonte C.

Las curvas de demanda se realizan según la Norma NSR-10 como se definió en el marco teórico, las curvas de demanda de estos 6 tipos de suelos a trabajar se muestran a continuación:

Figura 11.11: Curva de Demanda Cerros



**Fuente:** propia

En la figura 11.11 se tienen suelos definidos como "cerros", los cuales poseen pendientes altas y su composición principal está dada por rocas areniscas duras o rocas arcillolitas blandas, se caracterizan por ser rocas competentes y resistentes a la meteorización, poseen eventuales problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas, poseen una velocidad de onda promedio  $> 750$  m/s cada 50 m, con humedades naturales menores al 10% [1]. Estos suelos tienen una aceleración espectral máxima de 0.5 generando un desplazamiento espectral de 0.005 todo esto en fracciones de la gravedad.

Figura 11.12: Curva de Demanda Depósitos de Ladera

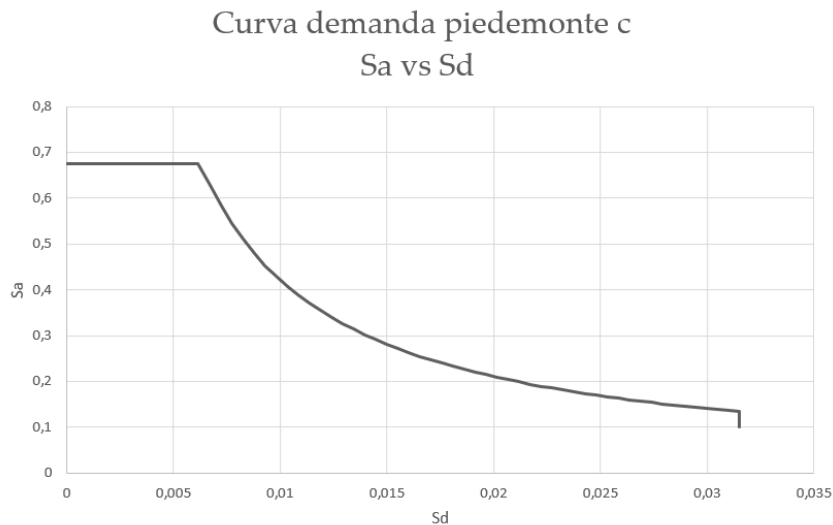


**Fuente:** propia



En la figura 11.12 se muestra la posible aceleración de los suelos denominados "depósitos de ladera", los cuales geomorfológicamente son cerros que se encuentran compuestos por gravas areno-arcillosas compactas, suelen tener capacidad portante media y ser susceptibles a problemas de estabilidad de taludes, el espesor del depósito está en el rango de 6-25 m y poseen velocidades de onda variables según el tipo del depósito [1]. La aceleración espectral máxima es de 0.62 generando un desplazamiento espectral de 0.007 todo esto en fracciones de gravedad.

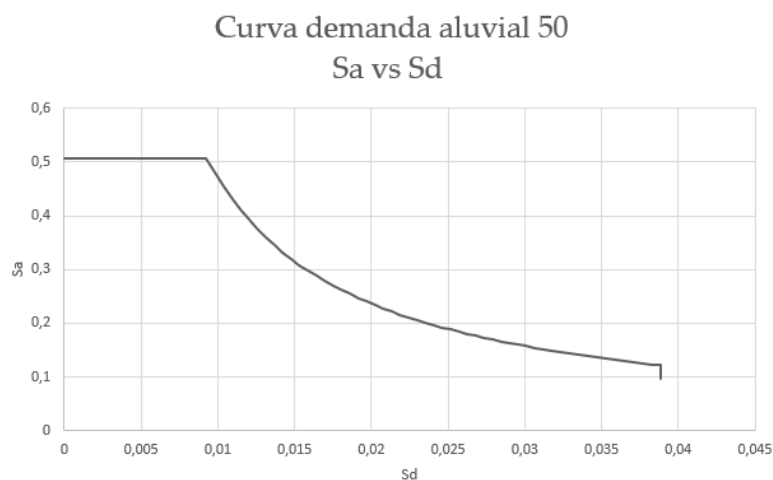
Figura 11.13: Curva de Demanda Piedemonte C



**Fuente:** propia

La figura 11.13 describe el espectro de demanda sísmica del suelo "piedemonte C" los cuales se componen por suelos coluviales y aluviales incorporando gravas areno-arcillosas compactas, se caracterizan por tener alta capacidad portante pero podrían llegar a presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas [1], la figura permite deducir una aceleración espectral máxima de 0.68 junto a un desplazamiento espectral de 0.007 en fracciones de la gravedad. Estos suelos poseen depósitos con espesores menores a 50 m, suelen tener presentes intercalaciones de arcilla blandas: en forma de bloques, canto o gravas, la velocidad de onda promedio cada 50 m se encuentra en el rango de 300 - 750 m/s conservando humedades naturales entre 10 y 30 %.

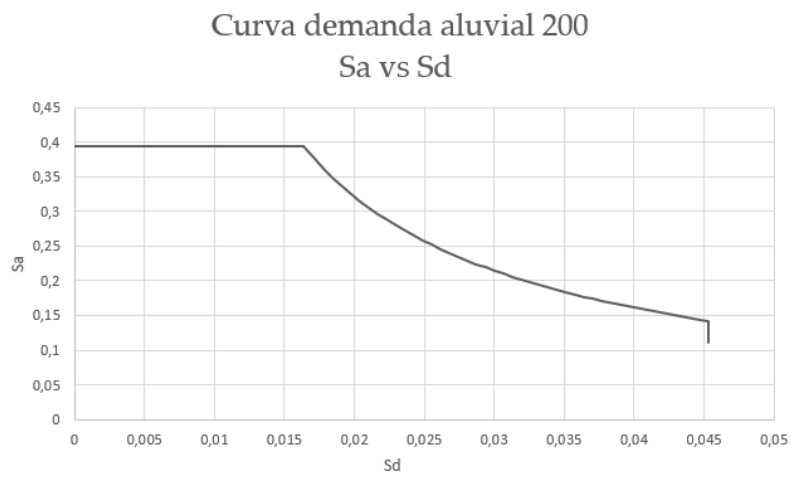
Figura 11.14: Curva de Demanda Aluvial 50



**Fuente:** propia

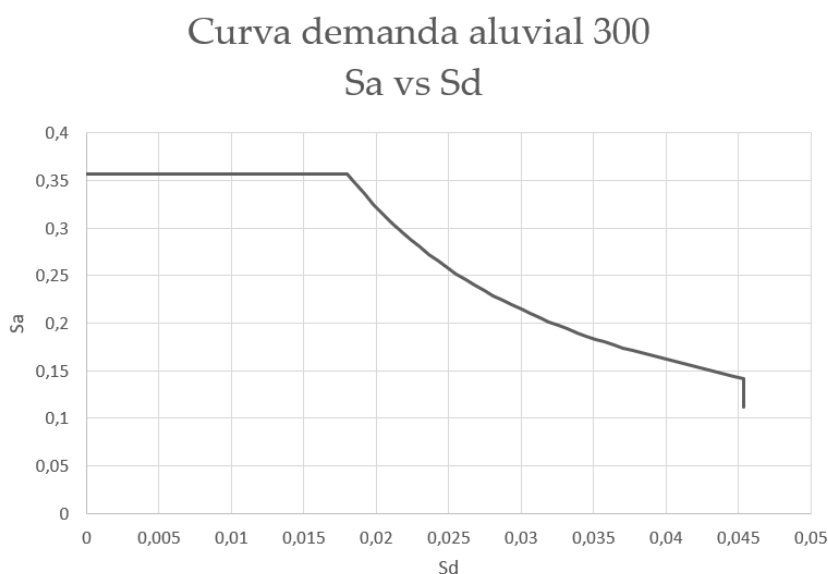
En la figura 11.14 se puede observar el comportamiento del espectro de demanda sísmica del suelo "aluvial 50" cuya descripción geotécnica se basa en arcillas limosas, arenas arcillosas o limos arenosos, en algunas zona se encuentran lentes de arenas limpias, el depósito de este tipo de suelo posee un espesor menor a 50 m, con velocidades de onda desde 175 hasta 300 m/s en humedades naturales en el rango de 25 - 50 %. Los suelos aluviales son poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto [1], la figura muestra una aceleración espectral máxima de 0.51 aproximadamente junto a un desplazamiento espectral de 0.008 todo esto en fracciones de la gravedad.

Figura 11.15: Curva de Demanda Aluvial 200



**Fuente:** propia

Figura 11.16: Curva de Demanda Aluvial 300



**Fuente:** propia

Las figuras 11.15 y 11.16 muestran el comportamiento de la posible demanda sísmica de los suelos "aluvial 200 y aluvial 300" con aceleraciones espectrales máximas de 0.39 y 0.36 que generan desplazamientos espectrales 0.017 y 0.018 de la misma manera, su caracterización es la misma que el tipo de suelo *aluvial 50* diferenciándose en el espesor de los depósitos, donde el primer tipo de suelo mencionado se encuentra en el rango 100-200 y el otro desde 200 hasta 300 m.

### 11.3. PUNTO DE DESEMPEÑO

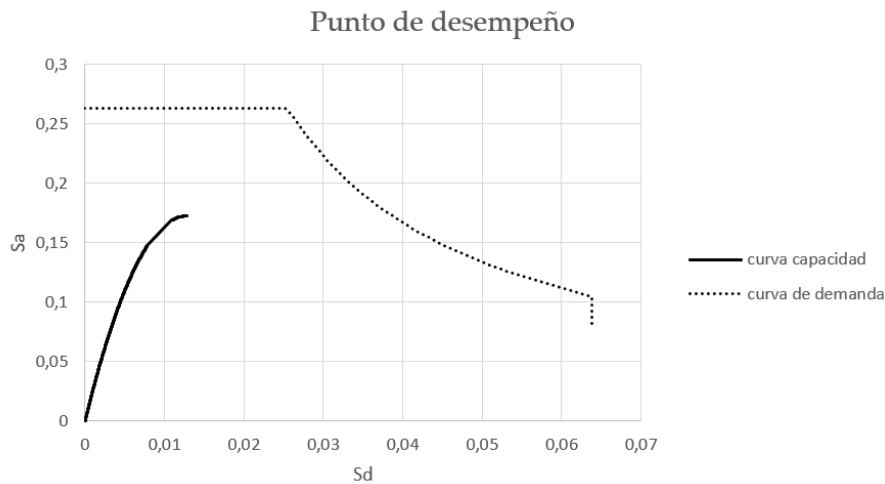
Así como se describió en el marco teórico, al trabajar con madera es necesario realizar una reducción de la curva de demanda según cada curva de capacidad esto se logra utilizando las ecuaciones 4.32 y 4.33, para poder unir ambas curvas y así hallar el punto de desempeño, este proceso de reducción se realizó para cada modelo con cada tipo de suelo, sin embargo la resistencia de la mayoría de los modelos no es suficiente para soportar la demanda de estos tipos de suelo como se pueden evidenciar en la figura 11.17.

Es importante resaltar que para el modelo 0 y 1 que son los modelos actuales realizados por Techo, la capacidad de la estructura no logra ser suficiente para soportar la demanda de los tipos de suelos analizados.

Para el modelo 0 y la reducción de las curvas de demanda de los seis tipos de

suelo trabajados, el suelo que menos demanda tiene es el aluvial 300, sin embargo, se puede evidenciar que la curva de capacidad no esta cerca de lograr cumplir con esta demanda, de una manera similar es el comportamiento para los otros 5 tipos de suelo.

Figura 11.17: Punto de desempeño entre modelo 7 y suelo aluvial 300

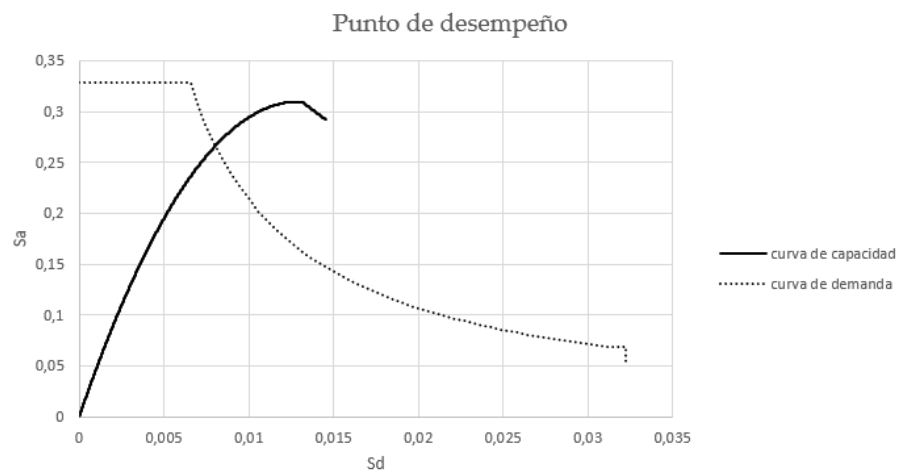


Fuente: propia

En la figura 11.17 se representa la unión de la curva de capacidad del modelo 7 con la curva de menor demanda que es el suelo aluvial 300, se puede evidenciar que aunque su resistencia es considerablemente mayor que el modelo 0 y 1 no se logra cruzar, es decir no logra suplir la demanda, este comportamiento se repite en los modelos del 2 al 6, en donde la resistencia va aumentando con cada propuesta de mejora pero no logra cumplir con la demanda necesaria para estos tipos de suelos en estas localidades.

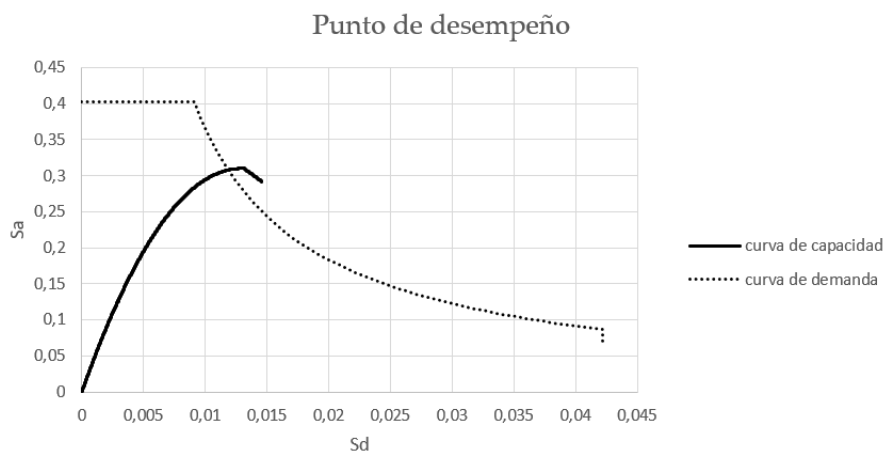
El modelo 8 que es el arriostrado con dimensiones 20x20 cm de los elementos estructurales, es el único de las mejoras propuestas que logra cumplir con la demanda de cada tipo de suelo en estas dos localidades, así como se mostrara en las figuras 11.18, 11.19, 11.20, 11.21, 11.22 y 11.23 donde se puede ver el punto de desempeño de este sistema estructural para cada tipo de suelo.

Figura 11.18: Punto de desempeño modelo 8, Cerros



Fuente: propia

Figura 11.19: Punto de desempeño modelo 8, deposito de ladera



Fuente: propia

Figura 11.20: Punto de desempeño modelo 8, pie de monte c

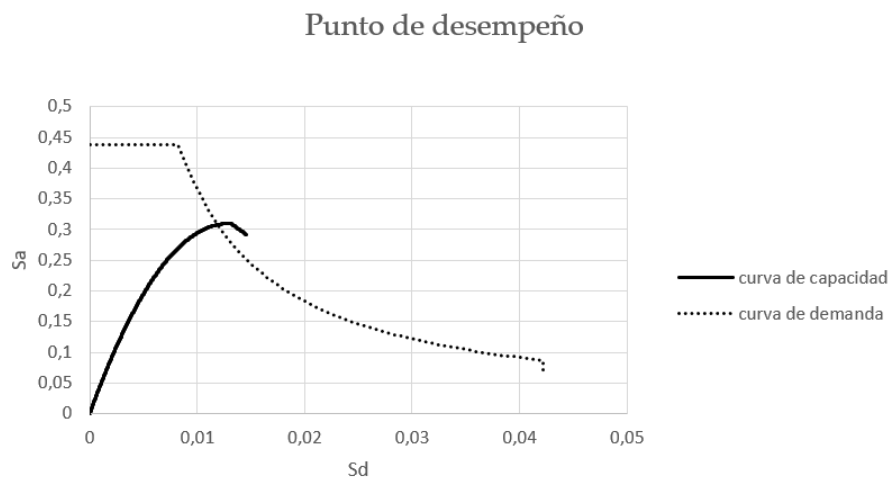


Figura 11.21: Punto de desempeño modelo 8, aluvial 50

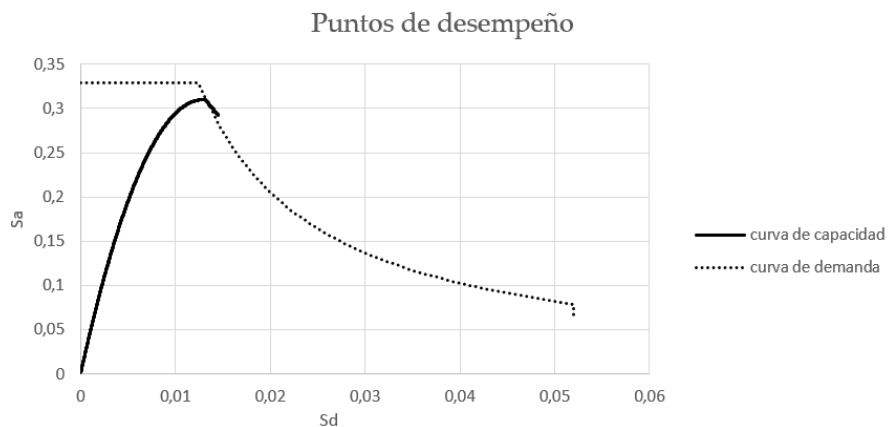


Figura 11.22: Punto de desempeño modelo 8, aluvial 200

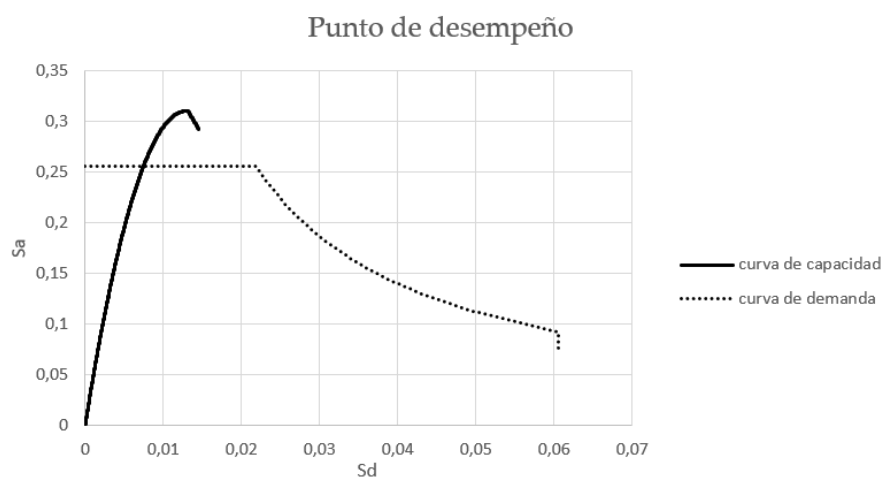
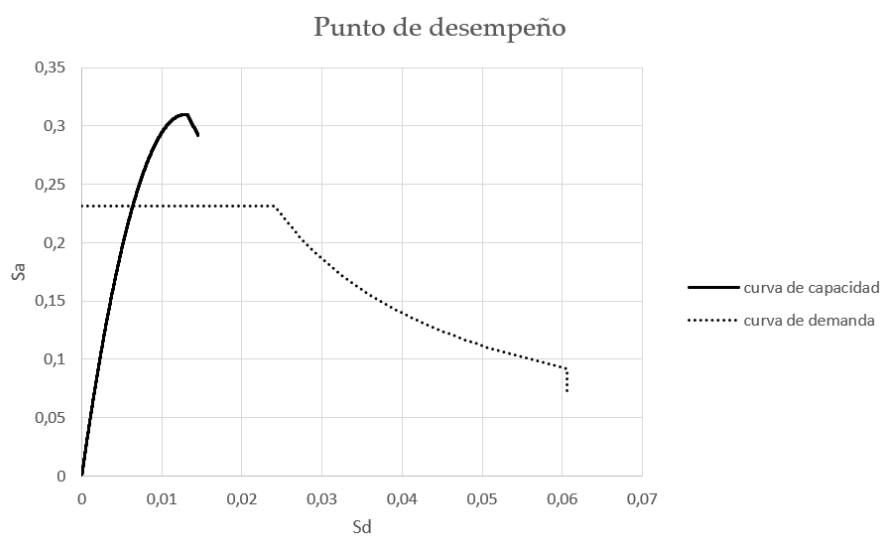


Figura 11.23: Punto de desempeño modelo 8, aluvial 300

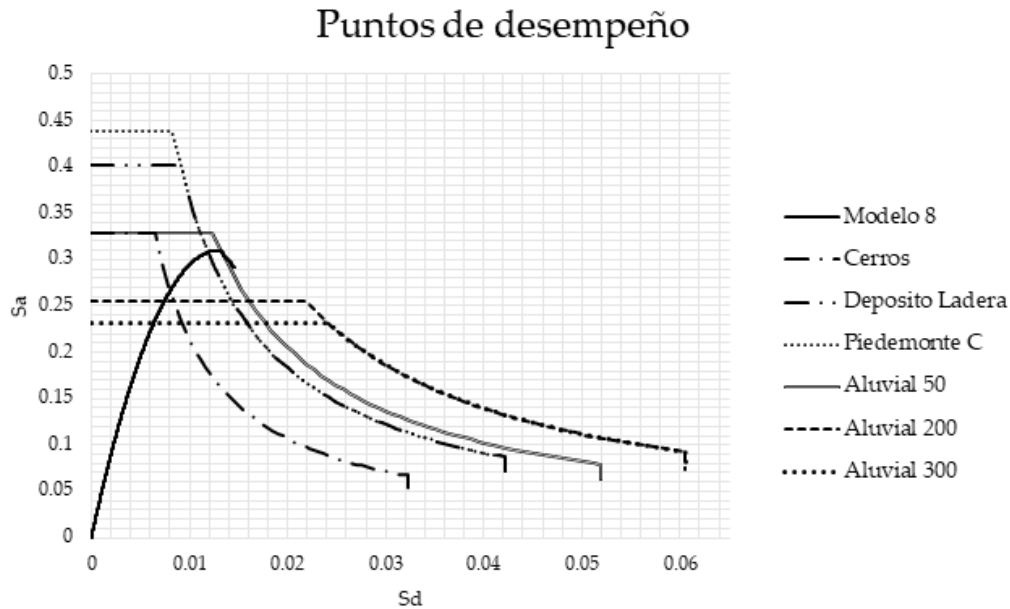


Según los resultados obtenidos de los 9 modelos analizados siendo los dos primeros las construcciones que en la actualidad realiza Techo, solo el modelo 8 el cual es una mejora propuesta que consiste en la adaptación de arriostradores de madera cuyas secciones transversales son 20 x 20 cm, cumple la demanda de los tipos de suelos existentes en Ciudad Bolívar y Usme, y por ende solo a este modelo se le



pueden establecer los puntos de desempeño los cuales se pueden ver en la figura 11.24.

Figura 11.24: Comportamiento modelo 8 para cada tipo de suelo



Cuadro 11.3: Normalización de puntos de desempeño - Modelo 8

Suelo	Sd	Normalización	Suelo	Menor - Mayor
Cerros	0.008	0.618	Aluvial 300	0.515
Deposito Ladera	0.012	0.927	Aluvial 200	0.579
Piedemonte C	0.0122	0.943	Cerros	0.618
Aluvial 50	0.013	1.004	Deposito Ladera	0.927
Aluvial 200	0.0075	0.579	Piedemonte C	0.943
Aluvial 300	0.0066	0.515	Aluvial 50	1.004

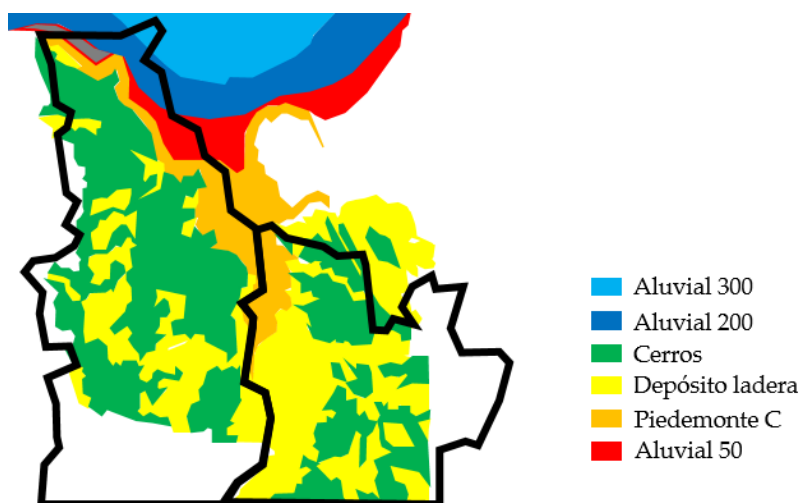
**Fuente:** propia

Teniendo en cuenta que el desplazamiento espectral máximo al que puede llegar la estructura sin presentar daños permanentes es de 0,01294, este valor se coge como referencia para parametrizar los puntos de desempeño y así poder definir en que tipo de suelo funciona mejor esta estructura. Según esto entre menor sea el valor de la norma mejor es el rendimiento sísmico de la estructura, en este orden de ideas el modelo 8 funciona de forma bastante eficiente en el tipo de suelo 6 es decir el

Aluvial 300 el cual presenta una menor demanda, en el tipo de suelo 5 y 1, que son Aluvial 200 y Cerros respectivamente también funciona de una forma bastante favorable, en los modelos 2 y 3 que son Deposito de ladera y Piedemonte C se cumple con la demanda pero están muy cerca del valor máximo de desplazamiento espectral y no son los más convenientes aunque si cumplan con la demanda necesaria, finalmente este modelo en el tipo de suelo 4 que es el Aluvial 50 no cumple con la demanda, porque el punto de desempeño se encuentra después de el punto máximo de la gráfica, es decir que esta vivienda podría presentar daños permanentes.

Finalmente estos datos se resumen en el mapa de las localidades de Ciudad Bolívar y Usme en la ciudad de Bogotá, donde se pueden identificar las zonas de posible construcción de la vivienda con arriostramientos de madera y secciones de 20x20 cm, identificada como modelo 8.

Figura 11.25: Mapa de Bogota, comportamiento sismico del modelo 8 en las localidades de Ciudad Bolivar y Usme



Fuente: propia

### 11.3.1. Impactos de los mejoramientos estructurales presentados

Los modelos que poseen arriostramientos del marco de madera generan un impacto en términos estructurales de optimización del rendimiento de la capacidad sísmica lo cual es demostrado con el desarrollo de la investigación, esto contribuye a velar por la seguridad de la vida humana refugiada en las viviendas de emergencia, da una visión de estrategias de mejoramiento estructural bajo la eventualidad de ocurrencia de un sismo, los modelos que incluyen el aumento de sección transversal con la distribución original de los elementos de la edificación planteada generan

impacto en la reducción de espacios al interior de la casa o en su defecto usar una mayor área de construcción lo que crea efectos incrementales en el aparato económico y presupuestal del programa social teniendo en cuenta para este efecto los procesos de transporte, manejabilidad y ensamble de los elementos estructurales.

La columnas de concreto confinado en el ámbito estructural crean dificultades en los procesos de unión de las partes, además del diseño adicional que requiere trabajar con hormigón, se incrementa la complejidad de ensamblaje de las viviendas requiriendo mayor cantidad de voluntariado para la colocación y fijación de las piezas, aunque se mejora el rendimiento sísmico en comparación a los modelos que se construyen en la actualidad, este no justifica ya que no soportaría la demanda sísmica de las zonas estudiadas

## **11.4. ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN**

EL trabajo de grado ESTUDIO DEL DESEMPEÑO SÍSMICO Y MEJORAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS VIVIENDAS DE EMERGENCIA TECHO EN LAS LOCALIDADES DE CIUDAD BOLIVAR Y USME DE BOGOTÁ D.C, se encontrara a disposición de la Universidad Católica de Colombia y se podrá encontrar en la biblioteca, con el fin de que sea una guía para las personas, estudiantes, egresados, profesores, administrativos y cualquiera que esté interesado en la información que aquí se proporciona, con el fin de aportar al desarrollo y bienestar de la comunidad desde el sector profesional de la ingeniería civil.

# Capítulo 12

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Inicialmente es necesario resaltar la carencia de antecedentes respecto a la aplicación del Software investigativo OpenSees en Colombia y toda Latinoamérica, respecto a este software se encontraron pocos documentos, los cuales son provenientes de autores de países ya desarrollados, con esto es fácil deducir y evidenciar la lentitud del desarrollo tecnológico en Colombia en el ámbito investigativo y en las áreas de la ingeniería estructural y sísmica en general.

Este tipo de investigaciones en las que se utilizan diferentes software de investigación ayudan a incrementar la productividad y competitividad del mercado o el sector a el que se este aplicando, como se ha evidenciado a lo largo de los años la ciencia y la tecnología son muy importantes para el desarrollo de una comunidad o país, porque genera ciudadanos con mayores habilidades para enfrentar los cambios y adversidades, también puede genera un mayor nivel de concientización a la hora de manejar los recursos, bienes y decisiones pensando en el bienestar social.

Una de las conclusiones más importantes con el desarrollo de este trabajo es que el modelo utilizado actualmente por la fundación Techo para suplir las necesidades habitacionales de las poblaciones más vulnerables, en el análisis desde un enfoque sismorresistente es insuficiente, es decir que este modelo no alcanza a suplir la demanda sísmica de los tipos de suelos identificados en las localidades de Usme y Ciudad Bolívar, esto evidencia que dicha fundación aunque supla una gran parte de este déficit habitacional brindando un cobijo y espacio para protección ante agentes externos como el clima y el sismo de las familias beneficiadas, no esta teniendo en cuenta la seguridad de dicha población a la hora de un desastre natural, cuando se menciona un desastre natural dentro de su definición esta incluido el sismo, es importante hablar también de la prevención de la colapsabilidad estructural de las edificaciones de emergencia y estas construcciones realizadas por Techo no cuentan con dicha disminución de la incertidumbre de falla ante un sismo, poniendo en riesgo no solo los elementos materiales si no la vida humana de sus habitantes.

Teniendo en cuenta lo anterior se propusieron una serie de alternativas con la finalidad de mejorar el rendimiento sísmico del modelo constructivo original, dichas mejoras fueron: aumento de las secciones transversales, arriostramientos y cambio en el material de las columnas principales. Sin embargo, de las 7 alternativas propuestas y explicadas a lo largo del desarrollo del trabajo, la única que alcanzó la capacidad estructural suficiente para resistir la demanda sísmica de suelos de las localidades en las cuales se encuentran la población que se quiere beneficiar es aquella con sistema de arriostradores y secciones transversales de 20 x 20 cm.

Con los resultados obtenidos en este proyecto se puede recomendar a la fundación Techo, reevaluar su propuesta agregando arriostramientos al modelo que utilizan actualmente, esto es bastante viable, porque no se aumenta considerablemente la inversión del material o esfuerzo y por el contrario si se aumenta en gran medida la capacidad de la estructura, lo cual resulta beneficioso para la población que accede a estos programas sociales.

Finalmente, en el mapa que se muestra la capacidad sísmica del modelo arriostrado en cada tipo de suelo, donde se puede evidenciar la categorización para definir en que tipo de suelo esta construcción puede ser más beneficiosa y así mismo en cual puede ser mas perjudicial, los suelos con mayor cobertura de la zona son los cerros y el depósito de ladera con los cuales la estructura posee un comportamiento aceptable.

# Bibliografía

- [1] Alcaldía Mayor de Bogotá, “Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C.,” p. 21, 2010.
- [2] S. Meneses, ““IDENTIFICACIÓN DE USOS PROBABLES DE Pinus patula CON BASE EN LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE TRABAJABILIDAD DE LA MADERA ,” *Tesis de Grado Universidad Tecnica del Norte*, pp. 29–32 ; 72–74, 2011.
- [3] J. Navarrete, “Persistencia y regionalización del desplazamiento forzado en Colombia Persistence and Regionalization,” 2020.
- [4] Ó. A. Alfonso R., R. A. Barrera G., P. I. Bernal F., D. C. Camargo C., and L. C. Garzón B., *The deadly cycle of street dwellers in Bogotá. Theories, forgetting, policies and fatal outcomes*, vol. 21. 2019.
- [5] Techo Colombia, “Por una sociedad justa y sin pobreza,” 2020.
- [6] S. V. Murillo, “Construir con Madera Alternativa para Resolver Necesidades Habitacionales.,” pp. 1–4, 2009.
- [7] E. Saleh and J. Mohammadi, “Seismic performance of structural frames and joints in wood tall buildings,” *ISEC 2019 - 10th International Structural Engineering and Construction Conference*, no. 1, pp. 1–6, 2019.
- [8] V. Salazar, “Proyectos que buscan hacer de la vivienda de la madera, una vivienda de calidad: chile apuesta por la construccion en madera,” *Revista De La Construccion*, vol. 7, no. 1, pp. 114–116, 2008.
- [9] H. Krawinkler, “Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation,” *Engineering Structures*, vol. 20, no. 4-6, pp. 452–464, 1998.
- [10] A. Filiatrault, H. Isoda, and B. Folz, “Hysteretic damping of wood framed buildings,” *Engineering Structures*, vol. 25, no. 4, pp. 461–471, 2003.
- [11] X. Estrella, P. Guindos, J. L. Almazán, and S. Malek, “Efficient nonlinear modeling of strong wood frame shear walls for mid-rise buildings,” *Engineering Structures*, vol. 215, no. April, 2020.

- [12] Aalto University Wood Program, “Liina Transitional Shelter / Aalto University Wood Program,” 2011.
- [13] A. Mitchell, J. Macció, and D. M. Fages, “El efecto de la vivienda de emergencia en el bienestar,” 2016.
- [14] IDIGER, “Caracterización General del Escenario de Riesgo Sísmico. Amenaza sísmica en Bogotá.,” 2020.
- [15] Congreso de la Republica de Colombia, “Constitucion politica de colombia 1991 preambulo el pueblo de colombia,” p. 108, 1991.
- [16] E. Ferrando, “El derecho a una vivienda digna y adecuada en el ordenamiento jurídico español,” *Anuario de Filosofía del Derecho*, pp. 305–322, 1992.
- [17] Techo Colombia, “Derecho a Bogotá,” p. 85, 2015.
- [18] GHS - Global Housing Solutions, “Vienda de Emergencia. Viviendas para personas en situaciones de emergencia rápido, seguro y simple.,” 2020.
- [19] ECOSIGLOS, “Ventajas y desventajas medioambientales de la madera en las construcciones,” 2013.
- [20] FSC - Forest Stewardship Council, “El material constructivo sostenible del siglo XXI,” *Organización Forest Stewardship Council*, p. 248, 2018.
- [21] R. Leslie, “The Pushover Analysis , explained in its Simplicity,” vol. 0, no. September 2013, pp. 1–13, 2002.
- [22] APPLIED TECHNOLOGY COUNCIL (ATC), “ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings,” 1996.
- [23] P. Deng, S. Pei, J. W. van de Lindt, M. Omar Amini, and H. Liu, “Lateral behavior of panelized CLT walls: A pushover analysis based on minimal resistance assumption,” *Engineering Structures*, vol. 191, no. May, pp. 469–478, 2019.
- [24] H. R, X. L, and G. D.E, “Design, Push-over analysis for performance-based seismic,” *Computers & Structures*, vol. 80, no. 0045-7949, pp. 2483–2493, 2002.
- [25] S. C. Yang, H. Hong, and F. M. Bartlett, “Responses and capacity curves of mid-and high-rise wood buildings subjected to seismic excitations,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 47, no. 1, pp. 63–76, 2020.
- [26] S. cheng Yang and H. P. Hong, “Reliability and fragility assessment of mid-and high-rise wood buildings subjected to seismic excitation,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 201, no. October, pp. 1–13, 2020.

- [27] Organización de las Naciones Unidas (ONU), “Objetivos de desarrollo sostenible ”Fin de la pobreza” .,” 2020.
- [28] J. I. Gonzales, “Aumento de la pobreza en Colombia no debe subestimarse.,” 2019.
- [29] DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística, “Resultados de Encuesta Multipropósito (EM) 2017,” *Encuesta Multipropósito 2017*, 2018.
- [30] Secretaría Distrital de Planeación, “Encuesta Multipropósito 2017. Principales resultados Bogotá-Región,” *Encuesta Multipropósito 2017*, p. 142; 148, 2017.
- [31] J. S. Diaz, “Visión Geotécnica de la Amenaza Sísmica Capítulo 13 : Respuesta sísmica de sitio,” *S.A.S, GeoTecnología*, 2019.
- [32] B. Folz and A. Filiatrault, *A Computer Program for Seismic Analysis of Wood-frame Structures (SAWS)*. No. W-21, 2002.
- [33] U. B. OpenSees, “SAWS material,” 2012.
- [34] O. O. d. l. N. Unidas), “¿Qué es la desigualdad?,” 2020.
- [35] Red Internacional para los Derechos Económicos Sociales y Culturales., “El derecho a una vivienda adecuada (párrafo 1 del artículo 11 del Pacto).,” *RED\_DESC*, 2020.
- [36] J. E. T. Ramírez, E. P. Pérez, and L. A. R. Giraldo, “Las necesidades habitacionales de los hogares bogotanos: Una mirada que trasciende el déficit convencional de vivienda,” *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, vol. 5, no. 9, pp. 104–122, 2012.
- [37] Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio Interior, “Viviendas de Emergencia,” 2020.
- [38] J. Q. d. L. Moya, B. G. Rodrigo, M. L. Cervera, C. V. Fernández, and V. G. Guinea, *Conceptos básicos de la construcción con madera: Documento de aplicación del CTE*. 2010.
- [39] Anonimo, “Aspectos Generales Del Riesgo Sísmico,” *Tesis Doctorales en Xarxa*, vol. 2, pp. 1–29, 2020.
- [40] R. J. Purca, “Resumen: Atc-40 Cap. 8 Procedimiento De Analisis Estatico No Lineal,” p. 15, 2015.
- [41] C. E. DUARTE BONILLA, M. E. MARTINEZ CHAVARRIA, and J. J. SANTAMARIA DIAZ, ““ Análisis Estático No Lineal ( Pushover ) Del Cuerpo Central Del Edificio De La Facultad,” 2017.



- [42] P. C. Raposo, J. A. Correia, D. Sousa, M. E. Salavessa, C. Reis, C. Oliveira, and A. De Jesus, “Mechanical Properties of Wood Construction Materials from a Building from the 19 th Century,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 5, pp. 1097–1101, 2017.
- [43] C. Peng, A. A. El Damatty, A. Musa, and A. Hamada, “Simplified numerical approach for the lateral load analysis of light-frame wood shear wall structures,” *Engineering Structures*, vol. 219, no. December 2019, 2020.
- [44] S. Pei, C. Lenon, G. Kingsley, and P. Deng, “Seismic Design of Cross-Laminated Timber Platform Buildings Using a Coupled Shearwall Concept,” *Journal of Architectural Engineering*, vol. 23, no. 3, p. 06017001, 2017.
- [45] S. Aicher, H. W. Reinhardt, and H. Garrecht, “Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology,” *RILEM Bookseries*, vol. 9, no. April 2015, 2014.
- [46] M. Popovski, J. Schneider, and M. Schweinsteiger, “Lateral load resistance of cross-laminated wood panels,” *11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010*, vol. 4, no. January, pp. 3394–3403, 2010.
- [47] D. Fitzgerald, A. Sinha, T. H. Miller, and J. A. Nairn, “Toe-Screwed Cross-Laminated Timber Connection Design and Nonlinear Modeling,” *Journal of Structural Engineering (United States)*, vol. 146, no. 6, pp. 1–13, 2020.
- [48] C. Loss, T. Tannert, and S. Tesfamariam, “State-of-the-art review of displacement-based seismic design of timber buildings,” *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 481–497, 2018.
- [49] K. M. Kyaw, C. K. Gadagamma, K. Kyaw, G. Hideomi, O. Murao, and K. Meguro, “Seismic fragility analysis of poorly built timber buildings in yangon slum areas,” *Journal of Disaster Research*, vol. 15, no. 3, pp. 407–415, 2020.
- [50] T. T. Nguyen, T. N. Dao, S. Aaleti, J. W. van de Lindt, and K. J. Fridley, “Seismic assessment of a three-story wood building with an integrated CLT-lightframe system using RTHS,” *Engineering Structures*, vol. 167, no. January, pp. 695–704, 2018.
- [51] Y. Pan, C. E. Ventura, W. D. Finn, and H. Xiong, “Effects of ground motion duration on the seismic damage to and collapse capacity of a mid-rise woodframe building,” *Engineering Structures*, vol. 197, no. February, 2019.
- [52] V. A. De-Araujo, C. M. Gutiérrez-Aguilar, J. Cortez-Barbosa, M. Gava, and J. N. Garcia, “Disponibilidad de las técnicas constructivas de habitación en madera en Brasil,” *Revista de Arquitectura*, vol. 21, no. 1, pp. 68–75, 2019.

- [53] Universidad de Berkeley - OpenSees, “Fiber Section.,” 2012.
- [54] Techo Colombia, “Manual de Construcción,” *Techo*, vol. 1, p. 32, 2019.
- [55] J. I. Fernández-Golfín, E. Hermoso, and M. R. Díez, “Analysis of the effect of volume on the bending strength of the Spanish scot and laricio pine timbe,” *Materiales de Construcción*, vol. 52, no. 268, pp. 43–55, 2002.
- [56] UNAM, “Capítulo 2 Propiedades de los materiales en secciones de concreto reforzado,” pp. 11–18, 2008.
- [57] C. Corral, “Arriostramientos. Tipologías. FEM,” 2012.