

**Evaluación Preliminar y Diagnóstico de las Patologías de las Estructuras: Torres
Enfriadoras de Agua de la Refinería de Barrancabermeja**

Adriana Cristina Chía Campo

**Monografía Presentada Como Requisito Para Optar al Título de Especialista en
Estructuras**

Director

Harold A Muñoz

Ingeniero Civil - MSc

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2019

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos	19
2. Alcance	20
3. Definiciones Técnica	21
3.1 Contracción de Secado.....	21
3.2 Porosidad en el Concreto	22
3.3 Petrología	22
4. Levantamiento de Daños y Lesiones	23
4.1 Torre Enfriadora TE - 801E.....	23
4.1.1 Registro Fotográfico Torre Enfriadora 801E.....	25
4.1.2 Levantamiento de Daños Torre Enfriadora TE-801E.....	36
4.1 Levantamiento de Daños Torre Enfriadora TE-801E.....	37
4.1.3 Pre-Concepto y Diagnóstico Torre Enfriadora TE-801E.....	40
4.2 Torre Enfriadora TE-850	43
4.2.1 Registro Fotográfico Torre Enfriadora 850.	43

4.2.2 Levantamiento de Daños Torre Enfriadora TE-850	52
4.2.3 Pre-Concepto y Diagnóstico Torre Enfriadora TE-850.	55
4.3 Torre Enfriadora TE-2940	56
4.3.1 Registro Fotográfico Torre Enfriadora 2940.	57
4.3.2 Levantamiento de Daños Torre Enfriadora TE-2940.	67
4.3.3 Pre-Concepto y Diagnóstico Torre Enfriadora TE-2940.	70
5. Propuesta y Alcance de Estudio Complementario.....	72
5.1 Ensayos y evaluación de campo	73
5.1.1 Determinación de la posición del refuerzo.	73
5.1.2 Determinación de la profundidad de carbonatación.	73
5.1.2.1 Seguimiento de la profundidad de carbonatación.	75
5.1.3 Determinación de la cuantía aproximada de cemento.	78
5.1.3.1 Determinación de la cuantía aproximada de cloruros.	78
5.1.4 Determinación de la cuantía aproximada de sulfatos.	79
5.1.5 Determinación de los parámetros de corrosión electroquímica (potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistividad del concreto).....	80
5.1.5.1 Resistividad eléctrica en $k\Omega.cm$	81
5.1.6 Determinación de la resistencia a compresión del concreto.	82
5.1.7 Determinación de la velocidad del pulso ultrasónico.	83
5.1.8 Determinación de la porosidad, densidad y absorción del concreto.	84
5.1.9 Ensayos de petrografía.....	84
5.2 Levantamiento de lesiones y elaboración de planos	86

5.3 Estudio de Vulnerabilidad Sísmica.....	87
6. Conclusiones.....	88
Referencias Bibliográficas	90

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema general de una torre de enfriamiento	17
Figura 2. Vista en planta de la TE-850	17
Figura 3. Ubicación TE-850 y TE-801E	20
Figura 4. Ubicación TE-850 y TE-2940	21
Figura 5. Fotografía detalle de la condición particular del concreto de la torre TE801-E	24
Figura 6. Fotografía vista general de la torre enfriadora TE-801E	25
Figura 7. Fotografía vista general del costado oriental de la TE-801 E	26
Figura 8. Fotografía detalle del muro superior del costado oriental	26
Figura 9. Fotografía detalle zonas con lesiones debidas a la corrosión del refuerzo	27
Figura 10. Fotografía de las columnas del costado oriental	27
Figura 11. Fotografía del muro del costado sur	28
Figura 12. Fotografía detalle de la presencia de fisura localizada debajo de la escalera de espesores de 0.6 mm	29
Figura 13. Fotografía detalle acumulación del producto de la permeabilidad de la junta de construcción - sobre la viga del nivel medio	30
Figura 14. Fotografía detalle del muro superior del costado occidental	31
Figura 15. Fotografía detalle muro superior y viga sobre columnas en el costado occidental	32
Figura 16. Fotografía detalle de las lesiones debidas a la corrosión en una de las columnas del costado occidental	33

Figura 17. Fotografía detalle del estado de la viga sobre columnas en el costado occidental.....	34
Figura 18. Fotografía vista de otra de las columnas del costado occidental.....	35
Figura 19. Fotografía vista general de un sector del costado sur de la TE-801 E	35
Figura 20. Fotografía detalle del estado de un sobrecimiento en el costado sur	36
Figura 21. Código empleado para levantamiento de lesiones.....	37
Figura 22. Planta de la torre TE-801E	38
Figura 23. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado oriental	38
Figura 24. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado occidental	39
Figura 25. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado norte	40
Figura 26. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamiento de lesiones – costado sur	40
Figura 27. Fotografía vista general del costado oriental de la TE-850	43
Figura 28. Fotografía detalle fisuras en el muro del tanque en el costado oriental y vista de las celdas de este mismo costado	44
Figura 29. Fotografía detalle fisuración del muro del costado oriental	45
Figura 30. Fotografía fisuras costado occidental	45
Figura 31. Fotografía detalle fisuración del muro del costado occidental.....	46
Figura 32. Fotografía vista de la celda No.2 del costado occidental	46
Figura 33. Fotografía vista del interior de la celda central del costado occidental.....	46
Figura 34. Fotografía detalle fisura existente en el costado occidental	47
Figura 28. Fotografía de archivo en la que se muestra el estado del costado sur hace 4 años.	48

Figura 36. Fotografía del muro del costado sur actualmente.....	48
Figura 37. Fotografía detalle de la grieta (2.0-5.0 mm) en el costado sur a la altura de la viga que tiene la TE-850, sobre los extremos superiores de las columnas.....	49
Figura 38. Fotografía detalle de medición de ancho de fisura en el muro del costado sur	49
Figura 39. Fotografía detalle de la interacción de la tubería de bombeo con la estructura de concreto	50
Figura 40. Fotografía grieta (ancho variable hasta 3.0 mm) sobre la viga del muro oriental	51
Figura 41. Fotografía vista del costado norte de la TE-850.....	51
Figura 42. Fotografía columna con lesiones en el costado occidental de la TE-850.....	52
Figura 60. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado oriental	53
Figura 61. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado occidental	53
Figura 45. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado norte	54
Figura 46. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado sur	55
Figura 47. Fotografía vista general de la torre enfriadora TE-2940	58
Figura 48. Fotografía vista general del costado oriental de la TE-2940	58
Figura 49. Fotografía detalle del tipo de fisuración en la TE-2940	58
Figura 50. Fotografía detalle de la situación descrita con los pasantes de fijación de la formaleta	59

Figura 51. Fotografía detalle de la situación que se presenta en todos los muros de la TE-2940 (exceptuando los muros del tanque)	60
Figura 52. Fotografía grietas recurrentes que coinciden con las columnas que no se prolongaron hacia y hasta la cubierta	60
Figura 53. Fotografía detalle fisuras en el muro del tanque en el costado oriental	61
Figura 54. Fotografía de una de las grietas del costado occidental permeando, de anchos variables (0.3 a 2.0 mm).....	62
Figura 55. Fotografía vista del costado norte a nivel de la altura del tanque (2.50 m).....	62
Figura 56. Fotografía deterioro de la pantalla 5 y detalle del estado del concreto de la torre TE-2940.....	63
Figura 57. Fotografía detalle fisuras en la viga de borde por su cara inferior (sobre las columnas)	64
Figura 58. Fotografía detalle de medición de ancho de fisura en el muro del costado sur en la zona de la viga.....	64
Figura 59. Fotografía vista del costado sur	65
Figura 60. Fotografía vista interior de una de las celdas del costado oriental	65
Figura 61. Fotografía de las columnas de la TE-2940	66
Figura 62. Fotografía vista de la parte superior del muro costado norte	66
Figura 63. Fotografía detalle de las tuberías pasantes en el tanque	67
Figura 64. Planta de TE-2940	68
Figura 65. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado oriental	68

Figura 66. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado occidental	69
Figura 67. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado sur	70
Figura 68. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado norte	70
Figura 69. Proceso de la carbonatación (.....	74
Figura 70. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes contenidos del cemento por kg/m^3	77
Figura 71. Relación entre la profundidad de la carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes relaciones a/c.	77

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Los efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación.....	69
Tabla 2. Criterio de valoración de medidas de resistividad	82

Resumen

Título: Evaluación Preliminar y Diagnóstico de las Patologías de las Estructuras: Torres Enfriadoras de Agua de la Refinería de Barrancabermeja.*

Autor: Adriana Cristina Chía Campo.**

Palabras Clave: Diagnóstico patológico, torres enfriadoras.

Descripción:

Las estructuras objeto de esta evaluación son las torres enfriadoras de agua, las cuales hacen parte de una serie de equipos que proveen servicios industriales a las diferentes plantas de proceso de la refinería de Barrancabermeja. Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, extrayendo el calor del agua mediante evaporación o conducción. El pre-concepto y diagnóstico dado obedece al criterio técnico basado en el levantamiento realizado de las estructuras, a lo investigado en la bibliografía de referencia y lo aprendido en el curso de patología dictado como una asignatura en la especialización.

El presente trabajo permite concluir que los espesores de recubrimiento mayores a 4.0 cm han protegido las estructuras del deterioro, evitando que la carbonatación avance de manera significativa. Así mismo, no se evidencian lesiones importantes debidas al fenómeno de la corrosión; sin embargo, se constata que la capa más expuesta de la superficie del concreto es fácilmente removible, concluyéndose que el concreto está siendo vulnerable a un ataque ácido.

Finalmente, los criterios aquí expuestos pretenden generar conciencia de la necesidad de realizar un estudio mucho más profundo, que permita generar una propuesta de rehabilitación completa y fundamentada, para que las edificaciones puedan seguir operando de forma segura por mucho más tiempo.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras. Director: Harold A Muñoz. Ingeniero Civil - MSc

Abstract

Title: Preliminary Evaluation and Diagnosis of the Pathologies of the Water Cooling Towers Structures of the Barrancabermeja Refinery.*

Autor: Adriana Cristina Chía Campo.**

Keywords: Pathological diagnosis, cooling towers.

Description:

The structures object of this evaluation are the water cooling towers, which are part of a series of equipment that provide industrial services to the different process plants of the Barrancabermeja refinery. Cooling towers are equipment that is used to cool water in large volumes, extracting heat from water by evaporation or conduction. The pre-concept and diagnosis given is due to the technical criteria based on the survey carried out of the structures, to what was investigated in the reference bibliography and what was learned in the pathology course dictated as a subject in the specialization.

The present work allows us to conclude that the coating thicknesses greater than 4.0 cm have protected the structures from deterioration, preventing carbonation from progressing significantly. Likewise, no significant injuries due to the phenomenon of corrosion are evident; however, it is found that the most exposed layer of the concrete surface is easily removable, concluding that the concrete is being vulnerable to an acid attack.

Finally, the criteria set forth here are intended to raise awareness of the need for a much deeper study, which allows generating a comprehensive and well-founded rehabilitation proposal, so that buildings can continue to operate safely for much longer.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras. Director: Harold A Muñoz. Ingeniero Civil MSc.

Introducción

La Refinería de Barrancabermeja está ubicada a orillas del río Magdalena, se extiende en un área de 254 hectáreas, en las que se distribuyen más de cincuenta plantas y unidades de proceso, tratamiento, servicios y control ambiental; convirtiéndose en una ciudadela industrial con más de 90 años de operación. Desde la década de los 80, la Refinería inició una tercera fase de modernización con la ampliación de la capacidad para el procesamiento de crudo de 130.000 a 170.000 barriles por día (Fuente: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/complejo-barrancabermeja>).

En la actualidad, el complejo es un activo estratégico para Ecopetrol, actualizado tecnológicamente y preparado para atender, junto con la Refinería de Cartagena (Reficar), la demanda de combustibles de los colombianos; es por esto que desde hace 16 años la ciudadela industrial ha desarrollado un proceso de transformación centrado en el mejoramiento de las competencias técnicas y organizacionales de su talento humano, en la incorporación de altos estándares de la industria y en la modernización de su infraestructura (Fuente: <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/la-refineria-de-barranca-sigue-con-la-llama-viva-515178>).

De lo anterior nace la iniciativa de realizar un diagnóstico patológico de una estructura en particular e importante para la operación de las plantas, ya que proveen de servicios industriales necesarios para la operación, como lo son las torres enfriadoras de agua, cuyo diagnóstico inicial

servirá para desarrollar un proyecto enmarcado en desarrollar un estudio patológico más profundo que concluya respecto al estado actual de la estructura, males que la aquejan (desde el punto de vista de su resistencia a los agresores presentes en el medio), nivel de deterioro y, sobre esta base, definir la mejor estrategia de rehabilitación tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Las estructuras objeto de esta evaluación son las torres enfriadoras de agua las cuales hacen parte de una serie de equipos que proveen de servicios industriales en este caso específico agua a las diferentes plantas. Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, extrayendo el calor del agua mediante evaporación o conducción. El proceso es económico, comparado con otros equipos de enfriamiento como los cambiadores de calor donde el enfriamiento ocurre a través de una pared.

Las torres enfriadoras son estructuras de concreto reforzado (ver Figuras 1 y 2), compuestas por la cimentación, un tanque que recoge el agua a enfriar, un pozo de bombas las cuales impulsan el agua hacia la parte superior de la torre, desde donde desciende atravesando un sistema de rejillas de material sintético, (travesía que le hace perder calor con el medio). La superestructura de la torre es una estructura dual con muros pantalla o de cortante (exteriores) y columnas sobre las caras oriental y occidental que sostienen el muro de fachada, la losa de cubierta y un sistema de conos por donde escapa el vapor de agua. Las celdas así formadas permiten el ingreso de aire frío hacia el interior de la torre. Los conos inicialmente se construyeron en concreto, sin embargo, hace algunos años han sido reemplazados por conos en material sintético debido al deterioro que estos presentaban, condición que ha ayudado a aliviar las cargas estructurales en las torres enfriadoras.



Figura 1. Esquema general de una torre de enfriamiento (Fuente: <http://www.climayoreo.com/blog/torres-de-enfriamiento>).

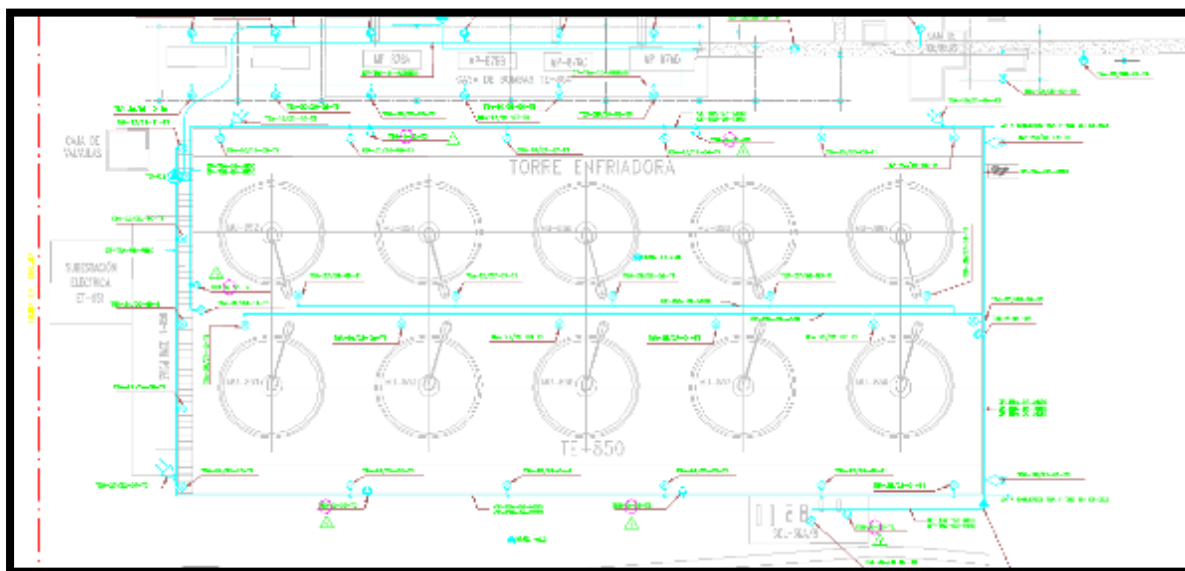


Figura 2. Vista en planta de la TE-850 (Fuente: archivo técnico de la Refinería de Barrancabermeja).

La evaluación de las estructuras se llevó a cabo mediante la inspección visual, levantamiento de daños, evidencia con la cual se pretende concluir acerca del estado actual de las mismas y sobre

esta base dar un preconcepto de lo que le puede estar ocurriendo a cada una de las torres que fueron seleccionadas para esta evaluación.

La evaluación no incluye ningún tipo de análisis estructural, ni de riesgo sísmico. Se evaluó solamente el perímetro de las torres (superficie expuesta). No se evaluó la cimentación, ni el interior de la torre debido a que estaban en operación.

1. Objetivos

Realizar el levantamiento de lesiones mediante inspección visual del edificio de las torres enfriadoras de agua de la Refinería de Barrancabermeja, específicamente las torres 801E/850/2940, identificando la patología de los materiales (resistencia del concreto) y nivel de deterioro encontrado, de tal forma que se aplique lo visto en la materia de patología estructural.

Generar un diagnóstico inicial bajo una inspección visual y técnica que permita identificar males, deterioros y demás aspectos que se puedan encontrar, desde el punto de vista de la resistencia de los materiales (concreto y acero) y nivel de deterioro encontrado, de tal forma que se pueda dar un preconcepto de lo que le puede estar ocurriendo a cada una de las torres que fueron seleccionadas para esta evaluación y proponer el alcance de un proyecto de rehabilitación estructural a partir de estudios patológicos más completos elaborados por profesionales con experiencia en el tema.

2. Alcance

Las torres enfriadoras objeto de esta monografía fueron seleccionadas de tal forma que quedaran geográficamente distantes, permitiendo evaluar la similitud o diferencia en las patologías encontradas dependiendo de los agentes agresivos presentes en cada área; por esta razón fueron seleccionadas las torres 801E, 850 y TE-2940 (ver ubicación dentro de la refinería en las Figuras 3 y 4).

La inspección visual consistió en el levantamiento de lesiones (visual y fotográfico), a partir del cual se pretende efectuar un diagnóstico inicial que permita plantear un estudio de patología y vulnerabilidad completo que lleve a proponer una estrategia de rehabilitación que analice el origen de las causas y consecuencias de los daños y fallas que presenten las estructuras, de tal forma que se formulen las medidas correctivas; las cuales no dependen sólo del grado de deterioro, sino también, del nivel al cual quiera el propietario llevar la estructura, de la urgencia y tiempo disponible para llevar a cabo los trabajos y de la capacidad de inversión de la compañía.



Figura 3. Ubicación TE-850 y TE-801E (Fuente: Google maps, 7 de Agosto de 2019).

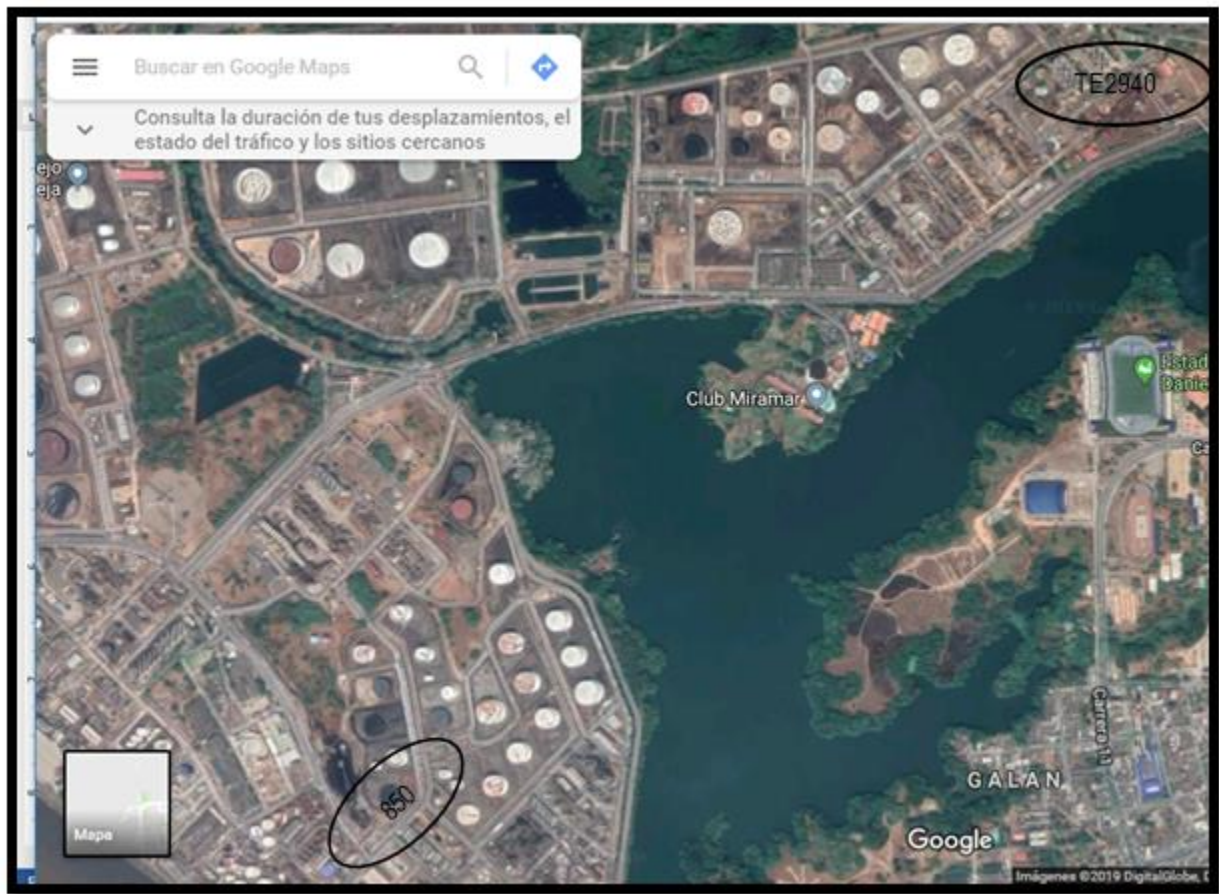


Figura 4. Ubicación TE-850 y TE-2940 (Fuente: Google maps, 7 de Agosto de 2019).

3. Definiciones Técnica

3.1 Contracción de Secado

Cuando el concreto es expuesto a su ambiente de servicio tiende a alcanzar un equilibrio con ese ambiente. Si el medio ambiente es una atmósfera seca, la superficie expuesta del concreto pierde agua por evaporación. La velocidad de evaporación dependerá de la humedad relativa, la temperatura, la relación agua – cemento y el área de la superficie expuesta del concreto (Revista del instituto mexicano del cemento y del concreto, 2006).

La contracción por secado constituye una porción del total de la deformación que se observa en un elemento del concreto (Harold Muñoz, 2019).

3.2 Porosidad en el Concreto

La porosidad del concreto es definida como la cantidad de espacios vacíos que quedan inmersos dentro de la masa del material como consecuencia de la evaporación del agua libre de la mezcla y de la presencia de aire naturalmente atrapado (P. Maiza, S Marfil, 2000). Cuando el concreto es elaborado y posteriormente empieza la etapa de fraguado, los constituyentes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras que el componente más liviano: el agua, flota en la superficie donde consecuentemente se evapora. El agua al estar ocupando un espacio, y teniendo en cuenta el aire atrapado, deja millones de huecos entrecruzados en todas las direcciones; estos espacios se unen entre si creando la porosidad y debilitando el concreto al generar unas pequeñas fisuras internas (S. Marfil, P. Maiza, R Salomón, 2002).

3.3 Petrología

Rama de la geología que se ocupa del estudio de las rocas, sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas, espaciales y cronológicas (García Casco, 2011).

4. Levantamiento de Daños y Lesiones

Teniendo en cuenta la ubicación, la presencia de cierto tipo de gases y por ser estructuras que se encuentran sometidas al constante proceso de humedecimiento y secado, se prevé que la acción sobre las estructuras de concreto reforzado en un medio industrial agresivo, rico en CO_2 (y en menor proporción en SO_2), da como resultado un ataque ácido sobre la estructura ; esto teniendo en cuenta que una vez el pH del concreto en la zona que rodea el refuerzo alcanza valores por debajo de 10.5 da lugar a la disolución de la capa pasiva, y en presencia de humedad y de oxígeno, empieza a desarrollarse el fenómeno de la corrosión (Corrosion of Steel in concrete, Digest 444 (part 1 to 3) 2000); por lo anterior se espera encontrar este fenómeno en las estructuras estudio de esta monografía.

4.1 Torre Enfriadora TE - 801E

La torre enfriadora TE - 801E es una estructura de concreto reforzado compuesta por la cimentación, un tanque que recoge el agua a enfriar que hace a su vez de pozo de bombas, las cuales impulsan el agua hacia la parte superior de la torre, desde donde desciende atravesando un sistema de rejillas de material sintético, (travesía que le hace perder calor con el medio). La superestructura de la torre es una estructura dual con muros pantalla o de cortante (exteriores) y columnas sobre las caras oriental y occidental que sostienen el muro de fachada, losa de cubierta y un sistema de conos por donde escapa el vapor de agua. Las celdas así formadas permiten el ingreso de aire frío hacia el interior de la torre. Los conos de concreto van a ser demolidos para

reemplazarlos luego por conos de material sintético, lo cual aliviará la estructura, este es un proyecto que ya está en ejecución.

La estructura tiene aproximadamente 48 años de construida y no se tiene registros de mantenimientos efectuados durante su vida en servicio. La posición de la estructura dentro de la refinería la expone permanentemente a un ambiente rico en CO_2 , H_2S y eventualmente cloro gaseoso lo que se nota de inmediato al inspeccionar la torre (ver Figuras de la 6 a la 20), ya que el ataque ácido la ha hecho perder pasta superficialmente (ver Figura 5). Los procesos físicos y químicos que afectan la estructura se ven beneficiados por la temperatura y la humedad reinantes en el medio.



Figura 5. Fotografía detalle de la condición particular del concreto de la torre TE801-E (Fuente: el autor).

En el costado sur (primer nivel) la superficie es tan blanda en sus dos primeros milímetros que puede retirarse con la uña.

4.1.1 Registro Fotográfico Torre Enfriadora 801E. A continuación, se presentan una serie de fotografías tomadas a las lesiones evidenciadas durante las visitas a campo (ver Figuras de la 6 a la 20) a la torre enfriadora TE-801E:



Figura 6. Fotografía vista general de la torre enfriadora TE-801E (Fuente: el autor).



Figura 7. Fotografía vista general del costado oriental de la TE-801 E (Fuente: el autor).



Figura 8. Fotografía detalle del muro superior del costado oriental (Fuente: el autor).

Se aprecia la grieta que trata de coincidir con la columna.



Figura 9. Fotografía detalle zonas con lesiones debidas a la corrosión del refuerzo (Fuente: el autor).



Figura 10. Fotografía de las columnas del costado oriental (Fuente: el autor).

Apariencia verdosa por acumulación de lama sobre ellas, al parecer no presentan otro tipo de deterioro.

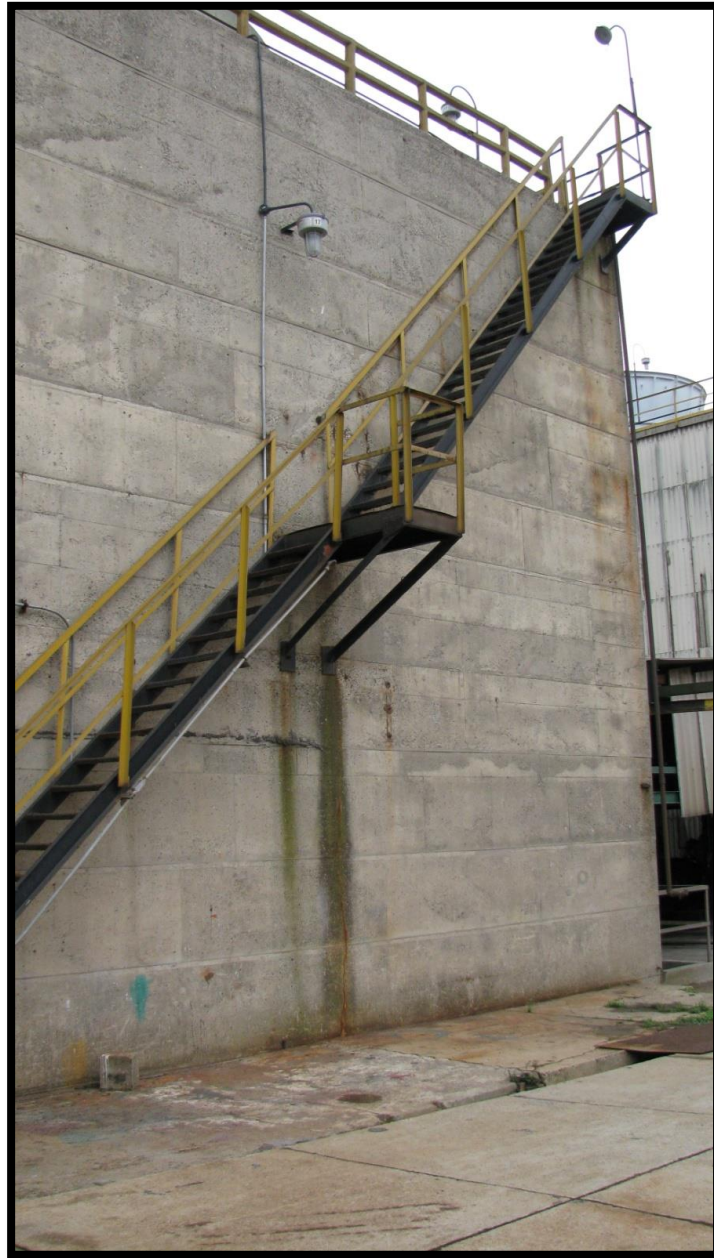


Figura 11. Fotografía del muro del costado sur (Fuente: el autor).

Presenta una fisura localizada debajo de la escalera (ver Figura 12 para ampliar detalle), y la dilatación de la junta debajo de la viga (ver Figura 13).



Figura 12. Fotografía detalle de la presencia de fisura localizada debajo de la escalera de espesores de 0.6 mm (Fuente: el autor).

Se aprecia el estado de la superficie con exposición del agregado.



Figura 13. Fotografía detalle acumulación del producto de la permeabilidad de la junta de construcción - sobre la viga del nivel medio (Fuente: el autor).

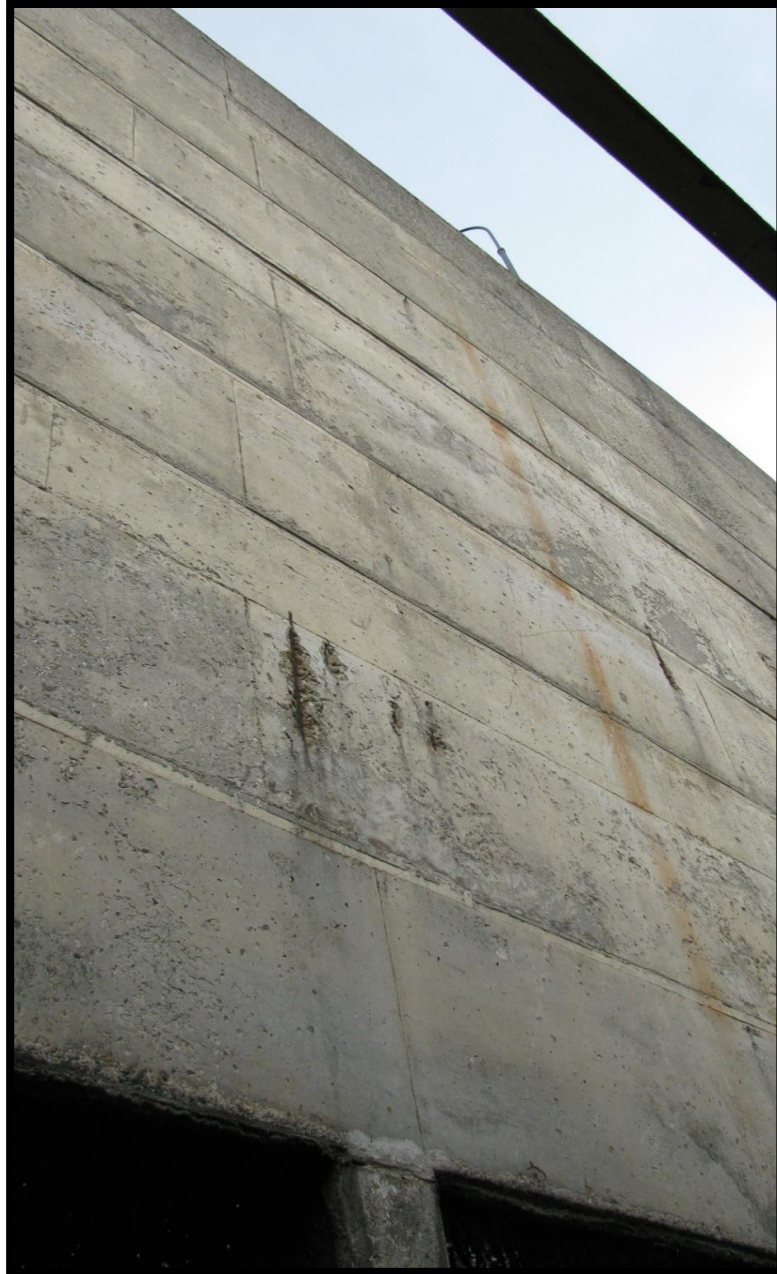


Figura 14. Fotografía detalle del muro superior del costado occidental (Fuente: el autor).

Se aprecian las lesiones que allí se presentan, en general se trata de zonas con pérdida de recubrimiento sobre el acero debido a la corrosión del mismo y algunas fisuras (ver Figura 15 de otro detalle similar del muro del costado occidental).



Figura 15. Fotografía detalle muro superior y viga sobre columnas en el costado occidental
(Fuente: el autor).

Se aprecian lesiones por corrosión del refuerzo y pérdida de recubrimiento en la viga. Esto debe repararse de inmediato antes de que se desarrolle un deterioro mayor que obligue a reconstruir elementos de la torre (ver Figuras 16, 17 y 18 de detalles específicos de viga y columnas).



Figura 16. Fotografía detalle de las lesiones debidas a la corrosión en una de las columnas del costado occidental (Fuente: el autor).

El bajo espesor de recubrimiento (menor a 5.0 cm) del acero de refuerzo, de acuerdo a lo especificado en el estándar técnico ECP-VST-P- CIV-ET-013 para acero de refuerzo de Ecopetrol y la presencia de humedad bañando el elemento aceleran este proceso de degradación.

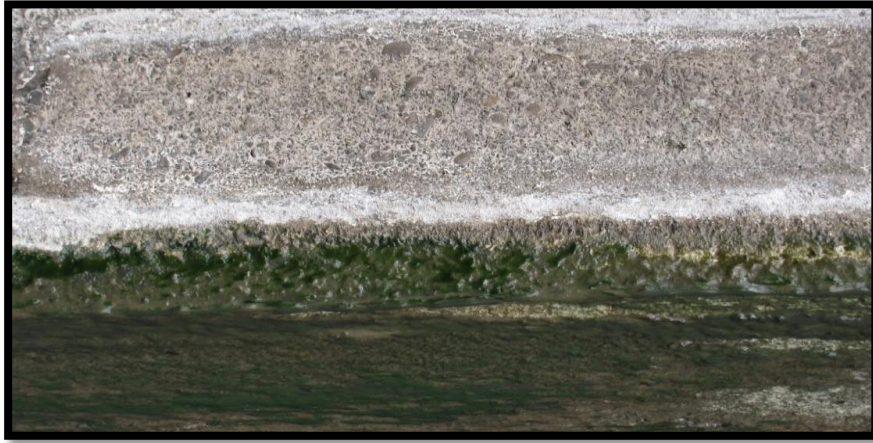


Figura 17. Fotografía detalle del estado de la viga sobre columnas en el costado occidental (Fuente: el autor).

Existe alguna pérdida de recubrimiento y presencia de lama (ataque biológico).



Figura 18. Fotografía vista de otra de las columnas del costado occidental (Fuente: el autor).

Se evidencian lesiones debidas a la corrosión.



Figura 19. Fotografía vista general de un sector del costado sur de la TE-801 E (Fuente: el autor).



Figura 20. Fotografía detalle del estado de un sobrecimiento en el costado sur (Fuente: el autor).

4.1.2 Levantamiento de Daños Torre Enfriadora TE-801E. Con base en lo evidenciado en la torre y mostrado en las fotografías anteriores, se desarrolla a continuación el levantamiento de daños mediante unos esquemas (ver Figuras 22, 23, 24, 25 y 26). Para la identificación de las lesiones se creó el siguiente código (ver Figura 21 Código empleado para levantamiento de lesiones en las tres torres), teniendo en cuenta que no existe un código único para determinar una lesión en patología estructural, con previa revisión del director se validó el código empleado:

	Fisura
	Grieta
	Inicio Corrosión Refuerzo Muros
	Inicio Corrosión Refuerzo Columnas
	Agrietamiento
	Corrosión del refuerzo en columnas con pérdida de recubrimiento.
	Corrosión del refuerzo en muros con pérdida de recubrimiento.

Figura 21. Código empleado para levantamiento de lesiones (Fuente: el autor).

Con el levantamiento de las diferentes caras de la torre se trató de representar la mayoría de lesiones que visualmente se identificaron (ver Figuras 22 - 26):



Diagrama de la estructura de la bodega No. 6, mostrando la sección transversal con el muro superior, la viga, las columnas y pantallas, y el murito tanque. Se indican las alturas (6,15, 0,85, 3,5, 0,42) y los anchos (0,3, 0,4). Se señalan las grietas que permea a la altura de la viga.

Figura 23. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado oriental (Fuente: el autor).

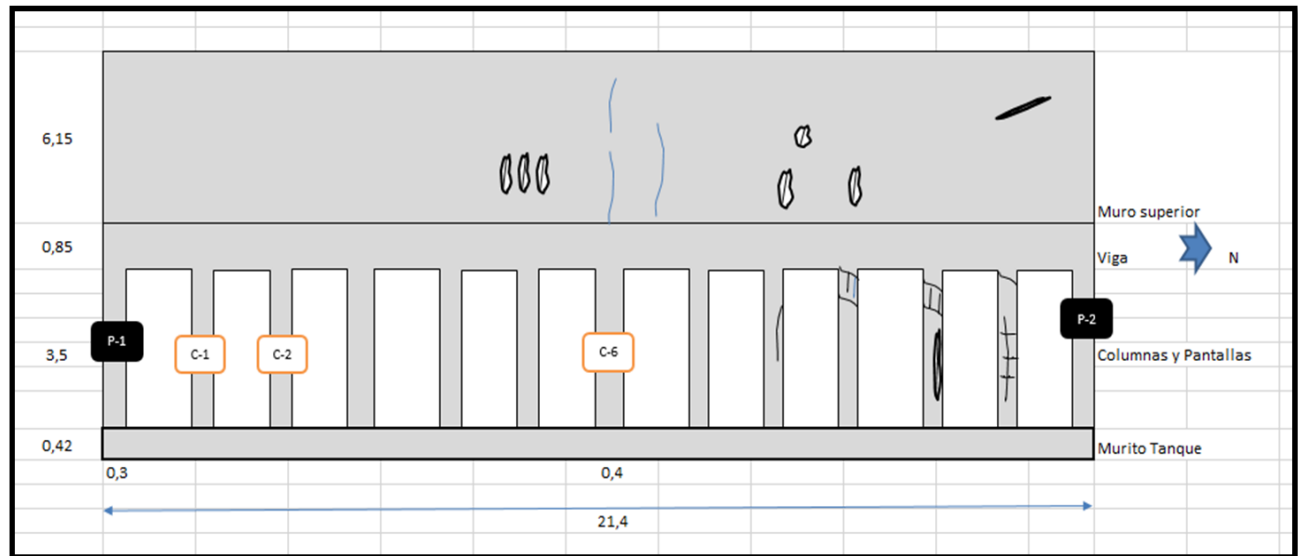


Figura 24. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado occidental (Fuente: el autor).

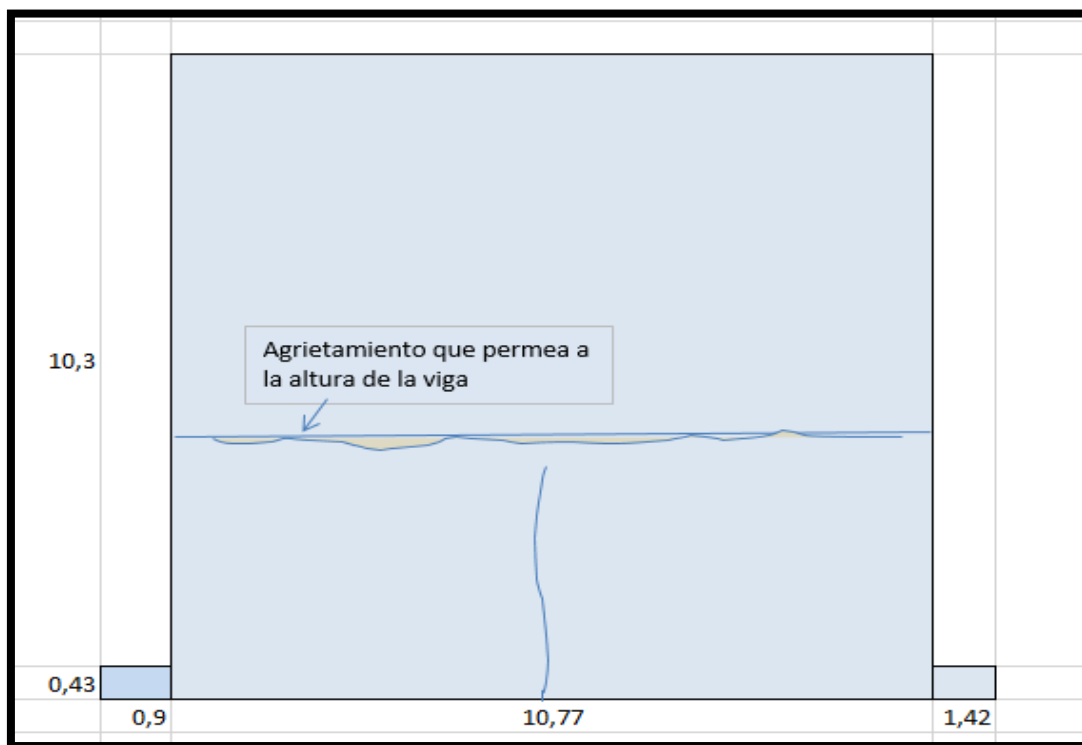


Figura 25. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado norte (Fuente: el autor).

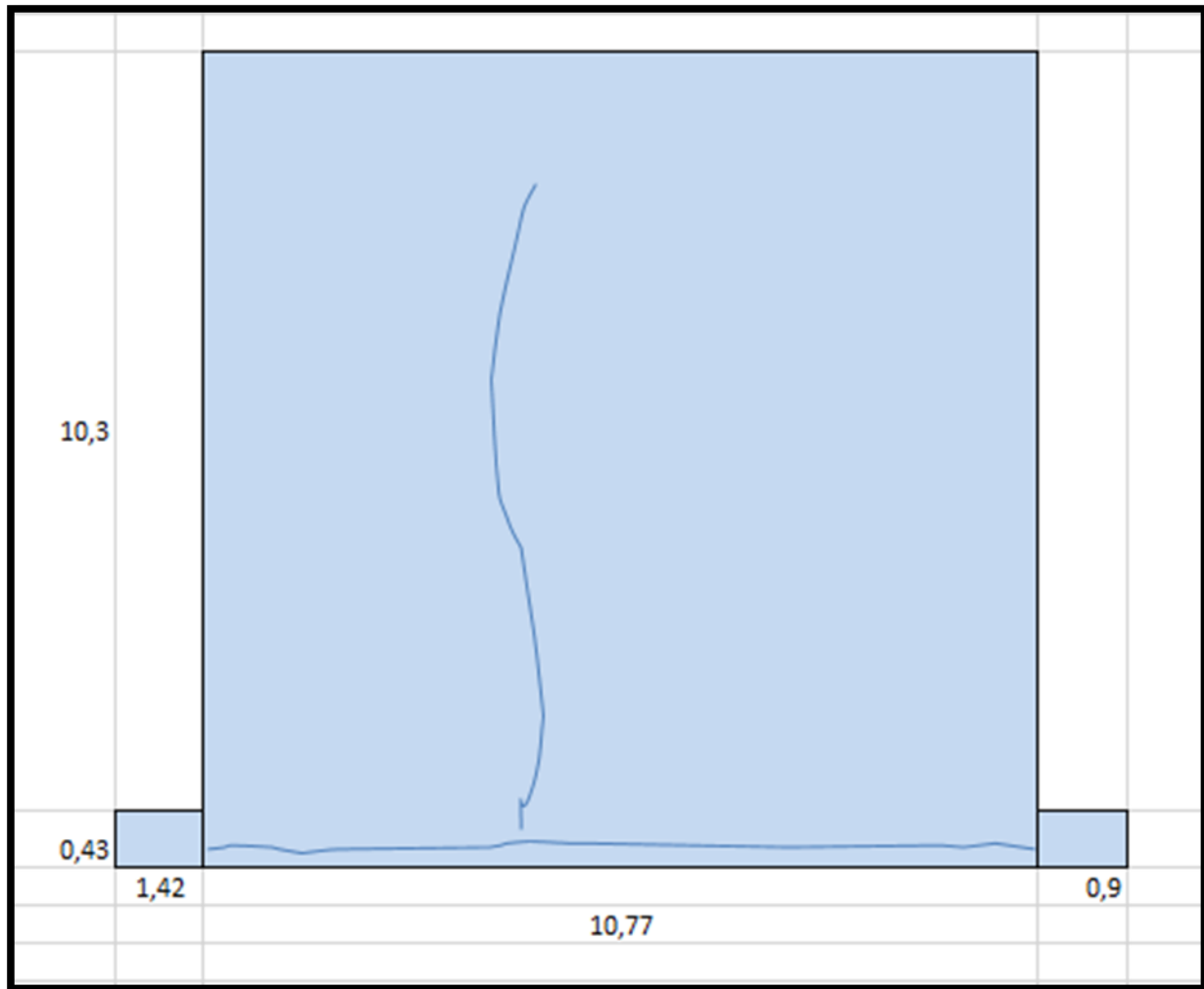


Figura 26. Alzado de la TE-801E con sus elementos y levantamiento de lesiones – costado sur (Fuente: el autor).

4.1.3 Pre-Concepto y Diagnóstico Torre Enfriadora TE-801E. El pre-concepto y diagnóstico dado a continuación obedece al criterio técnico basado en el levantamiento realizado de las estructuras, a lo investigado en la bibliografía de referencia y lo aprendido en el curso de patología dictado como una asignatura en la especialización. Los criterios aquí expuestos

pretenden generar conciencia de la necesidad de realizar un estudio mucho más profundo que permita generar una propuesta de rehabilitación completa y fundamentada que le permita a las edificaciones seguir operando de forma segura por mucho más tiempo.

En el levantamiento de lesiones para la TE-801E predomina la pérdida de pasta superficial y la exposición del agregado como fenómeno principal que afecta la estructura evaluada; las pocas grietas existentes en muros de la superestructura y en los muros del tanque se deben a contracción de secado (ver explicación en ítem 3.1), habiendo colaborado con el agrietamiento en los muros del tanque la ausencia de juntas de contracción y en los muros de la superestructura en los niveles superiores, el tamaño de los muros y la ausencia de columnas intermedias que redujeran el tamaño de los paños, dado que aquí, como en la mayoría de las torres, el muro es continuo.

Las grietas observadas en la TE-801E tienen anchos que varían entre décimas de mm y alcanzan los 3.0 mm en el caso más grave, estando la mayoría en el rango de 0.8-1.2 mm. Estas grietas desde el punto de vista de la durabilidad constituyen grave riesgo de corrosión localizada y de deterioro (Diego Sánchez de Guzmán, 2017). En la mayoría de los estudios del agrietamiento del concreto y su influencia en la durabilidad se ha comprobado que grietas de 0.2 mm hacia abajo no constituyen riesgo para la durabilidad de las estructuras (Harold Muñoz, 2019); desafortunadamente este no es el caso, ya que las grietas superan ampliamente ese límite. Se da sin embargo una condición afortunada, en los sitios donde pasa mayor humedad a través del muro, el arrastre de Ca(OH)_2 (hidróxido de calcio) ha promovido la colmatación de las grietas menores, generándose un proceso de autocurado de las mismas.

Así mismo, se observó que el concreto está sufriendo de porosidad (ver explicación en ítem 3.2), por lo que esto sería un camino abierto tanto para el ingreso de los principales agresores, como para la absorción de humedad. Una vez la estructura está construida, su red de poros se convierte en el contacto de la matriz del concreto con el medio agresivo.

Hay algunos sitios con lesiones causadas por corrosión, entre otras algunas columnas y algunas zonas puntuales de los muros de los costados oriente y occidente. No se observa que la carbonatación haya avanzado para causar graves lesiones, probablemente el uso de cementos sin adiciones pudo originar este buen desempeño. Hay poco agrietamiento pero de todas maneras compromete la durabilidad de la estructura, ya que las grietas son caminos expeditos para el ingreso de agresores, que pueden causar despasivación localizada, y con la humedad disponible y el oxígeno generar corrosión del refuerzo (Broomfield, J.P et al, ACI fall convention, 1993 – Armando, Red Durar, 1998).

Uno de los aspectos que vale la pena resaltar de esta estructura, a pesar del pobre manejo de la contracción de secado de concreto que agrietó los muros de los tanques, es el buen espesor de recubrimiento sobre el acero de refuerzo (espesores mayores a 4.0 cm); sin embargo, como señal que el ambiente de la refinería no deja de ser agresivo para las estructuras, se nota en los muros de la torre el debilitamiento superficial del concreto, por ejemplo en los muros del costado sur al pasar una espátula sobre su superficie se retira fácilmente la capa más expuesta. La torre evidencia en casi toda su superficie expuesta el impacto del ambiente ácido que la ha atacado durante los 48 años de vida en servicio, la pérdida de pasta superficial es apreciable a simple vista (ver Figura 5).

4.2 Torre Enfriadora TE-850

La estructura hace parte de las instalaciones de la planta Central del Norte y se encuentra rodeada hacia el Norte por las calderas de esta planta y por la TE 890, hacia el Occidente se encuentra la planta de Turboexpander, hacia el Oriente se encuentra el centro de Control de Potencia o CCP y la Planta de cracking UOPII, finalmente al Sur, se encuentra el bloque de Oficinas y talleres. La estructura tiene aproximadamente 36 años de construida y no se tiene registros de mantenimientos efectuados durante su vida en servicio. La posición de la estructura dentro de la refinería de Barrancabermeja la expone al ataque de un ambiente rico en CO_2 , H_2S , hollín de las Calderas B-2401/2/3/4 y eventualmente cloro (ver Figura 27, vista general de la TE-850).

4.2.1 Registro Fotográfico Torre Enfriadora 850.



Figura 27. Fotografía vista general del costado oriental de la TE-850 (Fuente: el autor).

Se aprecia fisuramiento que se cree pueden ser por contracción tanto en el muro del tanque como en los muros de la superestructura teniendo en cuenta la edad de construcción de la estructura (ver detalle en Figuras 28 y 29).



Figura 28. Fotografía detalle fisuras en el muro del tanque en el costado oriental y vista de las celdas de este mismo costado (Fuente: el autor).

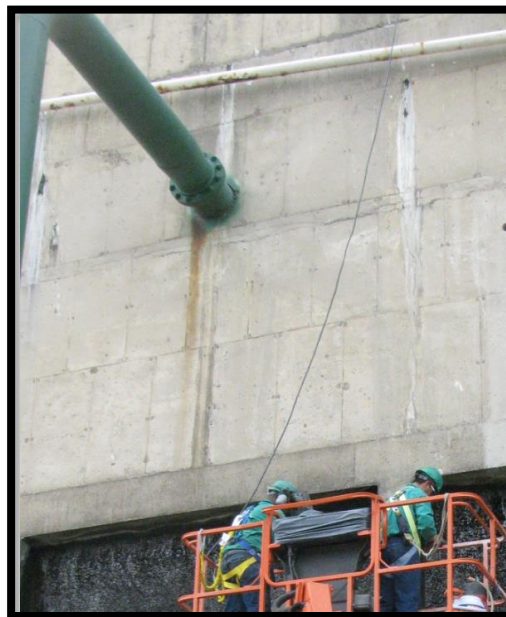


Figura 29. Fotografía detalle fisuración del muro del costado oriental (Fuente: el autor).

Nótese como fenómeno recurrente que las grietas nacen sobre las columnas, mostrando la problemática que generó no haberlas continuado (ver Figuras 30, 31 y 32 del costado occidental con la misma problemática).



Figura 30. Fotografía fisuras costado occidental (Fuente: el autor).



Figura 31. Fotografía detalle fisuración del muro del costado occidental (Fuente: el autor).



Figura 32. Fotografía vista de la celda No.2 del costado occidental (Fuente: el autor).

Aquí el fenómeno expuesto anteriormente se repite; las fisuras nacen en las columnas suspendidas, problemática constructiva de no continuarlas (ver Figura 33 ampliando detalle al interior de la celda).



Figura 33. Fotografía vista del interior de la celda central del costado occidental (Fuente: el autor).

Se visualizan manchas blancas, lo que se podría interpretar como lixiviación del hidróxido de calcio de la masa del concreto (ver Figuras 34 y 35 donde se observa la misma problemática), diagnóstico que se corroborará con ensayos de laboratorio que se desarrollaran durante los estudios de patología propuestos a desarrollar.



Figura 34. Fotografía detalle fisura existente en el costado occidental (Fuente: el autor).

Una parte está colmatada por el arrastre de hidróxido de calcio que se carbonata en la superficie. En la figura también se observa que por la parte inferior de la grieta percola agua.



Figura 35. Fotografía de archivo en la que se muestra el estado del costado sur hace 4 años (Fuente: archivo técnico de la Refinería de Barrancabermeja).

La situación es la misma a la fecha de esta inspección, nótese las fisuras por contracción y las lixiviaciones como manchas blancas (ver Figura 36 del mismo costado).



Figura 36. Fotografía del muro del costado sur actualmente (Fuente: el autor).

Lixiviaciones y fisuras (ver Figuras 37 y 38 donde se muestra la medición de una de las fisuras).



Figura 37. Fotografía detalle de la grieta (2.0-5.0 mm) en el costado sur a la altura de la viga que tiene la TE-850, sobre los extremos superiores de las columnas (Fuente: el autor).

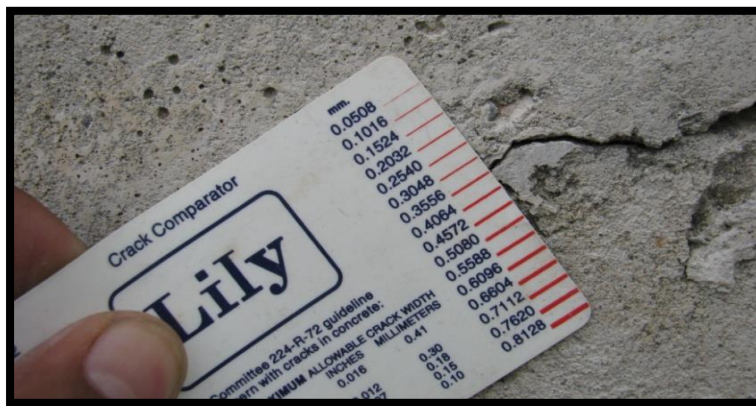


Figura 38. Fotografía detalle de medición de ancho de fisura en el muro del costado sur (Fuente: el autor).

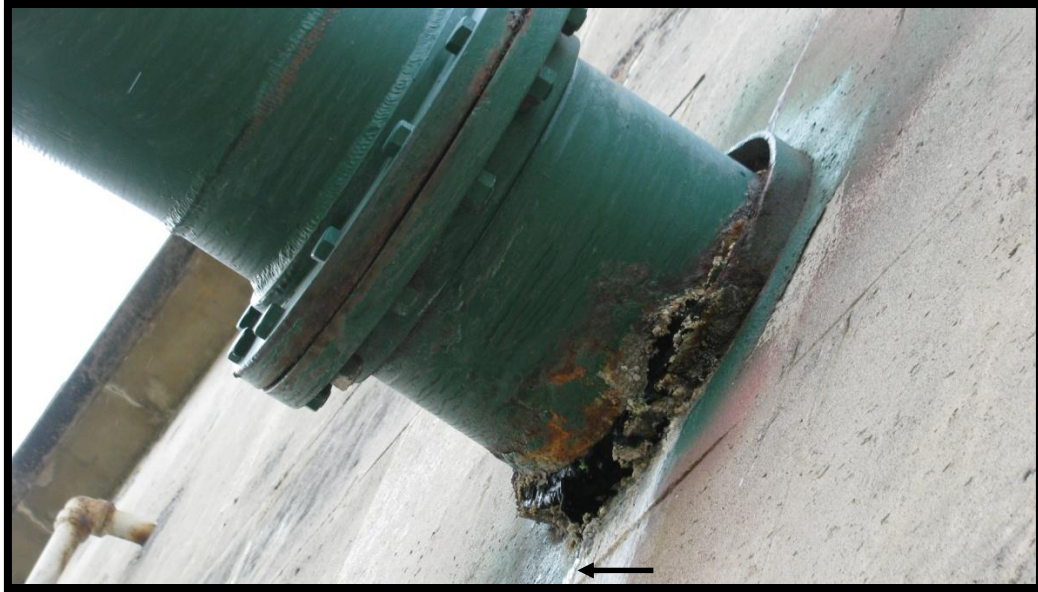


Figura 39. Fotografía detalle de la interacción de la tubería de bombeo con la estructura de concreto (Fuente: el autor).

La Figura 39 muestra algunas fisuras verticales en el costado occidental desarrolladas en el ingreso de la tubería. La corrosión del metal de la tubería contribuye de esta forma al fisuramiento del concreto por la inadecuada instalación del pase metálico por el muro (ver Figura 40 ampliando detalles de las grietas presentadas).



Figura 40. Fotografía grieta (ancho variable hasta 3.0 mm) sobre la viga del muro oriental (Fuente: el autor).



Figura 41. Fotografía vista del costado norte de la TE-850 (Fuente: el autor).

Se presenta agrietamiento vertical, adicionalmente, aparecen dos grietas diagonales de espesor considerable (2.0-3.0 mm).



Figura 42. Fotografía columna con lesiones en el costado occidental de la TE-850 (Fuente: el autor).

4.2.2 Levantamiento de Daños Torre Enfriadora TE-850. Con base en lo evidenciado en la torre TE-850 y mostrado en las fotografías anteriores, se desarrolla a continuación el levantamiento de daños mediante unos esquemas (ver Figuras 43, 44, 45 y 46). Para la identificación de las lesiones se creó un código (ver Figura 21 Código empleado para levantamiento de lesiones en las tres torres), teniendo en cuenta que no existe un código único para determinar una lesión en patología estructural, con previa revisión del director se validó el código empleado.

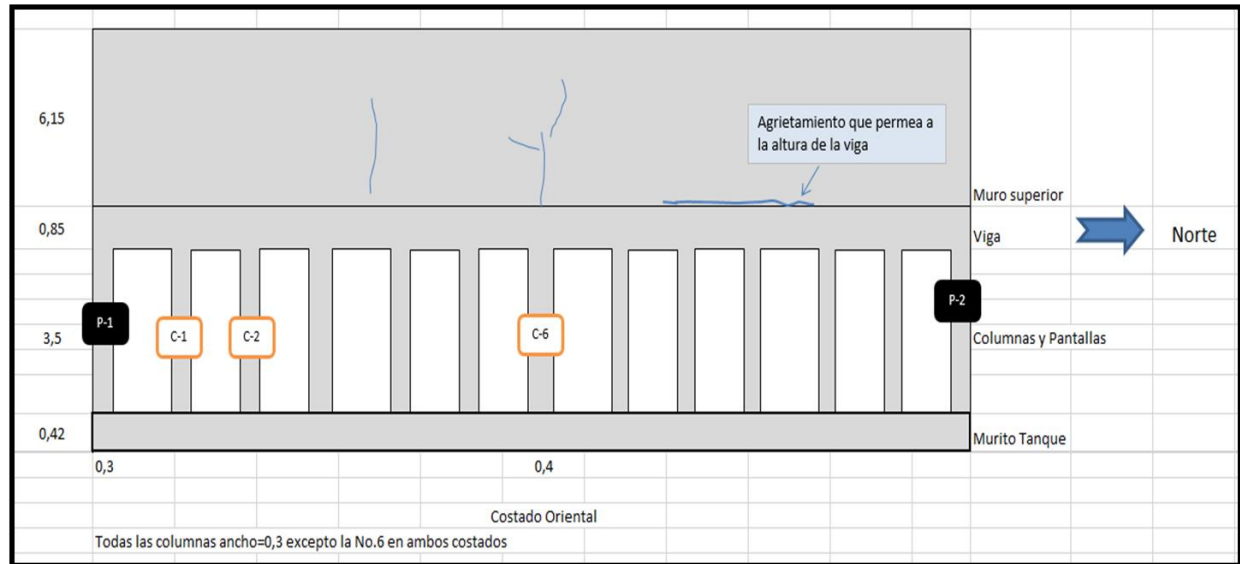


Figura 43. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado oriental (Fuente: el autor).

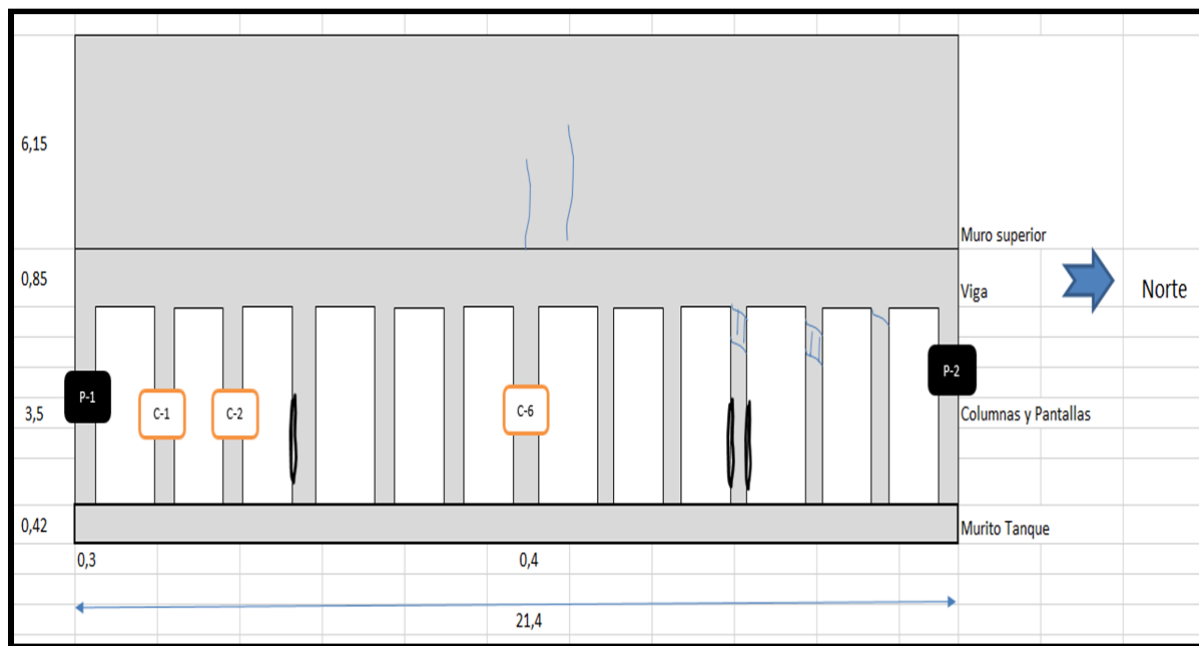


Figura 44. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado occidental (Fuente: el autor).

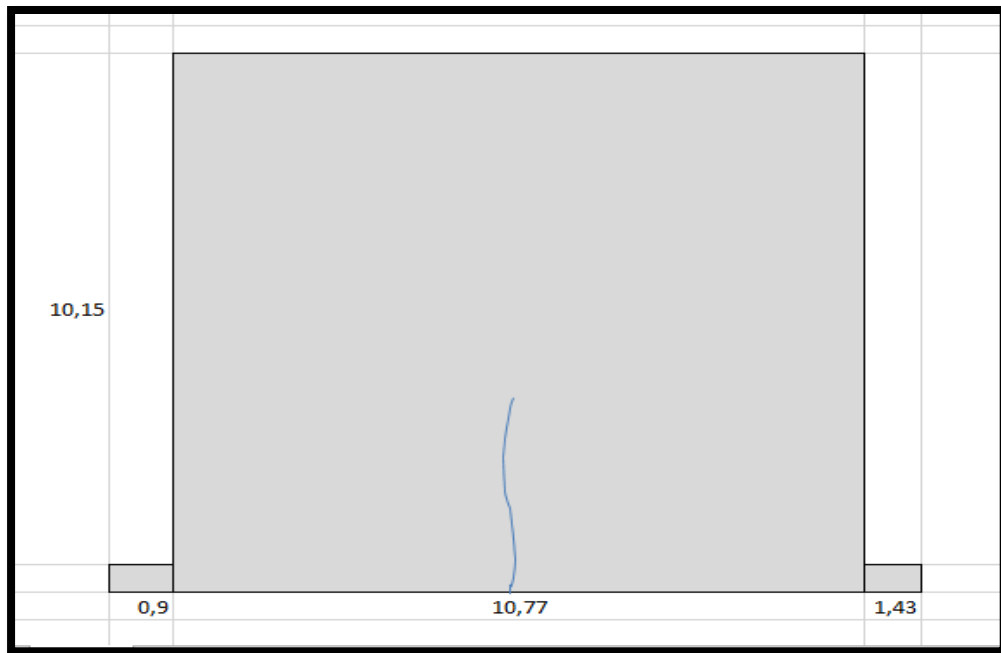


Figura 45. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado norte
(Fuente: el autor).

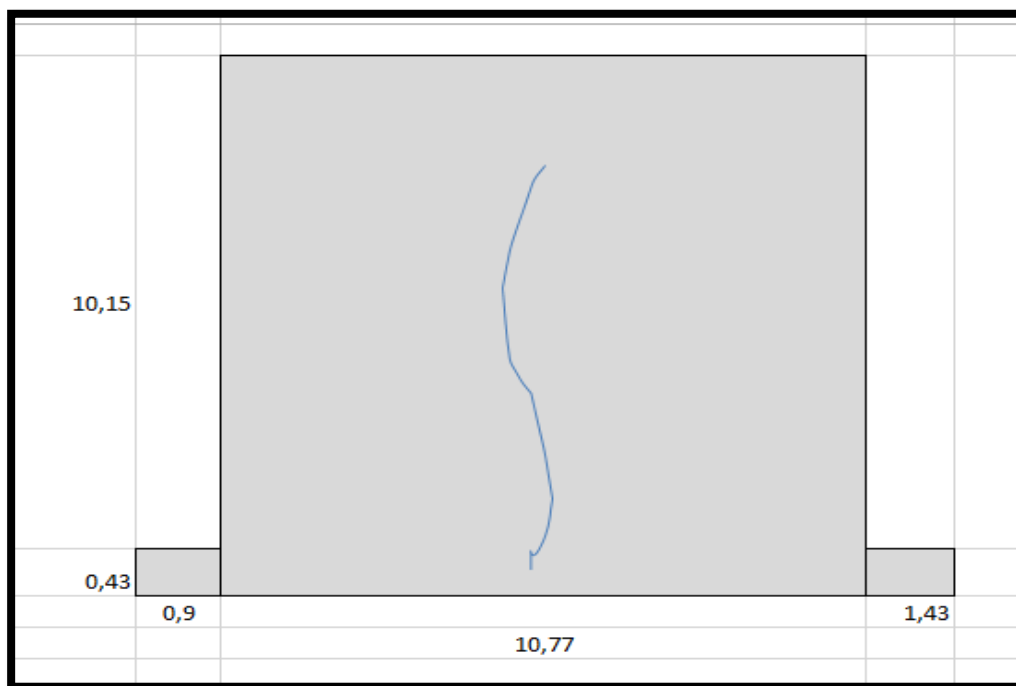


Figura 46. Alzado de la TE-850 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado sur
(Fuente: el autor).

4.2.3 Pre-Concepto y Diagnóstico Torre Enfriadora TE-850. En el levantamiento de lesiones predomina el agrietamiento como lesión principal que afecta la estructura evaluada. Las grietas existentes en muros de la superestructura y en los muros del tanque se deben a contracción de secado, habiendo colaborado con el agrietamiento en los muros del tanque, la ausencia de juntas de contracción, y en los muros de la superestructura en los niveles superiores, el tamaño de los muros y la ausencia de columnas intermedias que redujeran el tamaño de los paños, dado que aquí se dejó un muro continuo.

Las grietas observadas en la TE-850 tienen anchos que varían entre décimas de mm y alcanzan los 3.0 mm en el caso más grave, estando la mayoría en el rango de 1.0 mm -1.5 mm. Estas grietas desde el punto de vista de la durabilidad constituyen grave riesgo de corrosión localizada y de deterioro. En la mayoría de los estudios del agrietamiento del concreto y su influencia en la durabilidad se ha comprobado que grietas de 0.2 mm hacia abajo no constituyen riesgo para la durabilidad de las estructuras (Sánchez de Guzmán, 2017); desafortunadamente en este caso en particular las grietas superan ampliamente ese límite. Se da sin embargo una condición afortunada, en los sitios donde pasa mayor humedad a través del muro, el arrastre de Ca(OH)_2 (hidróxido de calcio) ha promovido la colmatación de las grietas menores, impidiendo una mayor permeabilidad de la estructura.

La estructura presenta grietas entre la viga del segundo nivel y los muros superiores, en los costados norte y sur, que deben ser tratadas. Se presentan, aunque en menor cuantía, otros sitios con lesiones menores, como ocurre con algunas columnas del costado occidental y la viga de las celdas donde carga el muro perimetral superior. Desafortunadamente el agrietamiento existente compromete la durabilidad de la estructura, ya que las grietas son caminos expeditos para el ingreso de agresores, que pueden causar despasivación localizada, y con la humedad disponible y el oxígeno generar corrosión del refuerzo (Muñoz Harold, material de clase 2019).

Uno de los aspectos que vale la pena resaltar de esta estructura, a pesar del pobre manejo de la contracción de secado de concreto que agrietó no sólo los muros del tanque, sino que causó una grieta encima de todas las columnas o en su cercanía, es el buen espesor de recubrimiento sobre el acero de refuerzo (espesores mayores a 4.0 cm). No se evidenciaron barras corroídas en la inspección, sin embargo, como señal de que el ambiente de la refinería no deja de ser agresivo para las estructuras localizadas, se nota en el muro del costado Sur cierto debilitamiento superficial del concreto, al pasar una espátula sobre su superficie se retira fácilmente la capa más expuesta (ver Figura 38); este debilitamiento es producto del ataque ácido del ambiente presente sobre el concreto.

4.3 Torre Enfriadora TE-2940

La estructura hace parte de las instalaciones de la unidad de Balance y se encuentra rodeada hacia el Norte y el Occidente por el área de tanques, que almacenan productos tales como gasolina y productos pesados como crudo, los cuales no afectan el ambiente, al Sur se encuentra la Planta de

Agua y la cracking UOPI, al oriente se encuentra rodeada por las calderas de Balance B-2901/2/3/4/5. El ambiente que afecta a esta torre, además de los gases propios de la Refinería, es el hollín producido por las calderas de Balance y el catalizador de la UOPI.

La estructura de concreto reforzado está compuesta por la cimentación, un tanque que recoge el agua a enfriar, un pozo de bombas las cuales impulsan el agua hacia la parte superior de la torre, desde donde desciende atravesando un sistema de rejillas de material sintético, (travesía que le hace perder calor con el medio). La superestructura de la torre es una estructura dual con muros pantalla o de cortante (exteriores) y columnas sobre las caras oriental y occidental que sostienen el muro de fachada, losa de cubierta y un sistema de conos por donde escapa el vapor de agua. Las celdas así formadas permiten el ingreso de aire frío hacia el interior de la torre. Los conos de concreto están siendo demolidos para reemplazarlos por conos de material sintético, lo cual aliviará cargas en la estructura. La estructura tiene aproximadamente 30 años de construida y no se tiene registros de mantenimientos efectuados durante su vida en servicio (ver Figura 47 y 48 donde se muestra la vista general de la TE-2940).

4.3.1 Registro Fotográfico Torre Enfriadora 2940.



Figura 47. Fotografía vista general de la torre enfriadora TE-2940 (Fuente: el autor).



Figura 48. Fotografía vista general del costado oriental de la TE-2940 (Fuente: el autor).

Se aprecia el fisuramiento por contracción de los muros de la superestructura (ver Figura 49 donde se amplía detalle de fisuras).

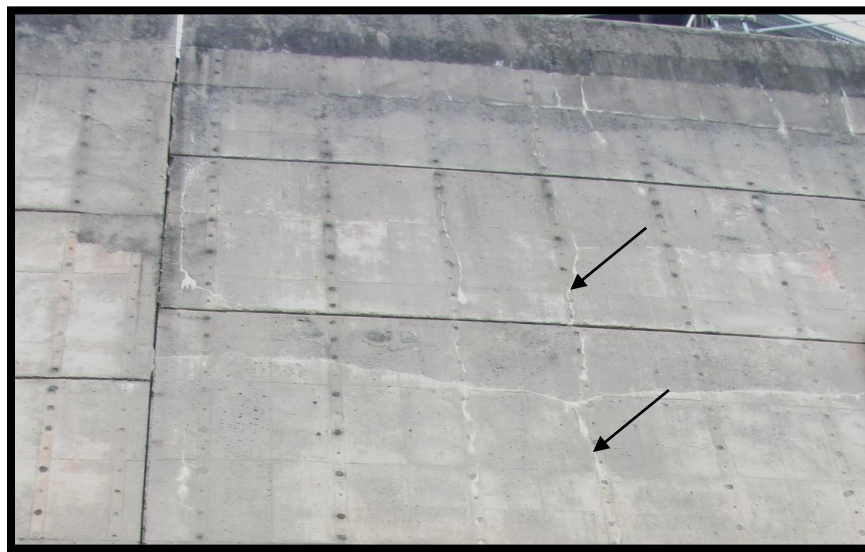


Figura 49. Fotografía detalle del tipo de fisuración en la TE-2940 (Fuente: el autor).

Se generalizó en esta estructura al sumarse dos defectos: contracción del concreto (no hay juntas) y un defecto constructivo con los pasos de la fijación de la formaleta (ver Figura 50).



Figura 50. Fotografía detalle de la situación descrita con los pasantes de fijación de la formaleta (Fuente: el autor).

Se nota cómo la corrosión del tubo conduit que se usó (ver Figuras 51 y 52), empuja el tapón de mortero del resane. Las fisuras se forman en el sitio más débil del concreto y esta serie de puntos favorecen el agrietamiento en esa dirección.



Figura 51. Fotografía detalle de la situación que se presenta en todos los muros de la TE-2940 (exceptuando los muros del tanque) (Fuente: el autor).

Mientras este tubo que dejaron adentro se siga oxidando va a empujar el relleno que se le ponga, por esto debe estudiarse su retiro.



Figura 52. Fotografía grietas recurrentes que coinciden con las columnas que no se prolongaron hacia y hasta la cubierta (Fuente: el autor).

Fisuración que agravó la serie de pasantes usados para los amarres de la formaleta al momento de fundir el concreto.



Figura 53. Fotografía detalle fisuras en el muro del tanque en el costado oriental (Fuente: el autor).

Las grietas se presentan cada 1.5 m, lo cual es una situación que se repite a lo largo de todos los costados de la TE-2940 a la altura del tanque (ver Figuras 54 y 55). Se alcanzan a apreciar las labores provisionales de sello que se les ha ido practicando con el tiempo, sin solucionar definitivamente el problema.



Figura 54. Fotografía de una de las grietas del costado occidental permeando, de anchos variables (0.3 a 2.0 mm) (Fuente: el autor).



Figura 55. Fotografía vista del costado norte a nivel de la altura del tanque (2.50 m) (Fuente: el autor).

Las fisuras verticales se repiten y son paralelas cada 1.0-1.5 m.

A continuación, se presentan una serie de fotografías que muestran el levantamiento de fisuras y grietas en las diferentes caras y partes de la torre (ver Figuras 56, 57, 58, 59 y 60).



Figura 56. Fotografía deterioro de la pantalla 5 y detalle del estado del concreto de la torre TE-2940 (Fuente: el autor).

Nótese las fisuras en patrón de piel de cocodrilo. En el concreto su color verdoso y la poca resistencia al rayado de su superficie evidencian el ataque recibido durante su vida en servicio (Diego Sanchez de Guzmán, Bogotá, Asocreto, 2017).



Figura 57. Fotografía detalle fisuras en la viga de borde por su cara inferior (sobre las columnas)

(Fuente: el autor).



Figura 58. Fotografía detalle de medición de ancho de fisura en el muro del costado sur en la zona de la viga (Fuente: el autor).



Figura 59. Fotografía vista del costado sur (Fuente: el autor).

Aunque en menor cantidad, pero existen también, fisuras de longitud considerable, algunas van de piso a cubierta. Nótese la condición de diverso tipo de manchas sobre la superficie del muro.



Figura 60. Fotografía vista interior de una de las celdas del costado oriental (Fuente: el autor).

Se aprecia el buen estado de la estructura al interior de la torre (ver Figura 61 de columnas de otra celda en operación).



Figura 61. Fotografía de las columnas de la TE-2940 (Fuente: el autor).

Se evidenció algunas columnas pocas con desportillamientos al parecer de origen mecánico.



Figura 62. Fotografía vista de la parte superior del muro costado norte (Fuente: el autor).

Existen menor número de grietas, sin embargo, las que existen, abarcan grandes longitudes, algunas son transversales y de gran longitud.



Figura 63. Fotografía detalle de las tuberías pasantes en el tanque (Fuente: el autor).

4.3.2 Levantamiento de Daños Torre Enfriadora TE-2940. Con base en lo evidenciado en la torre TE-2940 y mostrado en las fotografías anteriores, a continuación, se desarrolla el levantamiento de daños mediante unos esquemas (ver Figuras 64, 65, 66, 67 y 68). Para la identificación de las lesiones se creó un código (ver Figura 21 Código empleado para levantamiento de lesiones en las tres torres), teniendo en cuenta que no existe un código único para determinar una lesión en patología estructural, con previa revisión del director se validó el código empleado.

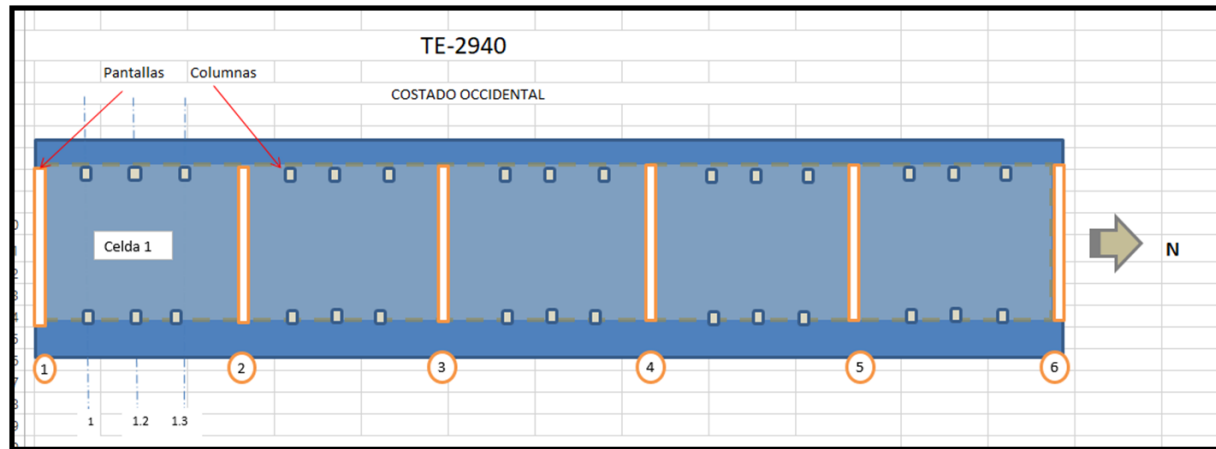


Figura 64. Planta de TE-2940 (Fuente: el autor).

Nomenclatura ejes usada para identificar los elementos

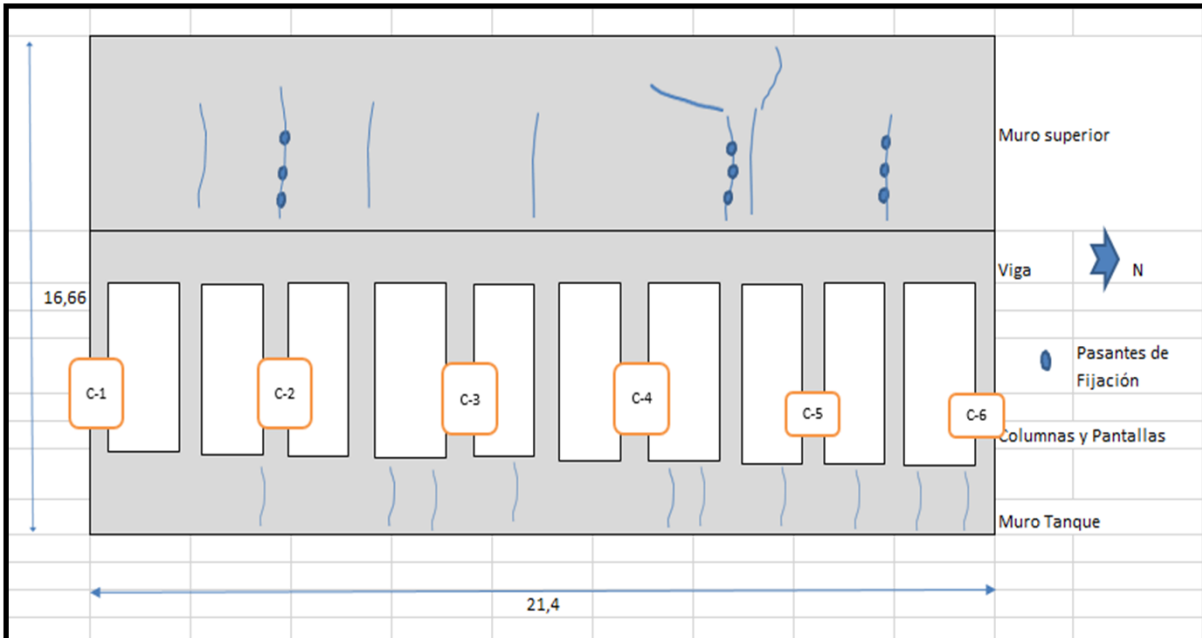


Figura 65. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado oriental (Fuente: el autor).

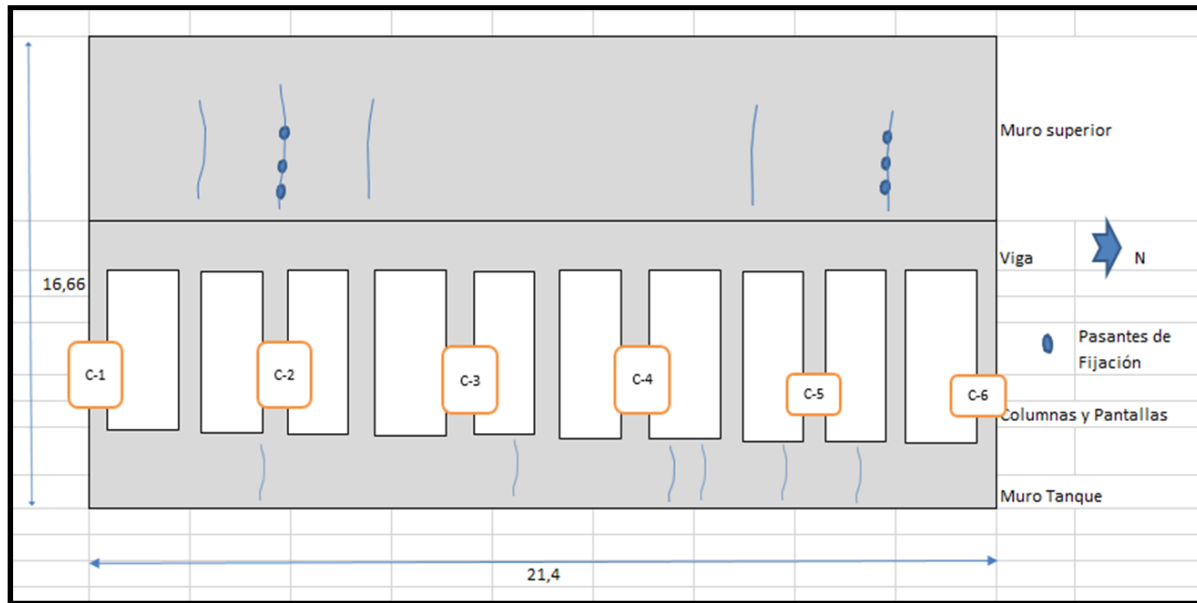


Figura 66. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado occidental (Fuente: el autor).

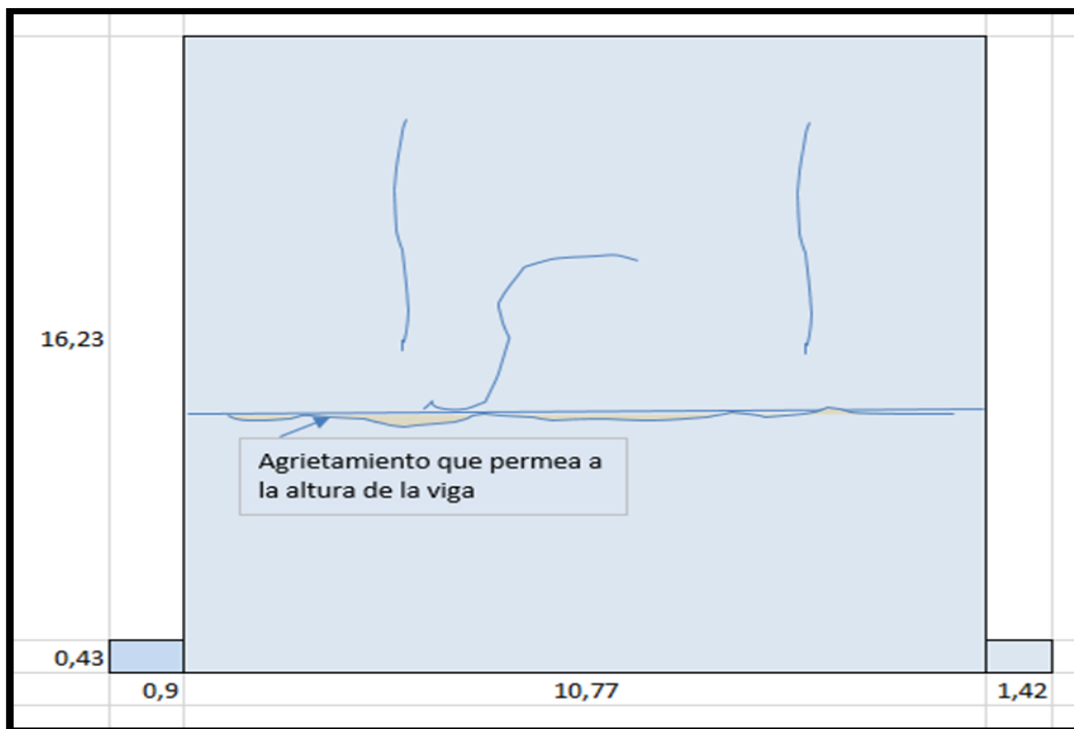


Figura 67. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado sur
(Fuente: el autor).

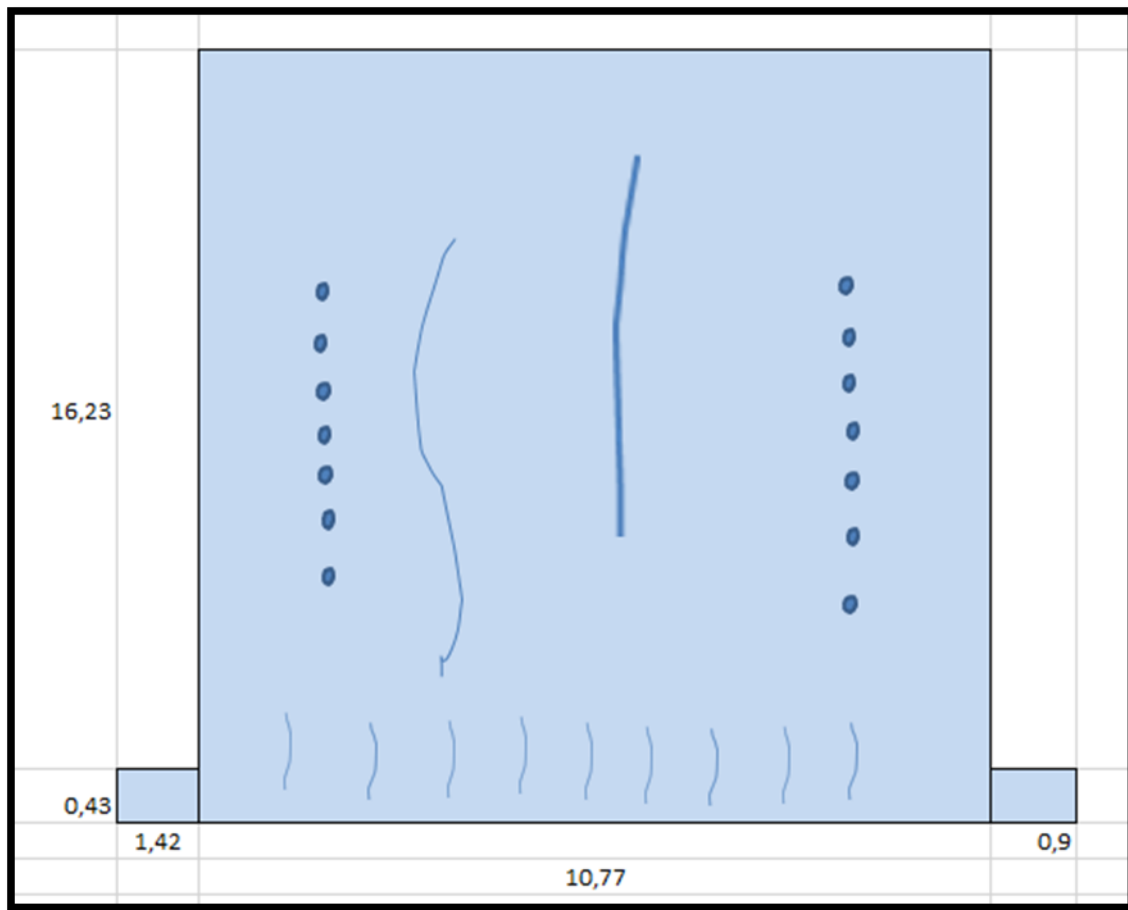


Figura 68. Alzado de la TE-2940 con sus elementos y levantamientos de lesiones del costado norte
(Fuente: el autor).

4.3.3 Pre-Concepto y Diagnóstico Torre Enfriadora TE-2940. En el levantamiento de lesiones predomina el agrietamiento como lesión principal que afecta la estructura evaluada. Las grietas existentes en muros de la superestructura y en los muros del tanque se deben a contracción de secado, habiendo colaborado con el agrietamiento, en los muros del tanque, la ausencia de juntas de contracción, y en los muros de la superestructura en los niveles superiores, el tamaño de

los muros, la ausencia de columnas intermedias que redujeran el tamaño de los paños y el sistema constructivo, ya que se dejaron embebidos en los muros superiores (costado oriental y occidental) y en toda la extensión de los muros de los costado sur y norte, los tubos conduit usados para pasar el sistema de sujeción de los testers de la formaleta; estos tubos al oxidarse, muy rápido por su conexión directa con la humedad, causaron tensiones (ya que el óxido de hierro es expansivo (Broomfield, J.P et al, ACI fall convention)), que no sólo sacaron muchos de los resanes de mortero, sino que generaron líneas de falla, que promovieron el agrietamiento en estos sectores. La problemática empeora dado el gran número de conectores, y de líneas de falla con que cuenta esta estructura.

Las grietas observadas en la torre tienen anchos que varían entre décimas de mm y alcanzan los 2.0 mm en el caso más grave, estando la mayoría en el rango de 1.0 mm – 1.5 mm. Estas grietas desde el punto de vista de la durabilidad constituyen grave riesgo de corrosión localizada y de deterioro. En la mayoría de los estudios del agrietamiento del concreto y su influencia en la durabilidad se ha comprobado que grietas de 0,2 mm hacia abajo no constituyen riesgo para la durabilidad de las estructuras (Sánchez de Guzmán, 2017); desafortunadamente las grietas superan ampliamente ese límite. Se da sin embargo una condición afortunada, en los sitios donde pasa mayor humedad a través del muro, el arrastre de Ca(OH)_2 (hidróxido de calcio) ha promovido la colmatación de las grietas menores, impidiendo una mayor permeabilidad de la estructura (ver Figura 53).

Se evidenciaron grietas entre la viga del segundo nivel y los muros superiores, en los costados norte y sur, que deben ser tratadas; desafortunadamente el agrietamiento existente compromete la

durabilidad de la estructura, ya que las grietas son caminos expeditos para el ingreso de agresores, que pueden causar despasivación localizada, y con la humedad disponible en la torre y el oxígeno del ambiente generar corrosión del refuerzo (Muñoz Harold, material de clase 2019).

Uno de los aspectos que vale la pena resaltar de esta estructura, a pesar del pobre manejo de la contracción de secado de concreto que agrietó no sólo los muros del tanque, sino que causo una grieta encima de todas las columnas o en su cercanía, es el espesor de recubrimiento sobre el acero de refuerzo (mayor a 4.0 cm).

Las juntas existentes entre tanque y estructura principal de la torre se encuentran deficientemente selladas y se presenta escape de agua y deben ser selladas (ver Figura 53).

5. Propuesta y Alcance de Estudio Complementario

Una vez realizado el diagnóstico y de establecer que es necesario realizar un estudio de patología, vulnerabilidad y reforzamiento estructural complementario a la presente evaluación, que permita generar una propuesta completa de rehabilitación de las torres enfriadoras no solo objeto de este trabajo si no de todas las demás estructuras similares en la refinería de Barrancabermeja.

Por lo anterior, a continuación, se plantea el alcance que este estudio como mínimo debe realizar, ya que quedará a criterio del especialista la cantidad de ensayos, el eliminar o incluir alguno que dentro de su experiencia considere se deba realizar:

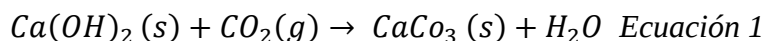
5.1 Ensayos y evaluación de campo

La evaluación de la estructura se debe llevar a cabo mediante la realización de ensayos en campo, directamente sobre la estructura, la toma de muestras para remitir a los laboratorios de materiales y químico, y el levantamiento de lesiones. Con estos ensayos se pretende tener una idea bastante aproximada de la situación real y actual de la estructura al momento de la evaluación y en particular, de los materiales que la componen: acero y concreto. Con base en los resultados de los ensayos y su respectivo análisis, se pretende concluir acerca del estado actual de la estructura, males que la aquejan (desde el punto de vista de su resistencia a los agresores presentes en el medio), nivel de deterioro y, sobre esta base, definir la mejor estrategia de rehabilitación tanto desde el punto de vista técnico como económico. Por lo anterior los ensayos que se plantean deban realizarse son los siguientes:

5.1.1 Determinación de la posición del refuerzo. La determinación del acero de refuerzo se lleva a cabo con una sonda electromagnética que muestra la posición del acero de refuerzo más expuesto y el espesor de recubrimiento. Esta determinación se hace previamente a la realización de la gran mayoría de los ensayos que hacen parte de la evaluación, por ejemplo, la extracción de núcleos, para no afectar el refuerzo, la prueba de profundidad de carbonatación y las pruebas de potencial de corrosión (Muñoz Harold, material de clase 2019).

5.1.2 Determinación de la profundidad de carbonatación. La carbonatación es una degradación química del concreto causada por el dióxido de carbono (CO_2) del aire. Este compuesto reacciona con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el cual se origina durante la

hidratación del cemento, y aumenta la alcalinidad a valores de PH mayores de 13 (típico de concretos sanos o recientemente elaborados) creando un medio para proteger el acero de la corrosión, y forman carbonato de calcio (CaCO_3). Esta reacción puede ser escrita de forma simplificada como se muestra en la Ecuación 1 (Campos Silva, A. R. Fajardo, G & Mendoza – Rangel, J, 2016):



Al reaccionar estos dos compuestos la alcalinidad desciende a un valor alrededor de 9.0, lo que es insuficiente para proteger al refuerzo contra la corrosión provocando que la capa pasiva, formada alrededor de la varilla del refuerzo al vaciar el concreto y que cumple la función de sellar totalmente el refuerzo garantizando el medio alcalino para evitar su oxidación, se quiebre (Ver Figura 69).

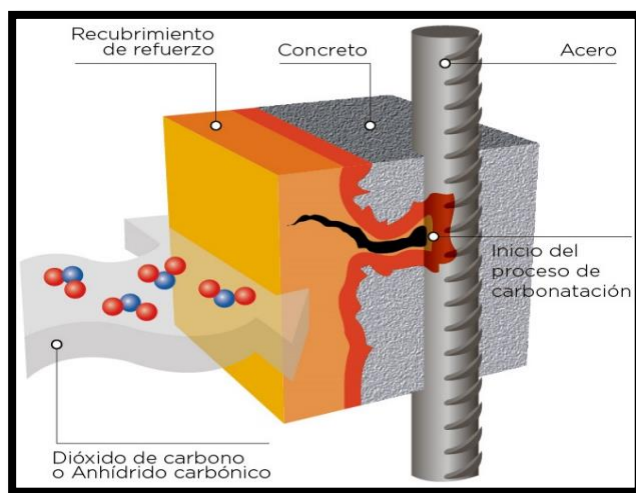


Figura 69. Proceso de la carbonatación (Campos Silva, A. R. Fajardo, G & Mendoza – Rangel, J, 2016).

La velocidad del fenómeno de la carbonatación en la pasta del cemento depende de la permeabilidad (regida por la relación agua/cemento, la cual determina la porosidad de la pasta de

cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación), del contenido de humedad, del contenido de CO_2 en el aire, del contenido inicial de humedad en el concreto endurecido y de la humedad relativa del medio ambiente (Muñoz Harold, 2015).

Este último representa un factor importante para la progresión de la carbonatación, el cual en índices bajos no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el CO_2 y en índices altos, los poros se bloquean y evitan el ingreso del CO_2 , pero simultáneamente proporciona un medio para la reacción entre el CO_2 , el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el CaCO_3 , por esto se determina que existe un valor crítico de humedad relativa ambiente que origina la máxima carbonatación, como se muestra a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1.

Los efectos del contenido de humedad en el proceso de carbonatación.

Humedad relativa en % (HR)	Proceso de Carbonatación
$\text{HR} > 70$	Evita el ingreso de CO_2
$50 < \text{HR} < 70$	Avanza Rápidamente
$\text{HR} < 50$	No hay suficiente agua para que se disuelva el CO_2

Fuente: (Campos Silva, Fajardo, & Mendoza-Rangel, 2016).

5.1.2.1 Seguimiento de la profundidad de carbonatación. En práctica, se procede a la obtención de una muestra de concreto para rociarla sobre la superficie de la muestra con una solución de fenolftaleína al 1% de alcohol etílico. Este indicador de pH presenta un rango de pH de 8.2 a 10.0, siendo incolora por debajo de 8.2 y presentando color rosado fuerte (fucsia) por encima de 10.0 unidades de pH (Muñoz Harold, 2015).

La profundidad de la carbonatación se incrementa con el tiempo, y puede representarse mediante la ecuación de ley de difusión de Fick, como lo expresa la Ecuación 2:

$$X = k\sqrt{T} \text{ Ecuación 2}$$

Donde:

X: profundidad de carbonatación en mm, a partir de la superficie.

K: constante que relaciona el tiempo con el avance de la carbonatación.

T: es el tiempo de exposición en años.

El coeficiente K es empírico, para una humedad relativa del 50% se puede definir mediante la Ecuación 3:

$$K = 72\left(\frac{3.24}{\sqrt{f'c}} - 0.126\right) \text{ Ecuación 3}$$

Para un valor diferente al 50%, k debe multiplicarse por un factor <1, dependiendo de la humedad (Muñoz, 2015).

Adicionalmente, los investigadores concluyen que existe una relación entre la profundidad de carbonación y el contenido del cemento de la siguiente manera (Ver Figura 70), entre menos contenido del cemento mayor profundidad de carbonatación (Campos Silva, Fajardo, & Mendoza-Rangel, 2016):

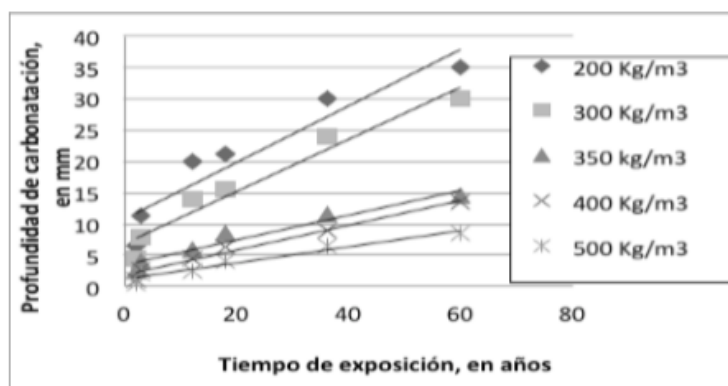


Figura 70. Relación entre la profundidad de carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes contenidos del cemento por kg/m^3 . Adaptado de: (Campos Silva, Fajardo, & Mendoza-Rangel, 2016)

La relación agua/cemento (a/c) se establece como el principal parámetro que afecta el avance de la carbonatación en el concreto, dado que la a/c y la compactación afectan el volumen de vacíos en el concreto, y por ende el volumen de aire del concreto, su comportamiento se evidencia en la Figura 71:

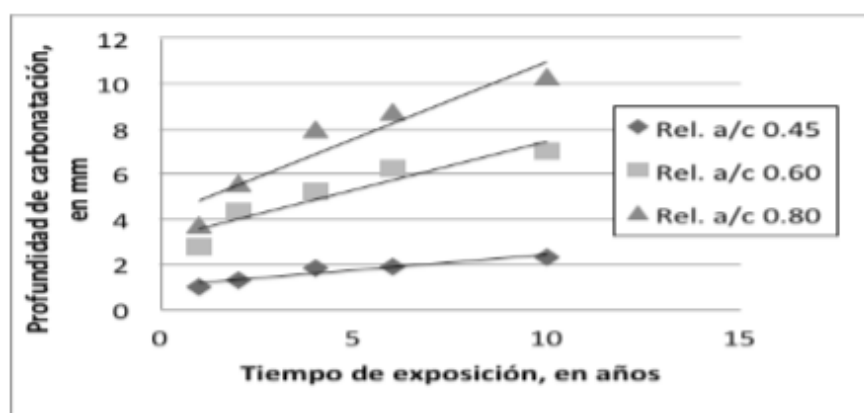


Figura 71. Relación entre la profundidad de la carbonatación con el tiempo de exposición, para diferentes relaciones a/c. Adaptado de: (Campos Silva, Fajardo, & Mendoza-Rangel, 2016).

5.1.3 Determinación de la cuantía aproximada de cemento. La determinación del contenido de cemento se lleva a cabo en el laboratorio químico sobre muestras secas de concreto extraídas directamente de la estructura. Es de utilidad conocer la cuantía de cemento existente en la mezcla ya que es un indicativo de su resistencia mecánica. Adicionalmente los contenidos de agresores como los cloruros y los sulfatos se reportan con respecto al contenido de cemento de la mezcla para compararlos con las cuantías críticas, las cuales también aparecen en la literatura referenciadas como un porcentaje del peso del cemento (Paulo Helene, 2000).

5.1.3.1 Determinación de la cuantía aproximada de cloruros. La presencia de cloruros (sales) en las estructuras de concreto siempre se ha asociado con la corrosión del refuerzo, ya que los iones cloruros son agentes despasivantes por excelencia del acero, cuando su concentración es suficiente para romper localmente la capa de óxidos e hidróxidos submicroscópica, fuertemente adherida y continua, a la que se atribuye la pasivación del refuerzo; se habla en la literatura de una concentración cloruros del 0,4% del peso del cemento de la mezcla para que haya riesgo de corrosión (Paulo Helene, 2000).

Los cloruros entran al concreto por absorción capilar y por difusión. En el caso particular, el fenómeno predominante de ingreso se cree será el de absorción por parte del concreto de aguas contaminadas con cloruro que alcancen las caras de los elementos estructurales. Una vez las sales penetran la estructura se presentará también avance debido a procesos de difusión.

Los cementos tienen cierto poder de combinación de cloruros, este poder depende básicamente del contenido de Aluminato Tricálcico (C_3A) del cemento usado para preparar las mezclas de

concreto. El aluminato tricálcico (C_3A) “fija” una parte de los cloruros que penetran la estructura y los convierte en cloroaluminato de calcio. Estos cloruros, siendo ya parte de un nuevo compuesto, no son preocupantes para la corrosión del refuerzo, sólo los cloruros “libres” pueden causar corrosión por picado. Por esta razón se deberá determinar tanto los cloruros “totales” en la muestra, como los cloruros “libres”. La determinación de la cuantía de cloruros libres y totales es una práctica de laboratorio químico y se lleva a cabo sobre muestras secas extraídas directamente de la estructura, generalmente a dos profundidades, para conocer el perfil de ingreso del agresor (Cardozo Victor, 2010).

5.1.4 Determinación de la cuantía aproximada de sulfatos. Con respecto a los sulfatos, a pesar que pueden tener cierta incidencia en la corrosión del refuerzo, particularmente en estructuras pre y postensadas, siempre han estado relacionados, más bien, con procesos de expansión del concreto. Esta expansión, dada la baja resistencia a tensión del concreto, generalmente conduce a la fisuración de los elementos y a la consecuente pérdida de resistencia a compresión del concreto y de su capacidad portante (Cobo Alfonso, 2001).

Por lo anterior, al determinar sulfatos en el concreto, el análisis de los contenidos reportados por el laboratorio se hace con respecto al porcentaje usual puesto en el cemento, en caso de que los valores reportados lo superen, será un indicativo que el medio donde se encuentra la estructura está aportándole sulfatos. Las aguas de proceso industrial pueden contener cierta cantidad de sulfatos disueltos, sin embargo, el contacto del agua de proceso con la estructura se da de adentro hacia afuera y en las columnas de cada celda en las zonas de salpique (casi todo el perímetro en las columnas externas). En concretos permanentemente húmedos (como es el caso de todos

elementos interiores de las torres enfriadoras de agua) el ingreso de los sulfatos y cloruros se da sólo por difusión ya que la absorción es nula dado que los poros permanecen saturados, y no se secan sino en las paradas de las celdas (evento poco común).

5.1.5 Determinación de los parámetros de corrosión electroquímica (potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistividad del concreto). Estas técnicas de medición sirven de gran ayuda al investigador y al evaluador de estructuras, ya que le permiten, por medios no destructivos, tener un panorama más preciso del estado actual de las mismas frente al fenómeno de la corrosión electroquímica (Muñoz Harold, 2015).

Las técnicas no destructivas para medir parámetros de corrosión del acero de refuerzo en el concreto son de gran interés si se requiere detectar el deterioro de las estructuras en su etapa temprana, antes de que sean las manifestaciones externas (grietas y desprendimientos de concreto) las que avisen al técnico de la problemática que enfrenta la estructura.

La medición de potenciales de corrosión (E_{corr}) mediante el empleo de la “Media celda de cobre-sulfato de cobre” (Norma ASTM C-876 - 15) es ya un ensayo bien conocido a nivel mundial, sin embargo la interpretación de los resultados es de cuidado, ya que puede malinterpretarse fácilmente un resultado, en particular cuando no se cuenta con parámetros adicionales que confirmen o desvirtúen la conclusión hecha con base en los resultados de esta sencilla prueba (Norma ASTM C-876-15). Debe siempre tenerse en cuenta que los resultados de potenciales de corrosión no son una prueba concluyente del estado de corrosión de un elemento estructural, más bien denotan la probabilidad de ocurrencia del fenómeno (Muñoz Harold, 2019).

Las mediciones de resistividad eléctrica y de resistencia óhmica vienen a auxiliar al investigador, dado que esta información, analizada en conjunto con los valores de potencial de corrosión pueden ya empezar a ser concluyentes con respecto a la situación de un elemento frente a la corrosión de sus armaduras (Muñoz Harold, 2015). La resistividad eléctrica indica la dificultad que puede tener una corriente iónica para pasar a través del electrolito formado por el concreto y sus poros, los cuales pueden contener agua y sales disueltas. Una gran resistividad indicará menor probabilidad de que se esté desarrollando un proceso corrosivo, pero no indica, por sí sola, que la armadura esté pasiva. Esto es particularmente cierto en ambientes con presencia de cloruros y debe manejarse con cuidado en ambientes donde sólo se presenta ataque por carbonatación (Moreno Emiliano, 2005).

Por lo tanto, el cruce de informaciones de potenciales de corrosión, resistividad, contenido de cloruros y profundidades de carbonatación es fundamental para la obtención de un diagnóstico preciso.

Las mediciones de intensidad de corriente de corrosión brindan información cuantitativa sobre la velocidad de corrosión del refuerzo, ya que existe una relación directa entre dichas mediciones y la cantidad de metal que se está perdiendo por corrosión en la unidad de tiempo (Muñoz Harold, 2019).

5.1.5.1 Resistividad eléctrica en $k\Omega.cm$. La resistividad eléctrica es una información complementaria de mucho valor al definir mediante valores de velocidad de corrosión y de potencial de corrosión el estado de la estructura frente a este conocido fenómeno. Para su

interpretación se incluye a continuación una escala de valores de resistividad eléctrica con su correspondiente significado en términos de actividad corrosiva (Ver Tabla 2):

Tabla 2.

Criterio de valoración de medidas de resistividad

Resistividad	Interpretación
> 100 kΩ.cm	No se puede distinguir entre acero activo o pasivo
50 a 100 kΩ.cm	Baja velocidad de corrosión
10 a 50 kΩ.cm	Moderada a alta velocidad de corrosión, con acero activo.
<10 kΩ.cm	La resistividad no es el factor que controla la velocidad de corrosión

Fuente: (Broomfield, J.P et al, 1993)

5.1.6 Determinación de la resistencia a compresión del concreto. La resistencia a compresión de un concreto depende del diseño de la mezcla y del adecuado curado que se le haya realizado a la estructura. La resistencia del concreto se evalúa a los 28 días, como control de calidad del suministro de este material de construcción. En labores de evaluación se acostumbra medir la resistencia actual de los elementos evaluados sobre núcleos o testigos extraídos de la estructura (Muñoz Harold, 2015). El valor obtenido de resistencia sirve indirectamente, para determinar la calidad de un concreto ya que a medida que la resistencia crece la porosidad y la permeabilidad disminuyen, por esta razón se acostumbra incluir al evaluar estructuras esta determinación (Muñoz Harold, 2015).

La extracción de núcleos es un ensayo de tipo semidestructivo, por dicha razón se procura no exagerar en el número de muestras a tomar y, en particular, se busca combinar este tipo de ensayo

con algún ensayo no-destructivos, el cual debe ser correlacionado con la resistencia real medida sobre los núcleos (Sanchez de Guzmán Diego, 2017).

5.1.7 Determinación de la velocidad del pulso ultrasónico. La velocidad con la que un pulso ultrasónico atraviesa un elemento de concreto depende de su resistencia mecánica y de la calidad y sanidad de su matriz. Una onda ultrasónica es una onda de compresión. En el ensayo se instalan, mediante un medio de acople (grasa), dos transductores entre dos caras de un elemento de concreto (medida directa), o en dos puntos sobre una misma superficie (medida indirecta). La señal sale del transductor emisor y al llegar la primera onda al transductor receptor el equipo muestra en pantalla el tiempo de tránsito. Conocida la distancia entre transductores, es fácil determinar la velocidad del pulso ultrasónico ($V=d/t$) (Federico González, 2004).

En esta prueba, ya que la onda atraviesa toda la masa de concreto localizada entre transductores, se puede determinar, con un ensayo netamente no destructivo (por sus siglas en ingles NDT), la calidad, compacidad y estado actual de una masa de concreto (Federico González, 2004).

Estas determinaciones en zonas agrietadas muestran que la grieta es continua y debe ser intervenida.

La correlación que se establezca con las mediciones de resistencia sobre núcleos extraídos de la misma estructura permite en cualquier momento mediante ensayos de ultrasonido, determinar la resistencia del concreto de otros elementos no evaluados, sin tener que extraer muestras de concreto (núcleos) (Federico González, 2004).

La velocidad del pulso ultrasónico se ve afectada por grietas, poros en el concreto, humedad, presencia de refuerzo en la dirección de viaje de la onda, etc; por esta razón tanto la prueba como su interpretación se deben hacer cuidadosamente (Federico González, 2004).

5.1.8 Determinación de la porosidad, densidad y absorción del concreto. La determinación de estas propiedades físicas del concreto permite al patólogo explicar el ingreso y la profundidad alcanzada por determinado agresor en el tiempo. Una mezcla porosa tiene baja densidad y su absorción será grande; al revés, una mezcla de buena calidad tendrá baja porosidad y su absorción será mínima. Como la mayoría de los agresores aprovechan la red de poros en el concreto para ingresar, es de sumo interés determinar en laboratorio estos parámetros sobre muestras de concreto extraídas de la estructura (ACI 2001).

De igual manera al estudiar estructuras de contención de agua, es importante saber la porosidad del concreto de las paredes de tanques (por ejemplo) ya que se puede estar perdiendo gran cantidad de agua sin que esta situación se perciba.

5.1.9 Ensayos de petrografía. La Petrografía es un campo de la petrología (Ver definición en el ítem 4.3) que se ocupa de la descripción física en términos visuales y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones derivadas de las rocas en estudio, mediante la microscopía de luz polarizada (esencialmente con luz transmitida, o reflejada) o microscopía electrónica (microscopio petrográfico), clasificándolas según su textura y composición mineralógica. Este tipo de análisis revela una serie de características y/o propiedades evaluables en los cristales y la relación que existen entre ellos, lo que va a ayudar a determinar la composición de la roca centrándose principalmente en la naturaleza y origen de la misma (Garcia-Casco, Universidad de Granada, Petrología Descripciones petrográficas., 2011). En este caso en particular el análisis se deberá realizar a la “roca elaborada por el hombre” y que se conoce como concreto,

evaluando petrográficamente los agregados que los componen, por lo que se requerirá para estos ensayos tomar varias muestras de concreto endurecido en varias zonas de las estructuras.

El análisis petrográfico de agregados incluye el análisis de una muestra representativa de un banco de agregados pétreos, la cual se analiza para determinar sus propiedades físicas, y composición mineralógica. La prueba consiste en cribar los materiales, las fracciones retenidas deben ser analizadas por separado, determinando la abundancia de cada componente de la muestra; de cada fracción retenida se deberán analizar al menos 300 partículas y contabilizar el número de partículas con base a los componentes identificados.

Durante el análisis se deberán examinar las partículas para determinar si presentan algún tipo de recubrimiento y determinar si estos recubrimientos pueden ser dañinos para el concreto y que tan adheridos se encuentran a las partículas.

Se deberá determinar si es necesaria una clasificación posterior por características físicas, si todas las partículas de un tipo de litología están en condición comparable deberá reportarse. Las condiciones que pueden ser consideradas durante el análisis petrográfico son: sanas, densas, intemperizadas, porosas, etc. Las principales características que deben tomarse en cuenta son forma, textura, tamaño de grano, estructura, poros, compacidad, cementación, color, composición mineralógica, condiciones físicas generales, así como presencia de constituyentes que se sospecha pudieran ser perjudiciales para el concreto. Al final deberá calcularse la composición del retenido de cada malla de una muestra heterogénea y el promedio en masa de la composición de toda la muestra (Garcia-Casco, Universidad de Granada, Petrología Descripciones petrográficas., 2011).

Con los ensayos de petrografía se espera determinar las siguientes características del material y de las estructuras en estudio:

- Identificar posibles causas de una mala calidad en el concreto.
- Identificar causas del deterioro del concreto.
- Determinación del rendimiento de la estructura a futuro.
- Determinar si el concreto es o no el especificado en el diseño.
- Descripción de la matriz de cemento, incluyendo grado de hidratación, el grado de carbonatación (si está presente), la evidencia de falta de solidez del cemento, la presencia de un aditivo mineral, adecuado sistema de curado, así como una alta relación agua – cemento en la pasta.
- Determinación de reactividad, verificar la interacción del agregado con la pasta y sus posibles afectaciones.
- Determinar si el concreto ha sido afectado por el ataque de sulfatos, u otro producto de ataque químico, o si fue sometido a condiciones de hielo y deshielo.
- Determinar la cantidad de agregado fino y agregado grueso en el elemento.
- Determinar el tipo de agregado grueso y fino, clasificándolo de acuerdo a su litología y contenido aproximado en la estructura.

5.2 Levantamiento de lesiones y elaboración de planos

Se requiere que el estudio de patología sea complementado con un completo levantamiento de lesiones (visual y fotográfico). Dicho levantamiento de las principales lesiones existentes permite,

combinándolo con los resultados de las demás pruebas, efectuar el diagnóstico para, así, entrar a definir la estrategia de rehabilitación más apropiada, la cual no depende sólo del grado de deterioro sino, también, del nivel al cual quiere el propietario llevar la estructura, de la urgencia y tiempo disponible para llevar a cabo los trabajos y de la capacidad de inversión.

El estudio que se realice servirá así mismo para levantar las estructuras y generar planos estructurales digitales de las torres enfriadoras.

5.3 Estudio de Vulnerabilidad Sísmica

El comportamiento estructural ante una sollicitación de tipo natural o antrópica cualquiera, está sujeto a las condiciones bajo las cuales fue idealizada y concebida la estructura (diseño y cálculo), cuyo nivel de significancia dentro del proyecto integral dependerá en fuerte medida de la eficacia y cumplimiento de las especificaciones de los materiales propuestos, del sistema de calidad y del nivel de seguimiento en los procesos constructivos, de la respectiva correspondencia en el nivel y tipo de ocupación y de la forma de mantenimiento y conservación de la estructura; lo anterior expresado como un comportamiento en términos de resistencia y rigidez determina el grado de seguridad estructural y el grado de funcionalidad que finalmente determinaran la vulnerabilidad de la estructura estudiada (Maldonado E, Jasbón N, Chio G, 2010).

Por lo anterior, se considera entonces que la evaluación debe complementarse con un análisis de vulnerabilidad sísmica que permita definir la predisposición intrínseca de las estructuras a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico, la cual está asociada directamente a los

procesos de concepción, diseño, construcción, operación y mantenimiento de la estructura analizada (Maldonado E, Jasbón N, Chio G, 2010).

6. Conclusiones

Los espesores de recubrimiento mayores a 4.0 cm han protegido las estructuras del deterioro, situación que es común en las tres torres evaluadas; es por esta razón que se puede concluir sin los ensayos respectivos que la carbonatación no ha avanzado de manera significativa hacia el acero de refuerzo.

Desde lo inspeccionado visualmente se puede determinar que las estructuras tienen en común que el acero se encuentra en estado pasivo, encontrándose corrosión sólo en zonas donde por alguna circunstancia (falta de recubrimiento apropiado, fisuras, defectos constructivos); el acero se despasivó y se generó el proceso corrosivo. No existen lesiones importantes debidas al fenómeno de la corrosión, reduciéndose a pequeños sectores aislados donde debe repararse, diagnóstico que se deberá corroborar con los ensayos respectivos.

La superficie del concreto de los muros en las tres torres analizadas es fácilmente removible en su capa más expuesta; lo que puede llevar a concluir que el concreto está siendo vulnerable a un ataque ácido que parece haber debilitado la superficie del concreto.

Las tres torres tiene en común el fenómeno de grietas en muros de las superestructura y en los muros del tanque debidas a la contracción de secado, habiendo colaborado con el agrietamiento en

los muros del tanque la ausencia de juntas de contracción y en los muros de la superestructura en los niveles superiores, el tamaño de los muros y la ausencia de columnas intermedias que redujeran el tamaño de los paños.

Se sugiere realizar una evaluación patológica más profunda mediante la realización de ensayos en campo de tal forma que se tomen muestras para remitir a los laboratorios de materiales y químico que complementen el levantamiento de lesiones desarrollado en esta monografía; para de esta forma emitir un informe bastante aproximado de la situación real de las estructuras, en particular, de los materiales que la componen: acero y concreto, para de esta forma plantear una estrategia de rehabilitación que permita el uso de la estructura por un tiempo más prolongado, analizando la viabilidad técnica y económica de las soluciones planteadas.

Referencias Bibliográficas

- American Concrete Institute (ACI). Mexico, (2001). Proporcionamiento de mezclas, concreto normal, pesado y masivo.
- Armado, Red DURAR, (1998). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón, 2ª Edición.
- Bre Centre for Concrete. Londres, (2000). Construction Corrosion of Steel in concrete: CRC. Digest 444 (parts 1 to 3).
- Broomfield, J.P et al, ACI fall convention, Minneapolis, Minnesota, (1993). Corrosion Rate Measurements in Reinforced Concrete Structures by a Linear Polarization Device,
- Campos Silva, A. R., Fajardo, G., & Mendoza-Rangel, J. (2016). Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo, 14-34.
- Cardozo Victor y Otros. (2010). Composición química del cemento. Retrieved from <http://scribd.com/doc/24863679/Composición-Química-Del-Cemento>.
- Cobo Escamilla, Alfonso. Fundación Escuela de la Edificación, Madrid, (2001). Corrosión de armaduras de estructuras de hormigón armado.
- Garcia Casco, A (2011). Universidad de Granada, Petrología Descripciones petrográficas. Retrieved from https://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_petrograf.htm
- Garcia Casco, A. (2010). Universidad de Granada, Petrología: Rocas metamórficas
- González Federico, González Sandoval Federico. (2004). Manual de Supervisión de Concreto Reforzado.

Helene, Paulo et Al. Sao Paulo (2000). Rehabilitación y Mantenimiento de estructuras de Concreto.

Maldonado Esperanza, Jascón Neyid Mauricio, Chio Gustavo, (2010). Funciones de Vulnerabilidad calculadas para edificaciones en muros de hormigón reforzado; Ingeniería de Construcción.

Moreno Pérez Emiliano. México, (2005). Comportamiento electroquímico del acero embebido en concreto. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencia con Especialidad en Ingeniería Metalúrgica. ESIQIE – IPN.

Muñoz Muñoz, Harold. Asocreto (2015). Construcción, Interventoría y supervisión técnica de las edificaciones de concreto estructuras, según reglamento Colombiano NSR-10.

Obtenido de UGR: https://www.ugr.es/~agcasco/msecgeol/secciones/petro/pet_met.htm

P, Maiza, S. Marfil. (2000). Petrografía del hormigón endurecido: estudio de un pavimento con patologías.

Portal web de Ecopetrol. (2014). Retrieved from <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/complejo-barrancabermeja>.

Revista imcyc. (2006). Editado por el instituto Mexicano del cemento y del concreto.

Revista Portafolio. Retrieved from <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/la-refineria-de-barranca-sigue-con-la-llama-viva-515178>.

S. Marfil, P. Maiza, R. Salomón. (2002). Examen petrográfico aplicado al estudio del hormigón de una ruta interurbana con evidencias de deterioro. Revista de la Asociación de Geología aplicada a la ingeniería y al ambiente.

Salinas Luna, Elkin Darío. (2012). Comportamiento a la Corrosión de acero galvanizado en una solución poro de concreto con cloruros y carbonatos.

Sanchez de Guzmán, Diego. Bogotá, Asocreto (2017). Durabilidad y Patología del Concreto.

Stehly, Richard D. & Brewer, Adam J. (2011). El informe petrográfico. Revista Construcción y tecnología en concreto. Núm. 06.

Vicepresidencia de Servicios y Tecnología Corporativo de Normas y Estándares de Ecopetrol, (2010). Estándar Técnico para Acero de Refuerzo, ECP-VST-P-CIV-ET-013.