



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**APOYO PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES EN  
CONCRETO REFORZADO CON CAPACIDAD DE  
DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR LOS MÉTODOS DE  
LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE Y  
ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO.**

Autor(es)

Juan Felipe Hernández Yarce

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería

Civil, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



Apoyo para el diseño de edificaciones en concreto reforzado con capacidad de disipación de energía por los métodos de la fuerza horizontal equivalente y análisis dinámico elástico.

**Juan Felipe Hernández Yarce**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Civil**

Asesores (a):

Álvaro José Mattos Olivella, Ingeniero civil

Laura Marcela Escudero Montoya, Ingeniera civil

Línea de Investigación:

Diseño de estructuras

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021

# **APOYO PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES EN CONCRETO REFORZADO CON CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR LOS MÉTODOS DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE Y ANÁLISIS DINÁMICO ELÁSTICO.**

## **Abstract**

This report addresses the work carried out during the industry semester in a company in the city of Medellín specialized in the structural design of reinforced concrete buildings. There, support was provided in the design activities for different projects using two of the main analysis methodologies endorsed by the Colombian earthquake resistant standard (NSR-10). These projects sought to find the safest and most economical design solutions, taking into account the need to build elements with energy dissipation capacity, according to seismic requirements considering the location of each project, physical conditions of the soil, construction materials to employ, the occupation that will be given to its structure and importance. In addition to the NSR-10, for the design of structural elements it was supplemented with information and recommendations from the American standard ACI-318, which allowed the implementation of programs such as ETABS V.17 for the modeling and design of buildings. The results obtained by the different models could be exported to software programs for cutting reinforcement, calculation memories and drawing programs such as e + ref, Excel and AutoCAD respectively. Finally, with the calculations obtained, it was possible to conclude with the stage of elaboration and printing of the required structural plans.

## **Resumen**

En el presente informe se aborda el trabajo realizado durante el semestre de industria en una empresa de la ciudad de Medellín especializada en el diseño estructural de edificaciones en concreto reforzado. Allí se hizo un apoyo en las actividades de diseño para diferentes proyectos empleando dos de las principales metodologías de análisis avaladas por la norma sismo resistente colombiana (NSR-10). En estos proyectos se buscó encontrar las soluciones de diseño más seguras y económicas, teniendo en cuenta la necesidad de construir elementos con capacidad de disipación de energía, según los requerimientos sísmicos considerando la ubicación de cada proyecto, condiciones físicas del suelo, materiales de construcción a emplear, la ocupación que se le dará a la estructura e importancia de esta. Además de la NSR-10, para el diseño de elementos estructurales se complementó con información y recomendaciones de la norma estadounidense ACI-318, lo cual permitió la implementación de programas como ETABS V.17 para el modelado y diseño de las edificaciones. Los resultados obtenidos por los diferentes modelos pudieron ser exportados a programas de software para despiece de refuerzos, memorias de cálculo y programas de dibujo como e+ref, Excel y AutoCAD respectivamente. Finalmente, con los cálculos obtenidos se pudo

concluir con la etapa de elaboración e impresión de planos estructurales requeridos.

## Contenido

1	Introducción.....	8
2	Objetivo general.....	9
2.1.	Objetivos específicos.....	9
3	Marco Teórico.....	9
3.1.	Estructuras de concreto reforzado: .....	9
3.2.	Sistemas estructurales.....	10
3.2.1.	Sistema muros: .....	11
3.2.2.	Sistema combinado:.....	11
3.2.3.	Sistema pórtico: .....	12
3.2.4.	Sistema dual:.....	12
3.3.	Método de análisis:.....	13
3.3.1.	Método de la fuerza horizontal equivalente (FHE):.....	14
3.3.2.	Método del análisis dinámico elástico (ADE):.....	15
3.4.	Capacidad de disipación de energía: .....	16
3.4.1.	Capacidad de disipación de energía mínima (DMI): .....	17
3.4.2.	Capacidad de disipación de energía moderada (DMO):.....	17
3.4.3.	Capacidad de disipación de energía especial (DES):.....	18
3.5.	Irregularidad: .....	19
3.6.	Deriva: .....	21
3.7.	Combinaciones de carga: .....	22
3.8.	Espectro sísmico de diseño: .....	23
3.9.	Perfil del suelo.....	24
4.	Metodología .....	25
5.	Resultados y análisis .....	30
6.	Conclusiones.....	41
7.	Referencias bibliográficas .....	42

## Listado de tablas

Tabla 1 Clasificación perfiles de suelo según AIS 2010. ....	25
Tabla 2 Resultados estructuras de Casas de Barú.....	32
Tabla 3 Resultado de cortantes sísmicos Casas de Barú.....	33
Tabla 4 Resultados Jazz Comercio - parqueaderos.....	38
Tabla 5 Resultado de Cortantes sísmicos Jazz Comercio - parqueaderos.....	39

## Listado de figuras

Figura 1. Esquema sistema muros.....	11
Figura 2. Esquema sistema combinado.....	11
Figura 3. Esquema sistema pórtico.....	12
Figura 4. Esquema sistema dual. ....	13
Figura 5. Representación esquemática de zonas de amenaza sísmica para Colombia. Tomado de AIS 2010. ....	17
Figura 6. Comparación de refuerzo según grado de capacidad de disipación de energía.....	18
Figura 7. Comparación de ductilidad en graficas de Fuerza vs Deflexión según grado de capacidad de disipación de energía.....	18
Figura 8. Irregularidades en planta. Tomado de AIS 2010.....	20
Figura 9. Irregularidades en altura. Tomado de AIS 2010.....	21
Figura 10. Definición de derivas. Tomado de AIS 2010. ....	22
Figura 11. Espectro elástico de aceleraciones como fracción de g. Tomado de AIS 2010.....	24
Figura 12. Diagrama de flujo de metodología. ....	29
Figura 13. Vista arquitectónica Casa Lote 3. ....	30
Figura 14. Vista arquitectónica Casa Lote 4. ....	31
Figura 15. Vista arquitectónica Casa Lote 36. ....	31
Figura 16. Vista arquitectónica Casa Lote 66. ....	31
Figura 17. Espectro de diseño Casas de Barú.....	33
Figura 18. Modelo estructural Casas de Barú Lote 3.....	35
Figura 19. Modelo estructural Casas de Barú Lote 4.....	35
Figura 20. Modelo estructural Casas de Barú Lote 36.....	36
Figura 21. Modelo estructural Casas de Barú Lote 66.....	36
Figura 22. Vista arquitectónica Jazz Comercio - parqueaderos.....	37
Figura 23. Espectro de diseño Jazz Comercio - Parqueaderos.....	39
Figura 24. Modelo estructural Jazz Comercio - Parqueaderos.....	40

## Nomenclatura:

- a** = Exponente para ser utilizado en el cálculo del periodo aproximado.
- A<sub>a</sub>** = Aceleración horizontal pico efectiva para diseño.
- A<sub>v</sub>** = Velocidad horizontal pico efectiva para diseño.
- C<sub>f</sub>** = Coeficiente utilizado para calcular el periodo de la estructura definido en Cap. A.4. de NSR-10.
- C<sub>u</sub>** = Coeficiente utilizado para calcular el periodo máximo permisible de la estructura definido en Cap. A.4. de NSR-10.
- F<sub>a</sub>** = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos, debida a efectos del sitio.
- F<sub>v</sub>** = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios, debida a efectos del sitio.
- D** = Carga muerta por peso propio del elemento, materiales incorporados a la edificación y elementos y equipos permanentes en la estructura.
- Ex** = Fuerza sísmica reducida de diseño en dirección x ( $F_x/R*S_x$ ).
- Ey** = Fuerza sísmica reducida de diseño en dirección y ( $F_y/R*S_y$ ).
- F<sub>x</sub>** = Fuerza sísmica calculada de acuerdo con requisitos del título A de AIS (2010) en dirección x.
- F<sub>y</sub>** = Fuerza sísmica calculada de acuerdo con requisitos del título A de AIS (2010) en dirección y.
- F'<sub>c</sub>** = Resistencia específica a la compresión.
- F<sub>y</sub>** = Resistencia específica a la tracción.
- g** = Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ].
- h** = Altura en [m] medida desde la base hasta lo más alto de la edificación.
- I** = Coeficiente de importancia.
- L** = Cargas vivas debidas al uso y ocupación de la edificación, incluyendo cargas debidas a objetos móviles, particiones que se pueden cambiar de sitio. Incluye cualquier reducción que se permita. Si se toma en cuenta la resistencia a cargas de impacto este efecto debe tenerse en cuenta en la carga viva L.
- M** = Masa total de la edificación, debe ser igual a la masa total de la estructura más la masa de elementos permanentes en la estructura.
- M<sub>j</sub>** = masa actuante total de la edificación en la dirección j.
- M<sub>mj</sub>** = masa efectiva modal de modo m en la dirección j.
- P** = Número total de modos utilizado en el análisis modal de la estructura.
- R<sub>0</sub>** = Coeficiente de capacidad de disipación de energía básico definido para cada sistema estructural y cada grado de libertad de capacidad de disipación de energía del material estructural.
- R** = Coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño, corresponde al coeficiente de disipación de energía básico, R<sub>0</sub>, multiplicado por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidades en planta, altura y ausencia de redundancia.

**S<sub>a</sub>** = Valor del espectro de aceleraciones de diseño para un periodo de vibración dado. Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un periodo de vibración T.

**T** = Periodo de vibración del sistema elástico [s].

**T<sub>a</sub>** = Periodo de vibración fundamental aproximado [s].

**T<sub>c</sub>** = Periodo de vibración correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño para periodos cortos, y la parte descendiente del mismo. [s].

**T<sub>L</sub>** = Periodo de vibración correspondiente al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante del espectro de diseño, para periodos largos. [s].

**T<sub>0</sub>** = Periodo de vibración al cual inicia la zona de aceleraciones constantes del espectro de aceleraciones. [s].

**V<sub>s</sub>** = Cortante sísmico basal, para las fuerzas sísmicas.

**V<sub>tj</sub>** = Cortante sísmico en la base total en la dirección horizontal j

**Φ<sub>a</sub>** = Coeficiente de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidad en altura.

**Φ<sub>p</sub>** = Coeficiente de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidad en planta.

**Φ<sub>r</sub>** = Coeficiente de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidad por ausencia de redundancia.

**Δ<sub>i</sub>** = Deriva en la dirección principal i.

**δ<sub>i</sub>** = Desplazamiento horizontal en la dirección principal i.

## 1 Introducción

Desde 1997 rige en Colombia una normativa que regula el diseño y construcción de estructuras civiles para todo el territorio nacional, conocida como la Ley 400. Esta ley surge a raíz de la observación y el comportamiento de elementos estructurales que se han podido evidenciar ante catástrofes naturales y ensayos de investigación tanto en Colombia como en el resto del mundo, que sirven como fundamento y base para la definición de la norma sismo resistente que se utiliza en el país hoy en día. La ley 400 tiene como referencia principal la normativa ACI-318 de Estados Unidos, la cual se ha adaptado a las condiciones locales en cuanto a lineamientos de parámetros sísmicos y así ser aplicable para el diseño de estructuras en concreto reforzado, mampostería estructural, estructuras metálicas, madera, entre otros materiales. A partir de la ley 400 de 1997 se ha hecho una actualización cada cierto periodo de tiempo en las consideraciones y requisitos generales para el diseño sismo resistente, en la actualidad se rige por la última versión de la norma sismo resistente del 2010 (AIS, 2010) y en ella se expone cada uno de los parámetros y condiciones de diseño de una edificación según su ubicación (zona de amenaza sísmica), el perfil del suelo en cual se hará la construcción, el uso u ocupación que se dará a la estructura, el sistema estructural a emplear, la configuración en planta y configuración en altura que permite considerar el grado de capacidad de disipación de energía. Para el diseño sismo resistente regido por la NSR-10 se permite utilizar los métodos de diseño de la fuerza horizontal equivalente (FHE), Análisis dinámico elástico (ADE), análisis dinámico inelástico y análisis no lineal de plastificación progresiva. Para el desarrollo del trabajo final de práctica profesional, se implementaron las metodologías FHE y ADE, ya que son las más utilizadas en el medio local puesto que cumplen para la gran mayoría de las edificaciones según las condiciones de irregularidad de la edificación, el uso del suelo, cantidad de niveles o longitud en altura, perfil de suelo y flexibilidad de las estructuras.

Para este trabajo se brindará apoyo en el diseño de estructuras de concreto reforzado bajo los métodos de análisis anteriormente descritos entendiendo las consideraciones específicas para estructuras con grado de capacidad de disipación de energía moderada (DMO). Así se espera comprender y aplicar correctamente el método de análisis matemático más apropiado en el diseño de una estructura según sus características bajo normativa colombiana.



## 2 Objetivo general

Caracterizar una metodología para el diseño y modelado de estructuras de concreto reforzado verificando el cumplimiento de las normas legales considerando un grado de disipación de energía moderado.

### 2.1. Objetivos específicos

- Caracterizar métodos de análisis para el diseño de estructuras de concreto reforzado en zonas de amenaza sísmica intermedia y baja.
- Identificar parámetros de diseño de estructuras de concreto reforzado considerando el grado de disipación de energía.
- Presentar modelos de diseño estructural bajo criterios de (FHE) o (ADE) y memorias de cálculo válidas para la realización de planos estructurales.

## 3 Marco Teórico

### 3.1. Estructuras de concreto reforzado:

Se les llama así a las estructuras compuestas por concreto y acero que trabajando en conjunto suplen necesidades de resistencia, rigidez y ductilidad. El concreto se fabrica en estado plástico por lo que es un material que presenta ventajas al ser moldeable y tiene facilidad de proporcionar continuidad en una estructura (Gonzalez Oscar & Robles Francisco, 2005). El concreto se forma por la mezcla homogénea de agregados finos, agregados gruesos y un cementante hidráulico con agua, donde se complementa con aditivos en algunos casos. Dentro de sus principales características está la resistencia específica a la compresión  $f'c$ , la cual define la calidad del material y suele estar dada en MPa, se determina mediante el ensayo de cilindros preparados con la mezcla de concreto y sometida a esfuerzos de compresión hasta los 28 días de su curado, cumpliendo con el control de calidad solicitado por el capítulo C de la norma sismo resistente de 2010 (NSR-10). Los valores de  $f'c$  más comúnmente utilizados en construcciones de Colombia son de 21, 28, 35, 42 y 49 MPa.

Por otro lado, se tiene al acero de refuerzo presentado como barras corrugadas o barras de acero inoxidable que cumplen con la norma

técnico-colombiana (NTC) 2289 descrita por (ICONTEC, 2007), barras lisas que cumplan con la norma NTC 161 de (ICONTEC, 2001) para estribos, retracción o temperatura, alambre de refuerzo electrosoldado corrugado y liso como el descrito en (ICONTEC, 2003). La principal característica del acero de refuerzo es su resistencia a la tracción, la cual se determina con la resistencia nominal a la fluencia  $f_y$  y define la calidad del material, suele estar dada en MPa y se puede conocer sometiendo probetas de acero a esfuerzos de tracción. El acero además presenta una resistencia a cortante y torsión que debe estar alrededor de 420MPa para barras de acero corrugadas y 490MPa en mallas electrosoldadas. (Segura franco, 2011).

Todos los ensayos de la NTC son de obligatorio cumplimiento para la NSR-10, tal y como se define en el Cap. A de la misma, al ser complementarios ya que las normas NTC definen la calidad de los materiales y la NSR-10 define el diseño sísmico utilizando estos materiales.

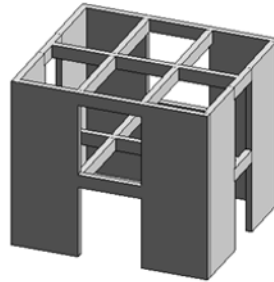
Conocidos los valores de resistencia para el concreto y el acero, se puede notar que ambos materiales pueden trabajar en conjunto de una manera óptima ante solicitudes de esfuerzos sísmicos, además presentan similitud en deformaciones por temperatura, y además, el concreto protege al acero de la corrosión y la exposición al fuego. (Segura franco, 2011)

### **3.2. Sistemas estructurales**

Bajo las características del concreto reforzado, se pueden construir estructuras conformadas por distintos tipos de sistemas estructurales avalados por la norma sismo resistente colombiana NSR-10, los cuales se diferencian según el tipo de elementos verticales empleados para resistir cargas y el grado de capacidad de disipación de energía:

### 3.2.1. Sistema muros:

Sistema compuesto por muros que transfieren las cargas verticales hasta la cimentación y las cargas horizontales son resistidas por los mismos muros o por pórticos con elementos diagonales. (SIMESA, 1999). Ver figura 1.

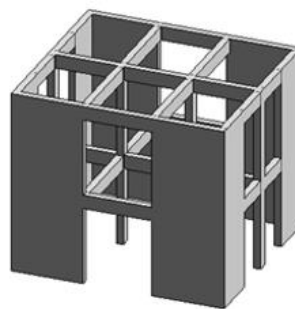


Muros de carga

**Figura 1. Esquema sistema muros.**

### 3.2.2. Sistema combinado:

En este sistema las fuerzas verticales son resistidas por pórticos (vigas y columnas) no resistentes a momentos y las fuerzas horizontales son resistidas por muros estructurales o pórticos con elementos diagonales. También puede ser fuerzas horizontales y verticales resistidas por pórticos resistentes a momentos, combinado con muros estructurales como se muestra en la figura 2 o pórtico con diagonales que no cumplan condiciones para un sistema dual. (SIMESA, 1999).



Combinado

**Figura 2. Esquema sistema combinado.**

### 3.2.3. Sistema pórtico:

Sistema compuesto por pórtico (vigas y columnas) resistente a momentos, sin elementos diagonales y que resiste cargas verticales y cargas horizontales. (SIMESA, 1999). Suele ser uno de los sistemas más utilizados en Colombia por su facilidad constructiva en casas y edificios no tan altos. Ver figura 3.



Pórtico

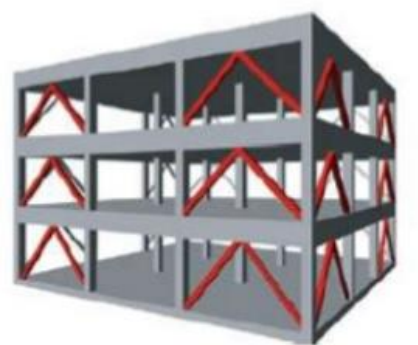
**Figura 3. Esquema sistema pórtico.**

### 3.2.4. Sistema dual:

Este sistema se compone por un pórtico (vigas y columnas) resistente a momentos sin elementos diagonales, combinado con muros estructurales o pórticos con diagonales como se muestra en la figura 4. En este sistema el pórtico transmite la cargas verticales y horizontales y los muros transfieren cargas horizontales. Además, para implementar un sistema dual se deberá cumplir con las siguientes condiciones:

- El pórtico resistente a momentos sin diagonales debe resistir fuerzas verticales
- Fuerzas horizontales resistidas por combinación de muros o pórticos con diagonales, con pórtico resistente a momentos con capacidad de disipación de energía especial, moderado o mínimo. El pórtico resistente a momentos actuando independiente debe resistir mínimo el 25% del cortante basal (Fuerza cortante sísmica de la base).

- Los dos sistemas se diseñan para resistir en conjunto el 100% del cortante basal, en proporción a rigideces relativas, considerando interacción del sistema dual en todos los niveles y bajo ningún caso los muros estructurales o pórticos con diagonales deberán resistir menos del 75% del cortante basal. (SIMESA, 1999)



Dual

Figura 4. Esquema sistema dual.

### 3.3. Método de análisis:

El efecto de las cargas sísmicas sobre una estructura debe analizarse mediante un modelo matemático que permita representar adecuadamente las características del sistema estructural. Para este modelo debe tenerse en cuenta como mínimo las condiciones de apoyo que tiene la estructura, comportamiento rígido o flexible del diafragma, variación de fuerzas axiales en elementos de la estructura causado por las fuerzas sísmicas, la torsión, dirección de aplicación de las fuerzas sísmicas y el grado de fisuración compatible con las cargas sísmicas y el grado de capacidad de disipación de energía. Como resultado del análisis deberá obtenerse como mínimo los desplazamientos horizontales en la estructura incluyendo torsión, distribución del cortante basal, incluyendo torsión en todos los elementos verticales de sistema estructural, efectos de carga sísmica en la cimentación, fuerzas internas, momentos flectores, fuerzas cortantes, fuerzas axiales para todos y cada uno de los elementos del sistema estructural. (Awad, 2012)

Los métodos de análisis que se contemplarán para este trabajo son:

### 3.3.1. Método de la fuerza horizontal equivalente (FHE):

En este método la magnitud y distribución de cargas, se basan en expresiones empíricas, con la suposición de que la estructura está controlada por el primer modo de vibración y que la distribución de cargas horizontales es triangular. Este método presenta el procedimiento más general cuando de estructuras regulares se trata, pero no es recomendable en estructuras irregulares o críticas localizada en zonas sísmicamente activas. (AIS, 2010). Este método será aplicable para las siguientes edificaciones:

- Todas las edificaciones, regulares e irregulares en zona de amenaza sísmica baja.
- Todas las edificaciones, regulares e irregulares con grupo de uso I (ocupación normal).
- Regulares, con máximo 20 niveles o 60 metros de altura medidos desde la base, en todas las zonas de amenaza sísmica, excepto edificaciones localizadas en suelos con perfil D, E o F con periodo de vibración mayor a dos veces el periodo de vibración correspondiente a la transición entre zona de aceleración constante del espectro de diseño para periodos cortos y la parte descendiente del mismo  $2T_c$ .
- Irregulares con máximo 6 niveles o 18 metros de altura medidos desde la base.
- Estructuras flexibles apoyadas en estructuras más rígidas que cumplan método de análisis dinámico inelástico. (AIS, 2010)

Los cálculos para el desarrollo de esta metodología se basan en la evaluación del periodo fundamental de la edificación  $T$ , obtenido a partir de las propiedades de resistencia sísmica bajo un modelo matemático linealmente elástico. El valor de  $T$  no puede exceder  $C_u T_a$ , que representa el periodo máximo permisible por la estructura multiplicado por el periodo de vibración aproximado, los cuales dependerán de los coeficientes de velocidad y amplificación en zona  $A_v$  y  $F_v$  y el sistema estructural de resistencia sísmica implementado tal y como se define en las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$C_u = 1.75 - 1.2 * A_v * F_v \quad (1)$$

$$T_a = C_t * h^\alpha \quad (2)$$

Donde:  $C_t$ ,  $a$  = Coeficientes dados en el Cap.A.4 de NSR-10 según sistema estructural.

$h$  = Altura de la edificación.

### 3.3.2. Método del análisis dinámico elástico (ADE):

En este método la magnitud y distribución de fuerzas son en función de las características dinámicas de la estructura y del sismo. En la configuración de cargas se incluyen los efectos de la geometría, las condiciones de los apoyos, la distribución de masa y los materiales, que se puede aplicar bajo modelos matemáticos tridimensionales con diafragma rígido o diafragma flexible y modelos limitados a un plano vertical para condiciones particulares del Cap. A.5 de la NSR-10. La mayor diferencia que tiene con respecto a la FHE es la determinación de las cargas laterales y de cómo estas son aplicadas a lo alto de la estructura.

Según la NSR-10 este método será aplicable para estructuras que no califican para método FHE y que además cumpla las siguientes condiciones:

- Edificios con más de 20 niveles o mínimo de 60 metros de altura, a excepción de las nombradas en los requisitos de FHE.
- Edificios con irregularidad tipo 1A, 2A y 3A según NSR-10.
- Edificios irregulares que no estén descritos en el cuadro de irregularidad en altura de NSR-10.
- Edificios con más de 5 niveles o 20 metros de altura, la menor, ubicados en zona de amenaza sísmica alta y que no tengan el mismo sistema estructural en toda su altura.
- Regulares e irregulares ubicadas en suelos con perfil D, E o F y un periodo mayor de  $2T_c$ . Se incluye en este caso efectos de interacción suelo-estructura. (AIS, 2010).

Como requisito para la utilización de este método se debe tener:

- Obtención de los modos de vibración.

$$M_j = \sum_{m=1}^p [M_{mj}] \geq 0.90 M \quad (3)$$

Donde: P = Número de modos.

$M_j$  = Masa participante

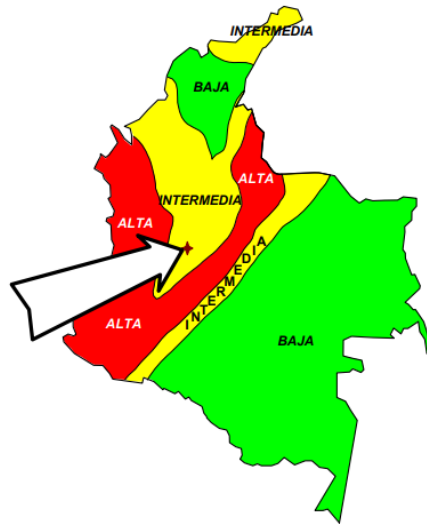
$j$  = Dirección de análisis

- Respuesta espectral modal utilizando las ordenadas del espectro de diseño definido para el periodo de vibración del modo
- Respuesta total incluyendo deflexiones, derivas, fuerzas y cortantes.
- Ajuste del valor del cortante dinámico en la base  $V_{tj}$  ya que este no puede ser menor al 80% para estructuras regulares o el 90% para estructuras irregulares del cortante sísmico basal  $V_s$ .
- Evaluación de derivas.
- Fuerzas de diseño en los elementos debidamente ajustadas por el coeficiente de capacidad de disipación de energía  $R$  y se combinan las cargas bajo lineamientos del título B de (AIS, 2010)

### **3.4. Capacidad de disipación de energía:**

La NSR-10 establece unos requisitos mínimos en cuanto a dimensionamiento de los elementos estructurales y cantidad de refuerzo para salvaguardar las vidas humanas y reducir pérdidas materiales ante un evento sísmico. Estos requisitos están en función del sistema estructural, los materiales implementados, el desempeño sísmico esperado y el nivel de amenaza sísmica (bajo, intermedio o alto) según la localización como se muestra en la figura 5 y el valor de los parámetros de aceleración y velocidad  $A_a$  y  $A_v$ . En función de la amenaza sísmica del lugar, se dispone de un grado de disipación de energía en el rango inelástico definido por la norma NSR-10, considerando las zonas sísmicas definidas para el territorio colombiano (Benjumea Royero et al., 2017) .





**Figura 5. Representación esquemática de zonas de amenaza sísmica para Colombia. Tomado de AIS 2010.**

La capacidad de disipación de energía se emplea de la siguiente manera:

3.4.1. Capacidad de disipación de energía mínima (DMI):

Es aplicable para zonas de amenaza sísmica baja donde los esfuerzos sísmicos no son tan considerables y por lo tanto los elementos no requerirán una gran capacidad de deformarse, por lo que el acero de refuerzo para los elementos estructurales suele ser el mínimo necesario.

3.4.2. Capacidad de disipación de energía moderada (DMO):

Es aplicable para zonas de amenaza sísmica baja e intermedia, para esta última zona los esfuerzos sísmicos son más considerables definidos por los coeficientes de aceleración y velocidad  $A_a$  y  $A_v$  y amplificación en periodos  $F_a$  y  $F_v$ , por lo que se requiere de una mayor ductilidad como propiedad física que tienen los materiales para deformarse antes de sufrir una ruptura y esto es lo que permite disipar la energía, para esto se deben cumplir con los criterios de diseño del Cap. A de NSR-10.

### 3.4.3. Capacidad de disipación de energía especial (DES):

Se utiliza obligatoriamente para zona de amenaza sísmica alta donde los esfuerzos sísmicos son grandes definidos por los coeficientes de aceleración y velocidad  $A_a$  y  $A_v$  y amplificación en periodos  $F_a$  y  $F_v$ , por lo que se requiere de una mayor ductilidad. Para esto se debe diseñar los elementos estructurales bajo criterios del Cap. A de NSR-10 y como se trata del requerimiento más alto de refuerzo se puede aplicar a zonas de amenaza sísmica intermedia y baja para mayor seguridad, pero se obtienen estructuras más costosas.

Para una mejor comprensión se muestra en las figuras 6 y 7 la comparación de cantidad de refuerzo y ductilidad respectivamente que presenta un elemento diseñado para cada uno de los casos:

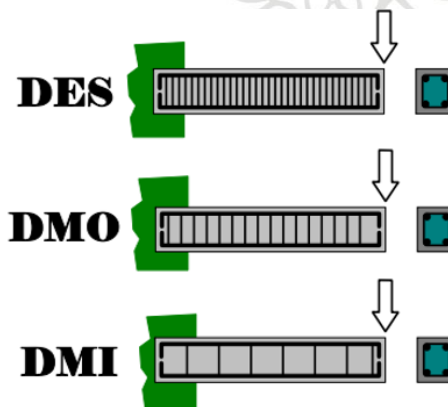


Figura 6. Comparación de refuerzo según grado de capacidad de disipación de energía.

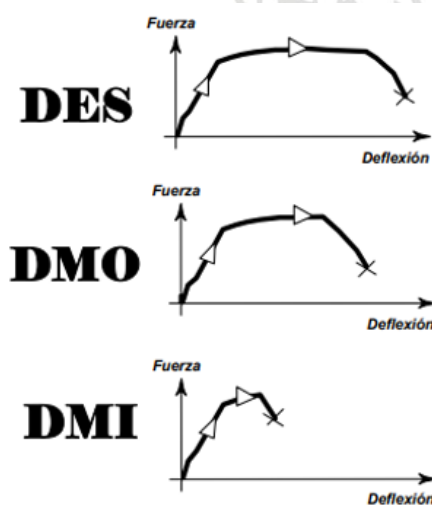


Figura 7. Comparación de ductilidad en graficas de Fuerza vs Deflexión según grado de capacidad de disipación de energía.

### 3.5. Irregularidad:

En el diseño estructural, se entiende como irregular a toda estructura con una configuración compleja en su geometría y altura, algo muy usual en la arquitectura moderna, es por esto por lo que la NSR-10 define diferentes casos de irregularidad que se puede presentar en una estructura, los cuales puedan ser cuantificables para ser analizados con metodologías precisas como el método de análisis elástico teniendo en cuenta el espectro de diseño sísmico. (Awad, 2012).

Para Efectos de diseño, se debe clasificar toda estructura, según la NSR-10 como regular o irregular, donde para estructuras irregulares se les debe garantizar una mayor rigidez, esto mediante la reducción del coeficiente de capacidad de disipación de energía básico  $R_0$ , multiplicado por los factores de irregularidad menores o iguales a uno para cada caso mostrado por en la figura 8 y figura 9, con esto se obtiene el coeficiente de capacidad de disipación de energía a ser empleado en el diseño,  $R$  mostrado en la ecuación 4.

$$R = \varphi_a * \varphi_p * \varphi_r * R_0 \quad (4)$$

Donde:  $\varphi_a$  = Coeficiente de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidad en altura.

$\varphi_p$  = Coeficiente de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidad en planta.

$\varphi_r$  = Coeficiente de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidad por ausencia de redundancia.

Cuando una estructura presente simultáneamente diferentes tipos de irregularidad en planta o en altura, se aplicará el menor valor que indique la norma.

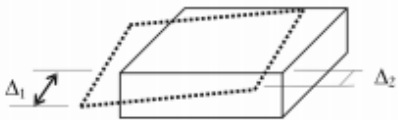
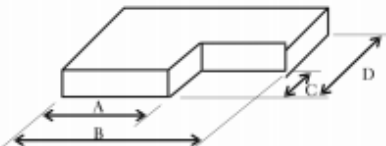
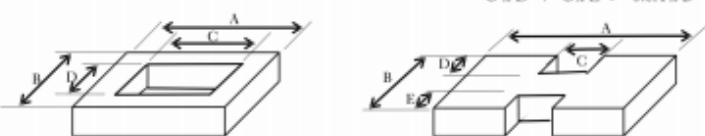
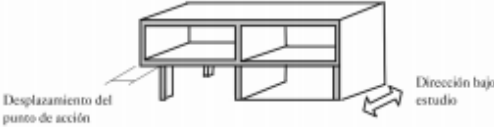
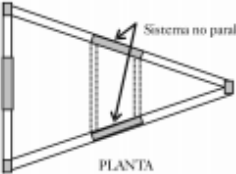
<p>Tipo 1 aP Irregularidad torsional externa</p> <p><math>\phi_p = 0.9</math></p> <p><math>1.4 \bullet \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right) \geq \Delta_1 &gt; 1.2 \bullet \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right)</math></p>	<p>Tipo 1 bP Irregularidad torsional externa</p> <p><math>\phi_p = 0.8</math></p> <p><math>\Delta_1 &gt; 1.4 \bullet \left( \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \right)</math></p>
	
<p>Tipo 2P Retrocesos en las esquinas, <math>\phi_p = 0.9</math></p> <p><math>A &gt; 0.15B</math> y <math>C &gt; 0.15D</math></p> 	
<p>Tipo 3P Irregularidades del diafragma, <math>\phi_p = 0.9</math></p> <p><math>A \times D &gt; 0.5A \times B</math>      <math>C \times D + C \times E &gt; 0.5A \times B</math></p> 	
<p>Tipo 4P Desplazamientos de los planos de acción, <math>\phi_p = 0.8</math></p> 	
<p>Tipo 5P Sistemas no paralelos, <math>\phi_p = 0.9</math></p> 	

Figura 8. Irregularidades en planta. Tomado de AIS 2010

<p>Tipo 1aA - Piso flexible - <math>\phi_a = 0.9</math></p> <p><math>0.60 \text{ Rigidez KD} \leq \text{Rigidez KC} &lt; 0.70 \text{ Rigidez KD}</math>, ó  <math>0.70 (KD+KE+KF)/3 \leq \text{Rigidez KC} &lt; 0.80 (KD+KE+KF)/3</math></p>	
<p>Tipo 1bA - Piso flexible - <math>\phi_a = 0.8</math></p> <p><math>\text{Rigidez KC} &lt; 0.60 \text{ Rigidez KD}</math>, ó  <math>\text{Rigidez KC} &lt; 0.70 (KD+KE+KF)/3</math></p>	
<p>Tipo 2A - Distribución masa - <math>\phi_a = 0.9</math></p> <p><math>m_D &gt; 1.50 m_E</math>  ó  <math>m_D &gt; 1.50 m_C</math></p>	
<p>Tipo 3A - Geométrica - <math>\phi_a = 0.9</math></p> <p><math>a &gt; 1.30 b</math></p>	
<p>Tipo 4A - Desplazamiento dentro del plano de acción, <math>\phi_a = 0.8</math></p> <p><math>b &gt; a</math></p>	
<p>Tipo 5aA - Piso débil - <math>\phi_a = 0.9</math></p> <p><math>0.65 \text{ Resist. Piso C} \leq \text{Resist. Piso B} &lt; 0.80 \text{ Resist. Piso C}</math></p>	
<p>Tipo 5bA - Piso débil extremo - <math>\phi_a = 0.8</math></p> <p><math>\text{Resist. Piso B} &lt; 0.65 \text{ Resist. Piso C}</math></p>	

Figura 9. Irregularidades en altura. Tomado de AIS 2010

La irregularidad por ausencia de redundancia ( $\phi_r$ ) se asignará en todos los sistemas estructurales que no cumplan las condiciones enunciadas en la sección A.3.3.8. de la NSR-10.

### 3.6. Deriva:

El estado límite de control de daños es la base para el diseño estructural en Colombia según criterios de la NSR-10, estableciendo límites de derivas, las cuales son desplazamientos horizontales entre dos puntos de una misma línea vertical en niveles consecutivos. Estos desplazamientos para el caso de Colombia no pueden ser superiores al 1% para estructuras de concreto reforzado ya que se asocia directamente con la deformación inelástica, daños en elementos estructurales que no hagan parte de sistema de

resistencia sísmica y elementos no estructurales, alarma y pánico (García, 1998).

Las derivas de entrepiso para primer piso y niveles superiores se expresan como se observa en las ecuaciones 5 y 6 respectivamente:

Piso 1:

$$\delta_1 = \Delta_1 \quad (5)$$

Piso i:

$$\delta_i = \Delta_i - \Delta_{(i-1)} \quad (6)$$

Donde:  $\delta_1, \delta_i$  = Desplazamiento horizontal en la dirección principal i para piso 1 y pisos superiores respectivamente.

$\Delta_i$  = Deriva en la dirección principal i para cada piso correspondiente.

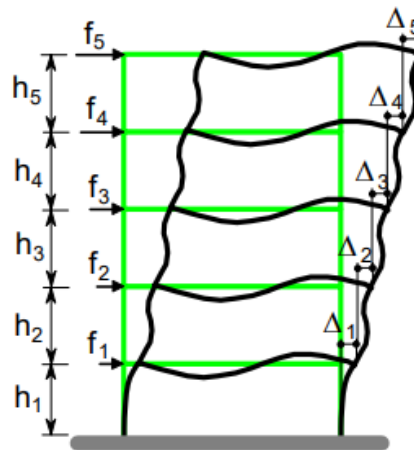


Figura 10. Definición de derivas. Tomado de AIS 2010.

### 3.7. Combinaciones de carga:

Las combinaciones de carga están compuestas por las fuerzas o sollicitaciones que se aplican al sistema estructural, los cuales deben aplicarse a las cargas muertas calculadas, cargas vivas y ambientales especificados para el caso de Colombia en el cap. B de NSR-10 y bajo las cuales se hace el diseño estructural. Cada combinación está nombrada como U00, U01, U02, U03, U04, U05 y está representada por las ecuaciones 7 a 12.

$$U00 = 1.4D \quad (7)$$

$$U01 = 1.20 D + 1.60L \quad (8)$$

$$U02 = 1.20 D + 1.0 L + 1.0 Ex + 0.3Ey \quad (9)$$

$$U03 = 1.20 D + 1.0 L + 0.3Ex + 1.0Ey \quad (10)$$

$$U04 = 0.90 D + 1.0 Ex + 0.3Ey \quad (11)$$

$$U05 = 0.90 D + 0.3Ex + 1.0Ey \quad (12)$$

Donde: D = Carga muerta.

L = carga viva.

Ex = Fuerza sísmica reducida de diseño en dirección x.

Ey = Fuerza sísmica reducida de diseño en dirección y.

Se observa en las ecuaciones 7 a 12 que se utilizan factores menores para aquellas combinaciones que se conocen con mayor certeza, por ejemplo, las cargas muertas. Los factores también reflejan la incertidumbre con la cual se calcula los efectos internos de las cargas internas a partir de las cargas externas en sistemas complejos, adicionalmente incluyen elementos de sección variable debido a agrietamientos. En todos los casos la combinación que controla el diseño es aquella que va a generar mayores efectos (Nilson, 2001).

### **3.8. Espectro sísmico de diseño:**

Las estructuras complejas deben diseñarse mediante espectros de respuesta general o procedimientos de movimiento del suelo específico del sitio. La Aceleración de respuesta de diseño  $S_a$ , dependerá del periodo fundamental de la edificación  $T$  y está dada como fracción de la gravedad. Se permite conocer mediante la ecuación 13, considerando los límites de periodo expuestos en la figura 11. Este cálculo permite conocer posteriormente el valor de cortante sísmico (McCormac & Russell, 2011).

$$S_a = (1.2 * A_v * F_v * I) / T \quad (13)$$

Donde:  $A_v$  = Velocidad horizontal pico efectiva para diseño.

$F_v$  = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios, debida a efectos del sitio.

$I$  = Coeficiente de importancia según ocupación.

$T$  = Periodo de vibración del sistema elástico [s].

En la figura 11 se puede observar las zonas del espectro elástico de aceleraciones para conocer el valor de  $S_a$

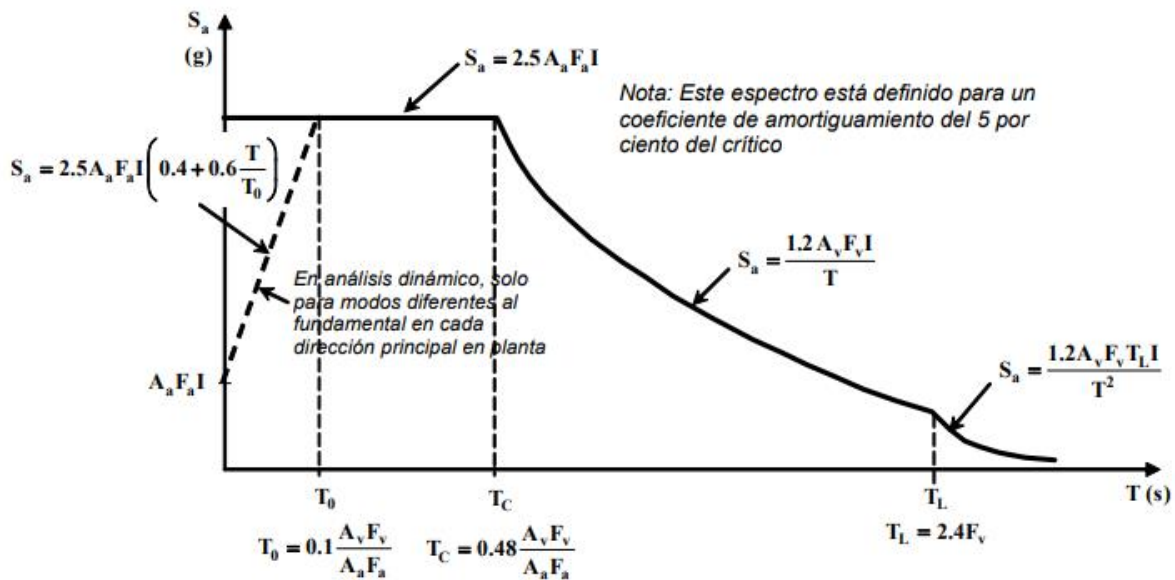


Figura 11. Espectro elástico de aceleraciones como fracción de g. Tomado de AIS 2010.

El valor de  $S_a$  permite conocer el valor acumulativo de fuerzas cortantes de cada piso de la estructura reflejado en la base (Cortante basal  $V_s$ ) por medio de la ecuación 14 y ajustarlo según la regularidad de la estructura:

$$V_s = M * S_a * g \quad (14)$$

Donde:  $M$  = Masa total de la edificación

$S_a$  = Valor dado del espectro de aceleraciones de diseño.

$g$  = Gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

Ajuste cortante:  $0.9 * V_s$  para estructuras irregulares.

$0.8 * V_s$  para estructuras regulares.

### 3.9. Perfil del suelo

La NSR-10 para el diseño sísmico de edificaciones define seis diferentes tipos de perfil de suelo basado en los parámetros de los 30 metros superiores del suelo medidos en el sitio del proyecto. La clasificación del tipo de perfil que se muestra en la tabla 1 estará definida por la velocidad media de onda cortante  $V_s$ , número de golpes del ensayo de penetración estándar  $N$  de acuerdo con la norma ASTM D 1586 (Selig et al., 1978), resistencia media al corte  $S_u$  cumpliendo con la norma (ASTM D2166 / D2166M - 16, índice de



plasticidad IP según (ASTM D4318 - 17e1 y contenido de agua determinado por medio de (ASTM D2166 / D2166M – 16.

**Tabla 1** Clasificación perfiles de suelo según AIS 2010.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
<b>A</b>	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
<b>B</b>	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 760$ m/s
<b>C</b>	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$ , o $\bar{s}_{u0} \geq 100$ kPa ( $\approx 1$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>D</b>	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$ , o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_{u0} \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
<b>E</b>	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{v}_s$
	perfil que contiene un espesor total <b>H</b> mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_{u0}$
<b>F</b>	Los perfiles de suelo tipo <b>F</b> requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: <b>F<sub>1</sub></b> — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. <b>F<sub>2</sub></b> — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ( <b>H</b> > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). <b>F<sub>3</sub></b> — Arcillas de muy alta plasticidad ( <b>H</b> > 7.5 m con Índice de Plasticidad <b>IP</b> > 75) <b>F<sub>4</sub></b> — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ( <b>H</b> > 36 m)	

#### 4. Metodología

A continuación, se define la metodología llevada a cabo durante el trabajo, explicando cada una de las etapas y las diferentes actividades puntuales en el marco del diseño estructural.

- Etapas uno: Esta etapa inicial comenzó con la revisión bibliográfica permanente sobre el diseño de estructuras de concreto bajo parámetros de la AIS (2010) y complementando con criterios de la normativa ACI -318, más documentos adicionales. También se definió la metodología a llevar a cabo para el diseño estructural, estudio de parámetros y se trazó el alcance del trabajo definido en la entrega de la propuesta.

Actividades:

- Definición del trabajo y propuesta metodológica.
- Elaboración de la propuesta.
- Revisión bibliográfica.

- Etapa dos: En esta etapa se hizo validación de prefactibilidad de los proyectos a apoyar y se realizó la revisión arquitectónica y de estudio de suelos para identificar los parámetros y datos de entrada para el diseño estructural. Con esto se revisaron proporciones geométricas, predimensionamiento de los elementos estructurales, chequeo de irregularidades y derivas según título A de AIS (2010). Luego se comienza a realizar los primeros dibujos de plantas estructurales incluyendo geometría y detalles, se evaluaron los diferentes tipos de cargas que aplicaban a cada estructura en la cual se trabajó según su ocupación y materiales y además se definieron las combinaciones de carga que serán aplicadas al sistema. Por último, en esta etapa se hizo revisión del cortante sísmico y/o viento según aplicara.

Actividades:

- Predimensionamiento de vigas, columnas, muros y losas bajo criterios del título C de la NSR-10.
  - Definición de las características de los materiales y sistema estructural empleado.
  - Revisión de la información geotécnica del estudio de suelos obtenidos bajo ensayos de campo como el Standar Penetration Test (SPT) y ensayos de laboratorio como resistencia al corte, límites de Atterberg, humedad natural y granulometría principalmente.
  - Plantear propuesta de cimentación según información geotécnica del tipo de suelo y cargas transferidas de la super estructura.
  - Revisión de parámetros sísmicos según ubicación del proyecto.
  - Identificación de grupo de uso según NSR-10 para asignación de cargas.
  - Chequeo de irregularidades y máxima deriva según criterios del título A de NSR-10.
  - Revisión bibliográfica.
- Etapa tres: Una vez obtenida toda la información requerida de parámetros sísmicos y predimensionamiento, se siguió con la etapa de análisis, donde se elaboró el modelo estructural con ayuda del programa ETABS 17, en él se ingresó información geométrica, combinaciones de carga, valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía según la zona de amenaza sísmica,

información de perfil de suelo y corrección por cortante sísmico. Una vez montado el modelo se realizó el Check List del programa empleado, donde se verificó que no hubiera superposición de elementos, o que en los nodos o elementos tipo Frame no se duplique la masa. Se revisó además los tipos de apoyos y diafragmas empleados al sistema. Luego de esto se hizo aprobación de resultados del análisis estructural (periodos y derivas).

Actividades:

- Modelado estructural en ETABS 17.
  - Definición de coeficiente de capacidad de disipación de energía, ajuste a cortante y coeficientes de espectro sísmico según lo indicado en el título A de NSR-10.
  - Revisión de modelado con ayuda de la opción Check List del programa de diseño.
  - Aprobación de periodos y derivas en el modelo según requisitos del título A de NSR-10.
  - Revisión bibliográfica continua.
- Etapa cuatro: Es la etapa de diseño y parte de los resultados arrojados por el modelo de ETABS aprobado. En esta etapa se diseñaron las cimentaciones considerando las características propias del suelo y las reacciones en base calculadas en el modelo ETABS. Se diseñó los elementos tipo columna bajo requisitos del título C de la NSR-10, según necesidad de DMO o DES, considerando la ubicación del proyecto y basado en los resultados de cuantía mínima obtenidos del modelo de ETABS que considera criterios de la ACI 318. Luego se hizo revisión del diseño de losas según la deflexión máxima permitida bajo criterios del título C de la NSR-10 con ayuda de la elaboración de líneas de carga en el programa ETABS, las cuales permiten representar las cargas aplicadas a la losa y así hallar el acero tipo Malla o barras requerido para cada luz de la losa. Se continuó con el diseño de elementos tipo vigas a partir de los resultados de diseño de ETABS bajo requisitos para DMO y DES descritos en el título C de la NSR-10 en cuanto a cuantía mínima, número de barras de refuerzo mínimo, longitudes de traslapo, longitudes de desarrollo, longitud de ganchos, espaciamiento de estribos máximo y mínimo, entre otros. Conocido el refuerzo necesario se exporta la información de diseño de vigas y nervios y fuerzas actuantes en vigas de ETABS a un programa de despiece llamado E+REF, el cual analiza la información ingresada e imprime

despiece de vigas para exportar a planos de AutoCAD, este programa procesa la información teniendo en cuenta los requisitos de diseño de la NSR-10. Luego se continuó con revisión del diseño de tanques, elementos no estructurales (ENE), escaleras, rampas, porterías, piscinas, muros de contención, y cerramientos. Se elaboraron las memorias de cálculo correspondientes para el diseño de cada elemento estructural con ayuda de Excel, utilizando las fórmulas matemáticas y consideraciones que exige la AIS (2010). Finalmente, cuando se tuvo diseño definitivo de elementos estructurales se calcularon los tenores para concreto y acero a modo de información adicional para el cliente constructor, luego se procedió a impresión de planos (incluyendo planos guía y listado de planos con sus actualizaciones), certificado de obra y finalmente se archivó el proyecto.

Actividades:

- Diseño de cimentaciones bajo criterios del título C y título H de NSR-10.
- Diseño de columnas bajo criterios del título C de la NSR-10.
- Diseño de vigas y nervios bajo criterios del título C de la NSR-10.
- Diseño de placas bajo criterios del título C de la NSR-10.
- Diseño de elementos no estructurales (ENE) bajo criterios del título A de la NSR-10.
- Elaboración de memorias de cálculo bajo los diferentes criterios de diseño.
- Cálculo de tenores.
- Impresión y entrega de diseños.
- Revisión bibliográfica continua.

Etapa cinco: Es la etapa final y correspondió a la revisión y análisis de los resultados, en esta etapa se identificó finalmente si se alcanzan los resultados esperados y objetivos trazados, con esta información se redactó el informe final.

A continuación, se presenta de forma resumida y esquemática en un diagrama de flujo la metodología empleada:

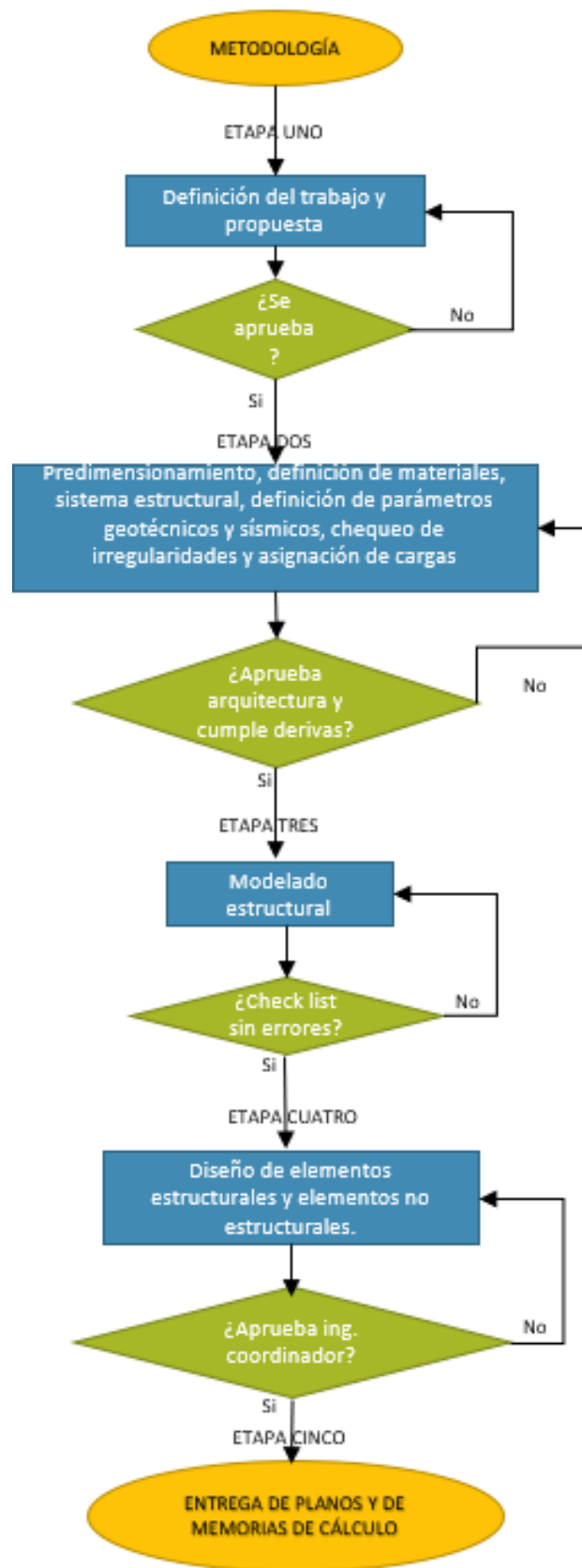


Figura 12. Diagrama de flujo de metodología.

## 5. Resultados y análisis

Para la presentación de resultados se tomó como estudios de caso dos proyectos que se diseñaron bajo criterios de capacidad de disipación de energía moderada (DMO) y en los cuales se brindó apoyo en cada una de las etapas planteadas en la metodología.

### – **Casas de Barú:**

(Se reserva el nombre de este proyecto por confidencialidad de la empresa).

Este proyecto fue desarrollado para la isla de Barú, Cartagena, donde se elaboraron diseños para casas entre uno y dos pisos en sistemas apertados resistentes a momentos en concreto reforzado con lozas macizas unidireccionales. Aunque cada casa representa una geometría diferente, fue posible comparar los resultados por sus coeficientes espectrales similares. Al estar ubicados en la misma localización se tuvieron los mismos parámetros de entrada sísmicos y capacidad portante del suelo. Las casas en las que se realizó apoyo dentro de este proyecto corresponden a los lotes 3, 4, 36 y 66.

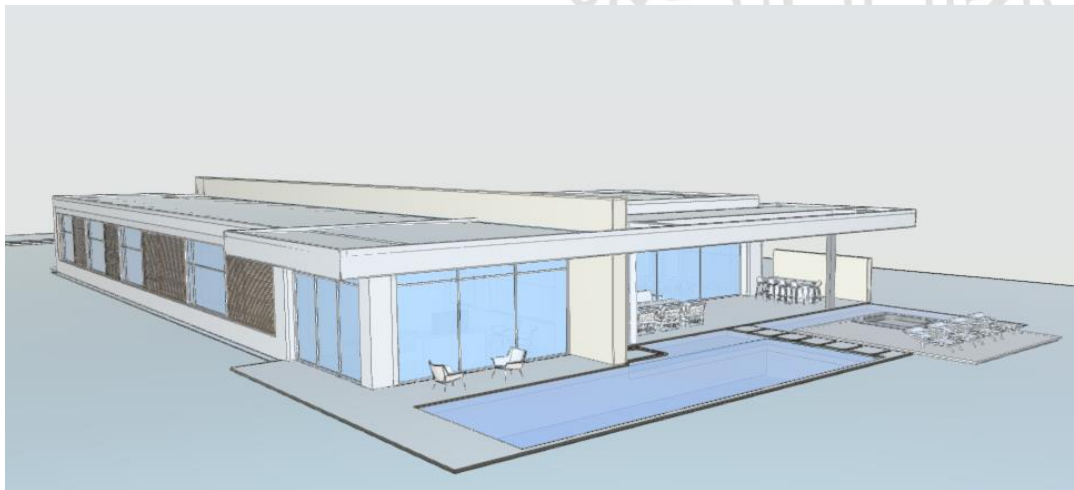
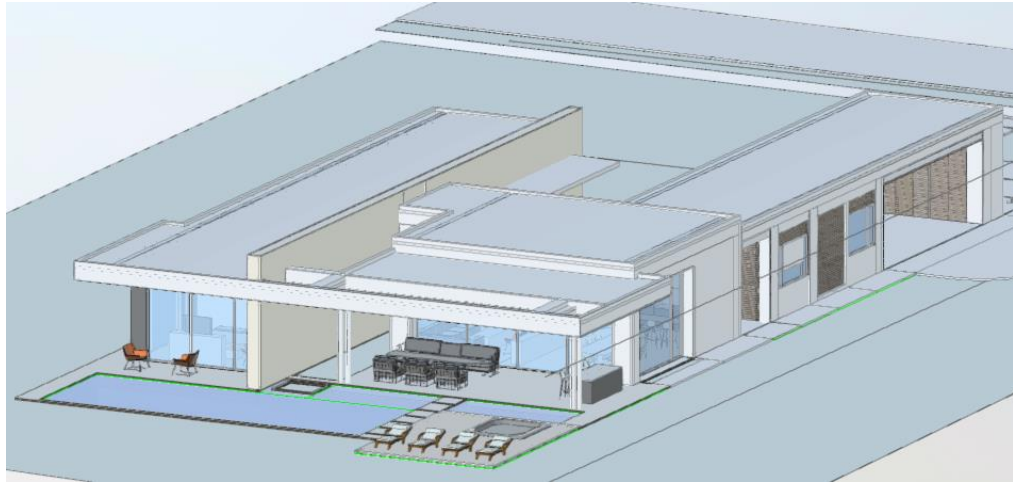


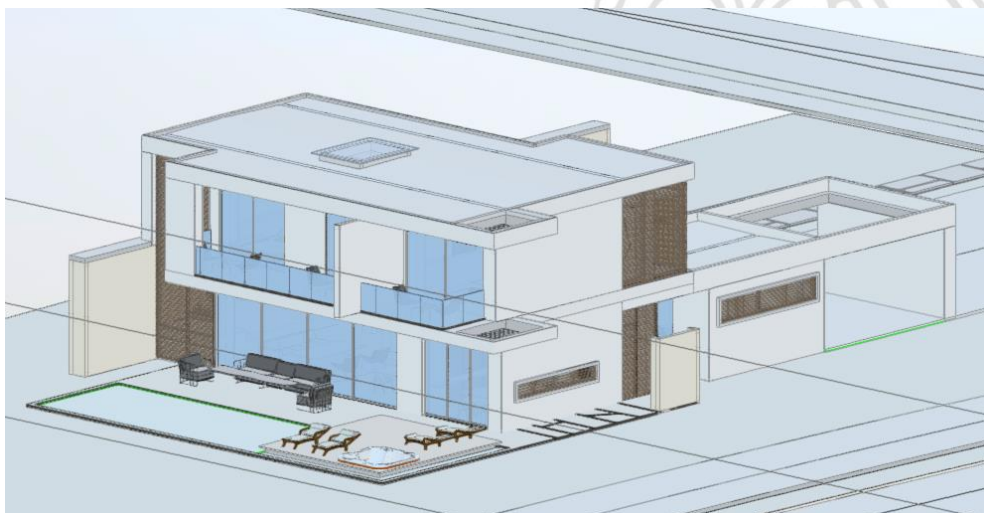
Figura 13. Vista arquitectónica Casa Lote 3.



**Figura 14. Vista arquitectónica Casa Lote 4.**



**Figura 15. Vista arquitectónica Casa Lote 36.**



**Figura 16. Vista arquitectónica Casa Lote 66.**

Para el diseño de las casas se obtuvo como parámetros de entrada en común:

Zona de Amenaza sísmica baja (Barú – Cartagena, Bolívar).

Perfil de suelo: C

Grupo de uso: I = 1.0

$A_a = 0.10$

$A_v = 0.10$

$F_a = 1.20$

$F_v = 1.70$

Capacidad portante del suelo = 28 Ton/m<sup>2</sup>

Conocidos los parámetros sísmicos de entrada y la geometría de cada una de las casas se obtuvieron los siguientes datos de la estructura:

**Tabla 2** Resultados estructuras de Casas de Barú.

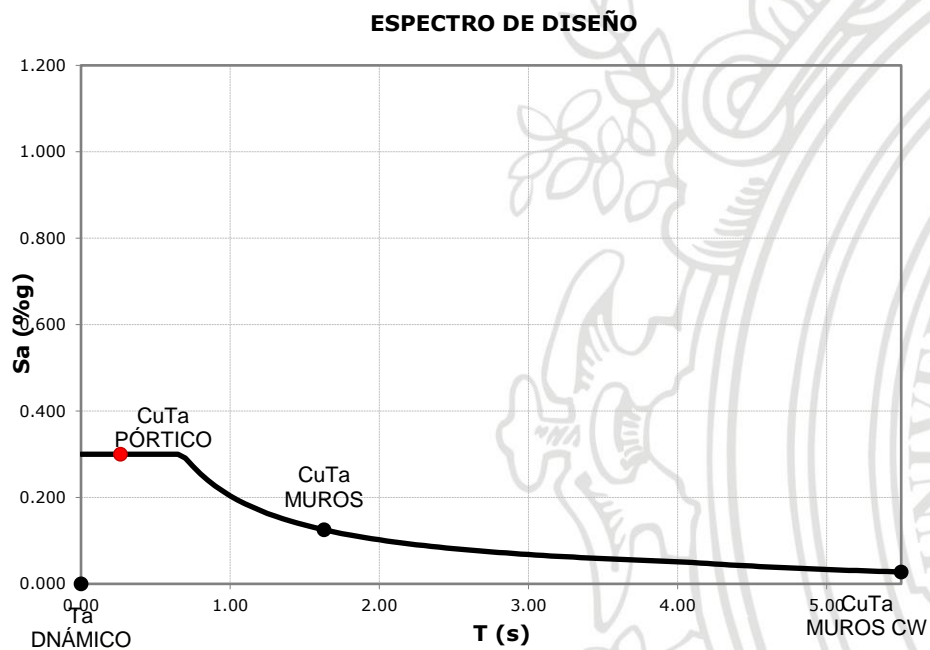
DATOS DE LA ESTRUCTURA	Lote 3	Lote 4	Lote 36	Lote 66
<b>Masa (tf)</b>	1080.77	785.32	574.94	231.45
<b>hn (m)</b>	4.20	4.20	7.50	7.27
<b>N</b>	1.00	1.00	2.00	2.00
<b>Ro</b>	2.50	2.50	2.50	2.50
<b>ØP</b>	0.80	0.80	1.00	1.00
<b>ØA</b>	1.00	1.00	0.90	1.00
<b>ØR</b>	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>R</b>	2.00	2.00	2.25	2.50
<b>Cu</b>	1.55	1.55	1.55	1.55
<b>Ct</b>	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>a</b>	0.90	0.90	0.90	0.90
<b>Ta (s)</b>	0.17	0.17	0.29	0.28
<b>Cu x Ta (s)</b>	0.26	0.26	0.45	0.43
<b>Sa [CuTa]</b>	0.30	0.30	0.30	0.30

En la Tabla 2 se observa de forma agrupada los datos de entrada correspondientes a masa total estimada de la edificación, altura total y número de pisos. Adicional a esto se observa que el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía básico  $R_o$  se consideró de 2.5 correspondiente a DMI por la ubicación en zona de amenaza sísmica baja. Se observa además irregularidad en planta tipo 1B según la figura 8 para Lote 3 y Lote 4 e irregularidad



en altura tipo 3A según figura 9 para la casa del lote 36, por lo cual aplicando la ecuación 4 se obtienen resultados del coeficiente de capacidad de disipación de energía para diseño correspondientes a 2.00, 2.25 y 2.5 según el caso.

Luego al evaluar el periodo  $CuTa$  por medio de las ecuaciones 1 y 2 se obtiene para todas las casas un coeficiente de espectro de diseño  $Sa$  igual a 0.3. En la figura 17, se muestra el coeficiente de espectro de diseño  $Sa=0.3$  para pórticos resistentes a momento.



**Figura 17. Espectro de diseño Casas de Barú.**

Conocido el valor de  $Sa$  se calculó los cortantes sísmicos  $Vs$  para cada casa según ecuación 14, considerando factor de ajuste según irregularidad.

**Tabla 3** Resultado de cortantes sísmicos Casas de Barú.

IRREGULARES	Lote 3	Lote 4	Lote 36	REGULARES	Lote 66
CuTa (Selec) (s)	0.26	0.26	0.45	CuTa (Selec) (s)	0.43
Sa [CuTa] (%g)	0.30	0.30	0.30	Sa [CuTa] (%g)	0.30
Vs [CuTa] (kN)	3180.72	2311.18	1692.04	Vs [CuTa] (kN)	1199
0.9 Vs [CuTa] (kN)	2862.64	2080.07	1522.84	0.8 Vs [CuTa] (kN)	959.08

En la tabla 3 se observa que, aunque se tuvo el mismo valor Sa para el cálculo sísmico de cada casa, el cortante sísmico Vs varía considerablemente en cada caso debido a la geometría y masa diferente que tiene cada estructura. Adicional a esto se realizó ajuste a 0,9 del cortante sísmico para tres de las casas que presentaron algún caso de irregularidad y 0,8 para la casa del lote 66 que no presentó irregularidad.

Para la evaluación de cargas se consideró cargas vivas para ocupación residencial y cargas de acabados variables considerando la implementación de materiales como mármol, madera y vidrio para pisos y fachadas:

Carga viva = 1.80 kN/m<sup>2</sup>

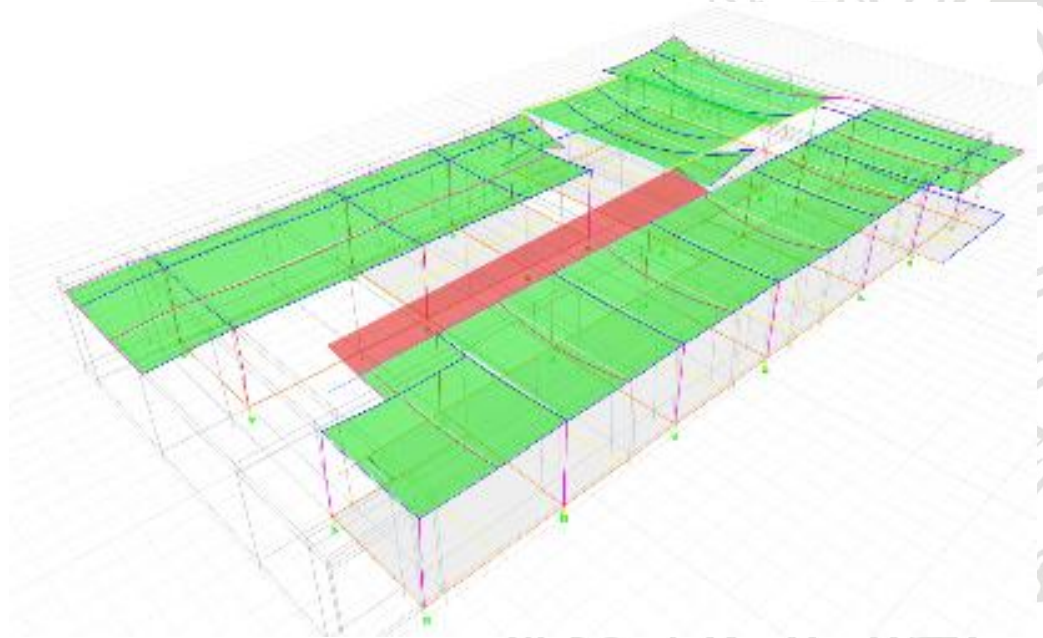
Acabados piso 1 = 1.60 kN/m<sup>2</sup>.

Acabados cubierta = 2.35 kN/m<sup>2</sup>.

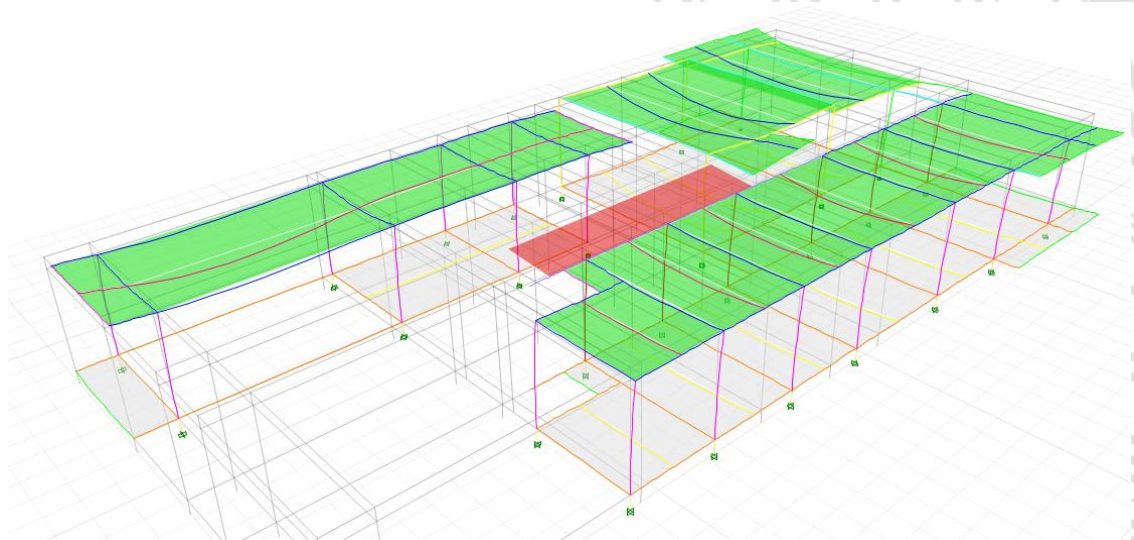
Por lo que se consideró refuerzo en las losas de concreto con mallas de hasta D257 para las luces más largas, considerando la resistencia a momentos a las cargas definidas.

Aunque el proyecto se encuentra ubicado en zona de amenaza sísmica baja, se diseñó los elementos estructurales bajo criterios DMO para mayor seguridad, bajo combinaciones de carga U01, U02, U03, U04 y U05. Según los resultados obtenidos por los modelos de diseño, se contempló para la mayoría de las vigas, barras longitudinales entre ½" y 1" con estribos en zonas confinadas y desconfinadas de 3/8". Para el diseño de nervios y viguetas se consideró solo a combinación U01, ya que estos elementos no hacen parte del sistema de resistencia sísmica y se aplican estribos para refuerzo a cortante sólo donde se requiere necesario según los resultados encontrados en ETABS V.17, programa que se utilizó

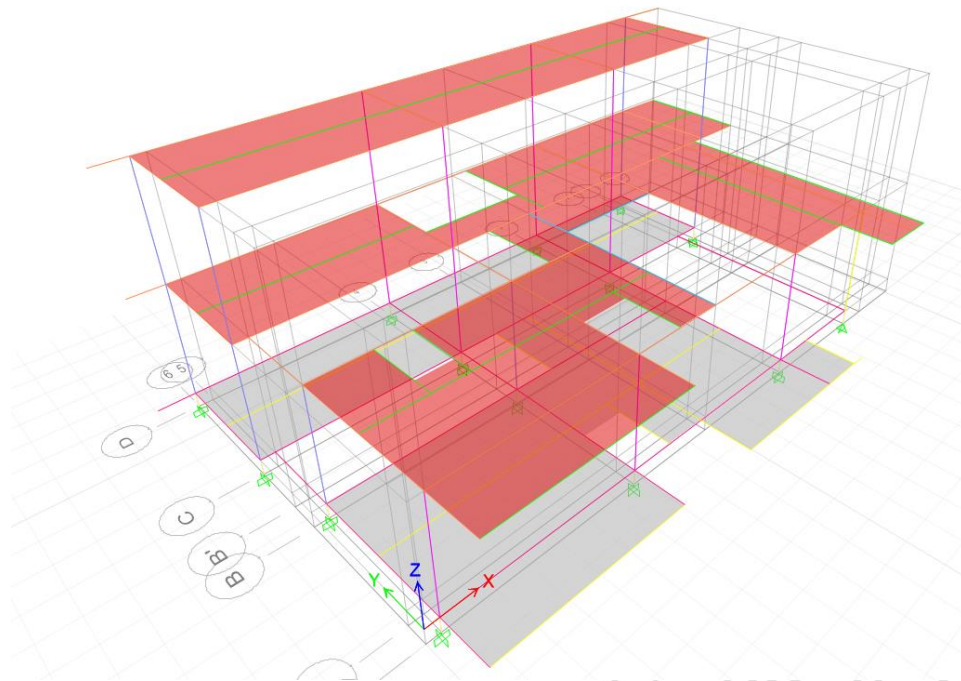
para el modelado estructural de cada una de las casas, tal y como se observa en las figuras 18 a 21.



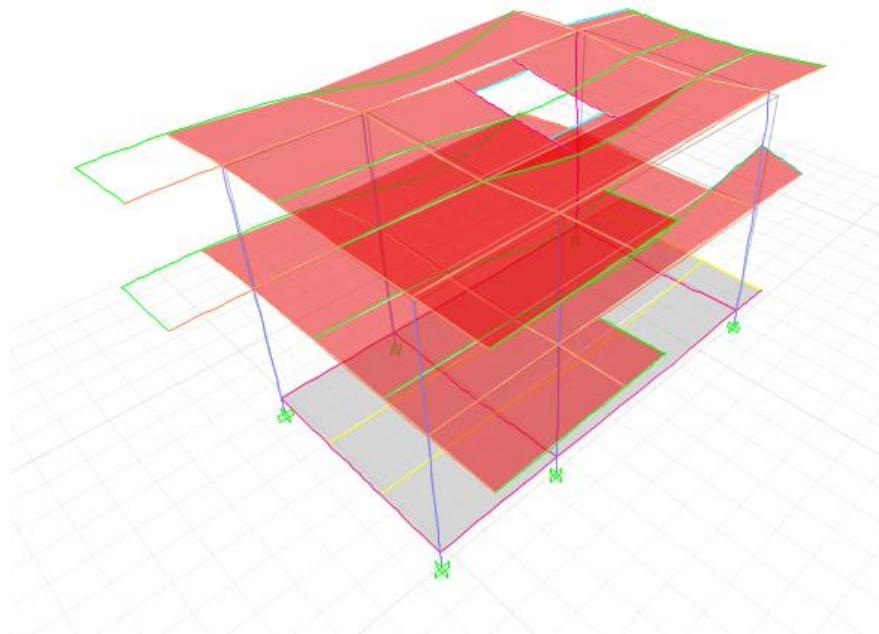
**Figura 18. Modelo estructural Casas de Barú Lote 3.**



**Figura 19. Modelo estructural Casas de Barú Lote 4.**



**Figura 20. Modelo estructural Casas de Barú Lote 36.**



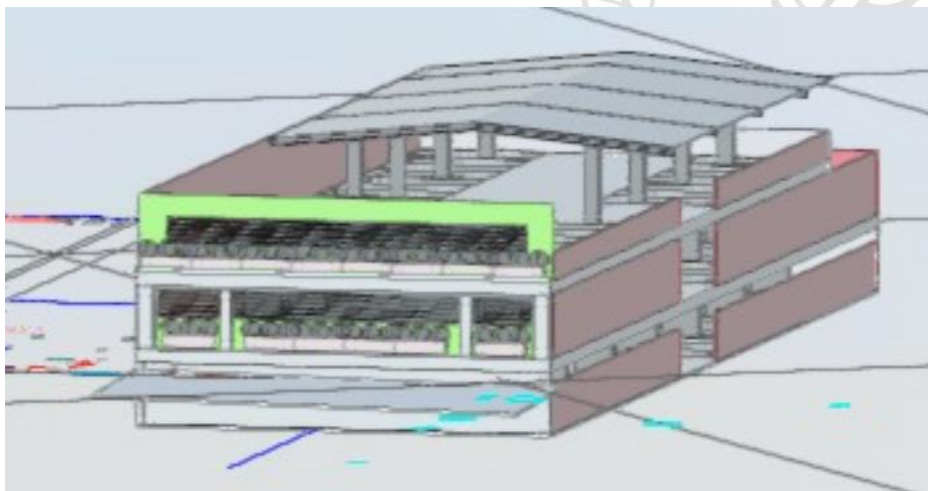
**Figura 21. Modelo estructural Casas de Barú Lote 66.**

Para el diseño de columnas se cumplió con requisitos de diseño DMO bajo combinaciones de carga U01, U02, U03, U04 y U05. Para

las columnas se verificó que la cuantía requerida nunca fuera superior al 4% con combinaciones de barras desde ½" a 1" con estribos en zona confinada y no confinada de 3/8".

– **Jazz comercio - Parqueaderos:**

Este proyecto fue desarrollado en la ciudad de Medellín, Antioquia y consta de una edificación de tres niveles con sistema porticado resistente a momentos en concreto reforzado con lozas macizas unidireccionales y cubierta metálica en el último nivel, destinada para parqueaderos en zona comercial



**Figura 22. Vista arquitectónica Jazz Comercio - parqueaderos**

Para el diseño de esta estructura se partió de los siguientes datos:

Zona de Amenaza sísmica intermedia (Medellín, Antioquia).

Perfil de suelo: C

Grupo de uso: I = 1.0

$A_a = 0.15$

$A_v = 0.20$

$F_a = 1.50$

$F_v = 2.00$

Capacidad portante del suelo =  $45 \text{ Ton/m}^2$

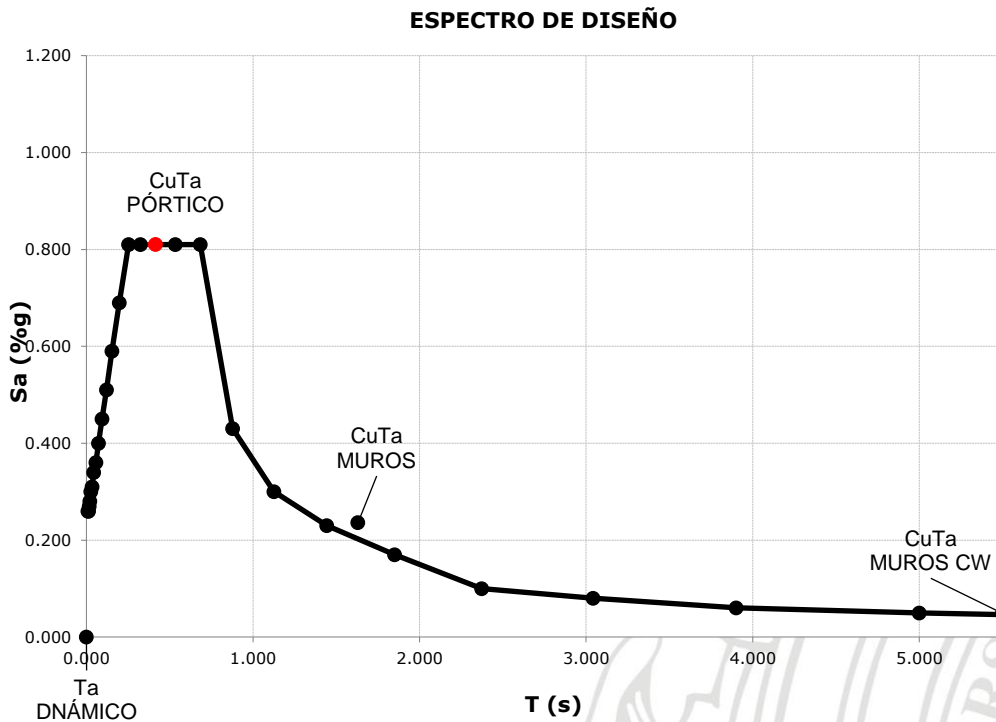
Conocidos los parámetros sísmicos de entrada y la geometría de la estructura se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 4** Resultados Jazz Comercio - parqueaderos.

DATOS DE LA ESTRUCTURA	JAZZ PARQUEADERO
Masa (tf)	1343.40
hn (m)	8.90
N	3.00
Ro	5.00
ØP	0.80
ØA	1.00
ØR	0.75
R	3.00
Cu	1.37
Ct	0.05
a	0.90
Ta (s)	0.34
Cu x Ta (s)	0.46
Sa [CuTa]	0.81

En la Tabla 4 se observa que el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía básico  $R_o$  se consideró de 5.0 correspondiente a DMO por la ubicación en zona de amenaza sísmica intermedia, además se evidencia presencia de irregularidad en planta tipo 2P según la figura 8 e irregularidad por ausencia de redundancia, por lo cual aplicando la ecuación 4 se obtienen resultados del coeficiente de capacidad de disipación de energía para diseño correspondiente a 3.00.

Luego al evaluar el periodo  $C_u$  por medio de las ecuaciones 1 y 2 se obtiene un coeficiente de espectro de diseño  $S_a$  igual a 0.81s. En la figura 23, se muestra el coeficiente de espectro de diseño  $S_a=0.81$  para pórticos resistentes a momento, dicha grafica se basa en resultados tomados en sitio por el estudio de suelos.



**Figura 23. Espectro de diseño Jazz Comercio - Parqueaderos.**

Conocido el valor de  $S_a$  se calculó los cortantes sísmicos  $V_s$  según ecuación 14 considerando factor de ajuste según irregularidad.

**Tabla 5** Resultado de Cortantes sísmicos Jazz Comercio - parqueaderos.

IRREGULAR	JAZZ PARQUEADERO
CuTa (Selec) (s)	0.46
$S_a$ [CuTa] (%g)	0.81
$V_s$ [CuTa] (kN)	10674.75
0.9 $V_s$ [CuTa] (kN)	9607.28

En la tabla 5 se observa que se realizó ajuste a 0,9 del cortante sísmico por presencia de irregularidad.

Para la evaluación de cargas se consideró cargas vivas para uso de parqueadero y cargas de acabados variables:

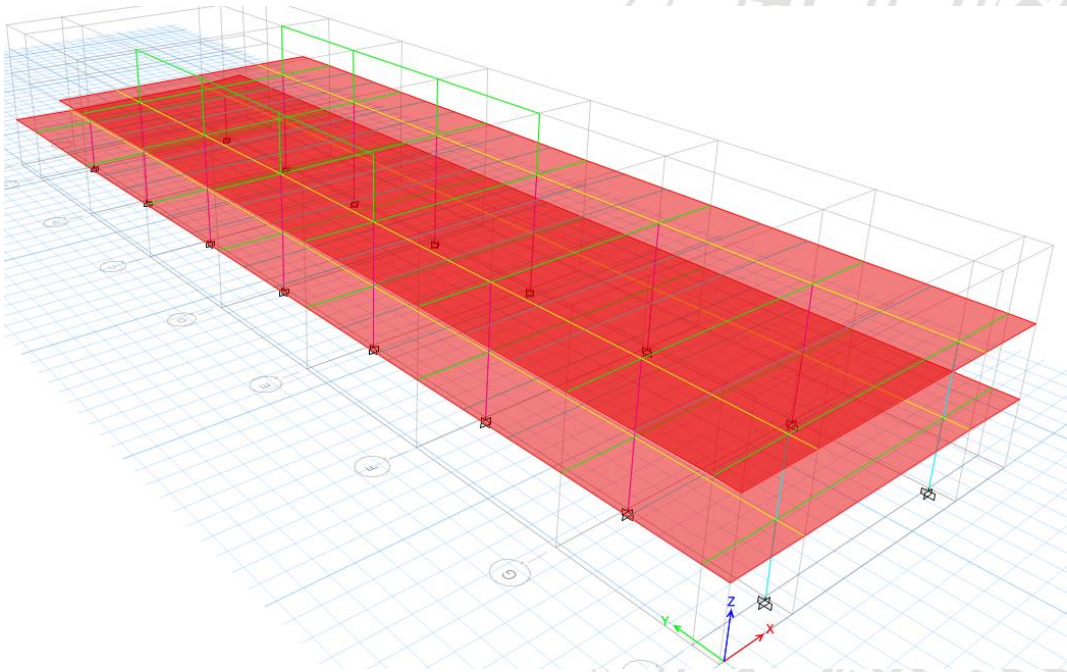
Carga viva = 2.50 kN/m<sup>2</sup>

Acabados piso 1 = 0.65 kN/m<sup>2</sup>.

Acabados piso 2 = 2.05 kN/m<sup>2</sup>.

Por lo que se consideró refuerzo en las losas de concreto con mallas de hasta D257 para las luces más largas, considerando la resistencia a momentos a las cargas definidas.

El proyecto se encuentra ubicado en zona de amenaza sísmica intermedia, por lo que se diseñó bajo criterios DMO con combinaciones de carga U01, U02, U03, U04 y U05. Según los resultados obtenidos por los modelos de diseño, se contempló para la mayoría de las vigas, barras longitudinales entre ½" y 1" con estribos en zonas confinadas y no confinadas de 3/8". Para el diseño de nervios y viguetas se consideró solo a combinación U01 por no hacer parte del sistema de resistencia sísmica y aplicando estribos sólo donde se requiere necesario según los resultados encontrados en ETABS V.17, programa en el cual se realizó el modelado estructural como se observa en la figura 24.



**Figura 24. Modelo estructural Jazz Comercio - Parquederos.**

Para el diseño de columnas se cumplió con requisitos de diseño DMO bajo combinaciones de carga U01, U02, U03, U04 y U05. Para las columnas se verificó que la cuantía requerida nunca fuera superior al 4% con combinaciones de barras desde ½" a 1" con estribos en zona confinada y no confinada de 3/8".



## 6. Conclusiones

- Al caracterizar las metodologías de diseño estructural para cada uno de los proyectos no se encontraron limitantes, considerando que los casos de irregularidad presentes y la geometría propia de cada edificación cumplía con los requisitos mínimos necesarios según la NSR-10 para la aplicación de Fuerza horizontal equivalente (FHE) y Análisis dinámico elástico (ADE).
- Aunque para las casas de Barú se contaba con el mismo coeficiente de espectro sísmico  $S_a$ , el valor de cortante sísmico calculado fue variable para cada caso, encontrando los valores de cortante sísmico más altos en las casas con mayor masa. Así mismo, para las estructuras irregulares de las casas de Barú, se evidenció un cortante sísmico ajustado mayor en comparación a la estructura regular.
- En las figuras 18 a 21 se puede apreciar el comportamiento de deflexiones según el modelo, que sufre cada una de las casas bajo los parámetros sísmicos y cargas establecidas. En estas imágenes se observa que para las luces más largas es mayor la deformación y esto se traduce a momentos mayores que definen el refuerzo longitudinal a utilizar.
- Los espectros de diseño mostrados en las gráficas de las figuras 17 y 23 muestran que el valor del coeficiente  $S_a$  se ubica en la meseta superior de la gráfica, esto quiere decir que el valor del periodo  $C_u T_a$  calculado se encuentra dentro de los límites establecidos por el capítulo A de NSR-10 para sistema estructural de pórtico resistente a momentos.
- Los diseños estructurales que más refuerzo solicitaron se presentaron en las estructuras con mayor altura y masa, ya que esto solicita un mayor periodo y cortante sísmico basal respectivamente.
- El diseño bajo desempeño DMI es realista en términos de disipación de energía para zonas de amenaza sísmica baja en edificaciones simples de poca altura, pero los requisitos de refuerzo mínimo para este caso son muy básicos para elementos estructurales, ya que la norma NSR-10 presenta poca información al respecto. Por lo tanto, se recomendó emplear criterios de diseño bajo DMO ya que permite que las estructuras tengan muy buena ductilidad, tanto para zonas de amenaza sísmica Intermedia como baja, además los criterios de refuerzo mínimo longitudinal y transversal para cada elemento están por encima de lo

requerido, lo que brinda mayor seguridad a las personas que ocuparan la edificación.

## 7. Referencias bibliográficas

- AIS, A. colombiana de ingeniería sísmica-. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. In Scielo.
- ASTM D2166 / D2166M - 16 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. (n.d.). Retrieved June 12, 2021, from <https://www.astm.org/Standards/D2166.htm>
- ASTM D4318 - 17e1 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. (n.d.). Retrieved June 12, 2021, from <https://www.astm.org/Standards/D4318.htm>
- Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios* (2nd ed.). Fondo editorial Universidad EAFIT.  
<https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=syWjDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=analisis+y+dise%C3%B1o+sismico+de+edificios&ots=F7ORpCyN7L&sig=isdccatABG4a3lBr6UvWlmcCbSw>
- Benjumea Royero, J. M., Sotelo Monroy, F. S., Celis Melo, C. E., & Chio Cho, G. (2017). Efecto del grado de capacidad de disipación de energía sísmica seleccionado en las cantidades de obra de muros de concreto reforzado. *Revista Tecnura*, 20(50), 15.  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a01>
- García, L. E. (1998). *DINÁMICA ESTRUCTURAL APLICADA AL DISEÑO SISMICO* (Universidad de Los Andes, Ed.; 2nd ed.).
- Gonzalez Oscar, & Robles Francisco. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado* (Limusa S.A., Ed.; 4th ed.).
- ICONTEC. (2001). *NORMA TECNICO COLOMBIANA NTC 161: BARRAS (Y ROLLOS) LISOS Y CORRUGADOS DE ACERO AL CARBONO* (NTC-161; Issue 571, p. 20).
- ICONTEC. (2003). *NORMA TECNICO COLOMBIANA NTC 1925: MALLAS ELECTROSOLDADAS DE ACERO, FABRICADAS CON ALAMBRE LISO, PARA REFUERZO DE CONCRETO*. ICONTEC.
- ICONTEC. (2007). *NORMA TECNICO COLOMBIANA NTC 2289: BARRAS CORRUGADAS Y LISAS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN, PARA REFUERZO DE CONCRETO*. In *Icontec* (Issue 571, pp. 1–22).
- McCormac, J. C., & Russell, B. (2011). *Diseño de Concreto Reforzado* (8th ed.). Alfa Omega grupo editor, S.A.
- Nilson, A. (2001). *Diseño de estructuras de concreto* (McGraw-Hill, Ed.; 12th ed.). Quebecor World .
- Segura franco, J. ignacio. (2011). *ESTRUCTURAS DE CONCRETO I* (7th ed.). Editorial Universidad Nacional de Colombia.  
[http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombi\\_a\\_hacia\\_la\\_COP21/ABC\\_de\\_los\\_Compromisos\\_de\\_Colombia\\_para\\_la\\_COP21\\_VF.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/colombi_a_hacia_la_COP21/ABC_de_los_Compromisos_de_Colombia_para_la_COP21_VF.pdf)

Selig, E., Schmertmann, J., Smith, T., & Ho, R. (1978). Example of an Energy Calibration Report on a Standard Penetration Test (ASTM Standard D 1586–67) Drill Rig. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 57.

<https://doi.org/10.1520/GTJ10369J>

SIMESA. (1999). *GUIA PARA INENIEROS CALCULISTAS, CONSTRUCTORES E INTERVENTORES DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO*. SIMESA Siderurgica de Medellin.

