



REVISTA INGENIO

Influencia en el diseño estructural del acero de refuerzo grado 80 y hormigón de alta resistencia (55 MPa) frente al acero de refuerzo convencional grado 60 y hormigón $f'c$ 28MPa en un edificio de hormigón armado de 18 pisos

Influence on structural design of grade 80 reinforcing steel and high strength concrete (55 M Pa) versus conventional grade 60 reinforcing steel and $f'c$ 28M Pa concrete in an 18-story reinforced concrete building

Sofía Pineda | Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Sebastián Villafuerte | Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

María Belén Correa | Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Alejandro Machado | Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Luis Hernández | Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

ARTICLE HISTORY

Received: 09/11/2022

Accepted: 06/01/2023

PALABRAS CLAVE

Hormigón armado, alta resistencia, sistema dual, propiedades mecánicas.

KEYWORDS

Reinforced concrete, high resistance, dual system, mechanical properties.

RESUMEN

La implementación de materiales con mayores resistencias en el medio constructivo ofrece importantes ventajas a nivel estructural y económico en obras civiles de gran magnitud. Este artículo pretende estudiar la influencia del concreto ($f'c$ 55 MPa) y refuerzo de alta resistencia (grado 80), frente al hormigón $f'c$ 28 MPa y varillas grado 60, en edificios de mediana altura con sistema dual. Ambas propuestas de diseño se localizan en el centro norte de Quito. Estas son comprendidas por 18 pisos de elevación y 4 subsuelos, destinados a departamentos habitacionales y locales comerciales. La Norma Ecuatoriana de la Construcción sustentada en el ACI, establece las bases fundamentales y parámetros para su diseño, partiendo de su predimensionamiento, seguido de la modelación, análisis estructural y finalizando con su diseño hasta la definición de planos estructurales. Haciendo uso de software de modelación estructural, se aplican tres importantes análisis a estas edificaciones: lineal estático, dinámico y pushover; verificando así su comportamiento frente a las cargas verticales y laterales a las que se ven sometidas y la resistencia de sus diferentes elementos. Una vez detallados los planos estructurales, se procede a la cuantificación del volumen del concreto y peso de las varillas de refuerzo con su debido análisis de precios unitarios para establecer los presupuestos de cada propuesta. Finalmente, todos los resultados son recopilados y analizados, tanto a nivel estructural como económico, con el fin de evaluar la influencia de los materiales de alta resistencia respecto a los convencionales, definiendo los pros y contras de ambas propuestas de diseño.

ABSTRACT

The implementation of materials with higher resistance in the construction industry offers important advantages, not only in the behavior of the infrastructure but in the economy of large civil works as well. This project pretends to study the influence of concrete ($f'c$ 55 MPa) and reinforced steel (Grade 80) of high resistance in contrast with the commonly used, concrete ($f'c$ 28 MPa) and reinforced steel (Grade 60), in buildings of reinforced concrete and medium size, formed by a dual system. The developed edifications under both proposals are in the north center of Quito city. They have 18 elevated floors and 4 underground-floors, that are destined for residential apartments and businesses. The Ecuadorian regulations of Construction based on the ACI, establish the fundamental basis and parameters for the design of the elements that conform to the infrastructure, starting from the pre-sizing, followed by the modelling, structural analysis, and finalizing with the design with the defined structural plans. Using structural modeling software, there are applied three important analyses to these edifications: linear static, linear dynamic, and non-linear static (pushover); which allows verifying its behavior under the gravitational and lateral loads to which they are subjected and the resistance of their different elements. Once the structural plans are detailed, it is proceeded to quantify the concrete and the reinforced steel with its respective analysis of unitary prices, allowing the establishment of budgets for each proposal. Finally, all the results are retrieved and analyzed, both structurally and economically, with the purpose of evaluating the influence of the materials of high resistance in contrast with the conventional, defining the pros and cons of both design proposals.

I. INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo se han implementado hormigones de alta resistencia en la construcción de edificaciones de mediana y gran altura, especialmente en zonas sísmicas. Esto debido a que su rendimiento ante altas compresiones permite una reducción notable de los elementos verticales, lo cual conlleva una superficie útil mayor en el edificio, cuantificaciones menores, por ende, menores pesos propios [1].

Por otro lado, la especificación ASTM A706 para acero de refuerzo cubría únicamente varillas de grado 60, pero a partir de 2009, debido a la necesidad de elevar la resistencia a fluencia en áreas sísmicamente activas, se incluyó requisitos para varillas designadas como grado 80, ayudando a reducir el congestionamiento del refuerzo y mejorar la capacidad de construcción, especialmente en estructuras sismorresistentes [2].

La implementación de materiales como el acero de refuerzo y el hormigón de alta resistencia, en la construcción de edificios de concreto armado diseñados bajo un sistema dual, podría representar un mejor desempeño estructural ante estados de carga gravitacionales y laterales, ofreciendo a la estructura mayor ductilidad y optimizando sus secciones.

En virtud de lo mencionado, el trabajo a desarrollar busca una alternativa en la implementación de materiales, como el hormigón y el acero de refuerzo de alta resistencia en un mismo edificio, en sustitución a los convencionales, brindando beneficios a la estructura, además de cumplir con las necesidades y solicitudes para su buen desempeño, teniendo como antecedentes los análisis desarrollados para ambos materiales, hormigón por [3] y [4].

1.1. DESARROLLO

1.1.1. Clasificación del hormigón y el acero de refuerzo

Una de las propiedades mecánicas del hormigón es la resistencia a la compresión, a partir del cual se lo clasifica en hormigón de alta resistencia, con un valor $f'c$ mayor a 50 MPa y hormigón convencional, $f'c$ de 10 a 50 MPa. Existe también hormigones de ultra alta resistencia que pueden llegar a compresiones superiores a los 100 MPa.

En la figura 1 podemos observar que a medida que aumenta la resistencia a compresión del hormigón, su deformación al alcanzar el $f'c$ va disminuyendo respecto a 0,003, para hormigones convencionales (ver Figura 1).

Asimismo, el acero de refuerzo se clasifica de acuerdo con su composición química, a mayor porcentaje de carbono, mayor esfuerzo de fluencia, con lo cual se define el acero grado 80 con f_y de 550 MPa y el acero grado

60 con f_y de 420 MPa.

En la figura 2 se puede apreciar que, a mayor grado, aunque el acero aumenta su esfuerzo de fluencia, tiende a disminuir su comportamiento plástico (ver Figura 2).

1.1.2. Análisis estructural para un sistema dual

Para que un sistema estructural se considere dual, se requiere que los muros absorban al menos el 75 % del corte basal en cada dirección [6].

Dada la obligatoriedad del diseño basado en fuerzas (DBF) de acuerdo con la NEC SE DS se aplican los análisis: estático lineal, dinámico lineal [6] y pushover.

El análisis estático lineal ignora fuerzas inerciales y de amortiguamiento y considera que las cargas obedecen a la ley de Hooke. Este análisis parte del espectro de diseño en aceleraciones.

El análisis dinámico lineal o espectral, a diferencia del estático, únicamente considera la linealidad. Este puede ser desarrollado tanto por el espectro de respuesta elástico de aceleraciones o construir el espectro a partir de las curvas de peligro. En estructuras irregulares, el cortante basal dinámico debe ser mayor al 85% del cortante basal estático. Además, su masa modal acumulada debe comprender al menos el 90% de la masa total de la estructura [6].

El pushover tiene como fin establecer el daño real del edificio, el cual se determina por medio del punto de desempeño. Este representa la respuesta máxima del edificio ante la acción sísmica a la que está sometida la estructura. En la figura 3, se puede observar la obtención del punto de desempeño, representado como la intersección del espectro de capacidad y el espectro de demanda.

El espectro de capacidad se determina a partir de la curva de capacidad por medio de su linealización equivalente. Esta curva está en función de la fuerza y el desplazamiento, cuando esta pierde su linealidad entra al rango plástico, es decir, que los elementos han fluido, generando rótulas plásticas, con lo cual se disminuye la rigidez en la estructura. El espectro de demanda resulta de la reducción del espectro de aceleración de respuesta (ver Figura 3).

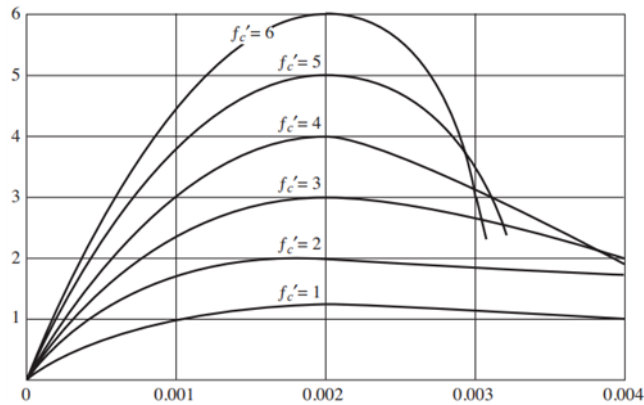
Es así que, mediante las rótulas plásticas generadas en el punto de desempeño, se evalúa la integridad física de la estructura [7].

1.1.3. Influencia de las propiedades del material en el pre-dimensionamiento de elementos estructurales

Al mejorar las propiedades de los materiales, se esperaría que la estructura requiera menores secciones en el proceso de prediseño, sin embargo, se ha observado que no es así en todos los casos, por lo que se especifica el

Figura 1

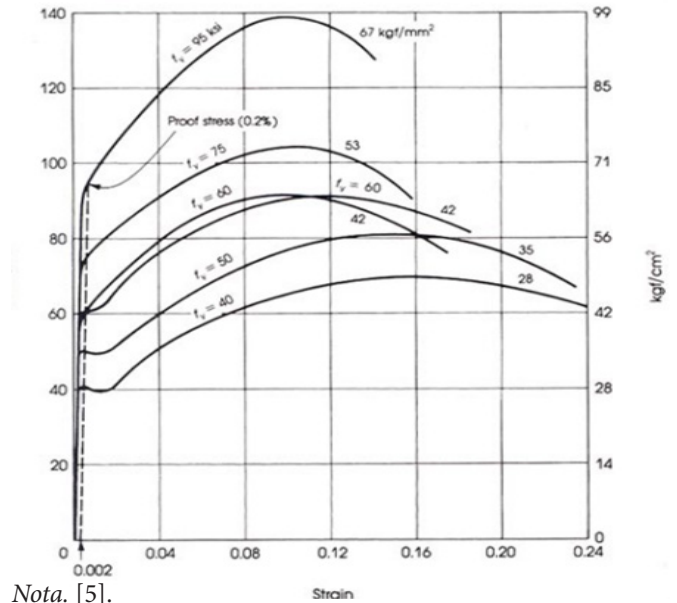
Curva esfuerzo-deformación para hormigones de diferentes resistencias



Nota. [5].

Figura 2

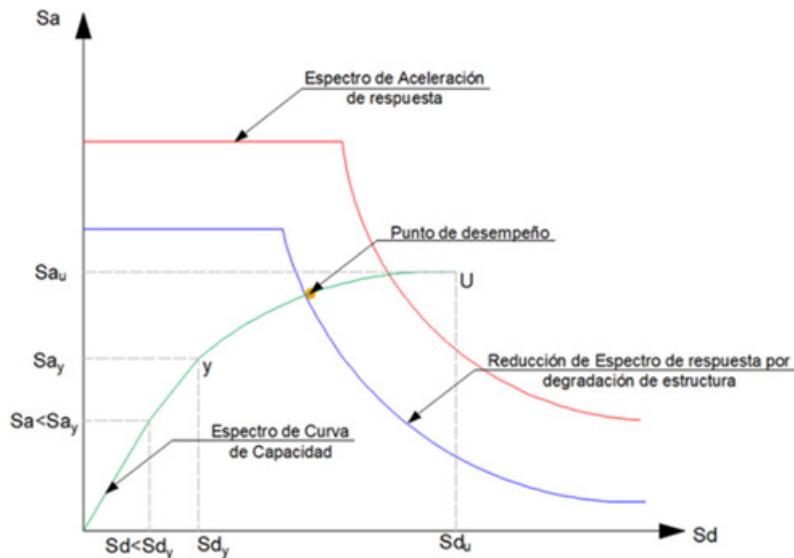
Curva esfuerzo-deformación para aceros de diferentes grados



Nota. [5].

Figura 3

Representación del punto de desempeño



Nota. [5].

siguiente:

La altura mínima de una viga corresponde al mayor valor entre las condiciones dadas en la tabla 9.3.1.1 de la ACI. Sin embargo, para un esfuerzo de fluencia (f_y) diferente de 420 MPa, la altura obtenida debe ser multiplicada por la expresión especificada en el apartado 9.3.1.1.1 de la ACI [8]. Mientras que, la expresión para determinar la altura mínima de la losa está en función de f_y , [8] a mayor esfuerzo de fluencia, mayor altura.

En el prediseño de las secciones de columnas la resistencia axial se obtiene mediante la expresión definida en el apartado 22.4.2.2 de la ACI, [8] donde la resistencia a compresión del hormigón (f'_c) y f_y son directamente proporcionales, por lo que al mejorar estas propiedades se generan menores secciones.

Por otro lado, la tabla 11.3.1.1 de la ACI establece el es-

pesor mínimo de muros de corte, [8] en donde no incide ninguna propiedad del material.

1.1.4. Influencia de las propiedades del material en el diseño de elementos estructurales

El diseño de los diferentes elementos estructurales se basa en la normativa vigente, ACI 318 - 19 y NEC SE HM. La tabla 1 presenta una recopilación de las expresiones en función de f'_c y f_y , denotando que f_y es indirectamente proporcional y f'_c directamente proporcional al requerimiento de acero, mientras que, respecto a la determinación de la resistencia, ambas propiedades son directamente proporcionales (ver Tabla 1).

Tabla 1 Recopilación de expresiones de la ACI 318 - 19 para el diseño de elementos en función de $f'c$ y f_y

	FLEXIÓN	CORTE	TORSIÓN	AXIAL
LOSA	Acero mínimo $f_y < 420 \text{ MPa}$ $0.0020A_g$ $f_y \geq 420 \text{ MPa}$ Mayor valor de: $0.0018 \frac{420}{f_y} A_g, 0.0014 * A_g$	Resistencia nominal a corte atribuida por el concreto $V_c = 0.53\lambda\sqrt{f'c}b_wd$		
VIGA	Acero mínimo $A_{s\min} = 0.25 \frac{\sqrt{f'c}}{f_y} b_wd$ $A_{s\min} = \frac{14}{f_y} b_wd$ Cuantía máxima $\rho_{\max} \leq 0.025$ (Grado 60) $\rho_{\max} \leq 0.020$ (Grado 80) Acero máximo $A_{s\max} = 0.75\rho_b b_wd$ Cuantía balanceada $\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f'c}{f_y} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_s} \right)$ Valor para la distribución rectangular homóloga de esfuerzos en el hormigón $28 < f'c < 55 \text{ MPa}$ $\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05(f'c - 28)}{7}$ $f'c \geq 55 \text{ MPa}, \beta_1 = 0.65$ Momento nominal $M_n = A_s f_y \left(d - \frac{A_s f_y}{1.7f'c b_w} \right)$	$M_{pr} = \alpha A_s f_y \left(d - \frac{\alpha A_s f_y}{1.7f'c b_w} \right)$ Resistencia nominal a corte atribuida por el concreto $V_c = 0.53\lambda\sqrt{f'c}b_wd$ Resistencia nominal a corte atribuida por el refuerzo a corte $V_s = \frac{A_v f_y d}{s}$ Separación en la zona crítica de confinamiento Grado 60 $\rightarrow 6\phi$ <i>Varilla más pequeña</i> Grado 80 $\rightarrow 5\phi$ <i>Varilla más pequeña</i> Refuerzo transversal mínimo $\frac{A_v + 2A_t}{s} \geq 0.2\sqrt{f'c} \frac{b_w}{f_y}, \quad \frac{A_v + 2A_t}{s} \geq 3.5 \frac{b_w}{f_y}$ $A_{t\min} \leq \frac{1.33\sqrt{f'c}A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{A_t}{s} \right) P_h, \quad A_{t\min} \leq \frac{1.33\sqrt{f'c}A_{cp}}{f_y} - \left(\frac{1.75b_w}{f_y} \right) P_h$	Umbral de torsión $T_{th} = 0.27\lambda\sqrt{f'c} \left(\frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \right)$ Revisión Geométrica $\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_wd} \right)^2 + \left(\frac{T_u * p_h}{1.7A_{oh}^2} \right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_wd} + 2\sqrt{f'c} \right)$ Acero de refuerzo transversal $T_n = \frac{2A_o A_t f_y}{s} \cot\theta$ Acero de refuerzo longitudinal $T_n = \frac{2A_o A_l f_y}{p_h} \tan\theta$	
COLUMNA	Cuantía mínima $\rho_{\min} = (1\% \text{ a } 3\%) f'c A_g$	Acero de refuerzo transversal mínimo, con $f'c < 70 \text{ MPa}$, mayor valor entre: $A_{sh1} = 0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'c}{f_y} \cdot s \cdot b_c$ $A_{sh2} = 0.09 \frac{f'c}{f_y} \cdot s \cdot b_c$ Resistencia nominal a corte atribuida por el concreto		Resistencia Axial Nominal $P_o = 0.85f'c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$
MURO	Cuantía mínima en toda la sección del muro $\rho_{\min} = \frac{1.6\sqrt{f'c}}{f_y}$ Refuerzo distribuido en el alma no puede ser inferior a 0.0025, a menos que: $V_u > 0.27 * A_{cv} * \lambda * \sqrt{f'c}$	Cortante nominal $V_n = (\alpha_c * \lambda * \sqrt{f'c} + \rho_t * f_y) * A_{cv}$ Un muro requiere de cabezales sí satisface la condición $\sigma > 0.2 * f'c$. Resistencia nominal a corte atribuida por el concreto		

CONEXIÓN VIGA - CO- LUMNA	Fuerza a tensión por el acero para evaluación del cortante horizontal $T = A_s \cdot \alpha \cdot f_y$ Fuerza cortante nominal $V_n = 1.7 \lambda \sqrt{f'c} * A_j, V_n$ $V_n = 1.2 \lambda \sqrt{f'c} \cdot A_j$
---------------------------------	--

Tabla 2

Recopilación de expresiones de la ACI 318 - 19 para detalles de refuerzo en función de $f'c$ y f_y .

	LONGITUD DE DESARROLLO	EMPALMES POR TRASLAPO
		$f_y = 420 \text{ MPa}$
		$l_{sc} = \text{máx}\{0.0073 * f_y * d_b; 30 \text{ cm}\}$
COMPRESIÓN	$l_{dc} = \text{máx}\left\{\left(\frac{0.075 * f_y * \Psi_r}{\lambda * \sqrt{f'c}}\right) * d_b, (0.0044 * f_y * \Psi_r * d_b)\right\}$	$420 \text{ MPa} < f_y \leq 550 \text{ MPa}$
		$l_{sc} = \text{máx}\{(0.013 * f_y - 24) * d_b; 30 \text{ cm}\}$
TRACCIÓN	$l_{dh} = \text{máx}\left\{\left(\frac{0.24 * f_y * \Psi_s * \Psi_c * \Psi_r}{\lambda * \sqrt{f'c}}\right), 8 * d_b, 15 \text{ cm}\right\}$	

1.1.5. Influencia de las propiedades del material en los detalles de refuerzo

Los detalles de refuerzo son necesarios para mantener la filosofía de sismorresistencia. En la tabla 2, se analiza la longitud de desarrollo tanto a tracción como a compresión, representando la relación f_y sobre la raíz de $f'c$, donde $f'c$ es inversamente proporcional a la longitud calculada, mientras que f_y es directamente proporcional. Por otro lado, en la longitud de empalme por traslapo a compresión incide f_y , de tal manera que a mayor f_y mayor longitud de empalme (ver Tabla 2).

2. MÉTODO

Se procede a la modelación de dos edificaciones de hormigón armado bajo una misma configuración, implantadas en el centro norte de la ciudad de Quito, en el cual de acuerdo con Aguiar el suelo presenta una taxonomía de perfil tipo «D» [9].

El edificio está conformado por 18 pisos y 4 subsuelos, destinados a locales comerciales y viviendas con una altura de entrepiso de 3 metros (ver Figuras 4, 5 y 6). Este está configurado por un sistema dual, vigas descolgadas y losas nervadas.

La propuesta arquitectónica está conformada por una planta simple y regular, destinada principalmente a vivienda, donde cada piso cuenta con 4 departamentos y la planta baja con 4 locales de uso comercial. El edificio consta de 18 pisos y 4 subsuelos, con una superficie constructiva de 530.00 m² y 975,28 m², respectivamente. Se

destina tres metros para la altura de entrepiso, alcanzando el nivel N+54,00 y una profundidad al nivel N-12,00. La mayor distancia entre ejes corresponde a 6 metros, en la dirección y - y, y 7 metros en la dirección x - x.

La carga muerta y viva empleadas se detallan en las tablas 3 y 4, donde los valores de la carga muerta se determinaron en función de la configuración arquitectónica y la carga viva se tomó de la NEC SE CG [10] (ver Tablas 3 y 4).

2.1. ESTIMACIÓN DE CARGA SÍSMICA

Parte del procedimiento del diseño basado en fuerzas es la estimación de carga sísmica, la cual está establecida en la NEC SE DS [6] y se especifica en la figura 7, obteniendo así, un cortante basal del 8,1% del peso reactivo de la estructura para ambas direcciones (ver Figura 7).

2.2. MODELAMIENTO ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS LINEAL

Con el fin de obtener el comportamiento óptimo del edificio al aplicar un análisis lineal y no lineal se adoptaron las secciones presentes en la tabla 5. Para el análisis se considera como modelo convencional aquel que tiene las propiedades $f'c$ 28 MPa y acero grado 60, y modelo de alta resistencia, aquel que tiene propiedades $f'c$ 55 MPa y acero grado 80 (ver Tabla 5).

El modelamiento fue desarrollado en el software ETABS siguiendo el diagrama de flujo mostrado en la figura 8. Para un correcto modelamiento y análisis es esencial tomar consideraciones como: el módulo de elasticidad, el

Tabla 3

Estimación de carga muerta

ELEMENTOS	PESO [T/m ²]
Bloques de losa	0,08
Mampostería	0,13
Acabados e instalaciones	0,20
Carga muerta	0,41
Carga muerta subsuelos y cubierta	0,28

Tabla 4

Carga viva de acuerdo con la NEC SE CG

OCUPACIÓN	CARGA VIVA [T/m ²]
Almacenes/ Restaurantes	0,48
Residencias multifamiliar	0,20
Garaje	0,20
Cubierta accesible	0,48
Cubierta inaccesible	0,07
Escaleras y rutas de escape	0,48

Figura 4

Planta tipo para departamentos

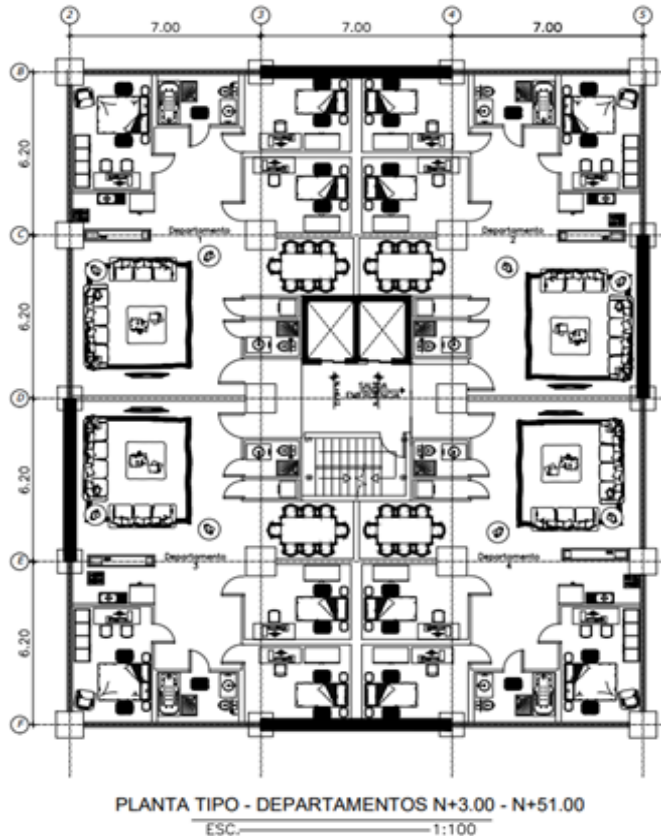


Figura 5

Planta tipo para almacenes comerciales

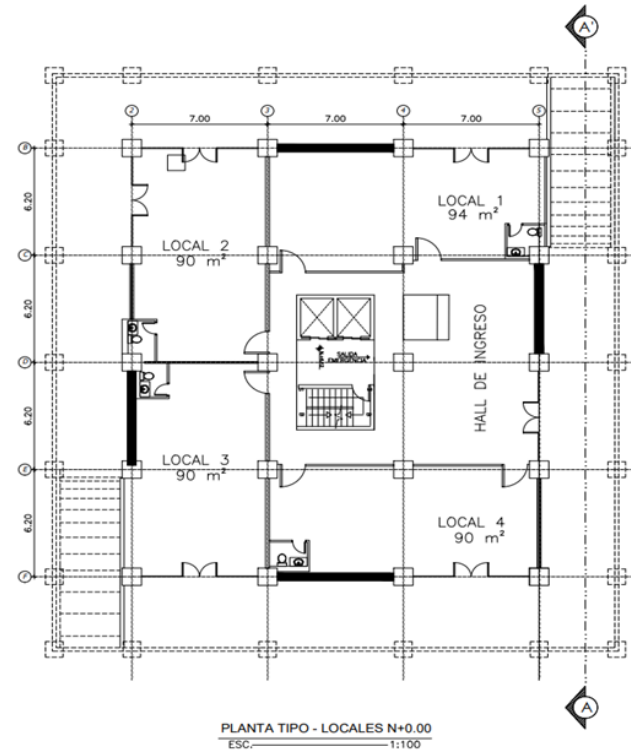


Tabla 5

Secciones adoptadas para elementos diseñados con materiales convencionales y de alta resistencia

MODELO/ELEMENTO		CONVENCIONAL	ALTA RESISTENCIA
Vigas		60x65 cm	55x60
Losa		25 cm	
Columnas	Interiores	95x95	75x75
	Exteriores	95x95	70x70
	Corte	40 cm	20 cm
Muro	Cabezales	95x95	70x70
	Ascensor	18 cm	12 cm
	Contención	20 cm	

Figura 6

Vista en elevación de la edificación de Cumbayá

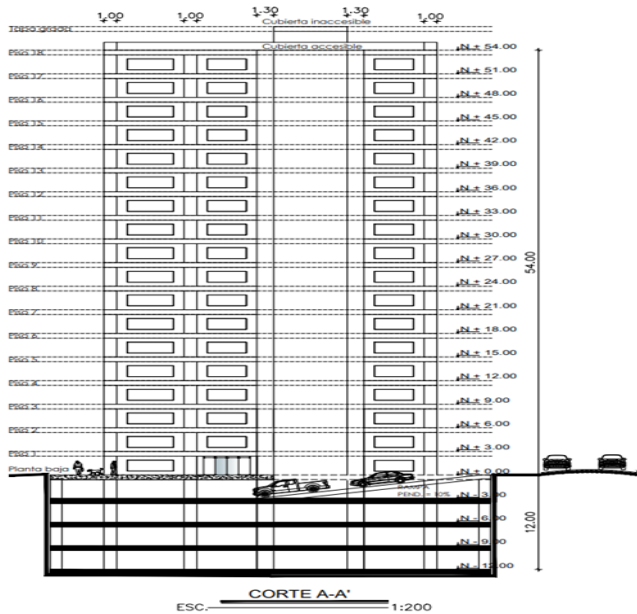
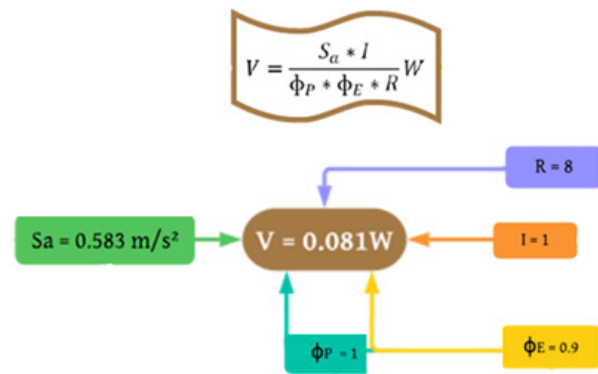


Figura 7

Estimación de carga sísmica



cual se determinó mediante la expresión propuesta por Alejandro en 2014, desarrollada de acuerdo con la calidad de materiales en la ciudad de Quito; [11] los factores de agrietamiento sobre las inercias de los elementos estructurales; las combinaciones de carga y los índices máximos de deriva para hormigón armado (ver Figura 8).

Para la aplicación de los análisis lineales se debe definir los respectivos casos de carga en cada dirección. En el análisis estático lineal se define el coeficiente de corte en función del peso reactivo, por otra parte, el análisis dinámico lineal parte de la definición del espectro de respuesta.

2.3. ANÁLISIS NO LINEAL (PUSHOVER)

Una vez analizado el comportamiento de la estructura y afinado el diseño, se da paso a la ejecución del pushover. Para ello se define cargas gravitacionales no lineales, que resulta de la combinación de carga muerta y viva afectada por un factor de escala 1.1 según la ASCE 41-17 [12]. A partir de este caso, se define el caso de carga no lineal «pushover» en la dirección dominante del primer modo

de vibración. Para definir el control de desplazamiento se detalla la magnitud, 4% de la altura en elevación, y el punto de monitoreo, siendo el centro de gravedad del último piso en la dirección del primer modo de vibración.

Se asigna rótulas plásticas al 5% y 95% de la longitud en los diferentes elementos de hormigón armado, definiendo su tipo y grado de libertad en el que se desempeña. Estos porcentajes representan la altura efectiva de la sección hasta dos veces su valor en la longitud del elemento, al definirse esta como la zona crítica de confinamiento para elementos de hormigón armado.

Finalmente, se ejecuta el pushover en «x» y «y». Donde sus resultados gráficos se obtienen a partir de la linealización equivalente proporcionada por el FEMA 440 [13].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes análisis y diseños desarrollados, los cuales fueron procesados a fin de exponer en el presente apartado ta-

Figura 8

Diagrama de flujo global del procedimiento a seguir para el análisis de un edificio en ETABS

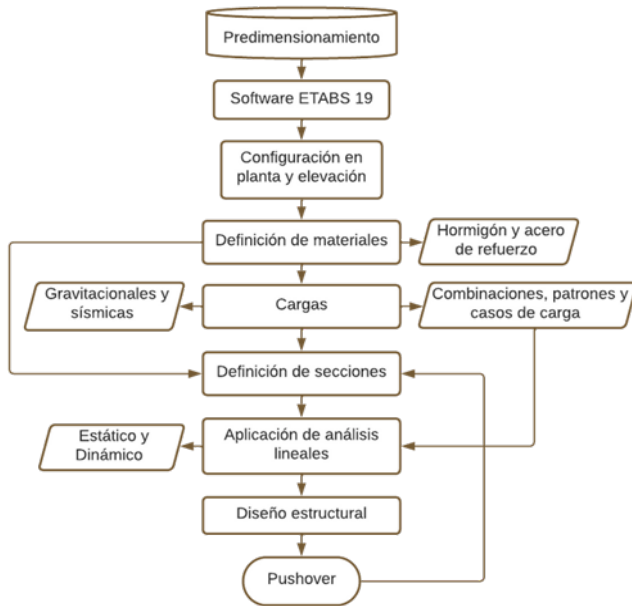


Figura 10

Período fundamental de la estructura de la propuesta convencional y de alta resistencia

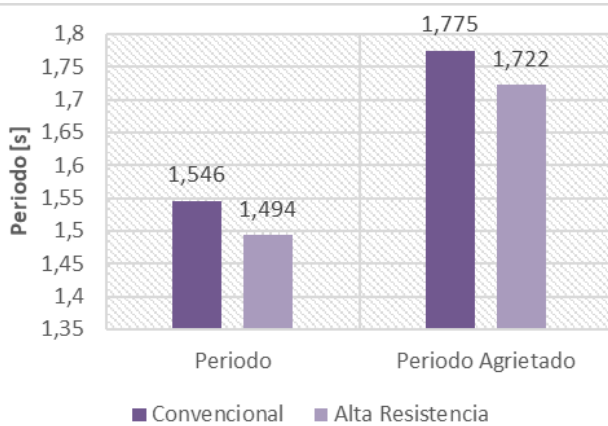


Figura 9

Peso de la estructura y cortante basal de la propuesta convencional y de alta resistencia

■ Peso de la Estructura [T] ■ Fuerza lateral [T]

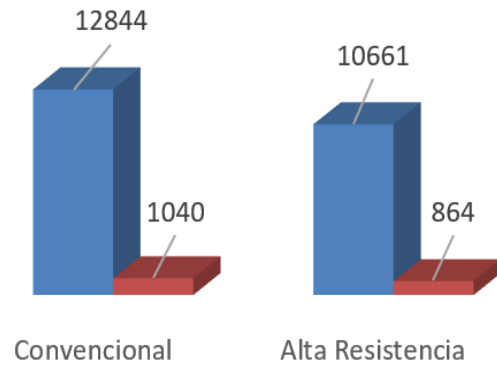
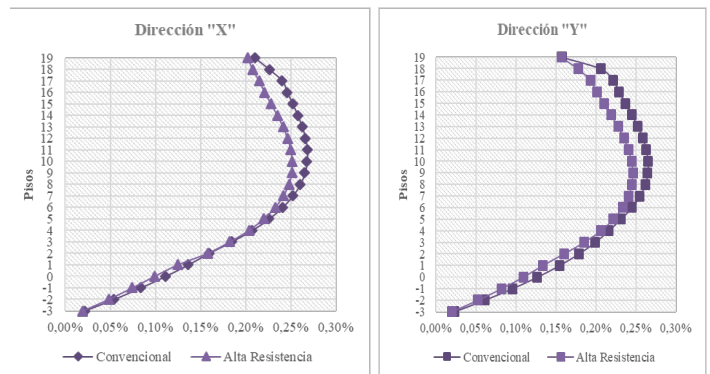


Figura 11

Derivas elásticas por piso en «x» y «y»



blas y figuras comparativas, de manera que se permita visualizar las diferencias entre la propuesta de diseño convencional y de alta resistencia.

3.1. PESO Y CARGA SÍSMICA

En la figura 9 se puede observar que la diferencia de secciones entre ambas propuestas tiene como resultado la variación de pesos propios. El modelo convencional presenta un incremento del 20% en su peso respecto al de alta resistencia, teniendo como consecuencia una carga sísmica mayor, ya que esta es directamente proporcional al peso de la estructura (ver Figura 9).

3.2. PERÍODO Y DERIVAS

De acuerdo con la figura 10, el modelo de alta resisten-

cia presenta un período menor al convencional a pesar de sus secciones menores, evidenciando la influencia de las propiedades del material en la rigidez de la estructura. Lo cual también es notorio en la pronunciación de la curva conformada por las derivas de cada propuesta (ver Figura 10).

Para las derivas, de acuerdo con los análisis lineales, se ha optado considerar únicamente las generadas por la carga sísmica estática, al tratarse de los valores más representativos en desplazamientos por piso en la estructura (ver Figura 11).

3.3. MASA MODAL Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Los tres primeros modos de vibración determinan el comportamiento de la edificación, por lo que conforme a las figuras 12 y 13, se aprecia que la dirección «x» es la

Figura 12

Masa modal acumulada de la propuesta convencional

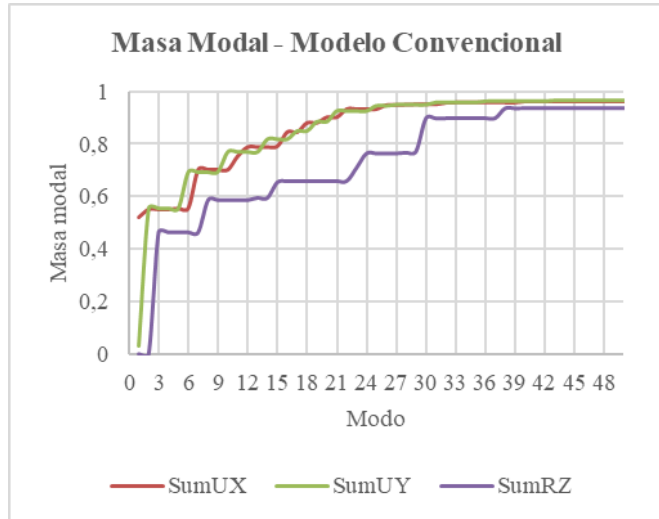


Figura 13

Masa modal acumulada de la propuesta de alta resistencia

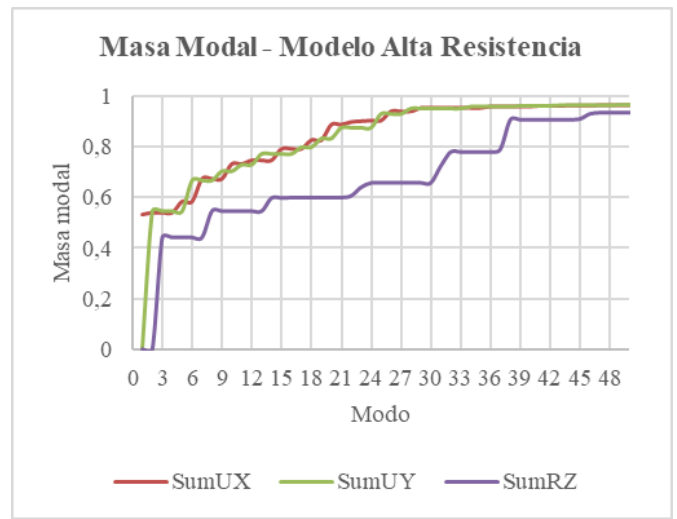


Figura 14

Cantidad de acero por elemento estructural de la propuesta convencional y de alta resistencia

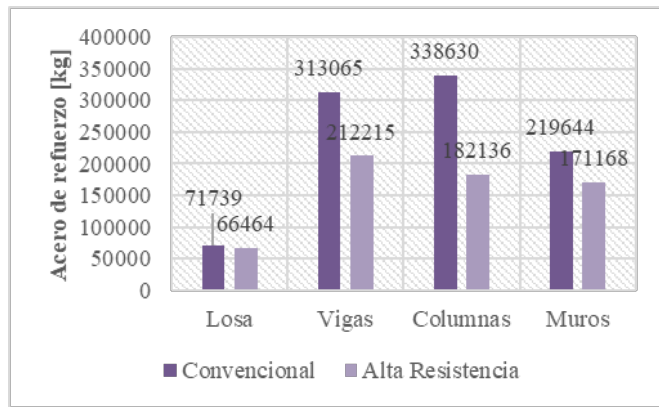
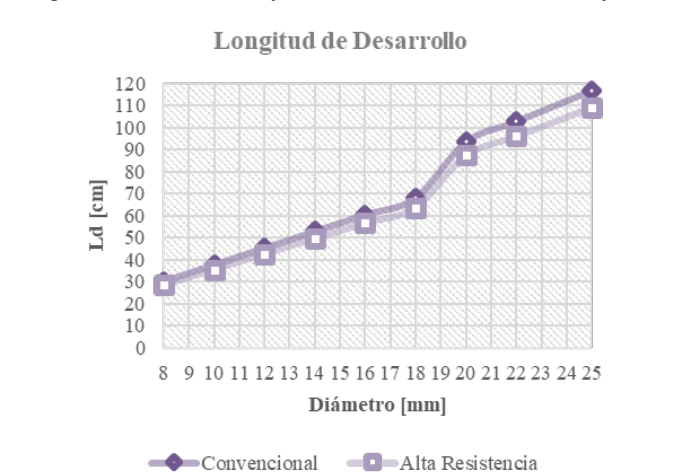


Figura 15

Longitud de desarrollo conforme al diámetro de varilla de refuerzo



predominante en ambas propuestas, presentando alrededor del 50% de la masa modal asociada al primer modo de vibración, seguido de la dirección traslacional «y» y rotacional en el tercer modo (ver Figuras 12 y 13).

Al revisar la cantidad de acero que requiere cada elemento estructural en cada propuesta se estableció que, en términos generales de cuantía de acero por elemento (ver Figura 14) se tiene que el refuerzo en la propuesta de alta resistencia se reduce: 8% en losas, 32% en vigas, 46% en columnas y 22% en muros, respecto al modelo convencional.

3.4. DETALLES DE REFUERZO

Tanto la longitud de desarrollo como de anclaje del modelo convencional presentan un incremento del 7% respecto al de alta resistencia (ver Figuras 15 y 16). Consecuentemente, el incremento en el empalme a tensión es del 7% al depender de la longitud de desarrollo, más no en el empalme a compresión, donde se decrementa un 35% a excepción de la varilla de 8 mm (ver Figura 17).

Las variaciones presentadas en las figuras 15 y 16 se deben a que la longitud de desarrollo y de anclaje son calculadas a partir de la relación entre el esfuerzo a fluencia del acero (f_y) y la raíz de la resistencia a compresión del concreto (f'_c).

3.5. PUSHOVER

La capacidad estructural se representa por medio de la curva de capacidad obtenida mediante el pushover, donde, como se observa en la figura 18, ambas propuestas sobrepasan el límite elástico al perder su linealidad (ver Figura 18).

En la figura 19, se puede observar los detalles del punto de desempeño: la propuesta convencional presenta su respuesta máxima en 0,5127 m con un cortante basal de 3812 T y la de alta resistencia en 0,4203 m con un cortante basal de 2814 T, ambos en la dirección «x» (ver Figura 19).

La ductilidad considera el comportamiento general de la estructura y se ve representada por el diagrama fuerza-desplazamiento. Esta propiedad muestra la

Figura 16

Longitud de anclaje conforme al diámetro de varilla de refuerzo

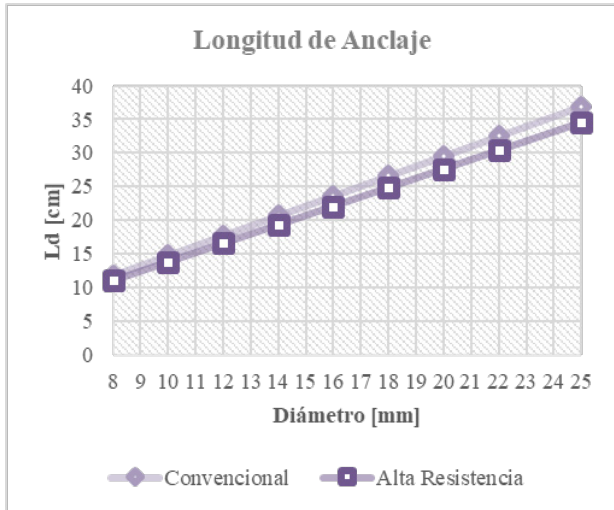


Figura 18

Curvas de capacidad en la dirección «x» y «y»

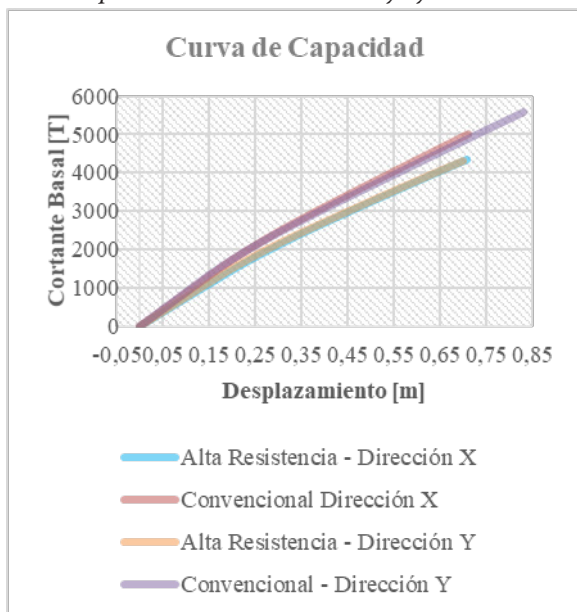


Figura 17

Longitud de empalme por traslapeo conforme al diámetro de varilla de refuerzo

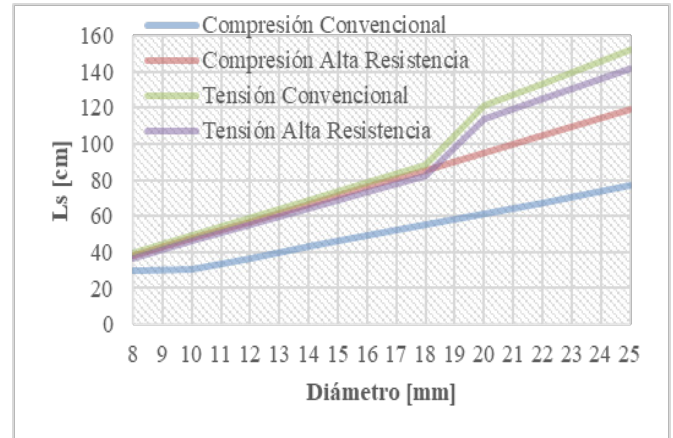
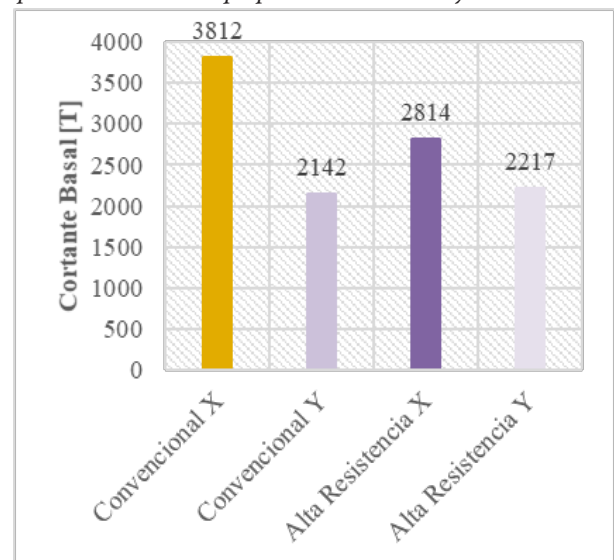


Figura 19

Respuesta máxima de la propuesta convencional y de alta resistencia



deformación de la estructura para una fuerza lateral dada, además de que permite trabajar en el intervalo inelástico, permitiendo tener mayores desplazamientos laterales sin perder estabilidad y colapsar. El modelo convencional presenta una ductilidad de 2,16 en su punto de desempeño y de 1,75 el de alta resistencia (ver Figura 20).

Ambas propuestas de diseño se encuentran en el rango de ocupación inmediata, ya que como puede observarse en la figura 21, las rótulas plásticas se formaron hasta el nivel B-C, es decir, que son edificios seguros para la integridad de los asistentes (ver Figura 21).

3.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

El presupuesto se obtiene a partir de la cuantificación y el análisis de precios unitarios. Respecto al concreto, según

la figura 22, el volumen del modelo convencional respecto al de alta resistencia presentó los siguientes incrementos: 18% en vigas, 76% en columnas y 95% en muros (ver Figura 22). Sin embargo, la losa en el modelo de alta resistencia presenta un incremento de 40% respecto al convencional, por lo que considerar una losa de hormigón armado representaría un ahorro de únicamente el 3%, mientras que al exceptuar la losa un 50%.

Por otro lado, a partir de la planilla de aceros, conforme muestra la figura 23, se determina que el peso requerido para el modelo convencional es 52% mayor respecto al de alta resistencia. Dando lugar a una diferencia significativa de acero por metro cuadrado de construcción al emplear refuerzo grado 80. Mientras que para el hormigón no existe mayor disparidad al considerar una losa de

Figura 20

Ductilidad de la propuesta convencional y de alta resistencia

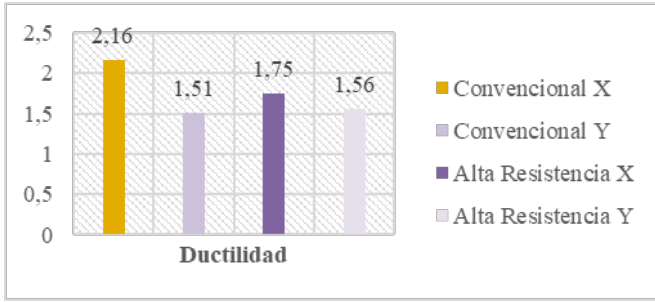


Figura 21

Rótulas plásticas generadas de la propuesta convencional y de alta resistencia

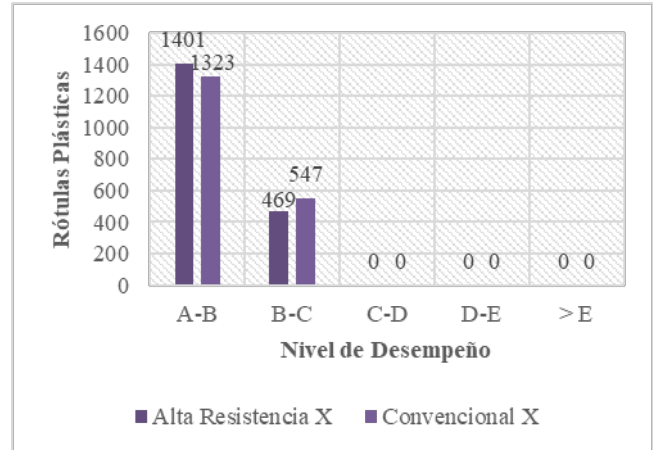


Figura 22

Cubicación de hormigón por elemento de la propuesta convencional y de alta resistencia

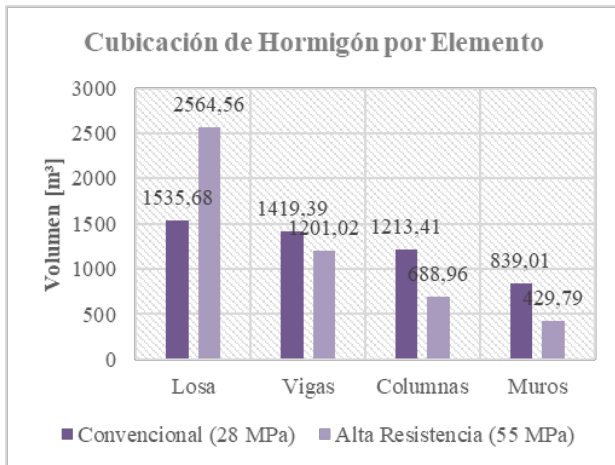
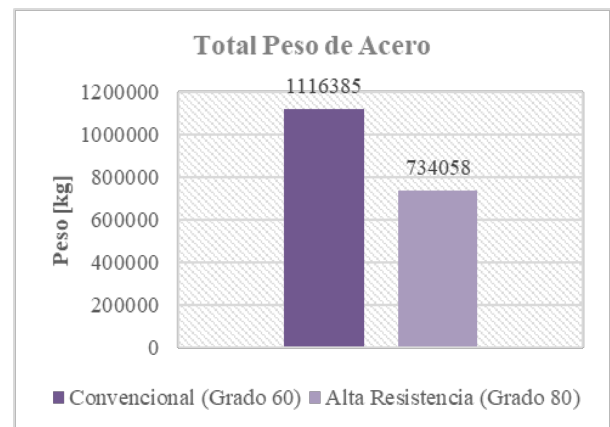


Figura 23

Peso total de acero de refuerzo de la propuesta convencional y de alta resistencia



hormigón armado, puesto que los volúmenes varían en apenas 0,01 a diferencia de excluir la losa (ver Figura 23).

El análisis de precios unitarios se realizó únicamente para concreto y acero de refuerzo, donde sus precios unitarios fueron facilitados por unión de concreteras UNICON y NOVACERO. El salario de mano de obra fue tomado de la Contraloría General del Estado, mientras que equipos y rendimientos se determinaron a través del Sistema Oficial de Contratación Pública, al ser un referente en el medio.

Como se observa en la tabla 6, el valor unitario del hormigón de alta resistencia es usd 31,25 más costoso que el convencional, implicando un incremento al valor de su APU del 29% (ver Tabla 6).

En cambio, el acero de refuerzo presenta una diferencia de 10 centavos por kilogramo (ver Tabla 7), lo cual conlleva un incremento del 6% en el valor del APU de grado 80, respecto al convencional.

Finalmente, los presupuestos determinados son: USD 2.302.994 para la propuesta convencional y USD 1.911.699

para alta resistencia, mostrados en la figura 24, lo cual significa un ahorro de USD 391.294, es decir, que la propuesta de alta resistencia es 17% más económica que la convencional (ver Figura 24).

Esta variación también se presenta en un presupuesto real, contemplando gastos indirectos. Llevar a cabo uno de estos proyectos con materiales convencionales resulta USD 212 por metro cuadrado de construcción, mientras que con alta resistencia se emplearía USD 177.

4. CONCLUSIONES

El concreto de alta resistencia ($f'c$ 55 MPa) en el país, generalmente es empleado para la construcción de obras especiales, más no de edificaciones, a pesar de no presentar una limitación en las normativas acerca de su uso. Por otra parte, a raíz de la introducción del acero de refuerzo grado 80 en el ASTM A706/A706M-16, se impulsó

Tabla 6

Análisis de precios unitarios del hormigón convencional y de alta resistencia.

RUBRO	P. U.	APU (0% C. I.)	APU (25% C. I.)
Hormigón premezclado $f'c$ 280 kg/cm ²	\$89,75	\$107,66	\$134,58
Hormigón premezclado $f'c$ 550 kg/cm ²	\$121,00	\$138,91	\$173,64

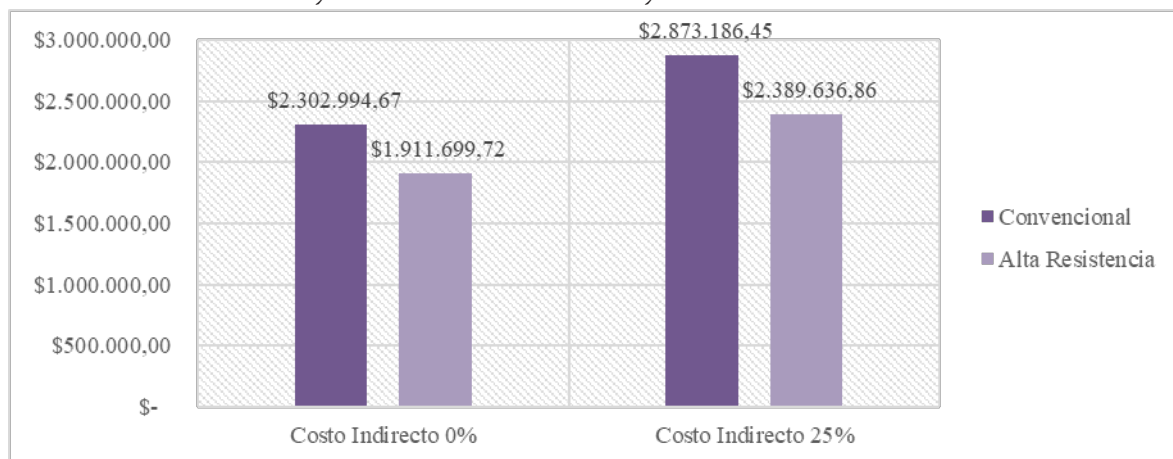
Tabla 7

Análisis de precios unitarios del acero de refuerzo convencional y de alta resistencia.

RUBRO	P. U.	APU (0% C. I.)	APU (25% C. I.)
Acero de refuerzo en barras f_y 4200 kg/cm ²	\$1,08	\$1,58	\$1,97
Acero de refuerzo en barras f_y 5500 kg/cm ²	\$1,18	\$1,68	\$2,10

Figura 24

Presupuesto con costo indirecto del 0% y 25% del modelo convencional y de alta resistencia



la aplicación de estas varillas corrugadas en las nuevas reformas del ACI 318-19, incluyendo especificaciones para el diseño y edificación de sistemas duales. Por consiguiente, actualmente se ofrece la oportunidad del uso conjunto de ambos materiales en edificaciones con muros estructurales.

La gran influencia de las propiedades del material sobre el comportamiento del edificio es notoria en varios aspectos, uno de ellos es:

El cortante basal, el cual es influenciado por el peso del edificio; un peso significativo de los elementos conlleva una fuerza lateral representativa, aumentando la probabilidad de falla debido a los grandes esfuerzos que puedan presentarse. La propuesta de diseño bajo materiales de alta resistencia ofrece secciones transversales de menor dimensión, involucrando una disminución en el peso y fuerza lateral de un 17% respecto a la propuesta convencional.

El modelo diseñado con base en materiales de alta resistencia, el cual emplea secciones de menor geometría en comparación al modelo convencional, implicaría mayor flexibilidad, a pesar de ello, se presenta como un edificio más rígido con tendencia a falla dúctil. Con lo cual, se aprecia la gran influencia de las propiedades del material sobre el comportamiento del edificio.

Las curvas conformadas por las derivas elásticas muestran una diferencia de rigidez en la estructura. La figura 11 expone que, en el modelo convencional se tiene una curva de mayor pronunciamiento, al tener una deriva máxima elástica de 0,002681 en la dirección «x» y 0,002650 en la dirección «y», mientras que en la propuesta de alta resistencia este valor corresponde a 0,002518 en la dirección «x» y 0,002465 en la dirección «y», conformando una menor curvatura y demostrando mayor rigidez.

Generalmente, mientras mayor sea la sección transversal, menor es el desplazamiento provocado ante un evento sísmico. En este caso, la influencia de las propiedades de los materiales de alta resistencia, rigidizan a los elementos de tal manera que los desplazamientos llegan a ser menores, aun teniendo secciones reducidas respecto a la propuesta convencional.

El diseño parte de las acciones ejercidas sobre los elementos estructurales, las cuales presentan una proporcionalidad con la geometría de la sección. En el modelo de alta resistencia existen reducciones en el área transversal de sus elementos respecto al convencional: 15% en vigas, 38% en columnas internas, 46% en columnas externas y cabezales, y 50% en el alma del muro. Así pues, las acciones ejercidas son inferiores y, por ende, el refuerzo es significativamente menor. Sin embargo, las losas presentan

una misma sección transversal, pero debido a la influencia de las propiedades de los materiales de alta resistencia, se requiere únicamente de acero mínimo. Asimismo, en los detalles de refuerzo se evidencia una disminución en la cuantía de refuerzo, lo que conlleva un importante ahorro económico en obras de gran magnitud.

De acuerdo con la respuesta pico y el estado límite de daño presentado en ambas propuestas, los daños producidos por la acción sísmica serán leves, al encontrarse en el nivel de ocupación inmediata, con lo cual se asegura la integridad de los ocupantes, operatividad después del sismo y costos menores de reparación.

En una estructura de hormigón armado, el concreto es el material más costoso, sin embargo, el acero de refuerzo representa mayor parte del presupuesto al requerir mayor cantidad. En este caso, el modelo convencional si bien presenta precios unitarios más económicos, las cantidades requeridas tanto de acero como de concreto acrecientan su presupuesto, a diferencia del modelo de alta resistencia, donde a pesar de que el precio unitario de los materiales es mayor, sus cantidades hacen el presupuesto mucho más asequible. Es así como se consigue un ahorro de USD 35,75 por metro cuadrado de construcción en alta resistencia. Además, un menor período de ejecución representa una ventaja económica.

Optar por una edificación diseñada en base a materiales de alta resistencia no solo refleja un beneficio económico, sino también, se aprecia grandes ventajas, como el descongestionamiento de refuerzo, reducción en los tamaños de varillas y secciones de los elementos, volúmenes y tiempos de fundición menores en obra, mayor resistencia y durabilidad, y a nivel arquitectónico, mayor espacio útil.

REFERENCIAS

- [1] C. M., *Utilización de los concretos de alta resistencia y concretos celulares en la industria de la construcción ecuatoriana*, 2015.
- [2] D. Gustafson, *Mayor límite de fluencia para el acero de refuerzo*, American Concrete Institute, ACI, 5, 2010.
- [3] H. & G. D. Oña, *Análisis costo-beneficio del uso de hormigón de alta resistencia ($f'c$ 45 MPa) versus hormigón normal ($f'c$ 28 MPa)*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [4] R. & G. D. Maldonado, *Análisis comparativo económico estructural de la utilización de acero de refuerzo de alta resistencia grado 80 frente a acero grado 60 en un edificio de 15 pisos*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2021.
- [5] J. McCormac y R. Brown, *Diseño de concreto reforzado*, México: Alfaomega, 2018.
- [6] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, *Peligro sísmico diseño sismo resistente*, NEC SE DS, Quito: MIDUVI, 2014.

- [7] ASCE/SEI, *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*, Reston: American Society of Civil Engineers, 2017, pp. 41-17.
- [8] American Concrete Institute, *Building code requirements for structural concrete*, Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- [9] R. Aguiar, *Microzonificación sísmica de Quito*, Valle de los Chillos: Centro de Investigaciones Científicas ESPE, 2013.
- [10] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, *Cargas (no sísmicas)*, NEC SE CG, Quito: MIDUVI, 2014.
- [11] H. Alejandro, *Módulo de elasticidad de hormigones de peso normal empleados en el Ecuador $f'c$: 21, 24, 28, 35 MPa*, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [12] American Society of Civil Engineers, *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings*, ASCE/SEI, 41-17, American Society of Civil Engineers, 2017.
- [13] FEMA 440, *Improvement of nonlinear static*, Washington: FEMA, 2005.