

## REFUERZO SISMORRESISTENTE DE EDIFICIOS EDUCATIVOS MODULOS 780 CON OCTOGONO

Fernando Calagua (1) y Daniel Quiun (2)

(1) Egresado de la Maestría en Ing. Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú

(2) Profesor del Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú

### 1. RESUMEN

El presente trabajo trata sobre una propuesta de intervención estructural a los edificios educativos denominados módulos 780 con octógono, construidos por INFES en años anteriores. Dichos edificios de 3 pisos, tienen forma irregular en planta y no cumplen con la condición de regularidad establecida en la Norma de Diseño Sismorresistente E.030 del 2003 (Ref.1). En el sismo del 12 de noviembre de 1996 el C.E. Fermín del Castillo ubicado en Nazca tuvo daños en este tipo de edificio (Ref.2).

El objetivo general del presente trabajo es contribuir a la protección de las edificaciones de centros educativos ante eventos sísmicos.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Evaluar el comportamiento y la vulnerabilidad sísmica de los edificios educativos conformados por el módulo de rectángulos y octógono integrados por un mismo diafragma rígido.
- Plantear la alternativa de separación y reforzamiento requerido de los bloques de octógono y rectángulos.
- Evaluar la factibilidad económica de la solución estructural.

### 2. INTRODUCCIÓN

La estructura del módulo a estudiar es de tres niveles y está formada por la unión de dos bloques: uno de forma de octógono y el otro de forma de rectángulos. El sistema estructural de la edificación es una combinación de pórticos de concreto armado y muros de albañilería en las dos direcciones principales de la estructura. La cimentación consiste en un sistema de zapatas conectadas por vigas en las dos direcciones principales de análisis de la edificación (Ref. 3, 4).

De acuerdo a lo indicado en la tabla N° 5 de la NTE E030 la planta del módulo en estudio se clasificaría como irregular por las esquinas entrantes y por la discontinuidad del diafragma en planta (Ver Fig. 1 y 2).

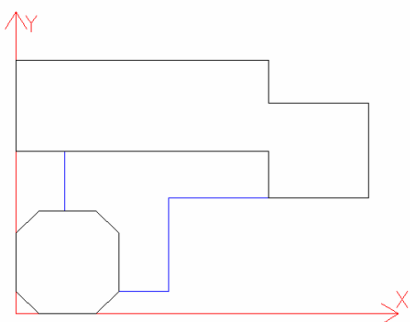


Fig. 1 Silueta de la planta típica de la que la estructura a estudiar (Ref. 1).

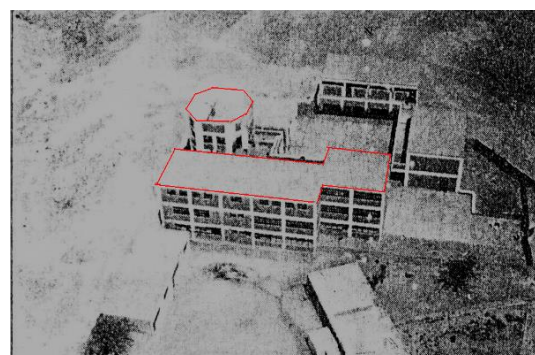


Fig. 2 Fotografía aérea en que se muestra La silueta de la edificación a estudiar. (Ref. 5).

Nótese que las plantas mostradas en las figuras 1 y 2 no coinciden. La construcción se encuentra reflejada como en un espejo alrededor del eje X con respecto a lo indicado en los planos. No había juntas entre los elementos de concreto armado y los muros de albañilería (Ver Fig. 3).



Fig. 3. CE Fermín del Castillo. Daños en los muros de tabiquería en la dirección longitudinal y otros daños de la edificación tras el sismo de Nazca de 1996.

### 3. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL

Se quiere verificar el comportamiento y resistencia de la estructura original con las normas vigentes a fines del año 2008. La edificación no cumple con la limitación que da la NTE-E030 respecto a que no se permite que una estructura esencial sea irregular. Sin embargo, por tratarse de una edificación existente, se realizarán las otras verificaciones.

#### 3.1 Descripción del modelo

Se efectuó un análisis en base a la geometría y a las características estructurales según los planos del proyecto, utilizando el espectro de aceleraciones y los parámetros correspondientes a la Norma de Diseño Sismorresistente NTE-E.030 vigente desde el año 2003. Se tomó en cuenta la incertidumbre del centro de masas, la que se incrementa cuando se trata de edificaciones con plantas irregulares y cuyos elementos que conforman la tabiquería, parapetos, dinteles y algún elemento no estructural no están uniformemente distribuidos. De los análisis en ambas direcciones y con excentricidades hacia ambos lados se extrajo las fuerzas para la verificación del diseño estructural.

Para el análisis se usó como herramienta el programa ETABS. Inicialmente se usó un modelo en el cual se representaron todos los muros de albañilería por elementos tipo shell, pero más adelante se vio que los elementos shell no representaban correctamente la interacción de los muros bajos con los pórticos de concreto armado.

Con el fin de considerar la influencia de los muros de albañilería en la dirección de los pórticos de concreto, se modelaron los muros por medio de puntales diagonales, cuyas propiedades están dadas en la Norma E.070 (Ref.6). Fue necesario usar dos modelos para cada sentido de la fuerza de sismo en la dirección X-X, orientando los puntales de manera que siempre se encuentren en compresión (Ver Fig. 4, 5 y 6). Al modelo se aplicó la carga muerta y viva correspondiente de acuerdo a la Norma de cargas NTE-020 para este tipo de edificaciones.

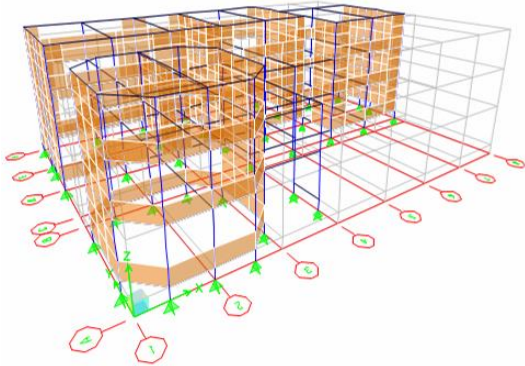


Fig. 4 Se muestra el modelo estructural original, el cual sirvió para hallar los periodos fundamentales en cada dirección mediante un análisis dinámico.

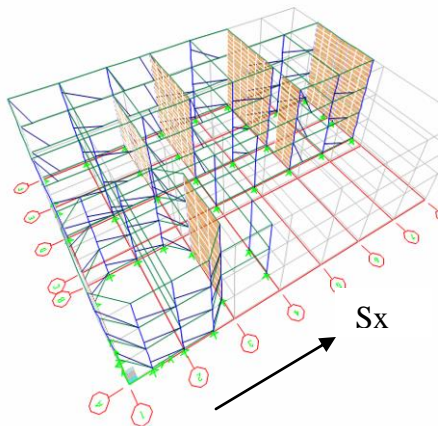


Fig. 5 Modelo con puntales en tabiques de la dirección longitudinal. En este modelo se aplicó una fuerza de sismo estática ( $S_x$ ) en el sentido indicado para que los puntales estén en compresión.

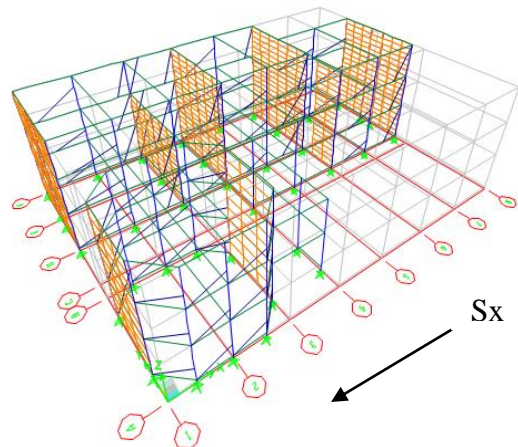


Fig. 6 Modelo con puntales en tabiques para la fuerza de sismo estática ( $S_x$ ) en el sentido indicado para que los puntales estén en compresión.

### 3.2 Análisis sísmico de la estructura original

Se usaron los siguientes parámetros sísmicos:

$Z=0.4$  => Factor de zona (Costa peruana)

$U=1.5$  => Factor de uso (Colegio-Estructuras esenciales)

$S=1.2$  => Factor de suelo (Suelo intermedio),  $T_p=0.6s$  (Estimado por no contar con estudio de suelos)

$C=2.5T_p/T$

R= Factor de reducción:

En ambas direcciones de la edificación existe una combinación de pórticos de concreto armado y muros de albañilería portantes. Se determinó cuál es el sistema estructural predominante en cada dirección para usar el factor de reducción adecuado. En la dirección "X" (ver Fig. 1) se compararon los periodos calculados con el análisis dinámico usando el modelo de la Fig.4, con el periodo aproximado para el método estático equivalente. Se concluyó que el sistema estructural era pórticos de concreto. En la dirección "Y" (Ver Fig.2) se averiguó qué porcentaje de la fuerza sísmica era tomada por los muros de albañilería y se concluyó que el sistema estructural era muros de albañilería. Por lo tanto, los factores de reducción considerados son:

$R_x=0.75 \times 8=6.0$  (Estructura irregular)  
 $R_y=0.75 \times 3=2.25$  (Estructura irregular)

### 3.3 Resultados de los análisis y verificación de la estructura

#### 3.3.1 Desplazamientos de entrepiso

En la tabla 1 se muestran los valores de desplazamientos de entrepiso comparados con los límites de la Norma NTE-E030.

Tabla 1.

|        | Dirección X                           | Dirección Y                           |
|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Piso   | $0.75 \cdot R \cdot \Delta_{rel} / h$ | $0.75 \cdot R \cdot \Delta_{rel} / h$ |
| 1      | $0.005 < 0.007$                       | $0.002 < 0.005$                       |
| 2      | $0.003 < 0.007$                       | $0.001 < 0.005$                       |
| 3 REC. | $0.001 < 0.007$                       | $0.001 < 0.005$                       |
| 3 OCT. | $0.0007 < 0.007$                      | $0.0001 < 0.005$                      |

Se observa que la estructura posee suficiente rigidez lateral con respecto a los límites establecidos por la Norma NTE-E.030.

#### 3.3.2 Verificación de los elementos estructurales

Después de realizar las verificaciones de los elementos estructurales se llegó a las siguientes conclusiones:

- La estructura tiene deficiente resistencia al corte en la dirección Y-Y donde el sistema estructural está compuesto por muros de albañilería. Es necesario adicionar elementos estructurales para incrementar la resistencia global al corte del edificio y aliviar la carga de los muros de albañilería. Es necesario realizar un reforzamiento estructural en esta dirección.
- Algunos de los tabiques de albañilería en la dirección X-X no cumplen por resistencia de acuerdo a lo indicado en la norma NTE-E070. Será necesario buscar una solución para evitar esta falla.
- Se han verificado algunas de las vigas de techo más cargadas y se ha visto que no cumplen por flexión inclusive para las combinaciones de carga de gravedad.
- Se han verificado algunas columnas de concreto armado y se ha visto que no cumplen por resistencia para las combinaciones que involucran cargas de sismo.
- La ausencia de juntas entre las columnas de concreto y los tabiques de albañilería, hace que se genere el efecto de columnas cortas y que el corte se vea incrementado en éstas. Por lo tanto, para eliminar este efecto, será necesario aislar los tabiques de albañilería de las columnas estructurales de concreto armado.
- Se han verificado las vigas de conexión de las cimentaciones y se ha visto que están sobrecargadas para las combinaciones que involucran cargas de sismo. Será necesario realizar trabajos de reforzamiento en estos elementos estructurales.

## 4. SEGUNDO ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En base a los resultados obtenidos en el primer análisis y de acuerdo a las conclusiones mencionadas anteriormente, se procedió a efectuar un conjunto de análisis con el fin de plantear mejoras al sistema estructural. En los análisis se incluyeron modificaciones estructurales con el fin de llegar a una solución que mejore adecuadamente las deficiencias de la estructura existente.

### 4.1 Primera modificación estructural

Para realizar este análisis se han efectuado las siguientes modificaciones.

- Se aíslan los muros bajos de albañilería de las columnas en los pórticos en la dirección X-X.
- En el modelo estructural se eliminan todos los tabiques en la dirección X - X.
- Se colocan las masas de los tabiques de albañilería eliminados en los nudos que lo conformaban y sobre las vigas.
- Se coloca la carga correspondiente al peso de los tabiques a lo largo de las vigas que lo soportan.

Considerando estas modificaciones se efectuó los análisis respectivos a la estructura con el objeto de averiguar cuál es el impacto global de este cambio y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Este análisis principalmente ha servido para diagnosticar la influencia de los tabiques de albañilería en la rigidez de la estructura.
- La rigidez de la estructura en la dirección X-X ha disminuido. Esta degradación es más notoria en los dos primeros niveles; sin embargo el octógono del tercer nivel cumple con los límites de desplazamientos, aún sin tabiques.
- Se concluye que una alternativa para mejorar la estructura sería el separar físicamente por medio de una junta, los bloques del octógono y rectángulos en toda la altura. Luego se debe de efectuar los análisis correspondientes para cada bloque por separado. El bloque del octógono muestra mayor rigidez lateral en las 2 direcciones que el bloque de los rectángulos en el tercer piso que ya se encuentran separados.

#### 4.2 Segunda modificación estructural

En este conjunto de análisis se planteó separar los bloques del módulo y disminuir la concentración de rigidez en el bloque del octógono. Este análisis se efectuó duplicando las columnas y vigas que existen en el límite entre los bloques octógono y rectángulo, definiendo así una junta. Se realizaron los correspondientes análisis sísmicos para cada una de las partes de la estructura. Los resultados determinarán si será necesario reforzar las estructuras.

##### 4.2.1 Análisis para el bloque del octógono separado (fig. 7)

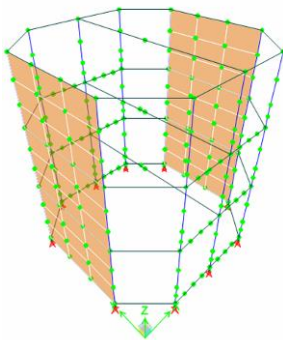


Fig.7 Se muestra el modelo para el bloque del octógono separado

Para el análisis sísmico se consideran los mismos factores sísmicos considerados anteriormente. En el caso de los factores de reducción se consideran los correspondientes a una estructura regular:  $R_x= 8$  (Estructura regular),  $R_y= 3$  (Estructura regular).

Se obtuvieron los desplazamientos de entrepiso indicados en la Tabla 2.

| Tabla 2. Bloque del octógono |                 |                 |
|------------------------------|-----------------|-----------------|
|                              | Dirección X     | Dirección Y     |
|                              | $0.75R\Delta/h$ | $0.75R\Delta/h$ |
| PISO1                        | 0.42% < 0.7%    | 0.13% < 0.5%    |
| PISO2                        | 0.03% < 0.7%    | 0.14% < 0.5%    |
| PISO3                        | 0.48% < 0.7%    | 0.05% < 0.5%    |

Finalmente se concluye que el bloque del octógono cumple con los límites de desplazamiento dados por la Norma NTE-E0.30.

4.2.2 Análisis para el bloque de rectángulos separado (fig. 8)

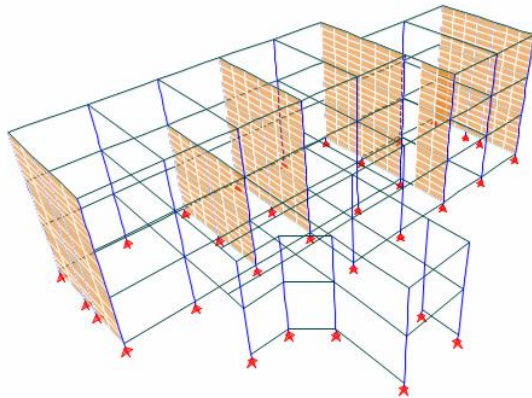


Fig.8 Se muestra el modelo para el bloque de rectángulos separado.

Para el análisis sísmico se consideran los mismos factores sísmicos considerados anteriormente. En el caso de los factores de reducción se consideran los correspondientes a una estructura irregular, con lo que se reducen los valores por 0.75:  $R_x = 0.75 \times 8 = 6.0$  ,  $R_y = 0.75 \times 3 = 2.25$ .

Se obtuvieron los desplazamientos de entrepiso indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. Bloque de rectángulos

|      | Dirección X     | Dirección Y     |
|------|-----------------|-----------------|
| PISO | $0.75R\Delta/h$ | $0.75R\Delta/h$ |
| 1    | 1.95% > 0.7%    | 0.19% < 0.5%    |
| 2    | 1.62% > 0.7%    | 0.17% < 0.5%    |
| 3    | 0.81% > 0.7%    | 0.09% < 0.5%    |

Observamos que la estructura no cumple con los desplazamientos límites en la dirección “X”, donde se han aislado los muros de albañilería. En cambio, la dirección “Y” correspondiente a los muros de albañilería, cumple con los límites establecidos por la Norma NTE-E0.30.

4.2.3 Conclusiones de la segunda modificación estructural

Después de efectuar los análisis sísmicos para cada uno de los bloques componentes de la estructura, ahora separados por medio de una junta, se ha observado que solamente el bloque de los rectángulos presenta deficiencia en la rigidez lateral, por lo que será necesario realizar modificaciones en este bloque.

Se plantearon alternativas de reforzamiento para el bloque de los rectángulos con el fin de poder llegar a la solución que técnica y económicamente sea la más adecuada.

**5. ALTERNATIVAS DE REFORZAMIENTO EN EL BLOQUE DE RECTÁNGULOS**

**5.1 Primera alternativa de reforzamiento.**

Se aumentó la rigidez de la estructura incrementando el peralte de las columnas, pero teniendo en cuenta el no modificar el funcionamiento de la arquitectura. Se mantuvo la posición de los vanos de ventanas, puertas y el empalme con los muros de albañilería que son ahora tabiques aislados.

Se planteó entonces peraltar las columnas rectangulares por medio de alas en el plano de los tabiques de albañilería. De esta manera tenemos entonces columnas con secciones “T” en las columnas intermedias y “L” en las esquinas, Ver Fig.9.

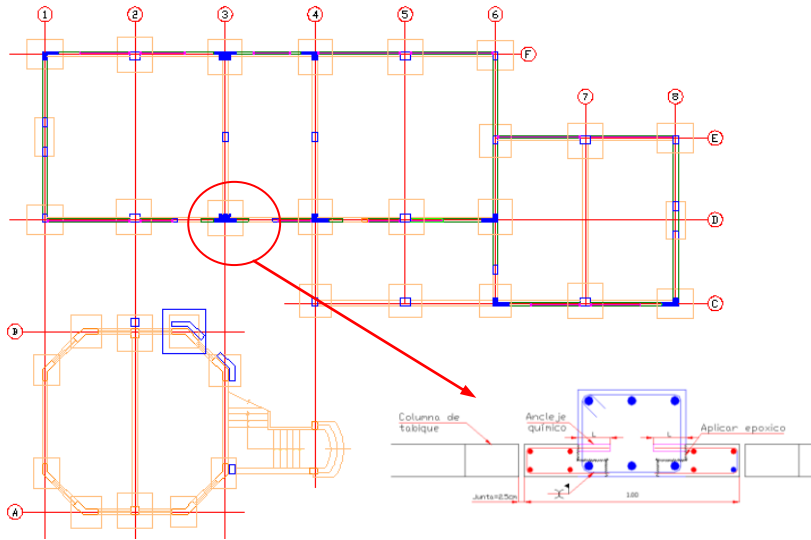


Fig.9 Muestra el planteamiento de reforzamiento en las columnas.

Se obtuvieron los desplazamientos de entrepiso indicados en la Tabla 4.

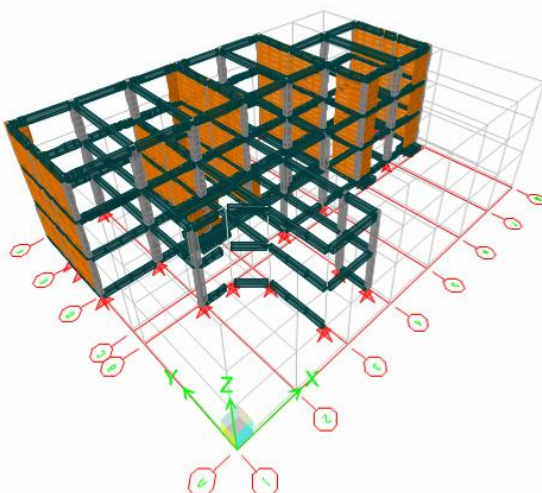
Tabla 4 Bloque de rectángulos con refuerzos tipo 1

|      | Dirección X      | Dirección Y      |
|------|------------------|------------------|
| PISO | $0.75R\Delta/h$  | $0.75R\Delta/h$  |
| 1    | $1.11\% > 0.7\%$ | $0.18\% < 0.5\%$ |
| 2    | $0.94\% > 0.7\%$ | $0.15\% < 0.5$   |
| 3    | $0.49\% > 0.7\%$ | $0.07\% < 0.5$   |

Se puede observar que la rigidez de la estructura sigue siendo deficiente en la dirección de los pórticos. A pesar de esto, cuando se ha seguido aumentando tentativamente la dimensión de las columnas no se ha obtenido resultados satisfactorios. Por lo tanto, se ha decidido considerar otra alternativa de reforzamiento.

### 5.2 Segunda alternativa de reforzamiento.

Al observar que lo expuesto en la alternativa 1 no satisface los requerimientos de la Norma E030 en lo que respecta a los desplazamientos laterales, se plantea una alternativa de solución para incrementar la rigidez de la estructura en la dirección X-“X” estudiada.



En esta alternativa 2, se planteó colocar placas de concreto armado donde existen tabiques de albañilería de manera de no modificar la arquitectura. Las placas que se colocaron son de 15 cm de espesor de acuerdo a lo indicado en los planos del reforzamiento y en el modelo estructural (Ver Fig. 10)

Fig.10 Se muestra el modelo estructural modificado, en el cual se incluyen las nuevas placas para rigidizar la estructura. Los parámetros sísmicos Z, U, S y C son los considerados anteriormente a excepción del factor de reducción  $R_x$ , ya que el sistema estructural en la dirección “X” es ahora dual; por lo tanto:  
 $R_x=3/4 \times 7=5.25$  (Estructura irregular)  
 $R_y=3/4 \times 3=2.25$  (Estructura irregular)

Se obtuvieron los desplazamientos de entrepiso de la Tabla 5.

Tabla 5. Bloque de rectángulos con refuerzos tipo 2

|      | Dirección X     | Dirección Y     |
|------|-----------------|-----------------|
| PISO | $0.75R\Delta/h$ | $0.75R\Delta/h$ |
| 1    | 0.70% <> 0.7%   | 0.14% < 0.5%    |
| 2    | 0.69% > 0.7%    | 0.11% < 0.5     |
| 3    | 0.56% > 0.7%    | 0.07% < 0.5     |

Se observa que con el reforzamiento planteado se cumple con los límites de desplazamiento establecidos por la Norma NTE-E0.30.

### 5.3 Verificación, Reforzamiento y Diseño de los Elementos Estructurales

#### 5.3.1 Verificación y reforzamiento en el bloque del octógono

Se verificó la resistencia de los elementos estructurales obteniéndose los siguientes resultados.

- Resistencia de los muros ante sismo severo - dirección “Y” (sí cumple en el primer piso con lo exigido en la Norma NTE-E.070).
- Resistencia de los muros ante sismo moderado - dirección “Y” (sí cumple en todos los pisos con lo exigido en la Norma NTE-E.070).
- Zapatas (algunas zapatas han requerido ser ampliadas y reforzadas).
- Vigas de conexión (una viga de conexión requiere ser reforzada por flexión).
- Columnas (las columnas cumplen por resistencia).
- Vigas de techos (algunas vigas han requerido ser reforzadas por flexión).

#### 5.3.2 Verificación y reforzamiento en el bloque de rectángulos

Se verificó la resistencia de los elementos estructurales obteniéndose los siguientes resultados.

- Resistencia de los muros ante sismo severo - dirección “Y” (No cumple en el primer piso con lo exigido en la Norma NTE-E.070).  
 Por esta deficiencia, se requirió incrementar la resistencia la corte de la edificación en la dirección Y. Se plantearon dos alternativas de reforzamiento.

Primera alternativa:

Se planteó reemplazar dos de los muros más largos por placas de concreto armado, con esta alternativa se logró que se cumpla con lo exigido por la NTE-E.070.

Segunda alternativa:

Se planteó adicionar paralelamente a los muros más largos dos placas de concreto, de manera que estas placas se apoyen en su propia cimentación y tomen el corte del edificio por medio de conectores a la losa del primer piso. Estas placas sólo tomarán carga de sismo pero no carga vertical, con la desventaja de que reduce el ambiente en el que se construirían.



Se escogió finalmente la segunda alternativa, ya que resultó ser más económica que la primera. Esto se entiende puesto que en la primera se deben demoler los muros de albañilería para ser reemplazados por placas de concreto.

- Resistencia de los muros ante sismo moderado - dirección "Y" (después del reforzamiento, sí cumple en todos los pisos con lo exigido en la Norma NTE-E.070).
- Zapatas (algunas zapatas han requerido ser ampliadas y reforzadas).
- Vigas de conexión (algunas vigas de conexión requieren ser reforzadas por flexión).
- Columnas (las columnas cumplen por resistencia).
- Placas ( se han diseñado e incorporado las nuevas placas consideradas)
- Vigas de techos (algunas vigas han requerido ser reforzadas por flexión).

## **6. COSTOS DEL PROYECTO DE REFORZAMIENTO**

Se han dibujado los planos de las estructuras reforzadas para toda la edificación, con el fin de tener un costo aproximado del proyecto de reforzamiento. De acuerdo a los trabajos de reforzamiento y modificación estructural de estos planos se han elaborado los presupuestos en las especialidades de arquitectura y estructuras.

Los metrados han sido realizados de acuerdo a los planos del reforzamiento que forman parte del presente trabajo con apoyo de los planos del proyecto original del CE. Fermín del Castillo.

Se han tenido en cuenta precios referenciales vigentes al 2009.

Para el CE Fermín del Castillo, se ha obtenido de la base de datos de INFES, el valor del presupuesto total contratado para la construcción. El presupuesto contratado para la construcción original fue de S/. 775,100.66, costo que corresponde a todas las especialidades en el periodo 18/08/1994 al 10/05/1995.

También se pudo encontrar en la base de datos de INFES el presupuesto contratado para las obras de reforzamiento y reparación de los daños que la edificación sufriera durante el sismo del 12 de Noviembre de 1996. En este caso el presupuesto contratado fue de S/. 63,125.00 en un periodo de obra del 01/12/2006 al 30/12/2006.

Se puede observar que el costo por la reparación y reforzamiento representó el 8.14 % del costo total de la obra.

El presupuesto correspondiente al proyecto de reforzamiento propuesto en este trabajo asciende a S/. 104,707.56, el que incluye las especialidades de arquitectura y estructuras. Este monto significa el 13.5% del valor total de la obra, teniendo en cuenta que los costos han variado desde la fecha del presupuesto contratado.

## **7. CONCLUSIONES**

Después de haber desarrollado los análisis, el estudio de alternativas de reforzamiento y el desarrollo de la alternativa más adecuada según lo sustentado, el presente trabajo llega como producto final a un proyecto de reforzamiento, manteniendo en lo posible la arquitectura original.

A continuación se listan las conclusiones finales referidas exclusivamente al aspecto técnico que involucran los análisis, reforzamientos y diseños.

- Como se concluyó oportunamente, la estructura original ha presentado deficiencias estructurales básicamente de resistencia, por lo que se procedió a ensayar diversas alternativas de modificaciones en la estructura. Las modificaciones sirvieron para entender el comportamiento de la estructura y cómo mejorarlo.

- Después de separar los bloques del octógono y de los rectángulos 780, se efectuaron las verificaciones para los elementos estructurales existentes en resistencia y condiciones de servicio, obteniendo que el bloque de los rectángulos requería mayor reforzamiento que el bloque del octógono.
- Se estudiaron dos alternativas de reforzamiento para el bloque de los rectángulos. La primera consistió en aislar los muros de albañilería que conforman tabiques en el eje longitudinal y aumentando la sección de las columnas en forma de “T” con el fin de aumentar la rigidez lateral. Como esta alternativa no fue suficiente para cumplir las exigencias de la Norma, se planteó una segunda alternativa, que consistió en adicionar placas de concreto armado con el fin de rigidizar la edificación cambiando el sistema estructural resistente.
- La segunda alternativa solucionó la deficiencia de rigidez de la estructura del bloque de los rectángulos en la dirección longitudinal.
- Como los muros de albañilería de cabeza en la dirección “Y” no cumplían los requerimientos de resistencia al corte mínima de la edificación, se plantearon dos alternativas de reforzamiento. La primera consistió en reemplazar 2 muros de albañilería por placas de concreto; paralelamente se planteó una segunda alternativa que consistía en adicionar placas en forma paralela a dos muros de albañilería, con el fin de incrementar la resistencia al corte de la edificación. Se escogió la segunda alternativa por ser más económica.
- Se procedió a verificar y reforzar los diferentes elementos estructurales con esta última configuración estructural.
- El costo de reparar la estructura en 1996 ascendió al 8.14% del costo inicial. Con el proyecto de reforzamiento propuesto en este trabajo el costo con precios del 2009 ascendería al 13.5% del costo inicial de la obra.

## REFERENCIAS

- 1.- SENCICO “Norma de Diseño Sismorresistente E.030”, Lima, 2003
- 2.- Quiun D., San Bartolomé A., Torrealva D., y Zegarra L. “Daños Producidos en Edificaciones por el Terremoto de Nasca del 12 de Noviembre de 1996”, Ponencias XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú, Trujillo, Perú, 1997.
- 3.- Calagua Mendoza Fernando, Tesis de Maestría, ESTUDIO DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DEL CENTRO EDUCATIVO FERMÍN DEL CASTILLO, Lima, 2009.
- 4.- INFES, Planos del proyecto estructural de Modulos 780 con octógono, Lima, 1993
- 5.- CISMID FIC UNI, “Sismo de Nasca del 12 de Noviembre de 1996”, Revista “EI INGENIERO CIVIL” N°107 y 108, Lima, Marzo-Junio 1997.
- 6.- SENCICO “Norma de Albañilería E.070”, Lima, 2006.