



Histórico, situación y refuerzo de los campanarios de la basílica de la Penha-Recife-Brasil

C.W.A. P. Sobrinho^{1,2}, A. C. Costa²

¹ Laboratório de Tecnologia Habitacional, Instituto de Tecnologia de Pernambuco. Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, UPE. Brasil.

Información del artículo DOI:

Artículo recibido el 05 de Septiembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 25 de Enero de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2017.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 3, Septiembre – Diciembre 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org.

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: Septiembre de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

En este trabajo se presentan y discuten el histórico, situación actual, técnicas y estrategias originales empleadas en el desarrollo del diseño de refuerzo estructural de ambos campanarios de la Basílica de la Iglesia de Penha. Técnicas de reparación mal diseñadas, llevadas a cabo en 1981, junto con ausencia de mantenimiento preventivo, filtraciones e incluso el crecimiento de arbustos incrustados en la mampostería, llevaron a la inestabilidad de los campanarios de la Basílica de la Iglesia de la Penha.

Palabras clave: fortalecimiento de albañilería; monumentos históricos; técnicas de refuerzo; estrategias de implementación; fibras de carbono.

ABSTRACT

This paper presents and discusses the history, current situation, original techniques and strategies used in the development of structural reinforcement design of both towers of the Basilica of Penha Church. Repair techniques poorly designed, conducted in 1981, along with lack of preventive maintenance, leaks and even the growth of bushes embedded in the masonry led to the instability of the towers of the Basilica of Penha Church.

Keywords: reinforcing masonry; historic monuments; reinforcement techniques; execution strategies; carbon fibers.

RESUMO

Este artigo apresenta e discute a história, situação atual, técnicas e estratégias utilizadas no reforço estrutural desenvolvimento design original de ambas as torres da Basílica da igreja de Penha. Mal concebido técnicas de reparo, realizada em 1981, juntamente com a falta de manutenção preventiva, vazamentos e até mesmo o crescimento de arbustos embutidas na alvenaria levou à instabilidade das torres da Basílica da igreja de Penha.

Palavras chave: reforço em alvenarias; monumentos históricos; técnicas de reforço; estratégias de execução; fibras de carbono.

Autor de contacto: Carlos Welligton Pires Sobrinho (carlos@itep.br)

1. INTRODUCCIÓN

La Basílica de Nuestra Señora de la Penha, Orden de los Hermanos Menores Capuchinos, es un edificio imponente en el paisaje urbano del sector de San Jose muy marcado por la presencia de torres delgadas altas y una enorme cúpula del cruzeiro, símbolos de una religiosidad fuerte que orientó el ambiente urbano de la formación inicial de la ciudad de Recife. Entre el inicio de la construcción (1656) y la terminación de su obra, que tomo mas de 200 años, debido a la expulsión de los calvinistas franceses de Recife, por orden del tribunal Portugués (CECI,2014).

La Figura 1 muestra el registro histórico del edificio al inicio del siglo XX. El edificio tiene una nave central y un par de torres estilizadas como "minarettes", donde recientemente han sido observados en sus columnas internas, en la torre de la campana de espacio, una serie de rajaduras y deslizamientos de tierra y materiales de una acción bastante extensa, raíces de plantas que crecieron y ramificaron entre los bloques de una torre.

En 1981, las intervenciones de refuerzo y llenado las ventanas ventilación (Araujo 2010) fueron hechos, los refuerzos fueron identificados con la inclusión de algunas columnas y barras de acero en elementos de hormigón armado.

En 2010, debido a lo grave de las manifestaciones patológicas tuvieron aberturas y rajaduras en algunas columnas y pérdida de revestimiento interno y externo, los refuerzos fueron insertados en estructuras de madera en las ventanas entre 8 columnas de estructura de bloques de las torres.



Figura 1. Imagen histórica de la Basílica de la Penha. Detalle de la torre del campanario sin ventilación.

Las Figuras 2 y 3 muestran el aspecto externo de una de las torres, mostrando detalle del tipo de refuerzo utilizado en las columnas que constituyen la torre de la Epístola.



Figura 2. Vista actual de la torre Epístola



Figura 3. Refuerzo en las columnas del campanário

En las Figuras 4 a 6 es posible observar aspectos de grandes grietas en las columnas del campanário generadas por la oxidación de las armaduras en estas columnas.



Figuras 4 a 6. Grietas causadas por la oxidación de los estribos de acero de las columnas

2. INVESTIGACIONES REALIZADAS

Para realizar el proyecto de refuerzo para las dos torres fueron realizadas las caracterizaciones del comportamiento mecánico en las muestras retiradas de la edificación y un análisis numérico para determinar las acciones que actúan en las torres.

2.1 Caracterización físico-mecánica de la edificación

Las características físicas y mecánicas de la edificación fueron obtenidas a través de la inspección por prospección en áreas de la región de la torre de la Epístola, a través de la perforación y corte de los bloques con disco doble diamantado, siendo las muestras enviadas al laboratorio del ITEP-Instituto de Tecnología de Pernambuco.

Las tentativas de obtención de muestras a través de la perforación con broca diamantada de 4" no se comportaron eficientemente, ya que la necesidad de cortar con lubricación hidráulica favorecía la disolución del mortero y del propio bloque, ya que tanto el mortero base de cal como el bloque calcinado sufrían con la acción de los movimientos del disco y la acción del agua. Para conseguir la

obtención de muestras en la albañilería fué necesario utilizar disco de corte doble diamantado, según se muestra en las figuras 7 y 8.



Figura 7. Proceso de retirada de muestras utilizando disco doble diamantado.



Figura 8. Muestra retirada del bloque encaminada para el laboratorio.

Las muestras fueron cortadas y preparadas en cuatro especímenes para la realización de los ensayos de compresión, siendo utilizada la prensa con control con capacidad de 30ton, permitiendo registrar el comportamiento posterior a la ruptura.

Para la determinación del módulo de elasticidad longitudinal y transversal fueron instalados deflectómetros con precisión de milésimas de milímetros en la sección transversal de aplicación de carga y utilizados LVDTs en la medición de los movimientos longitudinales. LA composición de las figuras 9 a-d muestran aspectos característicos de los ensayos sobre el comportamiento a compresión de las muestras.



a) Muestra 1



b) Muestra 2



c) Muestra 3



d) Muestra 4

Figuras 9 a-d. Comportamiento a compresión de las muestras

De esta evaluación, y análisis de la resistencia característica, conforme recomendaciones de la norma NBR 15182-2 fué obtenido

$$f_{pk} = 1,15 \text{ MPa}$$

2.2 Tensiones solicitantes

Las cargas requeridas solicitantes fueron obtenidas con base al modelo numérico teniendo por base el método de los elementos finitos (Mamaghani,2004) siendo la estructura de bloques modelada con elementos sólidos de formas variadas, los pisos en elementos de placas combinados con elementos de membrana y la flecha de la cubierta de las torres en elementos tipo casquete. Fue utilizado el sistema

computacional SAP2000 para obtención de las tensiones, siendo a este informado de las densidades y las características del comportamiento a compresión (módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson). La figura 10 muestra aspectos de los elementos sólidos utilizados y los resultados de las tensiones en los elementos que componen una de las torres.

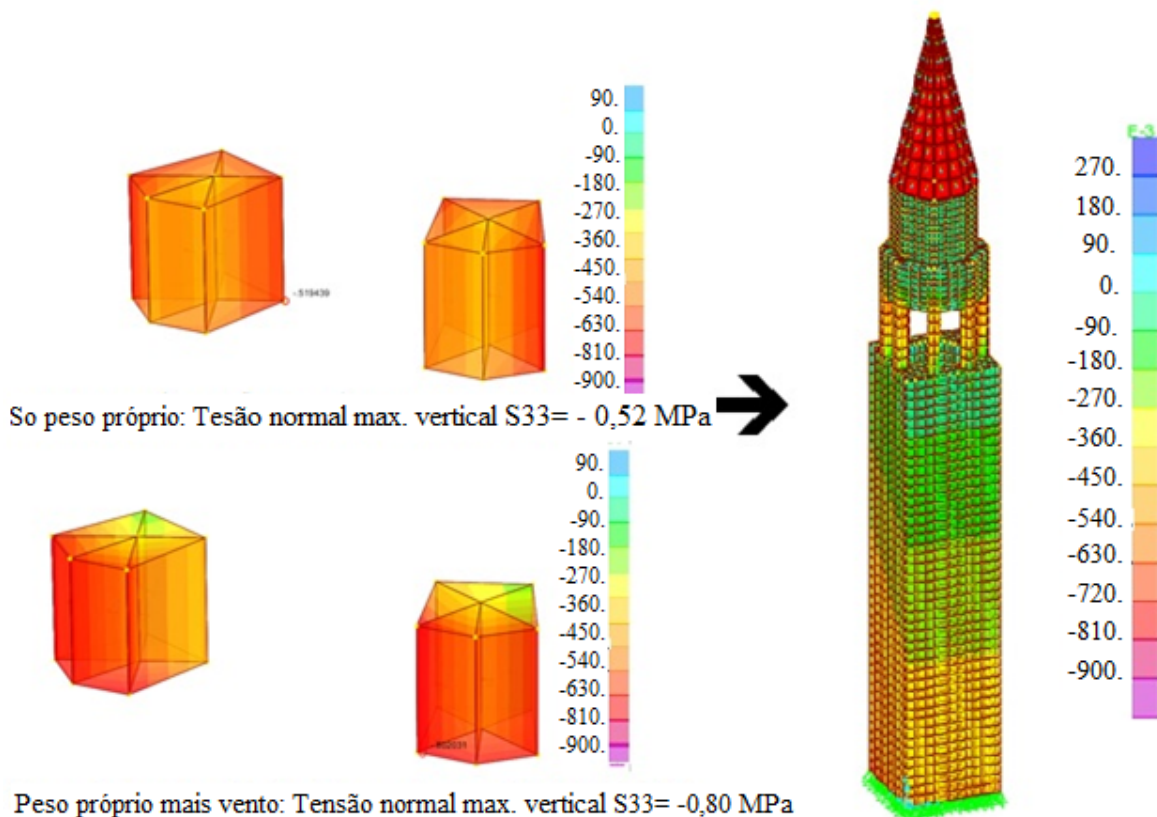


Figura 10. Resultados del análisis numérico de la torre de la Epístola en la Basílica

Las imágenes presentadas en la figura 10 muestran que las regiones más críticas de concentración de tensiones están en la base de las columnas del campanario, alcanzando el valor de 0,52MPa debido apenas al peso propio es de 0,80MPa cuando se considera la acción combinada del peso propio y la acción del viento.

2.3 Análisis de seguridad estructural

Considerando los resultados de las tensiones solicitantes, en especial en la región próxima a las bases de las columnas del campanario, alcanzó máximos valores entre 0,52MPa y 0,80MPa y considerando que la resistencia característica de las muestras fué determinado en 0,63MPa.

Estos valores muestran que la acción del viento y las tensiones superan la capacidad resistente de las columnas, inclusive sin considerar los factores de seguridad normalmente existentes cuando se procede a un dimensionado. De esta forma las estructuras de refuerzo provisionales, construídas con estructuras de madera en los vedos de las ventanas del campanario están actuando de forma decisiva, evitando colapso en esta región.

Los resultados de estos análisis están coherentes con la situación que se presenta en las columnas del campanario de la torre de Epístola, presentando elevado estado de fisuración e indicativos de ruina localizada.

Así se concluye que es extremadamente necesario un refuerzo que duplique la capacidad resistente, atendiendo así a los principios normativos de seguridad estructural.

3. ANTEPROYECTO DE REFUERZO ESTRUCTURAL

3.1 Principios del anteproyecto de refuerzo

Los sistemas compuestos estructurados con fibras de carbono son eficientes para la absorción de esfuerzos de compresión, impidiendo, por medio del confinamiento de la sección de las piezas axialmente solicitadas, el crecimiento de la deformación transversal de materiales, que originan la actuación da carga axial.

El efecto de la presión de confinamiento es inducir un estado triaxial de tensiones en las paredes y en esas condiciones los bloques, u otro material frágil, altera sustancialmente su comportamiento a compresión, tanto en la resistencia como es la ductilidad (Fiorelli,2002).

En las figuras 11 y 12 muestran la diferencia de comportamiento a compresión de un elemento de concreto, que podría ser de bloque, con o sin confinamiento transversal.

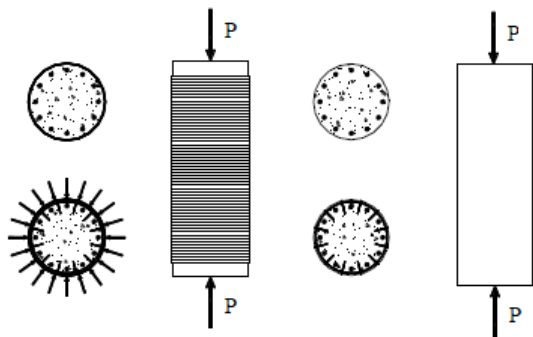


Figura 11. Tensiones y deformaciones en sistemas confinados y no confinados

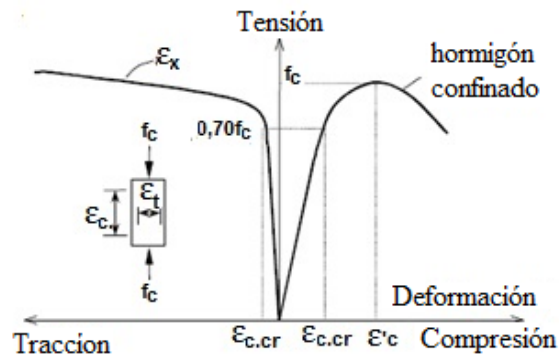


Figura 12. Configuración típica de una pieza de concreto confinada y no confinada

Además del efecto propiciado por el confinamiento, promovido por el sistema de fibras de carbono y resina epoxy, habrá la sustitución del revestimiento de mortero a base de cal por revestimiento a base de mortero polimérico a base de cemento y aditivos químicos.

3.2 Determinación da influencia del refuerzo

Las características a compresión de este mortero polimérico en relación al mortero de cal son sustancialmente mayores, pudiendo superar en 15 veces la resistencia a compresión en más de 35 veces el valor del módulo de elasticidad longitudinal, ver tabla 1.

Tabla 1. Características mecánica de los materiales

Material	Resistencia a compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Fonte
Paredes de bloques y mortero de cal	2,0	0,40	Ensayos en muestras (ITEP)
Mortero polimérico	30,0	15,0	Características de producto (Viapol,2015)

El efecto propiciado por el confinamiento, promovido con el uso del sistema compuesto de fibras de carbono y resina epoxy podrá llevar en hasta 30% la capacidad resistente de una pieza comprimida.

Asi mismo combinando los efectos de la sustitución del revestimiento con el confinamiento en las secciones externas transversales de las columnas propicia um incremento de la capacidad resistente de esos elementos que |ponen el campanario.

Las figuras 13 y 14 muestran el posicionamiento de las columnas que presentan las situaciones más críticas en términos de concentración de tensiones.

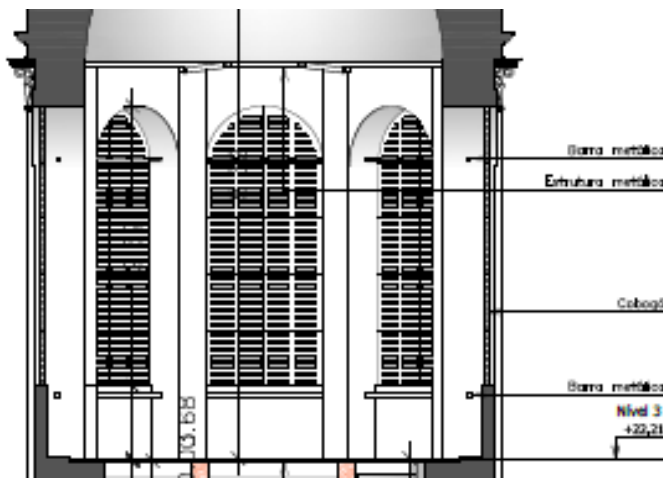
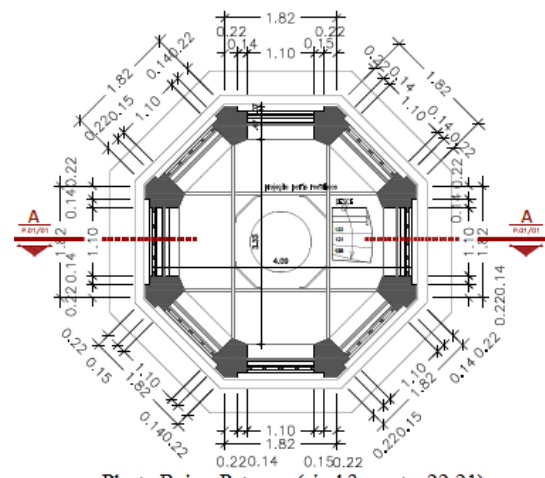


Figura 13. Región de las columnas del campanario

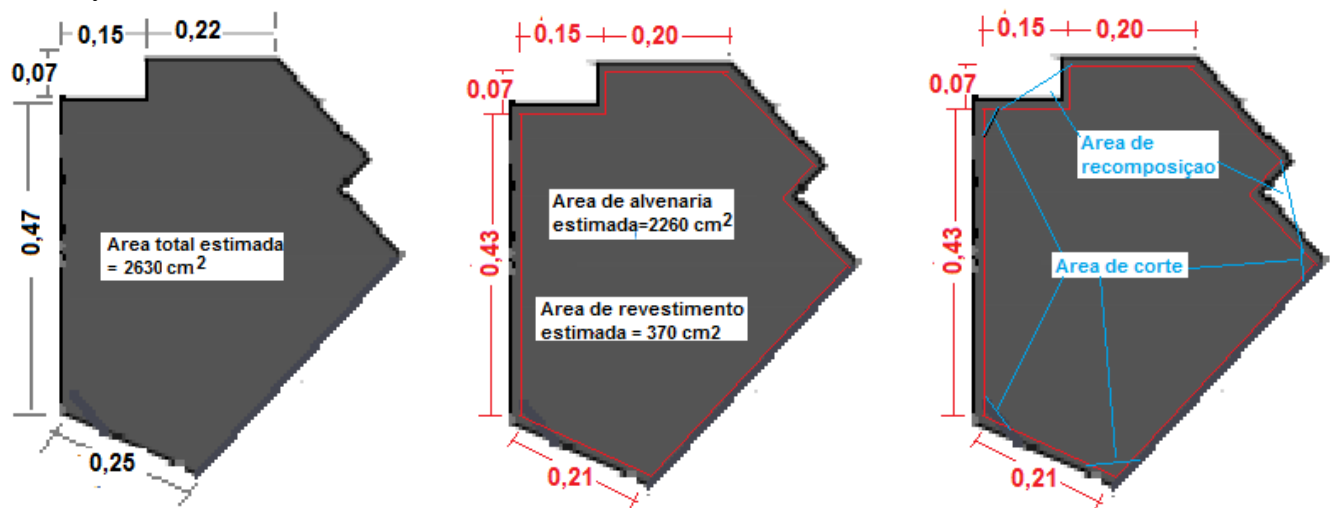


Planta Baja - Patamar (nivel 3 cuota: 22.21)

Figura 14. Planta baja en la base de las columnas

La evaluación de las áreas de la sección transversal de una de las columnas a ser reforzadas está considerada en la figura 15.

Prácticamente luego de las intervenciones de corte (desbastamiento de las esquinas) y acondicionamiento, necesario para lograr el amarre transversal de las columnas, las áreas estimadas de paredes y revestimiento no se alteran.



a) sección transversal de una columna no campanario

b) secciones de bloques y revestimiento

c) acondicionamiento y recomposición de las áreas

Figura 15. Evaluación del área posterior a las intervenciones necesarias a la colocación del refuerzo

La evaluación de las cargas actuantes y resistentes en la base de las columnas del campanario, puede ser estimada en:

- a) Carga total actuante, debido al peso propio, considerando el modelado numérico

$$S_{pp}=5,20*2630=13,676 \text{ ton}$$

- b) Carga total actuante, debido a la acción combinada de peso propio y viento, se tiene:

$$S_{pp}=8,00*2630=21,040 \text{ ton}$$

c) Resistencia de las paredes actualmente, considerando la resistencia característica del ensayo.

$$R_a = 6,30 * 2630 = 16.569 \text{ ton}$$

d) Resistencia estimada para las paredes reforzada con sustitución del revestimiento de mortero de cal por mortero polimérico

$$R_{r1} = 6,30 * 2260 + 300 * 370 = 127,569 \text{ ton}$$

e) Resistencia estimada para el refuerzo con uso de la cinta fibra de carbono

$$R_{r2} = 127,569 * 1,20 = 153,082 \text{ ton}$$

De esta forma se puede considerar que el refuerzo propuesto posibilita una elevación de la resistencia de las columnas en 7 veces su capacidad resistente y si se compara la carga actuante en la base de las columnas debido a la acción combinada del peso propio y el viento. De esta forma, el refuerzo propuesto presenta un coeficiente de seguridad en el orden de 7,0, muy superior a los 2,0 recomendado por las normas de albañilería.

4. PROCEDIMIENTOS DE REFUERZO

A continuación serán presentados los procedimientos para la ejecución del refuerzo estructural.

4.1 Procedimientos básicos para refuerzo de las estructuras de albañilería.

Los procedimientos básicos seguidos para la ejecución de refuerzo en paredes fueron:

4.1.1 Demolición y retiro del revestimiento existente, con desbaste de las esquinas y limpieza de las áreas que serán reforzadas

En las áreas a ser reforzadas los revestimientos existentes deberán ser retirados, pudiendo para ello utilizar piedra de amolar de corodur acoplado al esmeril, de esta forma no habrá impactos significativos en la estructura de bloques, conforme se muestra en la figura 16a.

Las esquinas vivas deben ser rebajadas, y luego de hacerlo y retirado todo el revestimiento, las áreas deberán ser limpiadas eliminando el polvo, pudiendo para ello utilizar chorro de aire a presión, ligeramente húmedo, según se muestra en la figura 16b.



Figura 16a. Proceso de rebajado del revestimiento con piedra de amolar



Figura 16b. Esquema de aplicación de chorro de aire y rebajado de las esquinas

4.1.2 Preparación y emparejado de la superficie

Las áreas que recibirán refuerzo, según el proyecto, se les debe preparar la superficie recibiendo aplicación de primer para poder llenar los vacíos para colocar la capa de mortero polimérico que homogeniza la superficie, como es indicado en las figuras 17a e 17b.

Este mortero deberá tener consistencia adecuada para su aplicación con brocha metálica sobre la superficie imprimada.

La superficie final debe presentar acabado liso y compacto.

Luego de 3 días de la aplicación del mortero se procede a la aplicación de otra capa de primer.



Figura 17a. Esquema del proceso de preparación



Figura 17b. Aplicación de primer como preparación de superficie

4.1.3 Procedimiento de aplicación de mantas de fibra de carbono

La superficie de las paredes ya preparada con una capa primaria de epoxi aplicada con un rodillo. Típicamente, este producto tiene una baja viscosidad lo que facilita su penetración a la pared. La función de esta capa es proporcionar una adherencia adecuada a la superficie de la estructura (Grande 2011).

Luego de la aplicación y rhomogenización en la masa es entonces aplicado el epóxi + carbonatos para corregir y eliminar los defectos de superficie que pueden perjudicar la aplicación.

Luego de regularizar y hacer la aplicación de la primera capa de resina. La superficie de la estructura es cubierta con saturación de resina epoxi. Esta resina, de alta viscosidad, ayuda a mantener el CFC y la posición correcta. La saturación impregnado de la fibra siendo aplicada, también ayuda en los esfuerzos de las fibras y abrasión protección.

La aplicación de las mantas de fibras de carbono, cortadas en la dimensión de las superficies y la geometría del área, es aplicada a la saturación de resina epoxi.

Continua con la aplicación de resina saturante de la capa superior reforzado y son hechas a los largo de toda el área de modo que el sistema es escondido.

Posterior a que todas las capas de CFC hayan sido aplicadas, se regulariza con compuesto de mortero polimérico y fibras plásticas.

La figura 18 muestra los procedimientos para la aplicación de las mantas de fibra de carbono.

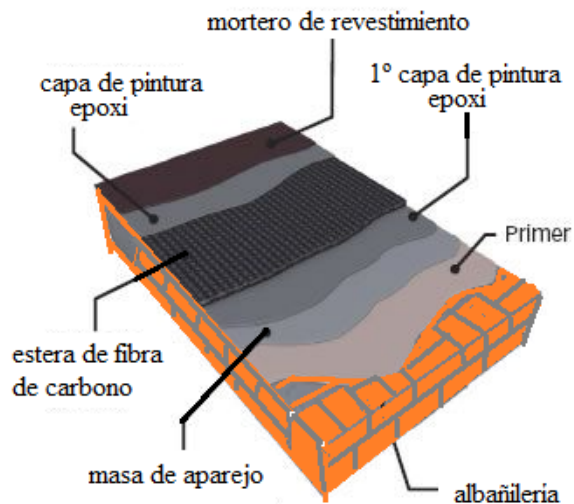


Figura 18. Sistema CFC

4.2 Estrategia para la recuperación de las torres

Considerando la situación crítica en que están los elementos que componen las torres, desde la pérdida de revestimiento de las piezas de cobre en la cubierta de las flechas, ocasionando la degradación de elementos estructurales de dicha cubierta, de la acción de degradación de arbustos crecieron y se ramificaron en el tambor de la torre de la epístola hasta el cuadro indicativo de ruina en las bases de las columnas del campanario. Para proceder a la recuperación de las torres, se debe desarrollar una Estrategia para su ejecución en las das etapas de refuerzo de las torres.

4.2.1 Procedimiento para la limpieza e inyección de epóxi en las columnas fisuradas

En las columnas fisuradas en lo alto del campanario hay la necesidad de limpiar y rellenar con resina epoxy para la recuperación del estado monolítico, esquemáticamente presentada en la figura 19 [5].

- Limpieza de las fisuras con chorro de aire a presión;
- Sujeción de partes de las armaduras impregnadas dentro de las fisuras, de manera de no provocar daños mayores;
- Perforación de orificios a lo largo de la fisura y colocación de los acoples, rellenando la parte externa con epoxy + cemento;
- Inyección de resina epoxy, con baja presión, en lós acoples, de abajo hacia arriba, de forma a rellenar las fisuras.



Figura 19. Proceso de inyección: colocación de acoples e inyección a través de bomba inyectora de epoxy

4.2.2 Procedimientos para retirar las chapas de cobre de la cubierta de los pórticos.

- Preparación de estructura auxiliar para apoyo de una plataforma para andamios: Insertar en las bases del campanario elementos de madera que apoyarán 4 perfiles metálicos trasapantes, que sostendrán las líneas de andamios.
- Montar las 8 columnas de andamios hasta llegar al borde de la base del pórtico, apretandolos contra las paredes de bloque;
- Colocar una reja/red de protección sobre los andamios en el sentido de evitar la caída de objetos del prótico;
- Con ayuda de una grúa, acoplada a una estructura de protección, retirar las piezas de cobre de la cubierta de los pórticos.

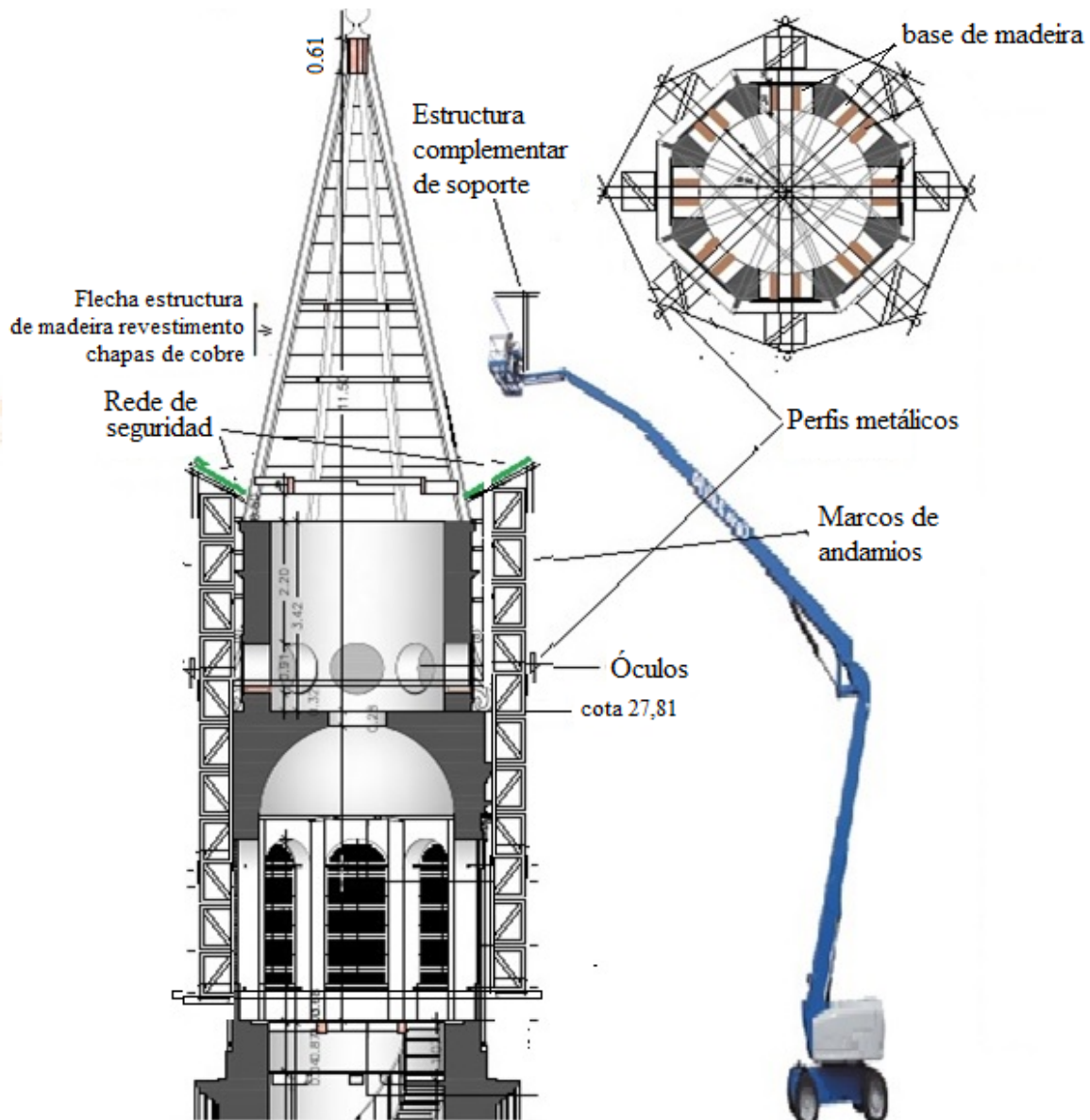


Figura 20. Esquema do processo

4.2.3 Procedimiento para refuerzo en las columnas del campanario

Las ocho columnas que componen el campanario, están actualmente con refuerzo provisional en estructura de madera y con bloques de ventilación.

Para promover el refuerzo de estas columnas, en pares y opuestas, deberá ser utilizada la técnica de refuerzo con sustitución del revestimiento existente y amarre con fibras de carbono.

- a) Luego se inicia el tratamiento de fisuras, según 4.2.1.
- b) Se promueve el corte del área de ventilación alrededor del par de columnas seleccionadas;
- c) Remover el revestimiento y su desbaste de las esquinas, conforme lo descrito en 4.1.1;
- d) Promover el refuerzo conforme lo descrito en 4.1.2 y 4.1.3;
- e) Respetar este procedimiento para otros pares de columnas opuestos.

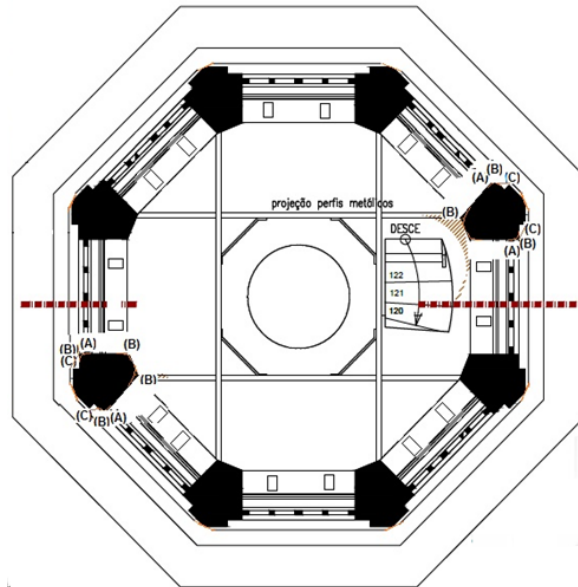


Figura 21. Planta baixa no nível 22.21

4.2.4 Procedimiento para la retirada de los arbustos enraizados en la torre de la Epístola y ejecución del refuerzo de la estructura de madera de la cubierta.

Los arbustos que crecieron y se enraizaron en la torre de la Epístola necesitan ser cuidadosamente retirados.

Luego del retiro del revestimiento de las flechas se procede a la investigación de la estructura de madera que compone las flechas de la cubierta de las torres.

- a) Identificar los elementos de madera que se dañaron y promover su refuerzo;
- b) Los refuerzos pueden utilizar chapas de acero y tornillos inoxidables, pudiendo ser necesario preparar de nuevas piezas de madera.



Figura 22. Detalle de la situación de la cubierta

4.2.5 Procedimiento de refuerzo de fibrar en el contorno externo de las torres

En las regiones externas del contorno de las torres, en los niveles 18,00, 25,00, 27,00, 29,00 y 31,00, serán desarrollados refuerzos, conforme las etapas que se ilustran en la figura 23:

- Preparación de estructura auxiliar para apoyo de una plataforma para andamios: Insertar en las bases del campanario elementos de madera que apoyarán 4 perfiles metálicos traspasante, los cuales sustentaran las líneas de andamios.
- Montar las 8 columnas de andamios hasta alcanzar el borde de la base de la flecha, ajustandolos contra las paredes de bloque;
- Colocar una reja/red de protección sobre los andamios en el sentido de evitar la caída de objetos de la flecha;
- Con auxilio de una grúa, acoplado a una estructura de protección, retirar las piezas de cobre de la cubierta de las flechas.

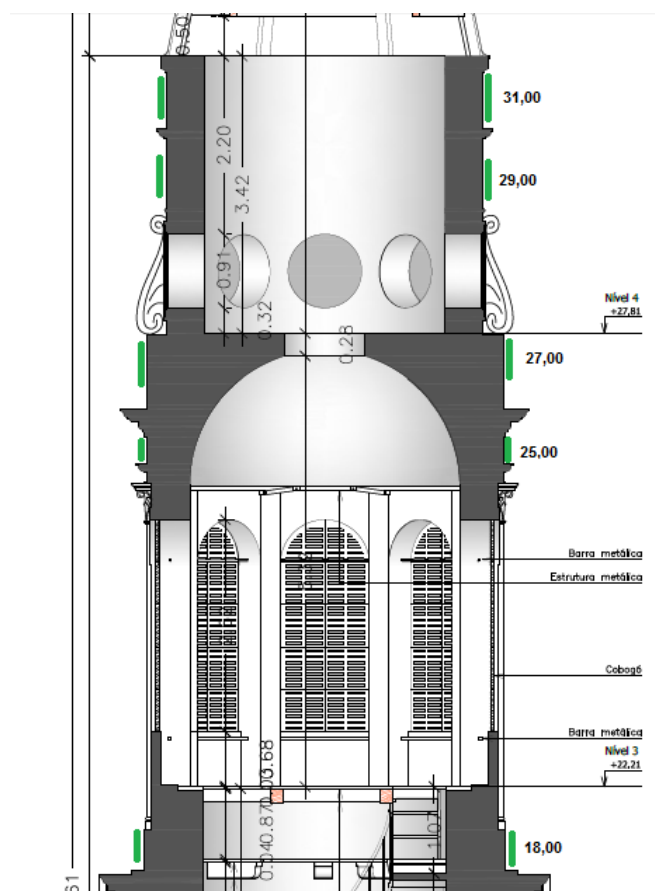


Figura 23. Refuerzo con cintas das columnas

5. CONSIDERACIONES FINALES

La situación que se encuentra las torres de la Basílica de la Penha muestra indicativos preocupantes en lo que se refiere a la estabilidad estructural. En la evaluación realizada no existe reserva de seguridad, o refuerzo provisional implantado está actuando de forma efectiva y plena, por tanto nuevos indicios de ruina estan a la vista.

La propuesta de refuerzo presentada posibilita no solo la retirada del refuerzo provisional con los aislamientos de ventilación construídos posteriormente a la construcción de la basílica en el siglo XVIII.

El uso de refuerzo a base de sustitución de mortero de cal por mortero polimérico y cintas en fibras de carbono, pueden ser recubiertas por una nueva capa de mortero a base de cal con reconstitución de detalles arquitectónicos y detalles semejantes a los originales.

El refuerzo en fibras de carbono y mortero polimérico no sufren degradación con la humedad y acciones naturales de intemperismo, son así consideradas durables.

6. REFERENCIAS

- Araujo, R. A. D (2010), *Sistema construtivo das torres sineiras da Basílica da Penha*. Parecer técnico. CECI- Centro de Estudos Avançados da Conservação Integrada (visita site 2014). <http://www.ceci-br.org/obras/penha.htm>
- Corum, J. M., Bettiste, R. L., Lui, K. C., Ruggles, M. B (2000), *Basic properties crossply carbon-fiber composite*. OAK Ridge National Laboratory-tennessee, USA.
- Fiorelli, J. (2002), *Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para refuerzo de vigas de madeira*. Dissertação de mestrado UFSC, 138pgs.
- Grande E., Imbimbo M., Sacco E. (2011) *Bond behaviour of CFRP laminates on clay bricks: experimental and numerical study*. Compos Part B 42:330–340
- Mamaghani, I. H. P. (2004), *Analysis of masonry structures by discrete finite elements method. Proceedings of the fourth International Seminar on structural analysis of historical constructions*. Vol 1, pg 650-666. Padova, Italy.
- Viapol- *Manual de Refuerzo das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono*. visita site 2015) www.viapol.com.br/media/123118/manual-viapol-2015