

- Aplicación de la técnica Mössbauer para el estudio de la corrosión en concretos OPC.
- Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga simultánea para una empresa de distribución de bebidas.
- Estudio de la bóveda de la iglesia de San Ignacio en Bogotá.
- Ensayos cíclicos y estáticos para evaluar la resistencia sísmica de los muros y las conexiones de paneles livianos prefabricados para la construcción de viviendas.
- Efecto de las bacterias tiosulfato reductoras en la corrosión de tuberías enterradas en suelos de campos de producción.

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE
INGENIERÍA

75

Julio - Septiembre de 2009

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas - Publindex - Clasificación tipo C
Publicación incluida en Ulrichsweb.com™
Tarifa postal reducida No. 2008-107
Vence 31 de diciembre de 2009

Editorial

CARLOS ENRIQUE ARROYAVE POSADA

Vicerrector académico de la Escuela Colombiana de Ingeniería y director de la Revista.

carlos.arroyave@escuelaing.edu.co

Fuerzas vivas de la nación –incluidos empresarios y académicos–, aglutinadas por el Estado, han comenzado a dar pasos evidentes en la búsqueda de un gran acuerdo patrio sobre cuál debe ser el futuro de Colombia a mediano plazo. Se plantea, entonces, la propuesta de un plan nacional de productividad y competitividad, mediante el cual se aspira a que en dos o tres décadas alcancemos una situación socioeconómica equivalente a la de un país de desarrollo medio.

Muy gratificante es el hecho de que dicho propósito se fundamente en la consolidación de un sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación, a cuyo alrededor se llama a cerrar filas y que, por tanto, debe contar con las universidades como abanderadas.

Adicionalmente, el gran salto se soporta de manera directa en la transformación del sistema productivo y éste, a su vez, tiene como uno de sus pilares la definición y consolidación de sectores productivos de talla mundial. En consecuencia, fruto de numerosos estudios y vastos debates, además de la idea de consolidar la presencia internacional en sectores como el del café, el carbón y los

biocombustibles, se ha decidido apostarles a otros sectores de la manufactura y los servicios en los que Colombia puede posicionarse mucho mejor o tornarse protagonista. Ante este llamado, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ha estado planeando su quehacer para los próximos años, considerando también sus fortalezas e intereses, y ha decidido concentrar sus esfuerzos en ciertas áreas de la ciencia, la tecnología y la ingeniería. Consecuente con lo anterior, la *Revista*, como su principal medio de comunicación científica, asume la tarea de respaldar las prioridades establecidas y trabajar por el avance de tales temas en la institución, la región y el país.

Los productos de nuevo conocimiento que hoy presentamos responden directamente a dicho propósito, entre los que se incluyen temas transversales relacionados con la infraestructura que debe sostener ese desarrollo y el manejo de problemas logísticos de transporte de insumos y de productos, tan significativos para Colombia.

Esperamos seguir siendo fieles a este compromiso, para beneficio nacional.

Aplicación de la técnica Mössbauer para el estudio de la corrosión en concretos OPC

Using the Mössbauer technique in the study of corrosion in OPC concrete

WILLIAM APERADOR (W. APERADOR)¹, HERNÁN GARCÍA TRIANA (H. GARCÍA)³, JESÚS TABARES (J. A. TABARES)³, RUBY MEJÍA DE GUTIÉRREZ (R. MEJÍA DE GUTIÉRREZ)²

1. Escuela Colombiana de Ingeniería, Grupo Ingeniería de Materiales, Bogotá.

2. Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos, Cali.

3. Universidad del Valle, Grupo de Metalurgia Física y Teoría de Transiciones de Fase, Departamento de Física, Cali.

william.aperador@escuelaing.edu.co

Recibido: 23/03/09 Revisado: 11/04/09 Aceptado: 12/05/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este trabajo se utilizó la técnica de espectrometría Mössbauer para estudiar el desempeño de un acero estructural embebido en un concreto tipo pórtland expuesto al proceso de carbonatación acelerada (3% CO₂, 65% humedad relativa (HR) y 25 °C temperatura) y condiciones de laboratorio (0,03% CO₂, 65% humedad relativa (HR) y 25 °C temperatura). Se identificaron y cuantificaron óxidos de hierro, los cuales fueron magnetita (Fe₃O₄), wuestita (FeO) y goethita (α-FeOOH). Se puede observar que el proceso de carbonatación acelerada genera un aumento en la cuantificación de estos óxidos.

Palabras claves: corrosión, Mössbauer, carbonatación, OPC.

Abstract

In this research, Mössbauer spectrometry was used to study the performance of steel bars embedded in an Ordinary Portland Cement (OPC) concrete exposed to an accelerated carbonation chamber (3% CO₂, 65% relative humidity (RH) and 25 °C in a laboratory environment (0.03% CO₂, 65% RH, and 25 °C). We characterized the corrosion products generated at the steel/concrete interface. The main compounds were magnetite (Fe₃O₄), wuestite (FeO), and goethite (α-FeO(OH)). The accelerated carbonation process increases the quantification of these oxides.

Keywords: corrosion, Mössbauer spectrometry, carbonation, OPC.

INTRODUCCIÓN

El acero embebido en un concreto de buena calidad es protegido del ambiente atmosférico por la alta alcalinidad de la solución del poro ($\text{pH} > 12,5$) el cual, en presencia del oxígeno, pasiva el acero. La protección puede perderse debido a la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el CO_2 atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto ($\text{pH} \approx 8$), desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo [1-2]. La prevención y detección del deterioro de infraestructuras de concreto es uno de los mayores retos. Se han usado varias técnicas cuantitativas no destructivas, basadas en métodos electroquímicos, para medir la velocidad de corrosión y así detectar la corrosión previamente.

El seguimiento y la evaluación de la resistencia a la corrosión de los puentes y otras estructuras de acero han sido muy limitados en los últimos años. Se considera que la corrosión ha causado graves problemas de deterioro que se están evidenciando en puentes de concreto con menos de 25 años de vida útil y que tienen embebido acero; estos problemas han sido resultado de la falta de conocimiento de la aplicación de los aceros estructurales con recubrimiento y sin él. Conforme a las directrices de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), es común efectuar evaluaciones de la corrosión del acero mediante la exposición de cupones de acero en sitios expuestos al medio ambiente, haciéndoles un seguimiento generalmente por períodos de hasta 30 años [3].

La duración del acero en un entorno determinado se calcula midiendo su velocidad de corrosión o pérdida de masa después de la exposición. La velocidad de corrosión se mide en función de las condiciones ambientales y las reacciones químicas que se presentan sobre la superficie del acero, pero los datos no proporcionan información sobre los óxidos o de la química de las capas de corrosión que se forman en el acero. Sin embargo, la identificación de los óxidos, así como la fracción de cada uno de los productos de corrosión, es importante para una mejor comprensión de los procesos de corrosión [4].

Para entender cómo las condiciones de exposición en un ambiente agresivo controlan la formación de productos de corrosión, y el rol de algunos de estos óxidos en la protección del acero a través de resistencia a la corrosión, es necesario hacer un análisis completo de la composición química y la fase de los recubrimientos. La difracción de rayos X (DRX) ha sido el método más popular para la identificación de los óxidos en el acero, pero sólo con una cuidadosa calibración de difracción de rayos X se puede usar para determinar la cantidad de cada compuesto de óxido de los productos de corrosión. Durante la última década, la aplicación de la espectroscopia Mössbauer al estudio de la corrosión atmosférica de los aceros estructurales ha demostrado que la difracción de rayos X con frecuencia proporciona una identificación muy errónea de la composición del óxido formado en la intemperie y aceros al carbono. Un ejemplo común es la identificación por separado de magnetita (Fe_3O_4) y maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Debido a que los óxidos tienen estructura cúbica y parámetros de red casi idénticos a temperatura ambiente, dificulta la caracterización de estos óxidos por difracción de rayos X [5]. No obstante, las propiedades magnéticas y eléctricas de los óxidos son muy diferentes, lo que permite a la espectroscopia Mössbauer identificar cada uno por separado. Por tanto, tal espectroscopia ha sido invaluable en la identificación de magnetita y maghemita, además de que proporciona información relativa a la concentración de impurezas y las condiciones de exposición en que se formaron.

El objetivo de este trabajo es utilizar la espectroscopia Mössbauer como una técnica analítica para la investigación de los productos de corrosión generados en el proceso de carbonatación del concreto tipo pórtland.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el estudio de la corrosión en estos materiales se utilizó concreto fabricado con cemento pórtland tipo I (OPC), de uso común en construcción y sin ningún aditivo. La fabricación de la mezcla de concreto contenía una dosificación de material cementante de 300 kg/m^3 . Se supuso que la relación agua/cemento fue de 0,5 con el fin de obtener un asentamiento adecuado (70 a 100 mm).

El tipo, composición y tamaño de los agregados finos y gruesos fueron los mismos para el concreto OPC. Correspondían a una grava con tamaño máximo de 19 mm, gravedad específica de 0,00294 kg/cm³, masa unitaria compacta de 1,86 kg/cm³, masa unitaria suelta de 1,70 kg/cm³ y absorción de 1,3%. Una arena con superficie específica de 0,0247 kg/cm³, masa unitaria compacta de 1,67 kg/cm³, masa unitaria suelta de 1,58 kg/cm³ y absorción de 2,9%. Finalmente, para el fraguado las mezclas con cemento pórtland fueron curadas bajo agua, con humedad relativa de 100% y una temperatura constante de 20 °C [6].

Con el propósito de estudiar en diversas condiciones el fenómeno de la corrosión del acero embebido en los concretos, el proceso para la medición del avance de la corrosión por la inclusión de dióxido de carbono se hizo en una cámara de carbonatación a condiciones controladas (3% CO₂, 65% humedad relativa y una temperatura de 25 °C). Para comparar los resultados obtenidos por la carbonatación se realizaron medidas a probetas expuestas al ambiente con las siguientes condiciones: 68% humedad relativa, 25 °C y 0,03% CO₂.

La identificación de los productos de corrosión generados en la superficie de los aceros se realizó mediante difracción de rayos X (DRX). El arreglo experimental en difracción de rayos X corresponde a un goniómetro PW3050/60 (θ/θ), manejado con un sistema XPERT-PRO y una radiación monocromática de Cu K α 1,54 Å, operado a 40 kV y 40 mA en condiciones de temperatura de 25 °C. El barrido sobre la superficie se hizo desde $2\theta = 20,01^\circ$ hasta $2\theta = 99,99^\circ$ con un paso $2\theta = 0,02^\circ$ a un tiempo de barrido de un segundo. Además, los espectros de Mössbauer se midieron mediante un arreglo típico de espectrometría Mössbauer de ⁵⁷Fe. Como fuente Mössbauer se utilizó una pastilla de ⁵⁷Co en una matriz de rodio, la cual decae radiactivamente a ⁵⁷Fe. Debido a que en el proceso radiactivo de la fuente de ⁵⁷Co se emiten distintos tipos de radiación, se tiene la posibilidad de dos modalidades de trabajo en la espectrometría Mössbauer, de transmisión o de reflexión, y en cada una de ellas se obtiene información diferente. En esta investigación se utilizó espectroscopia Mössbauer de transmisión (EMT) [7].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis efectuado con DRX sobre la superficie del acero de refuerzo embebido en el concreto OPC permite apreciar la presencia de los óxidos e hidróxidos de hierro en todas las muestras analizadas (tanto para las muestras sometidas a carbonatación acelerada como en las evaluadas al ambiente natural). Otros componentes que aparecen en el análisis de DRX se atribuyen a los componentes propios del concreto y de los agregados. En la figura 1 se observan los difractogramas obtenidos para el acero embebido en el concreto basado en cemento pórtland. En el Opca se presentan algunas fases con mayor intensidad que las halladas con el OPCC, debido a la conformación de la capa de protección, la cual se genera a partir de óxidos y hidróxidos. Se pueden encontrar las siguientes fases presentes: SC: silicato de calcio, C: calcita, G: goethita, AN: andradita, MG: magnetita, W: wustita, L: lepidocrocite, HM: hematita y Q: cuarzo.

En la figura 2 se muestran los espectros Mössbauer a temperatura ambiente de las muestras expuestas a carbonatación acelerada (OPCC) y exposición a ambiente (Opca). Para obtener el mejor ajuste de ambos espectros Mössbauer se utilizaron tres sextetos y dos dobletes, estudiados para ambos casos (OPCC y Opca). Dos de los sextetos se ajustaron con campos magnéticos hiperfinos de (Bf) 48,3 y 46,8 T, desdoblamientos cuadrupolares (Δ) de cero para ambas, y desvíos isoméricos (δ) de 0,17 y 0,57 mm/s, respectivamente, los cuales se

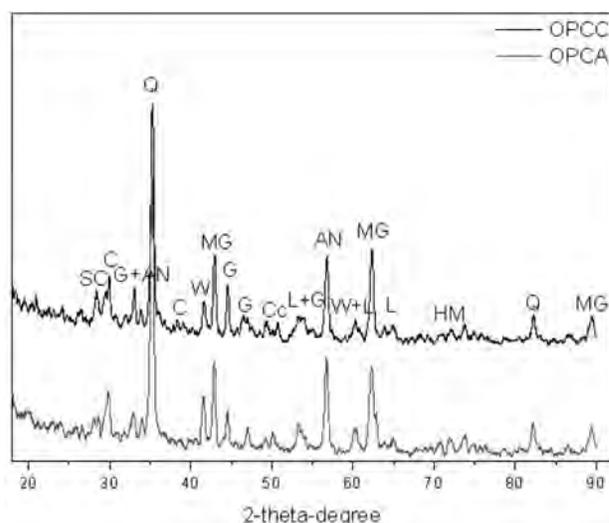


Figura 1. Espectros de DRX de las muestras OPCC y Opca.

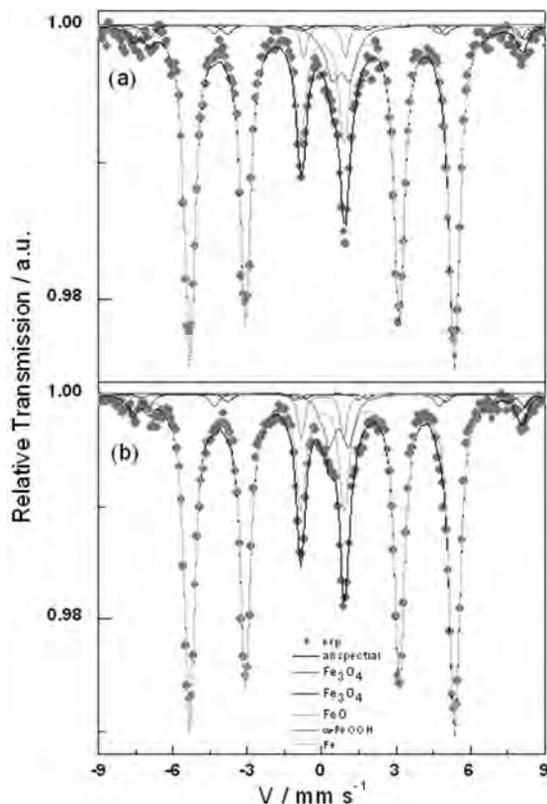


Figura 2. Espectro Mössbauer para la muestra OPC: a) exposición ambiente, b) carbonatación acelerada.

atribuyen a una fase espinela de magnetita ($Fe_{3-x}O_4$) [8-9]. Para el OPCC el otro sexteto se ajustó con parámetros, $B_f = 32,9$ T, $\Delta = -0,011$ mm/s y $\delta = -0,00$ mm/s, que se atribuye a una fase de Fe. Para uno de los dobletes se encontró $\Delta = 1,59$ mm/s y $\delta = 0,09$ mm/s, correspondiente a la presencia de $Fe^{2+}O$. En cuanto al otro doblete se encontró $\Delta = 0,69$ mm/s y $\delta = 0,71$ mm/s, correspondiente a la presencia de $Fe^{3+}O(OH)$. Se halló que para el Opca el sexteto restante se ajustó con parámetros, $B_f = 32,9$ T, $\Delta = -0,015$ mm/s y $\delta = 0,00$ mm/s, el cual se atribuye a una fase de Fe. Para uno de los dobletes se encontró $\Delta = 1,62$ mm/s y $\delta = 0,09$ mm/s, correspondiente a la presencia de $Fe^{2+}O$; en cuanto al otro doblete se encontró $\Delta = 0,78$ mm/s y $\delta = 0,62$ mm/s, correspondiente a la presencia de $Fe^{3+}O(OH)$.

En la tabla 1 se reportan los resultados porcentuales de óxidos e hidróxidos presentes en cada muestra. Se observa en todos los casos un porcentaje alto de hierro. En OPCC, la mayoría de los productos encontrados son

magnetita y goethita. Los porcentajes correspondientes a los productos de corrosión sobre el acero embebido en OPCC y Opca son similares entre sí; tan sólo el contenido de la fase goethita prevalece en condición de carbonatación, mientras en el medio ambiente natural los mayores valores se obtuvieron para magnetita.

Tabla 1

Relación de áreas del espectro Mössbauer de los productos hallados para las muestras

Fase	OPCC	OPCA
Magnetita (%)	$5,75 \pm 0,0023$	$6,76 \pm 0,0011$
Wustita (%)	$2,31 \pm 0,0001$	$3,31 \pm 0,0023$
Goethita (%)	$7,72 \pm 0,0045$	$6,63 \pm 0,0043$
Hierro (%)	$84,22 \pm 0,0037$	$83,29 \pm 0,0018$

La wustita sólo es estable a altas temperaturas. Por tanto, a temperatura ambiente se presenta como un residuo de forma laminar, ofreciendo muy poca protección a largo plazo para el acero en exposición ambiental o carbonatación acelerada. La goethita formada tiene alto porcentaje debido a la disolución y precipitación de lepidocrocita, la cual se transforma en goethita; debido a esto, no aparece lepidocrocita en el espectro Mössbauer [10].

La información arrojada por estas técnicas DRX y Mössbauer es análoga debido a que sobre la superficie del acero de refuerzo embebido en el concreto OPC se encontró presencia de óxidos e hidróxidos de hierro en las muestras analizadas (tanto para las muestras sometidas a carbonatación acelerada como a las evaluadas al ambiente natural). Además, se estableció la formación de la magnetita (Fe_3O_4), wustita ($Fe^{2+}O$) y goethita ($Fe^{3+}O(OH)$) como principales productos de corrosión; otros productos, como lepidocrocita y hematita, son hallados con menor intensidad, posiblemente debido al bajo porcentaje de estos hidróxidos presentes en la muestras analizadas, o a la mezcla con el hierro en razón de que poseen parámetros similares.

CONCLUSIONES

La espectroscopia Mössbauer es una técnica analítica con un alto grado de precisión, además es no destructiva, se utiliza para la identificación y cuantificación

de los productos de corrosión formada sobre el acero estructural expuesto a carbonatación acelerada y ambiente natural. El análisis a los concretos OPC muestra la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro en todas las muestras analizadas (tanto para las muestras sometidas a carbonatación acelerada como a las evaluadas al ambiente natural); además, se estableció la formación de la magnetita (Fe_3O_4), wustita (Fe^{2+}O) y goethita ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$) como principales productos de corrosión.

Agradecimientos

Los autores del presente trabajo expresan su agradecimiento a la dirección de investigaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, CENM y Colciencias, por el apoyo para la realización de este estudio, enmarcado en el proyecto Geoconcrete Convocatoria 332/2006, por el financiamiento recibido para su ejecución.

REFERENCIAS

- [1] Sathiyarayanan, S., Natarajan, Panjali, Saravanan, K., Srinivasan, S., Venkatachari, G. & Castro, M.Y. (2006). *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 630-637.
- [2] Frolund, Thomas, Jensen, Finn M. & Bassler, Ralph (2002). First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management IABMAS, pp. 1-8.
- [3] Metals and alloys (1992). Atmospheric corrosion testing, General requirements for field tests, Standard 8565-92, International Organization for Standardization.
- [4] Aperador, W. (2009). Evaluación de la corrosión de aceros embebidos en concretos activados alcalinamente. Tesis de doctorado. Colombia: Universidad del Valle, pp. 115-119.
- [5] Cornell, R. M. & Schwertmann, U. (1996). *The Iron Oxides. Structure, Properties, Occurrence and Uses*. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, p. 9.
- [6] Aperador, W., Mejía de Gutiérrez, R. & Bastidas, D.M. (2009). Corrosion resistance of carbonated alkali-activated slag concrete. *Corrosion Science*, 51 (3), pp. 2027-2033.
- [7] Semat, H. (1962). *Introduction to atomic and nuclear physics*. Rinhard & Company.
- [8] Rodríguez, V.F. (1993). *Desvío isomérico y sus aplicaciones*. Cali: GMTF.
- [9] Pérez, F., Barrero, C., Arnache, O., Sánchez, L.C., Peñaranda, S., García, K.E. & Pérez, M. (2007). Caracterización de herrumbres en procesos de corrosión de aceros en inmersión total. *Revista Colombiana de Física*, 39, pp. 83-86.
- [10] Haces, C., Corvo, F. & Pérez Reyes, A. (1981). Estudio de los productos de corrosión formados sobre aceros al carbono, en clima tropical húmedo (parte I). *Revista Cubana de Química*, pp. 34-44.

Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga simultánea para una empresa de distribución de bebidas

Solving the vehicles routing with simultaneous pickups and deliveries for a beverage distribution company

ÉDGAR GUTIÉRREZ-FRANCO¹, JAIRO R. MONTOYA-TORRES², JORGE A. BAUTISTA¹, ÉDGAR H. ALFONSO LIZARAZO¹

1. Universidad de La Sabana, Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos, Facultad de Ingeniería.

2. Universidad de La Sabana, Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas.

edgar.gutierrez, jorgebaar, edgar.alfonso@unisabana.edu.co jairo.montoya@unisabana.edu.co

Sometido: 9/9/08 Revisado: 24/11/08, 22/2/09, 15/4/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En este trabajo se presenta una solución para el problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga simultánea (*Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries*, VRPSPD). El estudio de este problema está inspirado en una aplicación real, proveniente de una empresa de distribución de productos lácteos con flota de vehículos heterogénea; puesto que el VRPSPD es conocido por ser un problema NP completo, se propone un procedimiento de solución basado en la búsqueda tabú. El estudio experimental se lleva a cabo empleando datos reales, en tanto que las soluciones obtenidas se comparan con la solución óptima conseguida con un modelo de programación entera mixta. Los resultados muestran la capacidad del procedimiento propuesto para generar buenas soluciones en mejores tiempos de cálculo.

Palabras claves: enrutamiento de vehículos, carga y descarga simultánea, búsqueda tabú, estudio de caso.

Abstract

This paper presents a solution for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries (VRPSPD) and heterogeneous fleet. The study of this problem is inspired from a real-life application taken from a milky beverage distribution enterprise. Since this problem is known to be NP-complete, this paper proposes a solution procedure based on tabu search. We conduct the experiments using real-life data. Solutions obtained using the tabu search procedure are compared with exact solution obtained using a mixed-integer linear programming model. Results show that the proposed procedure can generate very competitive solution in less computational time.

Keywords: vehicle routing, simultaneous pickup and delivery, tabu search, case study.

INTRODUCCIÓN

El transporte de productos y su adecuada planeación es una actividad común en diversas empresas de bienes y servicios, puesto que se busca satisfacer las necesidades de los clientes haciendo uso eficiente de recursos limitados de transporte. El enrutamiento de vehículos no siempre se modela de la misma manera, ya que depende de las características cuantitativas y cualitativas del caso específico que se va a tratar, por lo que se requieren ajustes en el modelo con el fin de suplir las necesidades que presente cada caso de aplicación. Inicialmente propuesto por Dantzig y Ramser (1959), el problema se ha aplicado en campos como el transporte y la distribución. A lo largo de la segunda mitad del siglo XX y principios del siglo XXI, se han hecho diversas modificaciones al modelo original del problema de enrutamiento de vehículos (*Vehicle Routing Problem*, VRP). Así mismo, en la literatura científica se han propuesto diversas formas de resolverlo, de modo que estos procedimientos puedan aplicarse eficientemente a diferentes situaciones y escenarios reales. Por lo general, se cuenta con un depósito del que sale y llega una flota de camiones o vehículos, razón por la cual se necesita planear el recorrido de las rutas con el fin de satisfacer la demanda de recolección y entrega de productos. El diseño de estas rutas debe hacerse con el mínimo costo posible de ejecución de los recorridos.

En este trabajo se estudia un caso real de diseño de rutas de distribución de productos lácteos, con carga y descarga simultánea en los puntos de servicio. Por razones de confidencialidad no es posible mencionar el nombre de la empresa, pero sí es posible decir que se trata de uno de los productores y distribuidores de lácteos líderes en Colombia. El problema tiene que ver con la distribución de bebidas lácteas a los principales supermercados de la ciudad de Bogotá utilizando la flota de camiones de la compañía, cuyas características son de carga y descarga simultánea: cada cliente tiene una demanda de carga, manifestada a través de la solicitud de productos, y una demanda de descarga, que se presenta como la devolución de productos. Estas devoluciones de productos pueden identificarse por la expiración de la fecha de vencimiento principalmente, puesto que se trata de productos perecederos.

Para la solución del problema, en primera instancia se presenta un modelo de programación lineal entera mixta con miras a la obtención de la solución óptima.

Sin embargo, puesto que el problema en estudio es de tipo NP completo, no es posible obtener una solución óptima para instancias de gran tamaño usando métodos exactos; por tanto, para mejorar los tiempos de cálculo con buenas soluciones se propone emplear un procedimiento de resolución basado en la búsqueda tabú.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En primer lugar, se describe el problema en estudio, inspirado en una aplicación real proveniente de la distribución de productos lácteos. Después se hace una breve revisión de la literatura referente tanto al problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga simultánea, como a ciertas aplicaciones del procedimiento de búsqueda tabú para la resolución de problemas de diseño de rutas. Posteriormente, se describe en detalle el diseño del algoritmo propuesto. A continuación se presentan los resultados computacionales de la implementación en la empresa en estudio. Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El transporte de bienes es uno de los factores que más inciden en los costos de toda la red logística, llegando a ser el 35% de los costos totales logísticos, aproximadamente (Solomon, 2003). Se hace, pues, indispensable que esta tarea sea eficaz para evitar pérdidas y gastos innecesarios. El problema de diseño de rutas de distribución estudiado en este artículo se encontró en una empresa líder en la producción y distribución de productos lácteos en Colombia, que realiza también operaciones en Ecuador y Venezuela. La distribución de los productos se hace empleando una cadena de frío, en razón del cuidado y el manejo que se les debe dar a los productos.

Para satisfacer la demanda de cada uno de sus clientes, la empresa debe planear el uso de un número limitado de camiones no idénticos, optimizar el uso de su capacidad y minimizar los costos de operación. La operación de logística de distribución de los productos lácteos debe enfrentar los problemas de carga y descarga simultánea en el punto de servicio. La descarga del vehículo (camión) se genera cuando se abastece el punto de venta y la carga se produce por la devolución de productos en el punto de venta (éstos pueden estar vencidos o encontrarse en mal estado). Los productos

devueltos se ofrecen a fincas porcicultoras, donde se aprovechan como parte del concentrado para cerdos. En este caso en particular, la empresa tiene un centro de distribución que atiende a los 107 supermercados de mayor demanda en la ciudad de Bogotá. Para el transporte de los productos lácteos se cuenta con una flota de 37 camiones, de los cuales 34 vehículos tienen capacidad mediana y 3 son de gran capacidad. En el cálculo de las distancias de transporte, la aplicación generada en el presente trabajo no utiliza coordenadas cartesianas, sino el costo de transporte de un supermercado a otro.

Formalmente, el problema de definición de rutas de distribución de los productos de la empresa en estudio se define como un problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga simultánea (*Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries*, VRPSPD). Este problema se puede representar con un grafo completo $G = (J, E)$, donde $J = \{0, 1, \dots, n\}$ es el conjunto de vértices o nodos (clientes) y E es el conjunto de arcos. El vértice $j = 0$ representa el depósito de la flota de camiones y los vértices $j = 1, \dots, n$ corresponden a los clientes o puntos de servicio, los cuales tienen asociada una demanda de producto. Cada arco $(i, j) \in E$, con $i, j = 0, 1, \dots, n$ e $i \neq j$, tiene asociado un costo de transporte y representan el valor de transportarse del vértice i al vértice j . Nótese que cuando $i = j$, este costo de transporte es nulo. Se cuenta con una flota heterogénea de k vehículos, cada uno con capacidad de carga C_k , con $b = 1, \dots, k$. En la figura 1 se muestra la representación

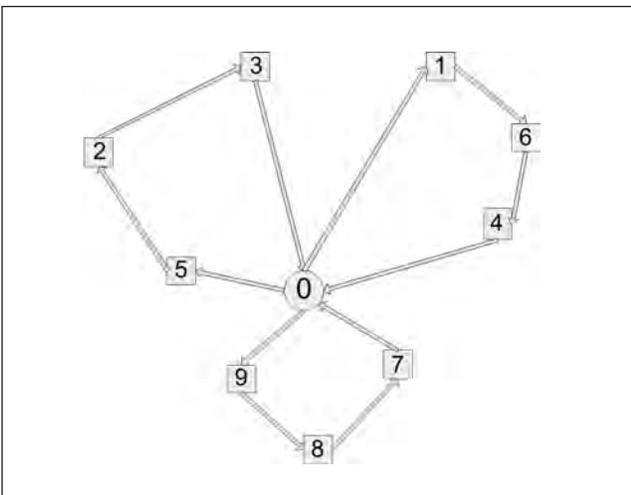


Figura 1. Representación del grafo.

de un problema de ruteo de vehículos compuesto por nueve nodos (clientes) y un centro de acopio o depósito (nodo 0). En cada nodo, los vehículos deben cargar y descargar producto.

El objetivo del VRPSPD es encontrar la partición de nodos en $J \setminus \{0\}$, siendo 0 el depósito, de modo que se hallen k particiones J_1, \dots, J_k y cada una contenga el nodo 0 exactamente una vez. Cada una de estas particiones de nodos corresponde a la ruta del vehículo $b = 1, \dots, k$. Se desea definir cada ruta con el mínimo costo, calculado como la suma de los costos de los arcos pertenecientes a dicha ruta. Para esto hay que tener en cuenta las siguientes características:

- Cada ruta sale y llega al nodo 0 (depósito).
- Cada vértice $j \in J \setminus \{0\}$ está contenido en una ruta y sólo una.
- La suma de las demandas de cada cliente en la ruta realizada por el camión (vehículo) k no debe exceder su capacidad C_k .
- Se debe satisfacer a cada cliente en cuanto a su demanda de carga y descarga de producto.

El problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga simultánea se puede formular como un modelo de programación lineal entera mixta. Es necesario definir los siguientes elementos del modelo matemático. Los índices y conjuntos se definen como:

- J : conjunto de nodos (clientes) en el grafo (no incluye el depósito).
- $J \setminus \{0\}$: conjunto de nodos en el grafo, excepto el depósito 0.
- K : conjunto de camiones (vehículos) utilizados para la distribución y recolección de productos.

Los parámetros del modelo son:

- C_k : capacidad de carga del vehículo $k \in K$.
- d_{ijk} : costo de viaje por parte del vehículo $k \in K$ entre los nodos $i \in J_0$ y $j \in J$, con $i \neq j$.
- D_j : cantidad de producto por descargar en el nodo (cliente) j .
- P_j : cantidad de producto por cargar en el nodo (cliente) j .
- n : número de clientes en el grafo.

M : cantidad numérica excesivamente grande, i.e.,
 $M \rightarrow \infty$.

Las variables de decisión están definidas como:

l_k : carga del vehículo k al partir del depósito.
 l_j : carga del vehículo después de atender al cliente j .
 π_j : variable empleada para evitar los subciclos inconexos
 X_{ijk} : variable binaria que vale 1 si el vehículo k realiza la ruta entre los nodos i y j .

El modelo matemático es el siguiente:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in J_0} d_{ijk} X_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N_k \cup \{d(k)\}} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{i \in J_0} X_{isk} - \sum_{j \in J_0} X_{ijk} = 0 \quad \forall S \in J, \quad \forall k \in K, i \neq S \quad (3)$$

$$l_k = \sum_{i \in J_0} \sum_{j \in J_0} D_j X_{ijk} \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$l_j = l_k - D_j + P_j - M(1 - X_{0jk}) \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$l_j = l_i - D_j + M \left(1 - \sum_{k \in K} X_{ijk} \right) \quad \forall i, j \in J, i \neq j \quad (6)$$

$$l'_k \leq C_k \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\pi_j \geq \pi_i + 1 - n \left(1 - \sum_{k \in K} X_{ijk} \right) \quad \forall i, j \in J, i \neq j \quad (8)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in J_0, i \neq j, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

La función objetivo (1) busca la minimización de los costos de transporte. Las ecuaciones (2) aseguran que el servicio por cliente se preste una vez y sólo una. Las ecuaciones (3) aseguran que cada cliente sea atendido por un solo vehículo. Las cargas iniciales están determinadas por los conjuntos de restricciones (4), mientras que las cargas de los vehículos después de atender el primer cliente están determinadas por las restricciones (5). Las restricciones (6) introducen los límites para la carga de los vehículos en ruta. Las restricciones (7)

aseguran que no se sobrepase la capacidad de carga de los vehículos. Las restricciones (8) garantizan la eliminación de subrutas (subciclos) inconexas. Finalmente, las restricciones (9) aseguran los valores admisibles para las variables de decisión.

REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE

El problema clásico de enrutamiento de vehículos (VRP) se ha estudiado ampliamente en las fuentes bibliográficas existentes sobre el tema. El lector interesado en conocer los procedimientos aplicados para resolverlo puede consultar los trabajos de Laporte (1992), Toth y Vigo (2001) o Golden et ál. (2008). En lo referente a problemas generales sobre carga y descarga, Parragh et ál. (2008a, b) presentan una revisión completa de la literatura científica relacionada. El caso particular del problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga (VRPPD) se produjo en la segunda mitad de la década de los ochenta (Golden y Assad, 1988). El modelo con carga y descarga simultánea lo expuso por primera vez Min (1989). Berbeglia et ál. (2007) muestran un marco general para la clasificación de problemas de tipo VRPPD. A continuación se presentan algunos trabajos relacionados con el VRPPD, publicados a partir de 2007, y más adelante se revisan las aplicaciones de la búsqueda tabú para problemas de enrutamiento de vehículos.

Ganesh y Narendran (2007) consideran el VRPPD con restricciones de secuencia y proponen un procedimiento heurístico constructivo de múltiples fases: construcción de *clusters* con los nodos más próximos, diseño de las rutas y asignación de vehículos. Gribkovskaia et ál. (2008) estudian el problema de diseño de rutas para un solo vehículo con mínimo costo neto, sujeto a despachos y cargas seleccionadas en los puntos de destino (clientes). Los autores proponen un modelo de programación lineal mixta y algunos heurísticos. Sus resultados del estudio experimental muestran que las mejores soluciones obtenidas con los métodos heurísticos se acercan a un nivel óptimo, pero frecuentemente son no hamiltonianas (i.e., uno o dos clientes se deben visitar dos veces en la ruta). Wassan et ál. (2008) diseñaron un procedimiento de búsqueda tabú para el problema de enrutamiento de vehículos con carga y descarga simultánea (VRPSPD). Gribkovskaia y Laporte (2008) estudian el problema de carga y descarga con un

solo vehículo hacia varios clientes, tanto en su versión clásica como considerando cargas selectivas o clientes con capacidad limitada.

Por su parte, el procedimiento metaheurístico de búsqueda tabú se ha utilizado para resolver problemas de enrutamiento de vehículos. Algunos de los trabajos realizados sobre enrutamiento de vehículos se citan a continuación. Renaud et ál. (1996) proponen un procedimiento de búsqueda tabú para el VRP con múltiples depósitos y restricciones de capacidad y de longitud de las rutas, en tanto que Brandão y Mercer (1997) sugieren un método de búsqueda tabú para el problema de planeación y enrutamiento de vehículos con múltiples viajes (*Multi-trip Vehicle Routing and Scheduling Problem*, MTVRSP). El procedimiento tabú propuesto por Gendreau et ál. (1999) está diseñado para resolver el problema VRP con flota heterogénea de capacidad variable. Este procedimiento produce soluciones de buena calidad en instancias conocidas. Barbarosoglu y Ozgur (1999) emplean un método tabú para resolver un caso particular de diseño de rutas para la distribución de bienes con un solo vehículo. Más recientemente, El Fallahi et ál. (2008) proponen un algoritmo de búsqueda tabú para resolver un caso especial del VRP con compartimientos dedicados al transporte de los productos demandados por los clientes. Bolduc et ál. (2009) recomiendan un procedimiento de búsqueda tabú para el problema VRP con partición de descargas y calendarios de producción y demanda. Zachariadis et ál. (2009) estudian el VRP capacitado con restricciones de carga bidimensionales (2L-CVRP). Este problema es una generalización del problema de enrutamiento de vehículos con capacidad de carga limitada de los vehículos (CVRP). Côté y Potvin (2009) presentan un método tabú para el VRP con flota homogénea, cuando a los clientes los puede atender una flota privada o un transportador público (externo). El objetivo del dueño de la flota privada es minimizar los costos fijos y variables de operación de su flota, así como también los costos totales de subcontratar el transporte.

PROCEDIMIENTO DE BÚSQUEDA TABÚ PROPUESTO

A continuación se presentarán las principales características del procedimiento tabú, un marco teórico general sobre el procedimiento y la construcción y desarrollo del algoritmo.

Preliminares

La búsqueda tabú es un procedimiento metaheurístico que puede catalogarse como “la clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas que son de optimización combinatoria, en los que las heurísticas clásicas no son efectivas ni eficientes. Las metaheurísticas proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de inteligencia artificial, evolución biológica y mecanismos estadísticos” (Glover y Kochenberger, 2002).

El procedimiento de búsqueda tabú (Glover, 1989) se ha aplicado en diversos casos de estudio y se basa en un procedimiento iterativo y heurístico con el fin de resolver problemas discretos de optimización combinatoria y de gran escala (Glover y Laguna, 1977; Glover et ál., 2005). El algoritmo busca no caer en óptimos locales, imponiendo y relajando restricciones para la solución del problema y realizando cortes de región factible, tomando en cuenta las restricciones que tiene el problema inicialmente. En el procedimiento se puede encontrar memoria a corto plazo, donde se almacena el historial de los últimos movimientos realizados, de modo que ésta sirva para evitar el regresar a un óptimo local. Por otra parte, la memoria a largo plazo busca diversificar la búsqueda sobre regiones inexploradas. De acuerdo con lo anterior, los dos procesos claves del procedimiento son restringir la búsqueda al catalogar el movimiento como tabú (prohibido) y liberar el movimiento mediante la memoria de corto plazo.

A renglón seguido se muestran los pasos para la realización de la búsqueda tabú aplicada al problema en estudio:

1. Selección de una solución inicial. Para el caso en estudio, esta solución inicial se obtuvo empleando el algoritmo de Clark y Wright (1964).
2. Desarrollo de la búsqueda tabú mediante búsqueda local.

Construcción de la solución inicial

Para la construcción de una solución inicial, se utilizó el algoritmo de Clarke y Wright (1964). En el caso en estudio se tiene una flota de camiones disponibles y todos los clientes, con sus respectivas demandas de carga y descarga. Los pasos para implementar exitosa-

mente el algoritmo en el caso en estudio se describen a continuación:

1. Cada cliente tendrá disponible un camión para suplir su demanda de carga y descarga. El camión realizará una ruta de ida y vuelta al depósito. Cabe anotar que el camión asignado debe poseer la capacidad necesaria para suplir esta demanda.
2. Se determina la matriz de ahorros con el fin de calcular los ahorros netos para cada pareja de clientes y asignarlos.
3. En la matriz de ahorros netos, para $i < j$ se ha de identificar la celda (i, j) que contiene el máximo ahorro. Después, las rutas $(0 \rightarrow i \rightarrow 0)$ y $(0 \rightarrow j \rightarrow 0)$ se colocarán en una nueva ruta $(0 \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow 0)$. Esto si inicialmente el camión que se seleccionó para la ruta $(0 \rightarrow j \rightarrow 0)$ posee capacidad para hacer el recorrido y cumplir la demanda $(0 \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow 0)$.
4. Cuando se identifica en la matriz de ahorros netos la celda (i, j) , con $i < j$ que contiene el máximo ahorro neto, los clientes i y j se pueden relacionar si y sólo si se satisface que:
 - a) Existe un trayecto del camión $(i \rightarrow 0)$ y otro trayecto $(0 \rightarrow j)$.
 - b) Los clientes i y j no están ya en la misma ruta del camión que tiene asignados los clientes.
 - c) Al vincularse los clientes i y j , agregando la ruta $(i \rightarrow j)$ y quitando $(0 \rightarrow i)$ y $(0 \rightarrow j)$, no se viola ninguna de las restricciones descritas en la formulación matemática.
5. Se repite el paso 4 hasta que no queden ahorros netos en la matriz por modificar.

Desarrollo de la búsqueda tabú mediante búsqueda local

A partir de la solución inicial, obtenida con el procedimiento de Clarke y Wright, se recurre a la fase de búsqueda local, con la cual se desea hallar un conjunto de soluciones. Para esto se selecciona un cliente en forma aleatoria, realizando los siguientes movimientos:

1. **Inserción.** El movimiento de inserción consiste en adherir un cliente c a una ruta r . Dado un cliente $c \in \alpha_{\text{solución}}$ y una ruta $r \subseteq \alpha_{\text{solución}}$, donde r es la ruta recorrida por un vehículo v , se remueve c de su ruta actual y se inserta en la ruta r .

2. **Remoción.** El movimiento de remoción separa a un cliente c de la ruta r en la que estaba asignado. Dado un cliente $c \in \alpha_{\text{solución}}$ que se encuentra en la ruta $r \subseteq \alpha_{\text{solución}}$, se remueve c de r .
3. **Intercambio.** El movimiento de intercambio permuta los clientes c_1 y c_2 asignados a dos rutas. Dados dos clientes c_1 y c_2 , que son parte de los recorridos r de los vehículos k_1 y k_2 , respectivamente, realizar el intercambio reemplazando a c_1 en el recorrido r del vehículo k_2 , y a c_2 en el recorrido r del vehículo k_1 (figura 2).

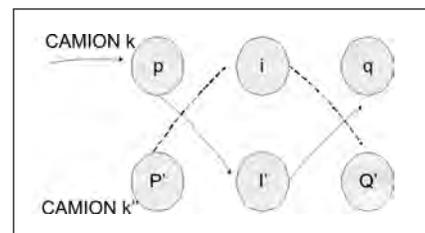


Figura 2. Movimientos de búsqueda local.

Después de efectuar el movimiento, si éste cumple con todas las restricciones, se procede a almacenarlo en la lista tabú. Una vez hecho el movimiento, el cliente asignado en el movimiento se descartará para incluirlo en futuros movimientos durante las próximas θ iteraciones, que se convierte en un parámetro para la resolución del problema. El procedimiento para la búsqueda es el siguiente:

1. La mejor solución encontrada α_{mejor} consiste en las secuencias (rutas) encontradas por la solución inicial. Como al comienzo del procedimiento no ha habido búsqueda local, la lista tabú está vacía.
2. En cada iteración, el mejor movimiento que no se encuentre en la lista tabú se incluye en la solución obtenida hasta el momento. Ésta es $\alpha_{\text{solución}}$, la cual se incluye en la lista tabú.
3. En caso de que la nueva solución $\alpha_{\text{solución}}$ tenga mejores resultados que la mejor solución α_{mejor} , se aplica el procedimiento de posoptimización y la solución actual $\alpha_{\text{solución}}$ se convierte en la mejor solución α_{mejor} .
4. El proceso de posoptimización está basado en el procedimiento llamado “Unstringing-and-Stringing” (U/S), el cual consiste en una fase de mejoramiento desarrollada por Gendreau et ál. (1992), en la cual se remueve el cliente en cada iteración (empezando

con el primer cliente), y se reinserta en la solución $\alpha_{\text{solución}}$ hasta que no se encuentre un mejoramiento.

EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES

Para la resolución del problema se compararon las soluciones obtenidas con el modelo de programación lineal entero mixto y con el algoritmo de búsqueda tabú propuesto. Los experimentos se realizaron en un computador personal con procesador AMD Turion 64 Mobile, de 1,79 GHz y memoria RAM de 895 MB. El modelo matemático fue resuelto empleando el software de modelación algebraica GAMS (General Algebraic Modeling System) y se utilizó el solver CPLEX. El procedimiento de búsqueda tabú, fue codificado utilizando el lenguaje de programación C++. En estas condiciones, el método propuesto de búsqueda tabú demora entre cinco y seis minutos en encontrar la mejor solución.

El desarrollo de los experimentos se realizó partiendo con diez clientes y con un número de vehículos suficientes, de manera que el modelo de programación lineal entera mixta pudiera dar solución al problema. Posteriormente, en forma gradual se fueron aumentando el número de clientes y vehículos, de tal modo que la complejidad computacional aumentara con el fin de realizar la comparación entre los resultados obtenidos por el método exacto y por el algoritmo de búsqueda tabú. A manera de ilustración, en la tabla 1 se muestran las secuencias de servicio (rutas) para una instancia con 108 clientes y 37 camiones. El valor de la función objetivo encontrado para esta instancia es de \$4.772.273.

En la figura 3 se puede observar la comparación entre los costos de transporte obtenidos por ambos

métodos. En la tabla 2 se muestra el detalle de estas soluciones, junto con la diferencia porcentual (GAP) entre ambas soluciones, calculada como:

$$\%dev = 100\% - \frac{C(\text{tabú})}{C(\text{Plem})} \times 100\% \quad (10)$$

Donde C(Tabú) y C(Plem) corresponden, respectivamente, al valor de la función objetivo empleando el método de búsqueda tabú y al valor de la función objetivo usando el método exacto de solución (programación lineal entera mixta).

Los resultados de la tabla 2 permiten apreciar que la programación entera mixta puede ofrecer un resultado óptimo: hasta 85 clientes con 7 camiones. Después de este tamaño de instancia, el método exacto no logra encontrar la solución óptima en un tiempo de cálculo razonable debido a la complejidad de tipo NP-duro del problema en estudio. Respecto a las comparaciones, se observa que no se encuentran soluciones mediante el algoritmo tabú que permitan tener un error inferior al 5%. Según lo reportado en las fuentes bibliográficas, habría que aumentar el número de iteraciones del algoritmo, actualmente fijadas en 500 (Solomon, 2003). De igual manera, la desviación porcentual de las soluciones encontradas aumenta en la medida en que se incrementa el número de clientes y camiones en la instancia, debido a que la flota de camiones es mixta (heterogénea) y la resolución empieza a utilizar camiones de diferentes capacidades. Esto ocasiona que el costo marginal de transporte disminuya, haciendo que el valor del costo encontrado por el algoritmo tabú se acerque al hallado por el método exacto. En la figura 4 se presenta la desviación porcentual del valor de la función objetivo en función del número de clientes en la red de distribución (nodos en el grafo).

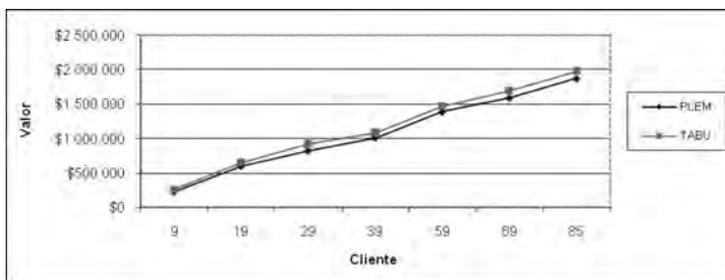


Figura 3. Comparación de soluciones obtenidas con el método exacto (Plem) y búsqueda tabú.

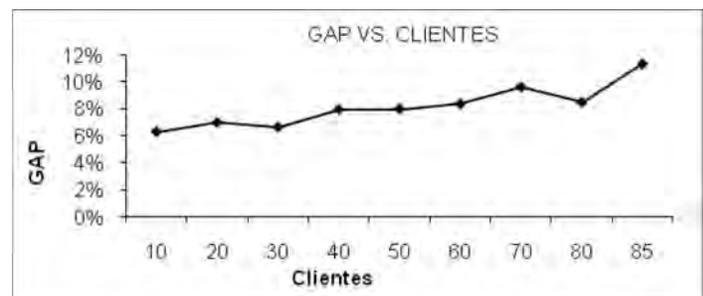


Figura 4. Desviación porcentual (GAP) en función del número de nodos en el grafo.

Tabla 1
Secuencia de rutas

Camión	Secuencia de rutas (nodos por visitar)	Camión	Secuencia de rutas (nodos por visitar)
0	0-1-0	19	0-22-0
1	0-2-0	20	0-23-60-0
2	0-3-0	21	0-24-0
3	0-4-0	22	0-25-0
4	0-5-0	23	0-27-0
5	0-6-0	24	0-28-0
6	0-7-0	25	0-29-56-61-75-0
7	0-8-0	26	0-30-0
8	0-9-0	27	0-31-47-53-59-66-0
9	0-10-0	28	0-2-0
10	0-11-39-0	29	0-33-67-0
11	0-12-40-0	30	0-34-69-79-0
12	0-13-41-45-0	31	0-35-81-0
13	0-14-0	32	0-36-0
14	0-15-46-0	33	0-37-43-48-50-52 63-64-68-70-72-73-74 76-77-78-80-82-83-84 85-86-87-88-89-90-91-92 93-94-95-96-97-98-99 100-101-102-103-104 105-106-107-108-0
15	0-16-42-49-55-0	34	0-17-20-44-57-0
16	0-18-62-0	35	0-26-0
17	0-19-51-58-0	36	0-38-0
18	0-21-54-65-0		

Tabla 2
Comparaciones entre Plem y búsqueda tabú

Vehículos	Clientes	Plem	Tabú	GAP
2	10	\$364.794,1	\$387.708,9	6,28%
4	20	\$572.156,8	\$612.158,8	6,99%
5	30	\$779.519,5	\$831.248,7	6,64%
6	40	\$986.882,2	\$106.551,9	7,97%
6	50	\$119.424,5	\$128.978,9	8,00%
6	60	\$140.160,8	\$151.905,8	8,38%
7	70	\$160.897,0	\$176.432,8	9,66%
7	80	\$181.633,3	\$197.059,8	8,49%
7	85	\$1.920,014	\$213.873,3	11,39%

CONCLUSIONES

En este artículo se estudió un problema de enrutamiento de vehículos con flota heterogénea, y carga y descarga simultáneas (VRPSPD). El problema se inspiró en una aplicación industrial real, proveniente de una compañía dedicada a la distribución de productos lácteos. El problema en estudio se formalizó a través de un modelo de programación lineal entera mixta, que permite obtener la solución exacta (óptima). Sin embargo, el VRPSPD es un problema conocido en la literatura como NP completo; por consiguiente, no es posible encontrar la solución óptima para grandes instancias en un tiempo de cálculo razonable. En vista de esto, con el fin de obtener buenas soluciones en un tiempo de cálculo aceptable, en este artículo se diseñó un procedimiento basado en la búsqueda tabú para resolver el problema. La eficacia del método tabú propuesto se comparó con el método exacto, empleando datos reales suministrados por la empresa en estudio. Al aplicar la programación lineal entera mixta se observa que es posible encontrar soluciones óptimas para instancias de hasta 85 clientes y 7 camiones, en tanto que para instancias con más de 85 clientes se hace necesario recurrir al método tabú. Comparando los resultados obtenidos para el valor de la función objetivo, se observa que la desviación porcentual entre las soluciones óptima y tabú (GAP) se incrementa relativamente en la medida en que se incorporan más clientes a la red (es decir, en la medida en que crece el número de nodos en el grafo). Esto se explica por cuanto se hace necesario el uso de más vehículos para satisfacer la demanda de los clientes. Por tanto, al poseer una flota de vehículos heterogénea, el costo marginal de transporte de los vehículos de mayor capacidad se hace menor. En los experimentos se observó, sin embargo, que podría incrementarse el número de iteraciones con el objeto de mejorar la cercanía al óptimo de la solución obtenida con el método tabú. En el futuro también podría pensarse en emplear métodos heurísticos híbridos para la resolución del problema. Algunas investigaciones permiten mostrar los resultados prometedores de este enfoque.

Agradecimientos

Parte de este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación CEA-24-2008, apoyado por el Fondo de Investigaciones de la Universidad de La Sabana. Los autores agradecen los comentarios del

evaluador anónimo, que permitieron mejorar el contenido y la presentación del artículo.

REFERENCIAS

- Barbarosoglu, G. & Ozgur, D. (1999). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 26, 255-270.
- Berbeglia, G., Cordeau, J.F., Gribkovskaia, I. & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *TOP*, 15 (1), 1-31.
- Bolduc, M.C., Laporte, G., Renaud, J. & Boctor, F.F. (2009). A tabu search heuristic for the split delivery vehicle routing problem with production and demand calendars. *European Journal of Operational Research* (in press). Available online May 18, 2009.
- Brandão, J. & Mercer, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 100, 180-191.
- Castillo, E., Conejo, A.J., Pedregal, P., García, R. & Alguacil, N. (2001). *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. John Wiley and Sons.
- Clarke, G. & Wright, J. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivering points. *Operations Research*, 12, 568-581.
- Côté, J.F. & Potvin, J.Y. (2009). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with private fleet and common carrier. *European Journal of Operational Research*, 198, 464-469.
- El Fallahi, A., Prins, C. & Wolfler Calvo, R. (2008). A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 35, 1725-1741.
- Ganesh, K. & Narendran, T.T. (2007). A cluster-and-search heuristic to solve the vehicle routing problem with delivery and pickup. *European Journal of Operational Research*, 178, 699-717.
- Gendreau, M., Hertz, A. & Laporte, G. (1992). New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 40, 1086-1094.
- Gendreau, M., Laporte, G., Musaraganyi, C. & Taillard, E.D. (1999). A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 26, 1153-1173.
- Glover, F. (1989). Tabu-Search Part I. *Orsa. Journal on Computing*, 1, 190-206.
- Glover, F. & Kochenberger, G. (2002). *Handbook of metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, Norwell.
- Glover, F. & Laguna, M. (1997). *Tabu search*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Glover, F., Laguna, M. & Martí, R. (2005). *Practical tabu search*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Golden, B. & Assad, A.A. (1988). *The vehicle routing problem: methods and studies*. Elsevier Science.
- Golden, B., Raghavan, S. & Wasil, E. (2008). *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*, Springer.
- Gribkovskaia, I., Laporte, G. & Shyshou, A. (2008). The single vehicle routing problem with deliveries and selective pickups. *Computers & Operations Research*, 35, 2908-2924.
- Gribkovskaia, I. & Laporte, G. (2008). One-to-Many-to-One single vehicle pickup and delivery problems. In: *The vehicle routing problem: latest advances and new challenges*. Springer, 359-377.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59, 345-358.
- Min, H. (1989). The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup points. *Transportation Research A*, 23, 377-386.
- Parragh, S.N., Doerner, K.F. & Hartl, R.F. (2008a). A survey on pickup and delivery problems. Part I: Transportation between customers and depot. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58, 21-51.
- Parragh, S.N., Doerner, K.F. & Hartl, R.F. (2008b). A survey on pickup and delivery problems. Part II: Transportation between pickup and delivery locations. *Journal für Betriebswirtschaft*, 58, 81-117.
- Renaud, J., Laporte, G. & Boctor, F.F. (1996). A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 23, 229-235.
- Solomon, N. (2003). On the worst case performance of some heuristics for the vehicle routing and scheduling problem with time windows constraints. Report 83-05-05, The Warton School, USA.
- Stroustrup, B. (2000). *The C++ Programming Language*, 3a. ed., Addison-Wesley Professional.
- Toth, P. & Vigo, D. (2001). *The Vehicle Routing Problem*. Siam.
- Wassan, N.A., Wassan, A.H. & Nagy, G. (2008). A reactive tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries. *Journal of Combinatorial Optimization*, 15, 368-386.
- Zachariadis, E.E., Tarantilis, C.D. & Kiranoudis, C.T. (2009). A guided Tabu search for the vehicle routing Problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 195, 729-743.

Estudio de la bóveda de la iglesia de San Ignacio en Bogotá

Research on San Ignacio church vault in Bogotá

CECILIA LÓPEZ PÉREZ¹, DANIEL RUIZ VALENCIA²

1. Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Arquitectura.

2. Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil.

lopez.c@javeriana.edu.co - daniel.ruiz@javeriana.edu.co

Sometido: 10/03/09 Revisado: 20/04/09 Aceptado: 15/05/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras (Grime) de la Pontificia Universidad Javeriana ha estudiado, desde el año 2007, la iglesia de San Ignacio desde los puntos de vista histórico, arquitectónico, constructivo y estructural, este último aspecto mediante modelos físicos y numéricos.

Las primeras iglesias que los españoles construyeron en Colombia tenían una cubierta en estructura triangular (denominada “par y nudillo”) elaborada con madera. Posteriormente, las bóvedas aparecieron como sistema estructural interno de la zona central de las iglesias. Las bóvedas se elaboraron inicialmente en materiales pesados, como piedra o ladrillo, y en consecuencia colapsaron durante los terremotos, siendo remplazadas por bóvedas construidas en madera o bahareque. Las bóvedas hechas con estos materiales se popularizaron en varios países de Suramérica, ya que por su flexibilidad y bajo peso han resistido mejor los sismos.

Un ejemplo de este tipo de bóvedas es el de la iglesia de San Ignacio en Bogotá, construida entre 1600 y 1661 y perteneciente a la Compañía de Jesús. La zona central está cubierta por una bóveda con “lunetos” que permiten incrementar la iluminación natural. La bóveda está formada por seis secciones construidas con madera, cañas y fibras vegetales, apoyadas en siete arcos. En este artículo se presentan los principales resultados del análisis realizado sobre esta bóveda.

Palabras claves: bóvedas en madera, historia, comportamiento estructural.

Abstract

Since 2007 Group Grime at the Pontificia Universidad Javeriana has carried out a research on the church of San Ignacio, from the architectural, historical, constructive, and structural perspective (the latter by physical and numerical models).

The first churches built by Spaniards in Colombia had a cover shaping a triangular structure (denominated par and nudillo) made of wood. Later on, the vaults were an internal structural system of the central nave of the churches. As the vaults initially were made of heavy materials as stone or brick, they collapsed during the earthquakes. Then, they were replaced by other ones made of wood or bahareque. These ones have become popular in several countries of South America because they have resisted the earthquakes better, given their flexibility and low weight.

The vault of San Ignacio church in Bogota is an example of this kind of structure, studied by the Grime group. The church was built between 1600 and 1661, and it belongs to the Company of Jesus. The central nave is covered by a vault with windows (lunetos) that allow increasing the natural illumination. The vault consists of six sections made of wood, canes and vegetal fibers supported on seven arcs. In this paper, we present the main results of the analysis of this vault.

Keywords: wood vaults, history, structural behavior.

ANTECEDENTES

En Colombia, en la época prehispánica, la madera se extraía de las zonas periféricas de los asentamientos urbanos y sirvió para fabricar tanto utensilios como elementos constructivos de viviendas. Como componente estructural de las construcciones se destacó el uso de la madera rolliza para entramados de techos inclinados, recubiertos con barro o paja, combinados con sistemas vernáculos de construcción (Arango, 1953).

Durante la época colonial, la madera tuvo una importante participación en las edificaciones y se destinó a edificaciones privadas y públicas. La madera se utilizó como componente integral de la construcción en estructuras para pisos entablados, bastidores para muros y armaduras para techos. Igualmente, se usó en revestimientos y obras complementarias, como cornisas, frisos, barandas, rejas, puertas, ventanas y muebles (Arango, 1991).

En el primer período de la época republicana se continuó con el uso de la madera como un material importante dentro de la construcción, en combinación con el adobe y el bahareque, lográndose edificaciones estables. En el siglo XX se empezó a combinar con otros materiales, como el ladrillo y el concreto, y simultáneamente se crearon nuevas formas, como los tableros de madera aglomerada.

Muchos elementos de madera complementarios de la arquitectura construida entre los siglos XVI y XIX se han conservado hasta nuestros días, pero de la mayor parte de la arquitectura edificada sólo se conserva la construida en la segunda mitad del siglo XIX.

Si bien en la Norma Sismo Resistente Colombiana se contempla un capítulo para las construcciones nuevas con este material es poco lo que se conoce sobre las características de las estructuras en edificaciones patrimoniales. En este tipo de edificaciones la madera se usaba estructuralmente en las vigas de coronación, en entrepisos y en las cubiertas, entre otros.

Por esta razón, desde el año 2007 el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras (Grime), de la Pontificia Universidad Javeriana, ha estudiado el empleo de este material en cubiertas y acabados de los templos dentro del proyecto de investigación “Análisis de las bóvedas hechas en madera en templos coloniales bogotanos”.

El presente artículo es un avance de la investigación realizada sobre la bóveda de la iglesia de San Ignacio, de

la Compañía de Jesús, en Bogotá. El objetivo principal del estudio consistió en el análisis de la bóveda de la iglesia de San Ignacio desde los puntos de vista histórico, arquitectónico, constructivo y estructural, este último aspecto mediante modelos físicos y numéricos.

LAS BÓVEDAS DE LAS IGLESIAS LATINOAMERICANAS

Una forma evolucionada de acabado interno de los templos se produjo con la construcción de bóvedas. Éstas se hacían en madera rolliza o escuadrada, las cuales cubrían la nave central o las capillas anexas a la nave principal y se decoraban con elementos en yeso o madera.

De acuerdo con Pérez (1979), y considerando la ilustración de la figura 1, los elementos principales que conforman la bóveda son:

- Intradós: superficie de un arco o bóveda que da a la vista por la parte interior del edificio del que forma parte.
- Trasdós: superficie exterior de un arco o bóveda.
- Camones: cada uno de los segmentos de tabla que forman el costillar de la bóveda a manera de cimbra.
- Lunetos: abertura que se abre a la bóveda y sirve de iluminación de la nave.
- Costillares: cada uno de los perfiles que se colocan como cimbra o estructura de una bóveda.
- Entramado: esqueleto de madera o cañas que forma una superficie.
- Flecha: altura desde el arranque hasta la clave.
- Espesor: distancia entre el trasdós e intradós de la bóveda.
- Arco toral: cada uno de los arcos que sostienen una nave con bóveda por arista o de crucería, perpendiculares al eje mayor de ésta.
- Ménsula: elemento arquitectónico que sobresale de un plano vertical y sirve para sostener alguna cosa. Se diferencia del can en que tiene más vuelo que altura.

Bóvedas en madera

Las bóvedas de cañón en madera son aquellas que mantienen su obra de fábrica arqueada, formando un techo o cubierta en este material. Su construcción se basó en los cánones establecidos en el tratado de

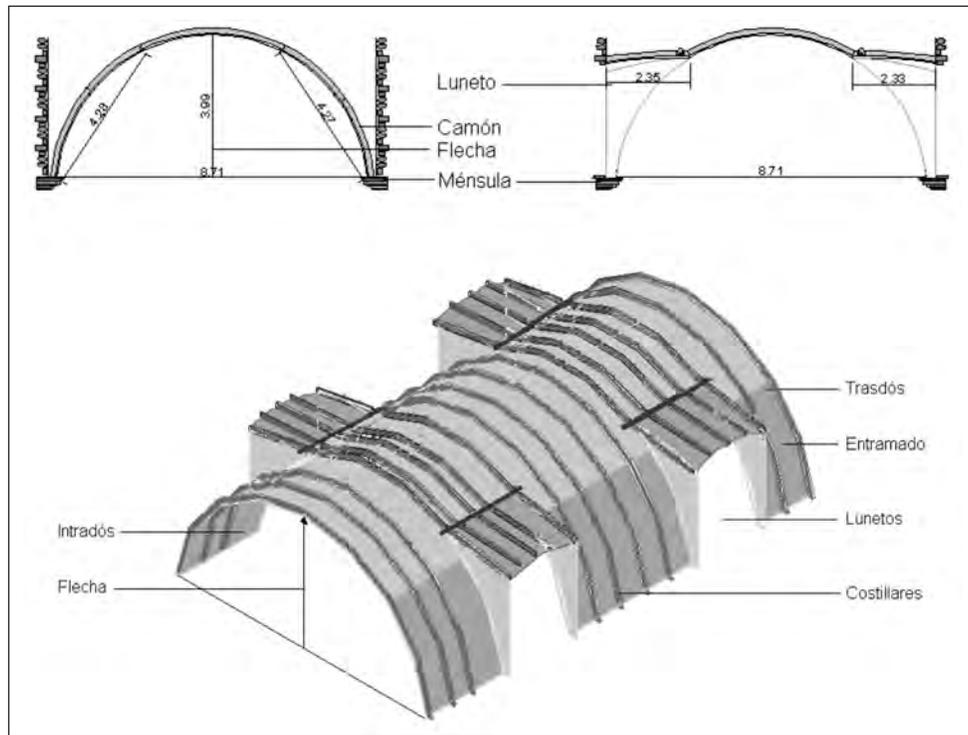


Figura 1. Elementos que conforman una bóveda.

Sebastiano Serlio, Philibert de l'Orme, el alarife Diego López de Arenas, el fraile Andrés de San Miguel y el maestro Rodrigo Álvarez. Esta clase de bóvedas se encuentran en España, entre las que pueden mencionarse las siguientes: la Capilla del Desamparo de Cristo en el Convento de Madrid, la Ermita de Nuestra Señora del Prado en Talavera y el Convento de los Agustinos Descalzos en Salamanca.

En Latinoamérica, se encuentran en el templo y antiguo convento del Carmen en el Distrito Federal, en México; en el Colegio de los Jesuitas (hoy catedral de Bahía) (Segre, 2009) y en el convento de San Francisco, de la misma ciudad, en Brasil; en la iglesia de San Francisco en Quito (Navarro, 2009), en Ecuador, y en la Catedral Metropolitana de Santa Cruz de la Sierra, en Bolivia.

En Colombia se han referenciado siete bóvedas construidas en madera (tabla 1), así como la cúpula de la Iglesia Mayor de Villa de Leyva, construida con el mismo material.

Bóvedas en bahareque

Sobre el uso del sistema de bahareque en bóvedas sólo se han encontrado referencias a nivel latinoamericano.

Tabla 1
Iglesias menores que tienen bóvedas en el centro histórico de Bogotá

IGLESIA	ORDEN
Iglesia de Santa Clara	Clarisas
Iglesia de La Concepción	Capuchinos
La Candelaria	Agustinos Recoletos
San Ignacio	Jesuitas
Ermita de la Tercera	Franciscanos

El bahareque es un sistema constructivo de origen prehispánico, mezcla de madera, cañas y tierra que se usa en muros y cerramientos.

A esta técnica se la ha denominado quinchá, baja-reque o bahareque a nivel latinoamericano (Instituto Eduardo Torroja, 1986) y se utilizó en paredes, muros, tabiques, columnas, pilastras, arcos y torres. Así mismo, se empleó como sistema constructivo y estructural en cubiertas, bóvedas y cúpulas. Esta técnica parte de una estructura de madera o cañas que se trenzan formando una membrana y extendiendo sobre las caras laterales un recubrimiento en barro, cal o yeso mezclado con agua.

Este sistema se emplea actualmente en países como Perú, Bolivia, Ecuador y Chile, donde se denomina quincha y en Uruguay, donde se llama fajina¹.

Los desarrollos de muros, bóvedas, arcos y cúpulas tenían las mismas dimensiones empleadas en España. Sin embargo, al poco tiempo de estar establecidos en el continente, los constructores observaron cómo los terremotos que afectaban al continente americano generaban comportamientos no deseados en las construcciones, ocasionando daños y colapsos totales o parciales (Instituto Eduardo Torroja, 1986). Esto exigió replantear el diseño importado de España, obligando a los constructores a emplear refuerzos, contrafuertes y diversos elementos en busca de una mayor estabilidad de la construcción.

Adicionalmente, los ibéricos observaron que el sistema constructivo de bahareque empleado por los indígenas estaba mejor preparado para resistir los fenómenos sísmicos, por lo cual empezaron a implementar su uso en las construcciones, combinando la madera escuadrada con cañas y fibras vegetales más flexibles, no sólo en muros y cerramientos, como era tradicional en las edificaciones indígenas, sino para cubrir grandes luces en forma de bóveda.

De todos los sistemas estructurales en bahareque implementados, los que presentaron mayor complejidad en su construcción y análisis fueron las bóvedas y las cúpulas, por estar conformadas por una sucesión de arcos cuyo aspecto crítico para la estabilidad se basaba en la rigidez de los apoyos y con el agravante de tener que cubrir luces mayores de 9 m.

Sobre la construcción de bóvedas en bahareque, en Latinoamérica se tiene registro en países como Perú y Argentina. Para el siglo XVII se tiene referencia del empleo de bóvedas de crucería en Perú (Instituto Eduardo Torroja, 1986), en las iglesias de Pacasmayo y la Catedral de Cuzco (originalmente construida en piedra), que se derrumbó durante el terremoto de 1609; se reconstruyó,

pero nuevamente colapsó con el terremoto de 1687. Luego de estos dos derrumbes se utilizó la mezcla de madera y bahareque para su reconstrucción.

Una vez que el sistema probó tener un mejor comportamiento sísmico que las técnicas importadas, se afianzó la técnica en el siglo XVII. En Perú, es fray Diego Maroto quien primero la emplea en 1666 para la bóveda de la iglesia de Santo Domingo de Lima. Luego, en 1675, Manuel de Escobar y el arquitecto portugués Constantino de Vasconcellos reconstruyen la iglesia de San Francisco con el mismo sistema, perfeccionando la técnica de Maroto. Después del terremoto de 1746, este sistema constructivo se generalizó en todo el país hasta convertirse en norma obligatoria. En tal sentido, se encuentran dos sistemas de bóvedas:

1. En el primer sistema las bóvedas estaban colgadas de elementos que formaban la armadura de cubierta.
2. En el segundo, el sistema era autoportante, conformado por arcos que se sostenían en conjunto.

En Argentina, se encuentra como ejemplo del uso del bahareque en bóvedas la iglesia de la Compañía de Jesús en Córdoba, construida por el padre Felipe Lemer, S.J. Este padre, de nacionalidad belga (Bimba, 2006), había trabajado en los astilleros de su país construyendo barcos, por lo cual se presume aplicó este conocimiento para la construcción de la bóveda de la iglesia. Su construcción comenzó en 1640 y terminó en 1670. Actualmente, el conjunto jesuítico, con su entorno, fue declarado patrimonio de la humanidad por la Unesco.

La bóveda de la iglesia principal está construida en madera de cedro en forma de quilla invertida, cubriendo una luz de 10 m. Las paredes que la sostienen son en piedra, con un espesor de 1,20 m. La bóveda, el friso y el retablo están contruidos con madera extraída del Paraguay. Dentro de este conjunto y para uso privado de la comunidad jesuita se encuentra la capilla doméstica, edificada entre 1644 y 1668. La bóveda está contruida con cañas, yeso y amarres de cuero. El intradós se halla cubierto con pinturas naturales y sus paredes son talladas en el siglo XVII, durante el período del barroco americano (*dossier* de prensa de la UNC). Con este mismo sistema de bóveda se construyeron la iglesia jesuítica de Santa Fe y la de Salta (Bimba Reuter).

En Colombia, se han encontrado bóvedas con este sistema en el Valle del Cauca, en la iglesia del Carmen y

1. Es de aclarar que el término fajina se emplea en Colombia como un sistema de construcción en tierra de empleo en construcciones militares, de acuerdo con los cánones establecidos para las construcciones militares de ultramar. Jorge Alberto Galindo Díaz (1986). El conocimiento constructivo de los ingenieros militares del siglo XVIII. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.

en la de San Francisco. La iglesia del Carmen de Popayán presenta amarres en cuero, en tanto que la de San Francisco está formada por camones y entramado en caña brava con una capa de barro (Archivo Dirección de Patrimonio). Adicionalmente, deben incluirse también las iglesias de San Ignacio en Tunja y Bogotá. La iglesia de San Ignacio en Tunja se desmontó entre 1969 y 1971 en la intervención de Acevedo Quintero, quien consideró que la bóveda y el crucero eran agregados de la edificación, razón por la cual actualmente no existen.

LA IGLESIA DE SAN IGNACIO

La iglesia de San Ignacio (figuras 2 y 3) se localiza en la calle 10 con carrera 6 en Bogotá. Está conformada por una sola nave con capillas laterales, unidas entre sí por arcos fajones apoyados en pilares. Su planta es de cruz latina, con cúpula en el crucero. La cubierta de la

nave es una bóveda de cañón, con lunetos que iluminan el espacio central.

La bóveda tiene una longitud de 28,4 m y un ancho de 11,0 m. Las capillas laterales están cubiertas por bóvedas vaídas que conforman diferentes espacios (Arbeláez y López, 1967).

La fachada presenta una distribución clásica (Renteña, 2001), diferente de la que hasta la época se empleaba. Es simétrica, diseñada con dos torres, de la cual sólo se construyó una. Su composición posee elementos horizontales (cornisas) y verticales (pilares o columnas dobles) que forman tres cuerpos. Entre las dos columnas hay tres nichos que no poseen ninguna imagen. Al costado occidental de la fachada se encuentra la torre, donde están las campanas. En el cuerpo central se halla una puerta de madera de dos hojas, aldabas y botones en bronce, y se remata con un frontón moldurado.

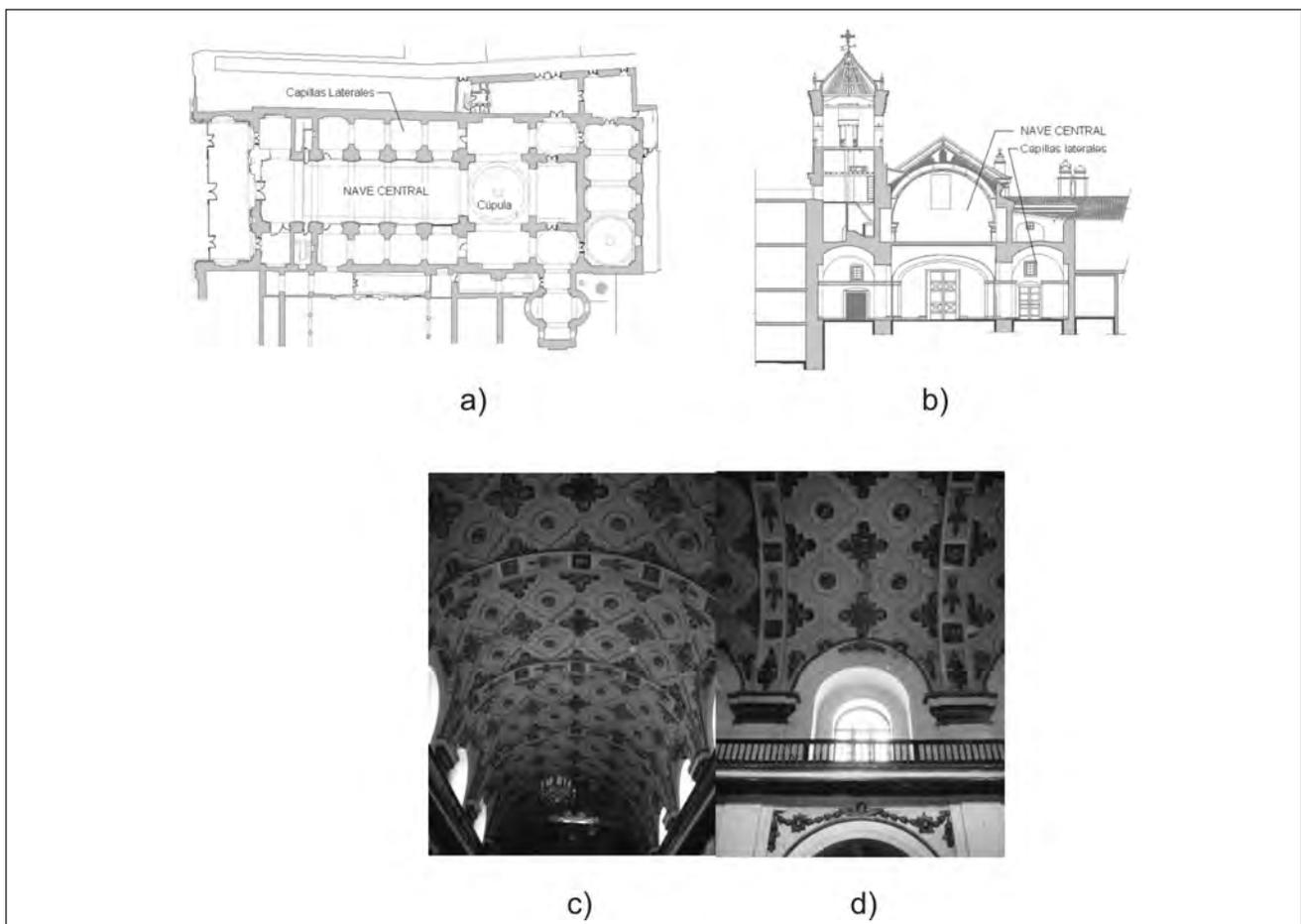


Figura 2. a) Planta; b) corte de la iglesia de San Ignacio; c) vista de la bóveda; d) luneto
Fuente: Instituto Carlos Arbeláez Camacho y autores.



Figura 3. Iglesia de San Ignacio: a) fachada principal; b) vista interna.
Fuente: Arquidiócesis de Bogotá.

SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LA BÓVEDA DE SAN IGNACIO Y VISITA DE INSPECCIÓN

Para determinar las características de la bóveda de la nave central de la iglesia de San Ignacio se realizó una visita de inspección, donde se documentaron los diferentes componentes. En la figura 4, así como en los esquemas arquitectónicos presentados en los capítulos 2 y 3, se muestran detalles de las bóvedas.

Durante la inspección se encontró que la bóveda está conformada por seis secciones y siete arcos formeros, ubicados cada 5 a 6 m, con excepción del tramo 2, donde la separación entre éstos es de 1,70 m. Los tramos están construidos en bahareque y en madera. En la figura 5 se observan algunos detalles de la configuración de la iglesia.

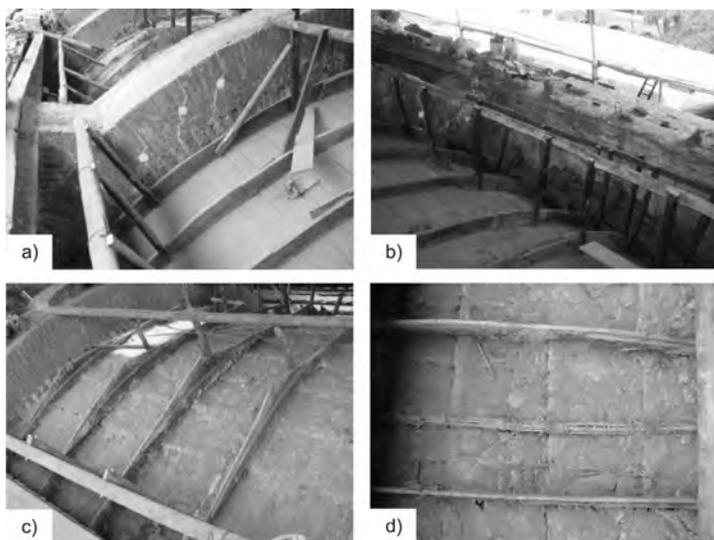


Figura 4. Imágenes de inspección a la bóveda: a) y b) tramo en madera; c) y d) tramo en bahareque.
Fuente: Instituto Carlos Arbeláez Camacho, 2006.

En particular el tramo 6, el más cercano a la cúpula, ha sido objeto de intervenciones como consecuencia de los temblores que ha soportado la edificación. En uno de estos temblores se desplomó la cúpula, arrastrando consigo el primer segmento de la bóveda, mientras que los tramos siguientes conservan la estructura original.

Los tramos construidos en bahareque están conformados

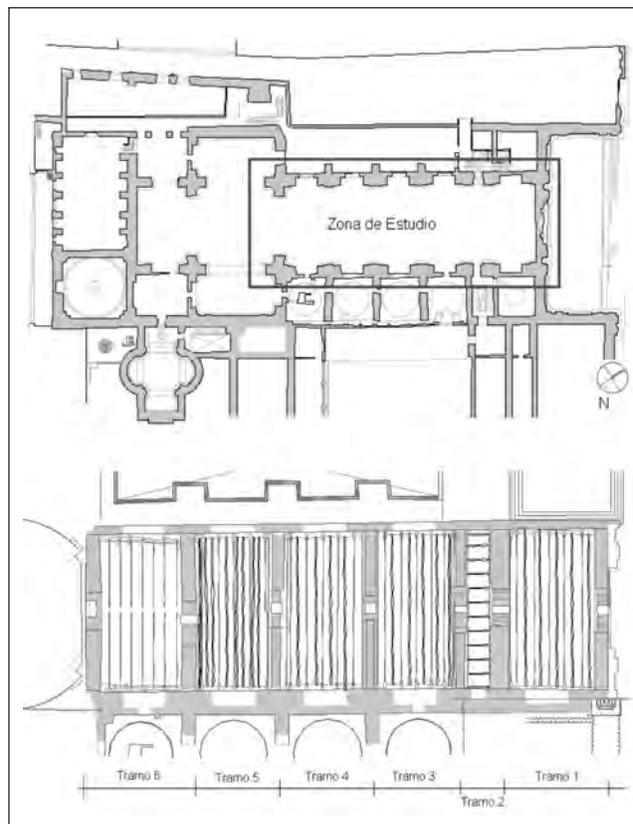


Figura 5. Planta de la iglesia de San Ignacio.
Fuente: Instituto Carlos Arbeláez Camacho.

mados estructuralmente por elementos (durmientes) de madera de 0,05 m de ancho x 0,025 m de espesor, que van de arco a arco y se apoyan en el dentado de los arcos de mampostería. Estos elementos sirven para rigidizar y como soporte del fajo de guadua. Existe un fajo de guadua (chusque) amarrado con cuan (fibra vegetal) ubicado entre cada costillar, formando arcos que se apoyan en las ménsulas. En la figura 6 se muestran algunos de los detalles descritos anteriormente. Por su parte, los costillares (que es la estructura fundamental) están constituidos por elementos traslapados de madera llamados camones.

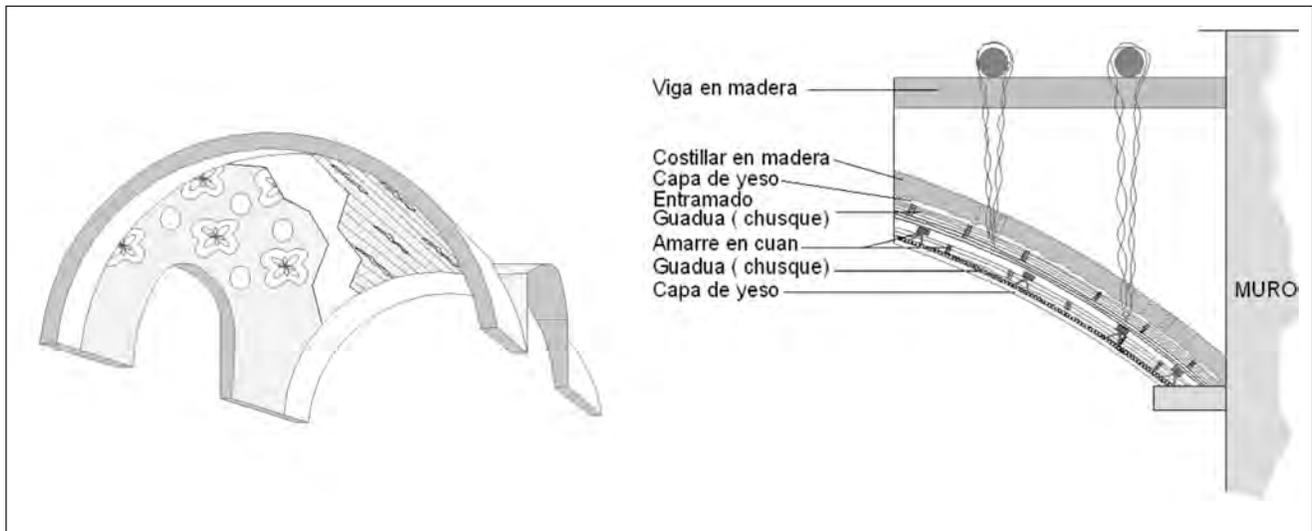


Figura 6. Sistema constructivo de la bóveda de San Ignacio.

Finalmente, existen unos tensores que se colocan para sostener los camones en el momento de su construcción, y van desde los camones hasta las correas o vigas. En principio, y a la luz de los análisis realizados y del estado actual del material que los compone, estos tensores no tienen una gran responsabilidad estructural para las cargas de trabajo.

En cuanto a los acabados en la cara interna de la bóveda (sobre la superficie rugosa formada por la lechada), se colocaba un lienzo y sobre él se aplicaba el pañete de acabado con yeso. Finalmente, se ubican las piezas y ornamentos de madera que tienen un pin o pata de anclaje, que se amarra al extradós de la bóveda.

Las bóvedas en madera tienen una estructura similar a las bóvedas encontradas en las iglesias mencionadas en la tabla 1, y estructuralmente están conformadas por un costillar, constituido por camones de escuadría o escuadrada² de mejor manufactura. Las uniones están hechas con clavos. El tamaño de los camones varía entre 45 y 90 cm. Así mismo, tienen un entablero armado con piezas de madera colocadas en forma perpendicular al costillar, con lo que se le da la curvatura al sistema. Este entablero se encuentra clavado al costillar con clavos de forja. En cuanto a los acabados, el entablero en el intradós tiene pintura como recubrimiento

y los ornamentos se encuentran clavados directamente al entablero.

Las uniones amarradas se emplearon para unir los fardos que forman la curvatura de las bóvedas, así como para unir los elementos de madera entre sí. Estas uniones están hechas en cuan, fibra vegetal que se encuentra en los alrededores de las zonas pantanosas. El cuan se trenza, formando cordones que sirven para las uniones.

Por su parte, tal como se mencionó anteriormente, en las uniones clavadas se emplearon clavos de forja.

PATOLOGÍAS ENCONTRADAS

En San Ignacio la cúpula sobre el altar colapsó, arrasando el tramo más cercano a la bóveda (tramo 6), por lo cual tuvo que remplazarse con una bóveda en madera. Sin embargo, las maderas empleadas en esta intervención no poseían la inmunización ni el tratamiento adecuados, por lo que este sector ha empezado a afectar los otros tramos (1 al 5) de la bóveda original. En la figura 7 se muestran algunos detalles de la patología encontrada durante las visitas de inspección.

PRUEBAS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Con el fin de verificar el comportamiento estructural de la bóveda de la iglesia de San Ignacio, se desarrollaron

2. La madera escuadrada es aquella cortada con sierra con dos caras paralelas.



Figura 7. a) deterioro de los amarres; b) pudrición de las vigas.

modelos experimentales a escala, semicuantitativos de una sección transversal de la bóveda para el sistema constructivo de madera. El modelo fue cuantitativo debido a la imposibilidad de obtener maderas con las características de deterioro (propiedades mecánicas y físicas) encontradas en la bóveda a escala real. Para ello se elaboraron modelos a escala 1:10 (figura 8).

El objetivo de las pruebas fue establecer los patrones de falla y comportamiento estructural ante cargas verticales y de esta manera determinar zonas de concentraciones de esfuerzo, bien sea en la zona central de las bóvedas (en la clave) o en la zona de los lunetos. De acuerdo con la configuración estructural encontrada



Figura 8. Modelo a escala de secciones de la bóveda de San Ignacio.

en campo, se simuló la condición estructural mediante modelos simplemente apoyados y sometidos a carga en el centro de la clave (figura 9), siendo ésta una condición mucho más crítica que la real, en la que se distribuye la carga uniformemente a lo largo y ancho de la bóveda.

Los modelos se probaron mediante un actuador



Figura 9. Disposición geométrica y de aplicación de carga de los modelos a escala de secciones de la bóveda de San Ignacio.

MTS (que reaccionaba contra un marco de acero) y se instrumentaron con una celda de carga, un deformímetro tipo LVDT en la clave y cuatro deformímetros mecánicos, ubicados en los costados de las probetas (figura 10). A los modelos a escala se les aplicó una

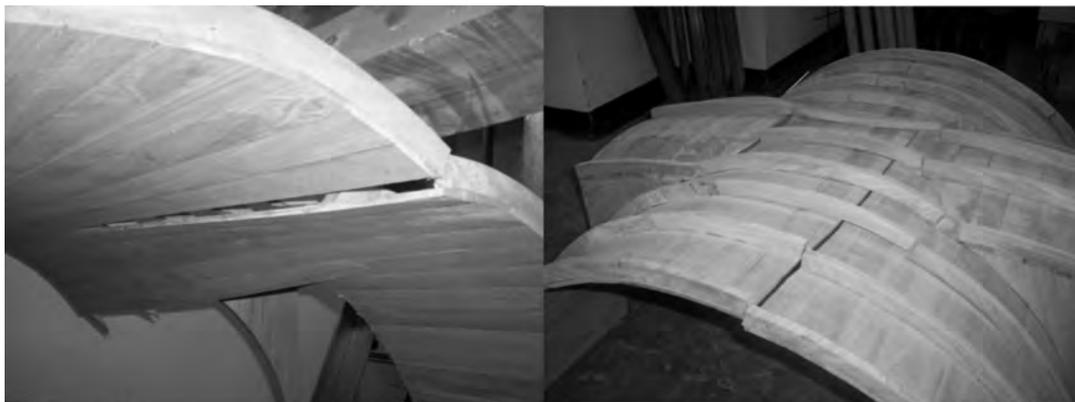
carga monotónica incremental, hasta llegar al colapso estructural de las probetas. El ensayo se realizó por control de desplazamiento, a una tasa de carga de 1 mm/s.



Figura 10. Deformímetros mecánicos laterales.

De esta manera se generaron patrones de falla en el centro de las bóvedas (clave), como los ilustrados en la figura 11a) y 11b). También se presentaron desprendimientos de la zona de los lunetos (figura 11c)), pero posteriores al inicio de las fisuras y grietas en la clave de las bóvedas.

Con base en la instrumentación y las pruebas realizadas, en la figura 12 se presentan los resultados de carga vs. desplazamiento vertical (como porcentaje del diámetro de la bóveda). A la luz de estos resultados, la carga máxima resistente y la rigidez inicial fueron similares para las dos bóvedas ensayadas. Así mismo, ambas exhiben un rango no lineal de comportamiento, con capacidad de ductilidad al desplazamiento pero con caídas de carga originadas en las rupturas sucesivas en el interior de las maderas.



a) Bóveda 1

b) Bóveda 2



c) Fallas en la zona de los lunetos.

Figura 11. Patrones de falla de las bóvedas.

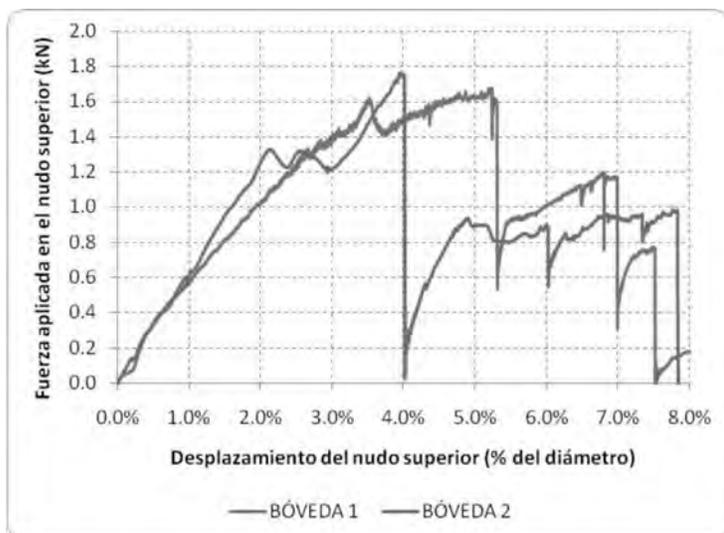


Figura 12. Curvas de carga vs. desplazamiento vertical.

Con el fin de corroborar estas zonas de concentración de esfuerzo, se elaboraron modelos numéricos por elementos finitos, tanto de los modelos a escala como de sus respectivos modelos reales. En la figura 13 se muestra un esquema que ilustra la distribución de los esfuerzos máximos en la bóveda (esfuerzos en kPa) cuando ésta se somete a las cargas establecidas durante las visitas técnicas de inspección. A la luz de estos resultados, es claro que las zonas de máxima concentración

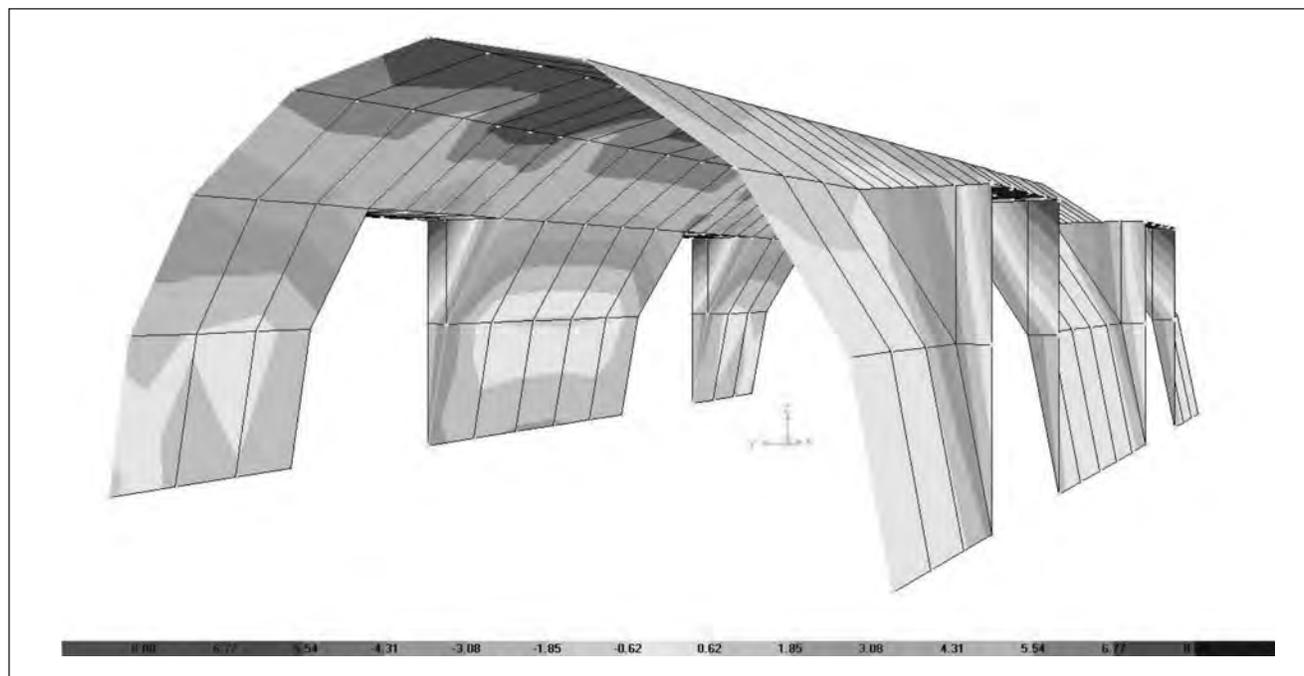


Figura 13. Esfuerzos para cargas de trabajo en kPa de las bóvedas de la iglesia de San Ignacio.

coinciden con los lugares donde se generaron las fallas en los modelos experimentales a escala, y serían precisamente estas zonas las que deberían intervenir con reforzamientos estructurales.

CONCLUSIONES

1. El sistema y las técnicas de construcción de las bóvedas analizadas corresponden a sistemas vernáculos de edificación, adaptados por los constructores para cubrir las naves principales de las iglesias. Originalmente, las bóvedas se construyeron en los mismos materiales pesados usados en España, pero debido a las condiciones sísmicas de América se utilizaron la madera y el bahareque como nuevos materiales de soporte.
2. En la iglesia de San Ignacio, y con base en las visitas de inspección y en la búsqueda bibliográfica e histórica, se encontraron dos sistemas constructivos: uno atípico de construcción y otro con características similares a los hallados en otras iglesias de Colombia y de Latinoamérica.
3. Tal como ocurre en muchos monumentos históricos, algunos elementos estructurales de madera de la iglesia de San Ignacio presentan importantes estados de afectación (putrición) debido a malas

intervenciones realizadas en el pasado. Es prioritario intervenir dichos elementos.

4. Los resultados de las pruebas de laboratorio y de las modelaciones numéricas indican que se debe prestar especial atención a las zonas centrales de las bóvedas y, en segunda medida, a las zonas cercanas a los lunetos, ya que en estos lugares se generan importantes concentraciones de esfuerzos, por lo que deben ser objeto de intervenciones de refuerzo estructural.

REFERENCIAS

- Arango, Silvia (1990). *Historia de la arquitectura en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional.
- Arango B., Teresa (1953). *Precolombia*. Madrid: Talleres de sucesores de Rivadeneyra, S. A.
- Arbeláez Camacho, Carlos & López, Sebastián (1967). La arquitectura colonial. En: *Historia extensa de Colombia*. Bogotá: Ed. Lerner.
- Bimba Reuter (2006). Los jesuitas en Córdoba. Iglesia de la compañía e iglesia doméstica. *La Revista*. Sociedad Argentina de Escritores.
- Instituto Carlos Arbeláez Camacho para el Patrimonio Construido (2006). Restauración de la iglesia de San Ignacio.

- Instituto Eduardo Torroja (1986). Informes de la construcción. *La tierra, material de construcción*, vol. 37, No. 377.
- Navarro, José Gabriel (2009). Contribuciones a la historia del arte en el Ecuador. Tomado de <http://books.google.com.co>. Consultado en abril de 2009.
- Pérez Calvo, Carlos E. (1979). *Diccionario ilustrado de arquitectura*. Jorge Plazas (ed.).
- Rentería Salazar, Patricia (2001). *Arquitectura en la iglesia San Ignacio de Bogotá. Modelos influjos, artifices: Coluccini, arquitecto de la iglesia de San Ignacio de Bogotá*. Bogotá: Editorial Ceja.
- Segre, Roberto (2009). América Latina en su arquitectura. Tomado de <http://books.google.com.co>. Consultado en abril de 2009.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración de las siguientes unidades académicas:

- Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana, por la financiación del proyecto “Análisis de bóvedas hechas en madera en templos coloniales bogotanos”.
- Laboratorio de Pruebas y Ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

Ensayos cíclicos y estáticos para evaluar la resistencia sísmica de los muros y las conexiones de paneles livianos prefabricados para la construcción de viviendas

Static cyclic tests to evaluate seismic resistance of the walls and connections in prefabricated low weight panels for building houses

DANIEL RUIZ¹, MÓNICA RIVEROS², SANTIAGO MARTÍNEZ³, SEBASTIÁN HERRERA⁴

1. Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá.

2. Metecno de Colombia. Departamento Técnico.

3. Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniería Civil.

4. Pontificia Universidad Javeriana. Ingeniería Civil.

daniel.ruiz@javeriana.edu.co - mriveros@metecnocolombia.com - martinez.santiago@javeriana.edu.co - herrera-juan@javeriana.edu.co.

Sometido: 18/04/09 Revisado: 15/05/09 Aceptado: 20/06/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

En Colombia se desarrolló un sistema prefabricado, conformado por paneles autoportantes (espuma y láminas colaborantes de acero), que se ha utilizado para elementos no estructurales. No obstante, el bajo peso de los paneles y la alta resistencia de las láminas de acero sugieren que el sistema podría usarse como sistema estructural de casas de un piso. Por ello se han realizado diferentes pruebas de laboratorio en la Universidad Javeriana sobre los paneles y los materiales que lo componen, las cuales han demostrado la bondad del sistema para resistir cargas sísmicas. Sin embargo, hasta hace unos meses no se habían realizado suficientes pruebas sobre las conexiones. En este artículo se presenta una nueva fase de la caracterización del sistema donde se evalúa el comportamiento de las conexiones del sistema prefabricado ante cargas estáticas y dinámicas. Los resultados sugieren que las conexiones podrían resistir cargas sísmicas en edificaciones de un piso ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta.

Palabras claves: conexiones, sistema prefabricado de bajo peso, comportamiento sísmico, ensayos de laboratorio.

Abstract

In Colombia, a prefabricated system conformed by self-supporting panels (foam and coworkers-laminae of steel) has been used for non-structural elements. Nevertheless, the low weight of the panels and the high resistance of its steel laminae have suggested that this system could be the structural one of one-story houses. That is why researchers have carried out laboratory tests in the last years in the Pontificia Universidad Javeriana to test the panels and its materials. These researches have demonstrated that the system could resist seismic loads. However, researchers have not carried out sufficient tests on the connections. In this paper, we present a new phase of the characterization of the system. We subjected the connections of the prefabricated system to static and dynamic loads. The results suggest that the connections could resist seismic loads as part of one-story houses built in zones of high seismic accelerations.

Keywords: connections, low weight prefabricated system, seismic behavior, laboratory tests.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La necesidad de una vivienda digna es uno de los problemas más graves que afronta Colombia. Lo anterior, sumado a las condiciones sísmicas del país (que incrementan los costos de las edificaciones para mejorar su seguridad), exige desarrollos innovadores para ofrecer nuevas alternativas de vivienda. En referencia al caso sísmico, debe mencionarse que el colapso parcial o total de las estructuras hechas por el hombre es la causa más común de muerte y lesión en la mayoría de los terremotos. Cerca del 75% de las muertes atribuidas a terremotos en el siglo XX se debió al colapso de edificaciones. El alto peso de éstas (elaboradas en mampostería, en adobe o en concreto) puede ocasionar lesiones graves cuando los muros o los elementos de los pórticos se desploman sobre las personas. En el caso colombiano, diversos sismos han afectado al país, como el del eje cafetero del 25 de enero de 1999, el cual causó graves daños en las ciudades de Armenia y Pereira, así como en un amplio número de pequeños poblados cercanos. Las estadísticas indican que el terremoto deterioró unas 50.000 edificaciones en la zona cafetera, en especial casas antiguas, edificios de mampostería no reforzada ni confinada, y viviendas diseñadas y construidas sin especificaciones de diseño sismorresistente. En la mayoría de los casos fueron las personas de bajos recursos las más afectadas por el colapso de sus casas.

Por esto surge la necesidad de estudiar nuevas alternativas en sistemas estructurales para viviendas de un nivel, que soporten las fuerzas sísmicas y que garanticen la seguridad de sus ocupantes a costos razonables. Estos nuevos sistemas estructurales deben ser resistentes, durables, livianos y con costos no muy elevados. El

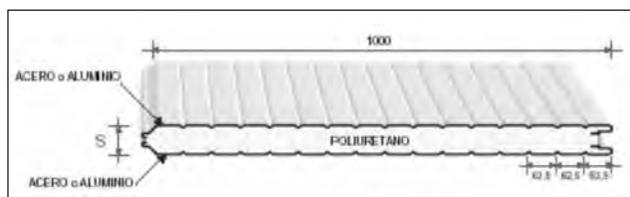


Figura 1.1 Panel para muro Monowall.

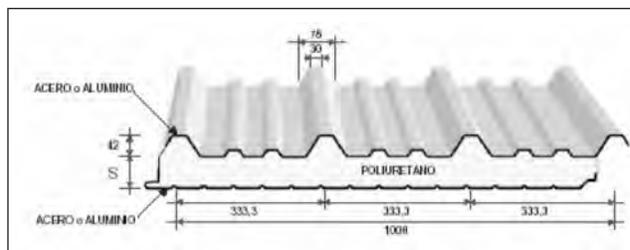


Figura 1.2 Panel para cubierta Techment.

sistema propuesto en la referencia (Metecno, 2005) emplea paneles tipo sándwich (poliuretano expandido dentro de lámina metálica), remates de acero y cubiertas también en paneles tipo sándwich (en las figuras 1.1 y 1.2 se detallan el panel de muro y el panel de cubierta, respectivamente).

Por otro lado, el concreto se utiliza en el sistema únicamente en la etapa de cimentación para fundir una placa con un espesor que oscila entre 10 y 15 cm, con refuerzo de malla electrosoldada, dependiendo de los requerimientos estructurales. Los remates de acero que sirven de transición entre los paneles y la placa de cimentación están anclados mediante pernos de expansión a la losa de concreto que sirve de cimentación (figura 1.3). Así mismo, la unión entre los paneles y los remates se realiza mediante tornillos de 6 mm de diámetro de alta resistencia (tornillos autorroscantes).

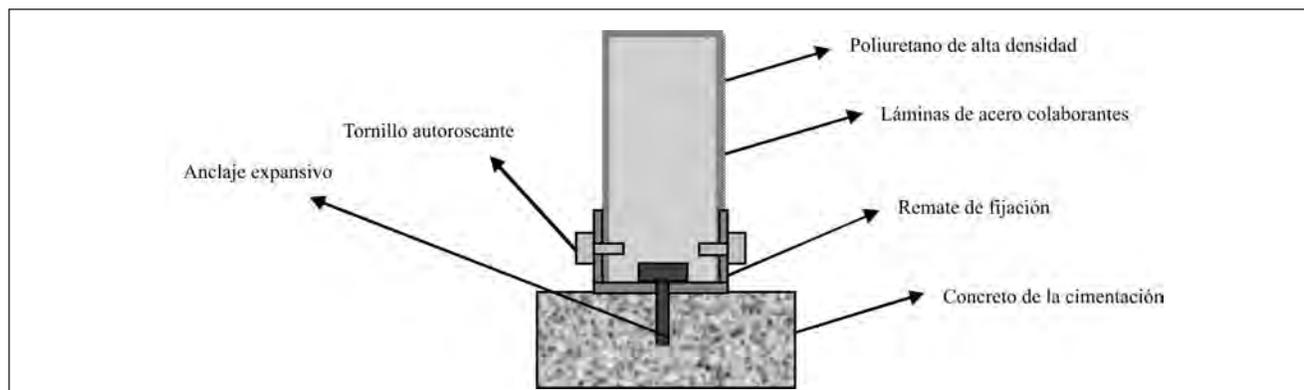


Figura 1.3 Esquema de anclaje del panel a la placa de cimentación.

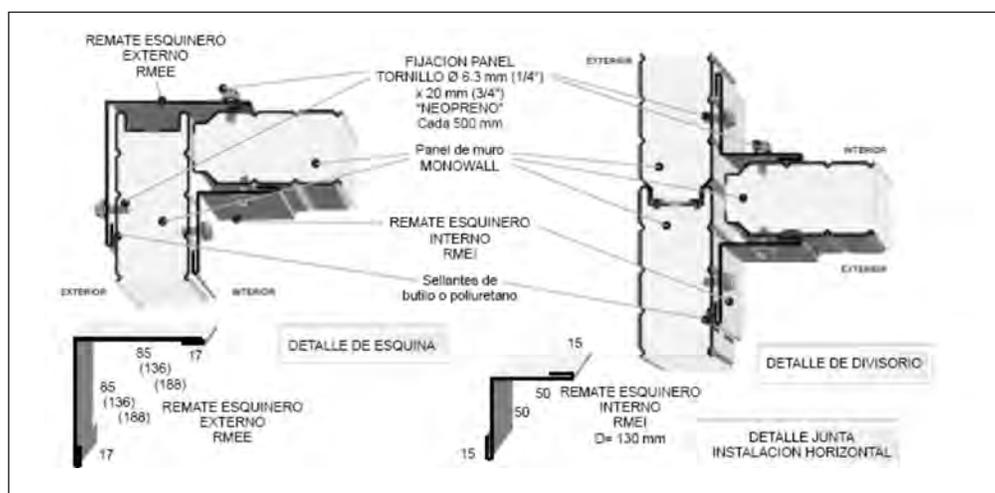


Figura 1.4 Detalle de unión entre los muros.

En la figura 1.4 se presentan otros detalles de unión entre los muros del sistema, el cual se realiza mediante tornillos de fijación de 1/4" de diámetro autorroscantes.

Por otro lado, el peso de los paneles y de las placas de cubierta que conforman el sistema oscila entre 6 y 12 kg/m². Al considerar simultáneamente el bajo peso y las características constructivas del sistema, es de esperarse que edificaciones de un piso construidas con los paneles puedan presentar un buen comportamiento sísmico.

Sin embargo, para que un sistema constructivo, cuyos materiales no estén contemplados en la Norma Sismorresistente, referencia (AIS, 1998), se pueda utilizar en la república de Colombia, se debe someter a la aprobación por parte de la Comisión Asesora Permanente del Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. A este ente se le debe entregar, entre otras cosas, toda la información experimental y analítica que permita constatar que el sistema es apropiado para zonas de amenaza sísmica intermedia o alta. Se han hecho diferentes caracterizaciones en este sentido en importantes laboratorios de Ingeniería Civil, entre los que se destaca el de la Pontificia Universidad Javeriana por la gran cantidad de pruebas realizadas.

En los estudios de las referencias (Ruiz et ál., 2007; Cimoc, 2000), se resumen los principales resultados de las pruebas efectuadas sobre el sistema a la luz de las normas técnicas indicadas en las referencias (Icontec, 2005; ASTM, 2000). A partir de los estudios efectuados se dispone de la siguiente información:

- Prácticas constructivas y características del sistema

estructural, incluyendo procesos constructivos y manuales de instalación.

- Caracterización detallada de los materiales del sistema (ensayos sobre probetas a pequeña y a gran escala –muros y cubiertas–).
- Modelos teóricos elásticos por el método de los elementos finitos, tanto de las pruebas efectuadas como de una propuesta de vivienda de un piso.

En un futuro, la idea es disponer de todas las herramientas para masificar el sistema y construir viviendas de interés social como las que ya se han levantado en el departamento del Cauca (figura 1.5). Estas casas de un nivel están enteramente construidas en el sistema de paneles propuesto y se encuentran en perfecto estado después de varios años de haberse construido.

Sin embargo, a pesar de todas las pruebas que se han hecho, las conexiones existentes entre los paneles y los remates de fijación, así como las uniones entre los remates y la cimentación, estaban pendientes de ser estudiadas a fondo. También faltaba un estudio de laboratorio del sistema al ser sometido a cargas dinámicas paralelas al plano de los muros. De acuerdo con lo anterior, y para complementar las investigaciones previamente realizadas, en este artículo se presentan los resultados de pruebas ante cargas seudodinámicas de muros y las características mecánicas de resistencia de las conexiones, continuando con una segunda fase de un proyecto que se ha trabajado los últimos años en la Universidad Javeriana. Las demás características



Figura 1.5 Ejemplo de casas de interés social construidas con el sistema estructural en estudio.

mecánicas del sistema se describen en detalle en la referencia (Ruiz et ál., 2007).

ENSAYOS DE ELEMENTOS DE CONEXIÓN

En el presente apartado se describen las pruebas de laboratorio hechas sobre las principales conexiones implementadas por el sistema de paneles prefabricados en estudio. Estos elementos objeto de ensayo corresponden a pernos autorroscantes de 6 mm de diámetro y de alta resistencia, remates en “U”, anclajes expansivos y paneles de 50 mm de espesor nominal. El acero que compone las láminas tiene un esfuerzo de fluencia del orden de los 330 MPa, esfuerzo de rotura de 400 MPa y espesor de lámina de 0,5 mm (Ruiz et ál., 2007).

Extracción de anclajes expansivos

Con el fin de establecer la resistencia a la extracción de los anclajes de fijación al concreto, se diseñó un montaje experimental en el que a una viga de concreto sin refuerzo se le instalaban dos anclajes expansivos (figura 3.1). Este tipo de ensayo no está normalizado y por ello fue necesario realizar un diseño experimental detallado para lograr las fallas deseadas. Vale la pena mencionar que se fundieron seis vigas de concreto mediante una mezcla de concreto de 25 MPa. Se llevaron a cabo pruebas sobre los materiales granulares y sobre el cemento del concreto para tener un adecuado control de calidad. Como resultado de lo anterior, la resistencia a la compresión de los cilindros testigo (cuatro en total) tuvo una resistencia promedio de 26,5 MPa, con un coeficiente de variación de 2%.

El ensayo de extracción de los anclajes se hizo con un actuador dinámico marca MTS, de 100 kN de capacidad de carga máxima. Mediante dicho actuador se aplicó una fuerza de extracción al anclaje expansivo a través de una barra de acero (figura 2.1a). Luego se muestra la forma en que la vigueta, donde se instaló el anclaje expansivo, transmitía la carga al marco de reacción mediante pernos de alta resistencia (figura 2.1b). Finalmente, se presenta un detalle de la zona de instalación del anclaje expansivo (figura 2.1c). Los anclajes expansivos tenían un diámetro de 6 mm y una longitud de anclaje de 3,2 cm.

Vale la pena indicar que en el anclaje expansivo en algunas ocasiones se usa una arandela entre la cabeza del anclaje y el remate de fijación en U (figura 2.1c). Por tanto, se hicieron pruebas de los anclajes expansivos tanto con arandela como sin arandela.

Una vez realizado el montaje de la figura 2.1, se procedió a efectuar las pruebas de extracción. En total, se ensayaron 17 probetas: cinco sin arandela y doce con arandela. El estado de los anclajes luego de hacer la prueba se puede apreciar en las fotos de la figura 2.2.

Así mismo, los resultados de las fuerzas máximas resistentes de extracción se resumen en la tabla 2.1. En general, la manera de falla predominante consistió en un desprendimiento de la cabeza del anclaje, más que en la extracción de un “cono” de concreto.

Es claro que los resultados indicados en la tabla 2.1 presentan cierta variabilidad. Sin embargo, como se verá más adelante, aun la menor fuerza resistente registrada es mayor que las demandas sísmicas en los anclajes de una vivienda de interés social de un piso ubicada en una zona de amenaza sísmica alta.

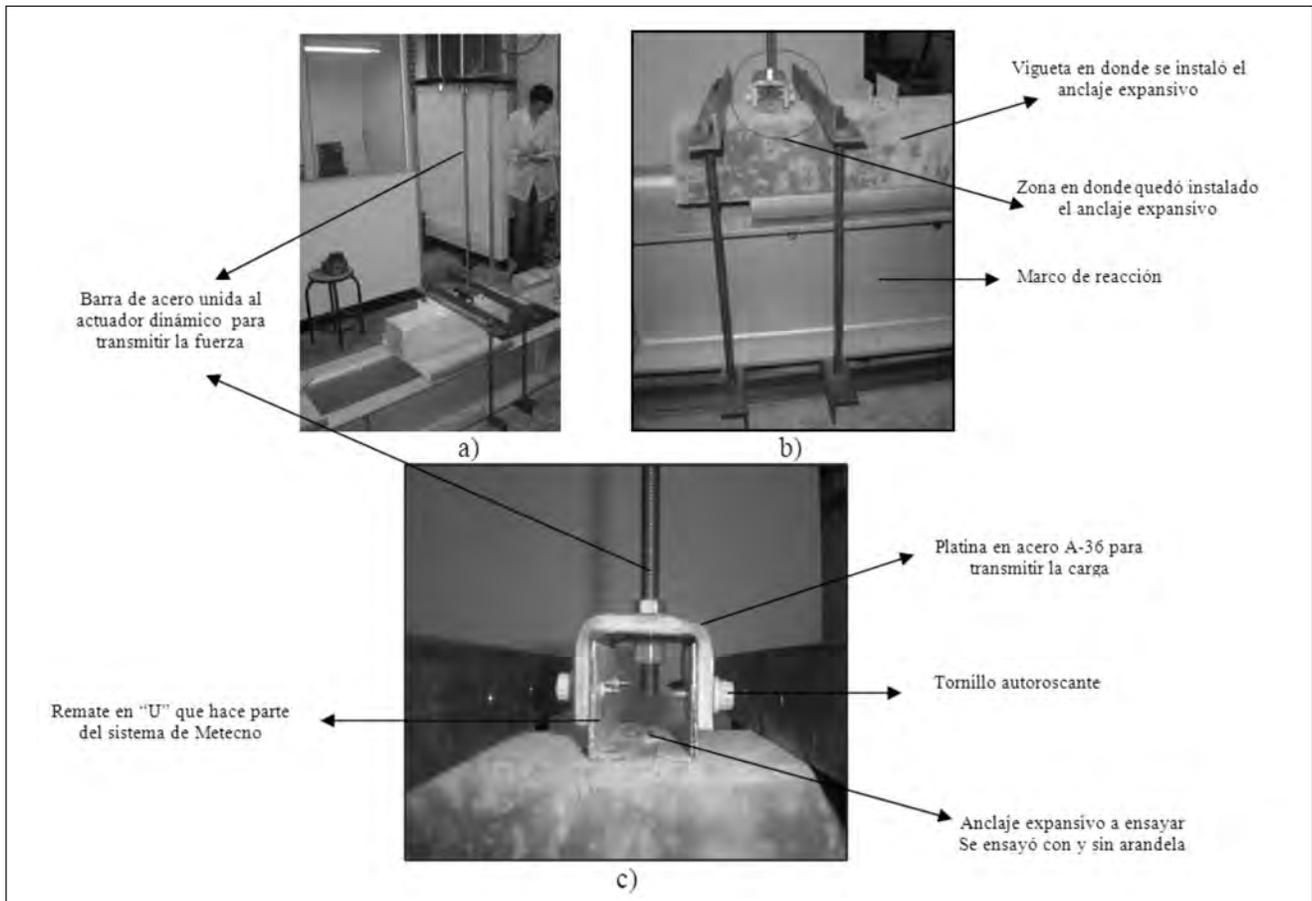


Figura 2.1 Montaje del ensayo de extracción de anclajes expansivos.

Ensayos cíclicos de conexiones entre muros y remates de fijación

Con el fin de establecer la capacidad resistente de la lámina colaborante de los paneles en las uniones con los remates de fijación, se diseñó una prueba experimental para medir esta resistencia. De acuerdo con lo reportado en la referencia (Ruiz et ál., 2007), esta unión está dominada por esfuerzos de desgarramiento de las láminas colaborantes de los paneles, razón por la cual se diseñó una prueba para determinar dicha fuerza de desgarramiento, así como la capacidad de disipar energía del sistema en este proceso. El desgarramiento de la lámina lo ocasionan los pernos autorroscantes bosquejados en la figura 1.3. En la figura 2.3 se muestran imágenes del montaje realizado.

La primera fase del ensayo fue cíclica (por control de desplazamiento), mediante señales sinusoidales con amplitud de desplazamiento variable entre 0,1 y 4 mm y con frecuencias de movimiento variables entre 0,5 y 1 Hz. Posteriormente se efectuó un ensayo monotónico,

hasta llegar a la falla por desgarramiento de las láminas colaborantes de acero. El estado de las probetas al finalizar el ensayo se muestra en la figura 2.4. Obsérvese que la falla se presentó en las inmediaciones de los tornillos autorroscantes y el agujero, originalmente redondo, de 6 mm de diámetro se convirtió en un óvalo. Así mismo, se generó un cono de falla tanto en las láminas colaborantes como en el poliuretano que hay entre ellas.

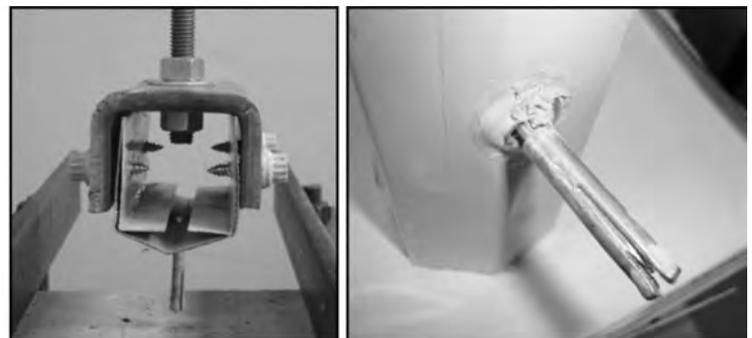


Figura 2.2 Detalle de la falla de anclajes expansivos.

Tabla 2.1
Fuerza máxima resistente de los ensayos de extracción de anclajes expansivos

Ensayo	Forma de falla	Fuerza máxima (KN)
Sin arandela #1	Extracción del anclaje completo	3,0
Sin arandela #2	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	1,3
Sin arandela #3	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	2,0
Sin arandela #4	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	1,0
Sin arandela #5	Extracción del anclaje completo	3,6
Sin arandela #1	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	2,1
Sin arandela #2	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	4,2
Sin arandela #3	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	1,5
Sin arandela #4	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza y con tambor de expansión dentro de la viga	3,0
Sin arandela #5	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	3,2
Sin arandela #6	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	3,3
Sin arandela #7	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	3,6
Sin arandela #8	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	2,8
Sin arandela #9	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	3,7
Sin arandela #10	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	4,0
Sin arandela #11	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	3,6
Sin arandela #12	Extracción del anclaje completo con desprendimiento de cabeza	3,8

En las curvas de la figura 2.5 se muestran los ciclos de histéresis de las pruebas realizadas. Vale la pena mencionar que los ensayos se llevaron a cabo en condiciones similares de montaje y proceso de carga. De la

misma manera debe mencionarse que, por el montaje, los valores de carga indicados corresponden al de una conexión conformada por cuatro pernos autorroscantes. A la luz de los resultados, este tipo de conexión es

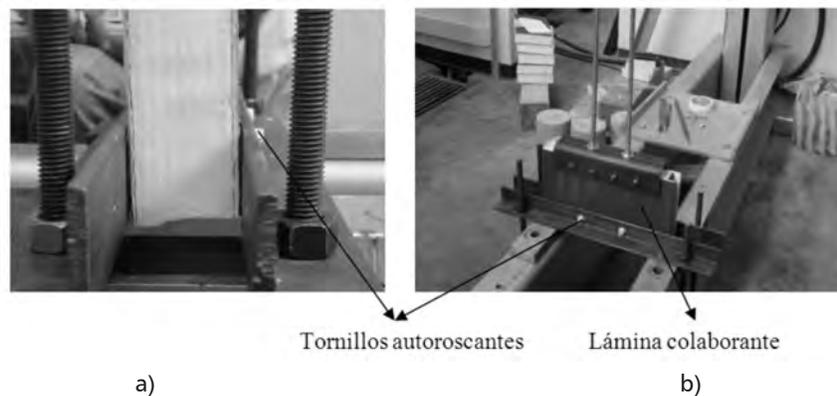


Figura 2.3 Montaje del ensayo para evaluar la unión entre el panel y el remate de fijación: a) Vista lateral. b) Vista superior.

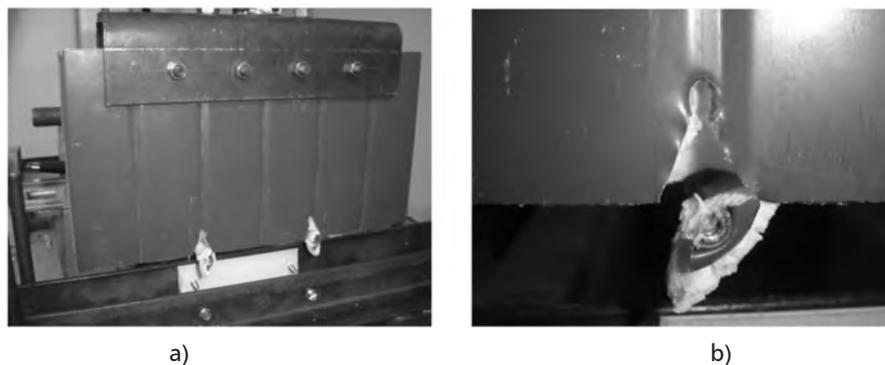


Figura 2.4 Montaje del ensayo para evaluar la unión entre el panel y el remate de fijación.

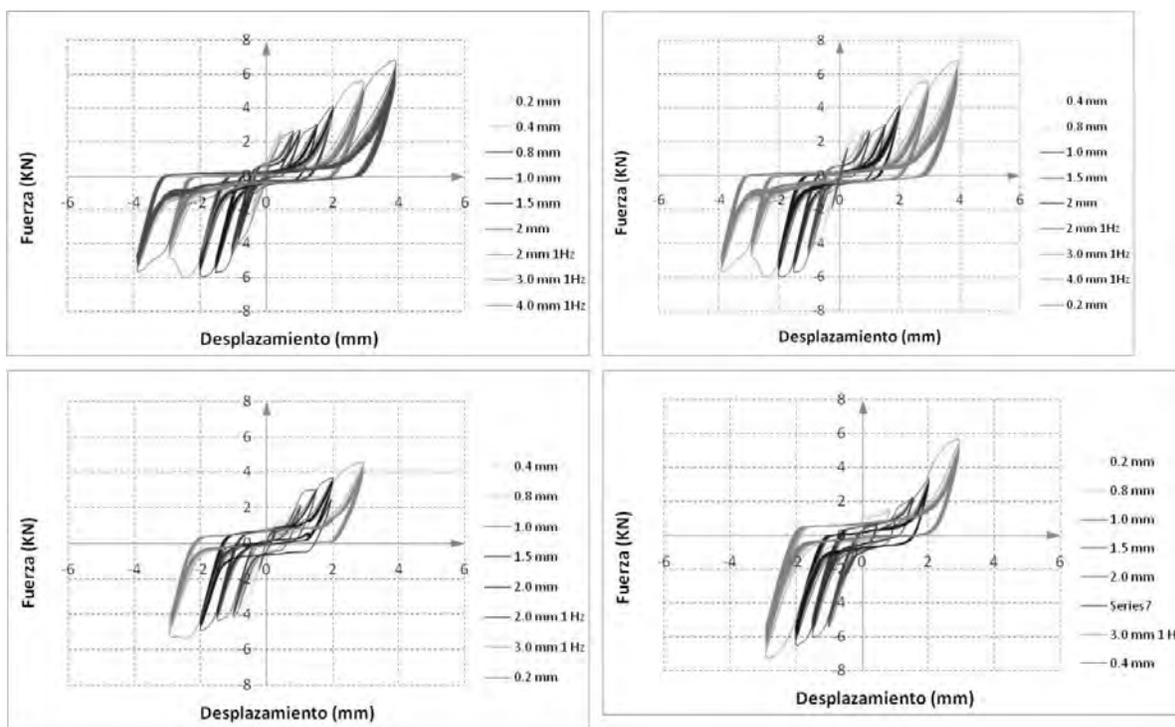


Figura 2.5 Ciclos de histéresis para las conexiones panel-remate estudiadas.

capaz de disipar energía y no hay pérdida de resistencia en la medida en que se incrementan los desplazamientos. Obviamente, este tipo de comportamiento es deseable en sistemas de resistencia sísmica.

Al finalizar las pruebas dinámicas, se llevó a cabo un ensayo monotónico hasta la falla por desgarramiento. Dichas curvas de fuerza vs. desplazamiento de este proceso final de carga se muestran en la figura 2.6.

Obsérvese que las cargas resistentes del sistema no superaron los 6,5 kN. Para efectos de análisis es importante mencionar que en los muros del sistema por cada cuatro pernos autorroscantes hay uno, o a lo sumo dos anclajes expansivos a la cimentación como los indicados en el apartado de extracción de anclajes. Desde este punto de vista, el sistema estructural podría disipar energía en las conexiones entre las láminas y los remates, pero el punto débil del sistema será el anclaje expansivo.

Con el fin de corroborar los resultados de las pruebas se desarrolló un modelo en elementos finitos con el montaje experimental descrito anteriormente. Para ello se vinculó el módulo de elasticidad del poliuretano (464

MPa) y de las láminas colaborantes de acero (200.000 MPa) al modelo tridimensional basado en *shells* (acero) y en sólidos (poliuretano). Las demás propiedades mecánicas se pueden ver en la referencia (Ruiz et ál., 2007). El espesor del poliuretano fue de 55 mm (de acuerdo con las pruebas de laboratorio) y el de la lámina

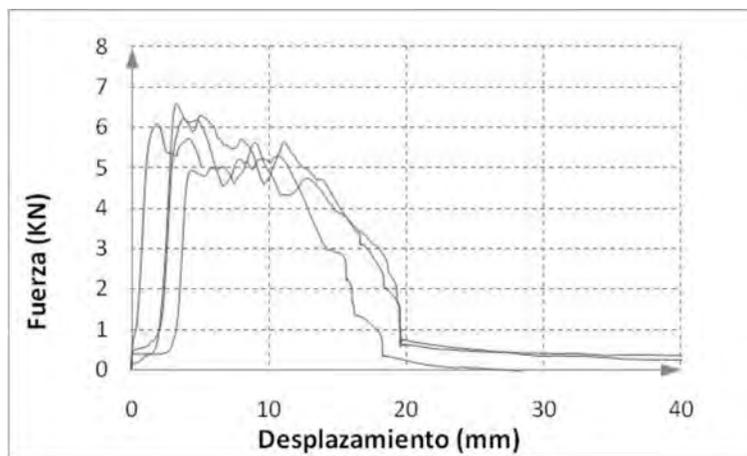


Figura 2.6 Ensayos monotónicos hasta la falla de las conexiones panel-remate.

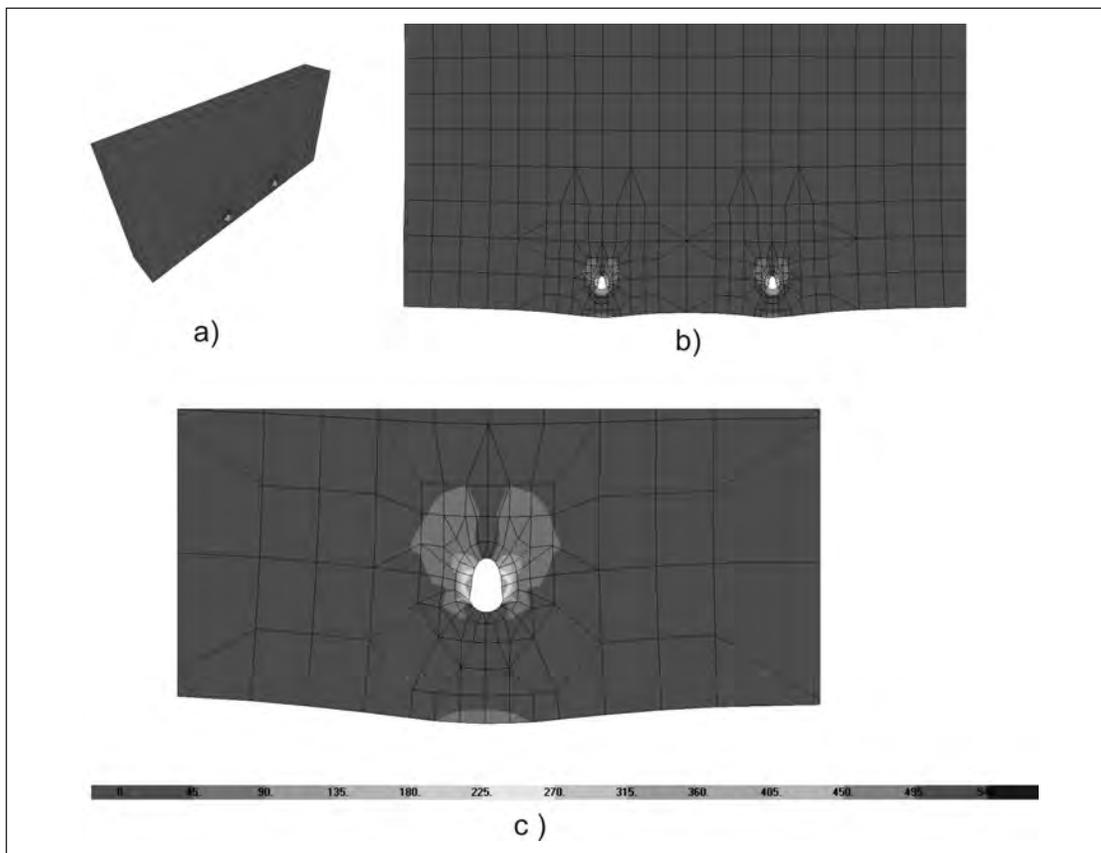


Figura 2.7 a) Modelo por elementos finitos de las conexiones panel-remate. b) Elástica del modelo al aplicarle la carga registrada en el ensayo. c) Concentración de esfuerzos en la conexión.

de acero de 0,5 mm. Al modelo tridimensional de la figura 2.7a) se le aplicó una fuerza de 6,5 kN en la zona superior, obteniéndose la curva elástica indicada en la imagen de la figura 2.7b). Al revisar el nivel de esfuerzo para esta condición de carga en las inmediaciones de los pernos autorrosantes (figura 2.7c) se observa un esfuerzo de 405 MPa, el cual es similar al esfuerzo de rotura del material.

Así mismo, la zona de concentración de esfuerzos está ubicada alrededor de los pernos, lo cual es evidente al observar simultáneamente las figuras 2.7 y 2.4). Luego, este análisis aproximado por elementos finitos realizado en el programa SAP 2000 (CSI, 2005) corrobora los resultados experimentales.

ENSAYOS SEUDODINÁMICOS DE CARGA PARALELA AL PLANO DEL MURO

Con el propósito de establecer el comportamiento de las conexiones trabajando en conjunto con el sistema de paneles, se diseñó una prueba de laboratorio para ensayar los paneles del sistema prefabricado ante una carga paralela al plano del muro. Para hacer este ensayo se usó un actuador dinámico marca MTS de 100 kN de capacidad de carga, el cual se instaló en un marco de reacción diseñado exclusivamente para las pruebas de los paneles. El esquema del montaje de los ensayos se presenta en la figura 3.1.

El ensayo se efectuó por control de desplazamiento de la zona superior del muro. Para ello se hizo a una frecuencia de un ciclo cada cuatro segundos, incrementando la deriva desde desplazamientos pequeños hasta derivas del 4%. Para cada nivel de deriva se efectuaron cinco repeticiones. En la figura 3.2 se muestra la historia de desplazamientos hasta 400 segundos, en donde se puede apreciar la forma en que se incrementa



Figura 3.1 Esquema del montaje de los paneles sometidos a carga paralela al plano del muro.

la deriva. No obstante, cada ensayo tuvo una duración cercana a los 600 segundos.

Cada prueba de laboratorio duró aproximadamente diez minutos. Esta manera de realizar los ensayos permite determinar y percibir en tiempo real la evolución de la rigidez, la resistencia y la ocurrencia de los daños. En total, se efectuaron dos pruebas de laboratorio sobre dos muros diferentes. Cada muro contó con su propia

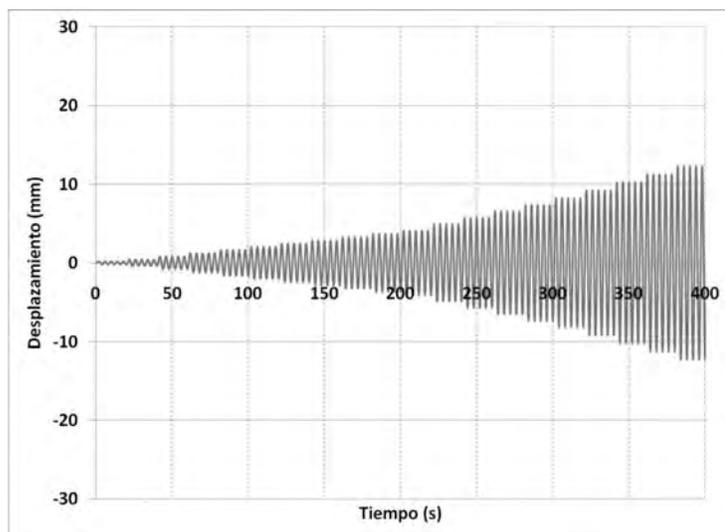


Figura 3.2 Historia de desplazamientos de la zona superior del muro hasta 400 segundos.

cimentación de concreto, constituida por una viga con una cuantía de refuerzo tal que permitió la falla de los muros, manteniendo sin daño las vigas.

Así mismo, cada muro tenía una altura de 2,05 metros, un ancho de 2,0 metros y un espesor nominal de 50 mm, y fue arriostrado lateralmente para garantizar movimientos en el plano. Los muros del sistema se modulan cada metro, lo cual implica que cada muro ensayado estuvo conformado por dos paneles. Los muros se instrumentaron con tres LVDT y por una celda de carga. Los LVDT estaban ubicados así: uno a media altura, otro en la zona superior del muro y el restante en la punta del actuador dinámico. Se tomaron los datos de carga y desplazamientos a una frecuencia de cien datos por segundo para todos los canales activos.

Vale la pena señalar que la única diferencia entre los dos muros ensayados fue la distancia de separación entre los anclajes expansivos que unen el remate en forma de “U” y la viga de cimentación. El primer muro se instaló con anclajes expansivos cada 290 mm y el segundo con anclajes expansivos cada 150 mm.

Instalación e instrumentación de los ensayos

En la figura 3.3 se muestra el proceso de instalación de un muro, el cual empieza con la instalación del remate y culmina con los tornillos autorroscantes. Es importante mencionar que ambos muros fueron anclados y atornillados por un instalador profesional.

Después del proceso de instalación de los muros, se procedió a ubicar tanto el gato hidráulico como los LVDT en su lugar (figura 3.4). Cabe anotar que la carga se aplicó al muro a través de una mensula de acero, unida en la zona frontal al actuador dinámico y en la zona inferior a ángulos metálicos cuadrados de dos pulgadas de lado y $\frac{3}{8}$ ” de espesor.

Resultados de las pruebas seudodinámicas

Con base en el anterior montaje, los dos muros se sometieron a cargas paralelas al plano del muro con ciclos similares a los indicados en la figura 3.2. En la figura 3.5 se muestran los ciclos de histéresis del muro con anclajes más separados (cada 290 mm). De acuerdo con esta gráfica, el muro incrementa su resistencia con el desplazamiento hasta una deriva cercana al 1%. A partir de este punto la resistencia disminuye como

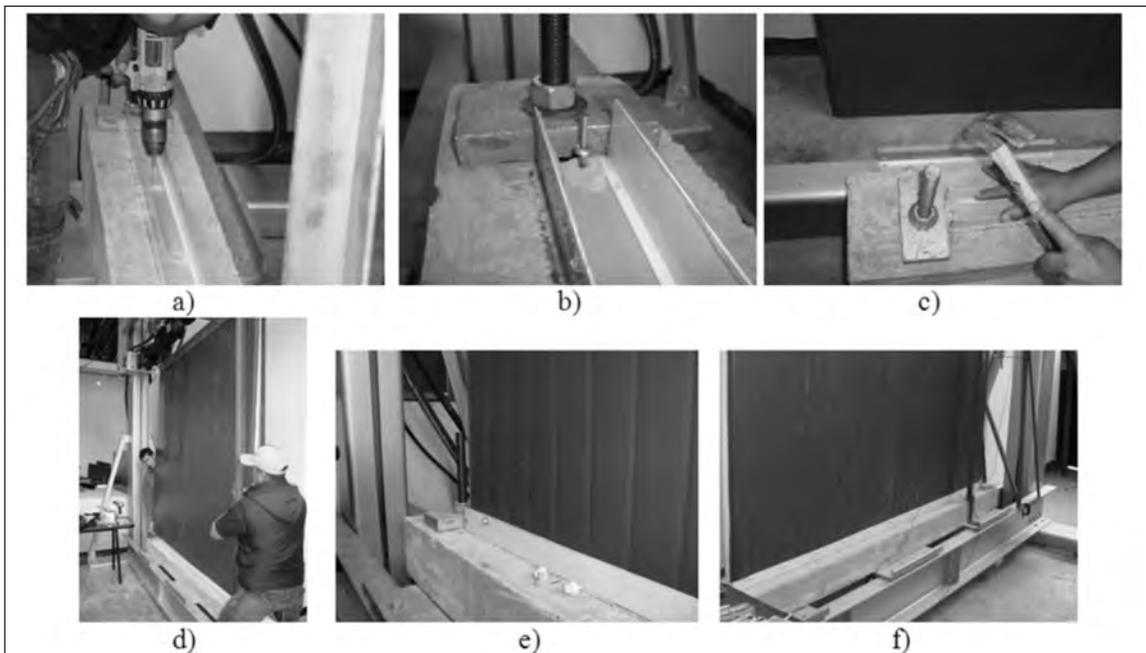


Figura 3.3 Instalación de uno de los muros en el marco de reacción: a) Perforación del remate en "U". b) Perforación de la viga con un taladro percutor y puesta del anclaje expansivo. c) Penetración del anclaje expansivo en la camisa. d) Puesta del muro en el remate en "U" ya anclado a la viga de cimentación. e) Instalación del primer tornillo autorroscante. f) Muro anclado a la cimentación.

consecuencia de la falla por extracción de los dos anclajes de los dos extremos. La carga máxima del ensayo es de 5,5 kN y después, cuando fallan los anclajes de los extremos, cae hasta una resistencia máxima de 4,2 kN, para una deriva del 2%. La última fase del ensayo

muestra un muro con una resistencia muy reducida, desplazándose hasta derivas del 2,7%, únicamente con los anclajes centrales remanentes.

Durante la prueba de este primer muro se observó que el remate empezaba a levantarse de la viga de ci-

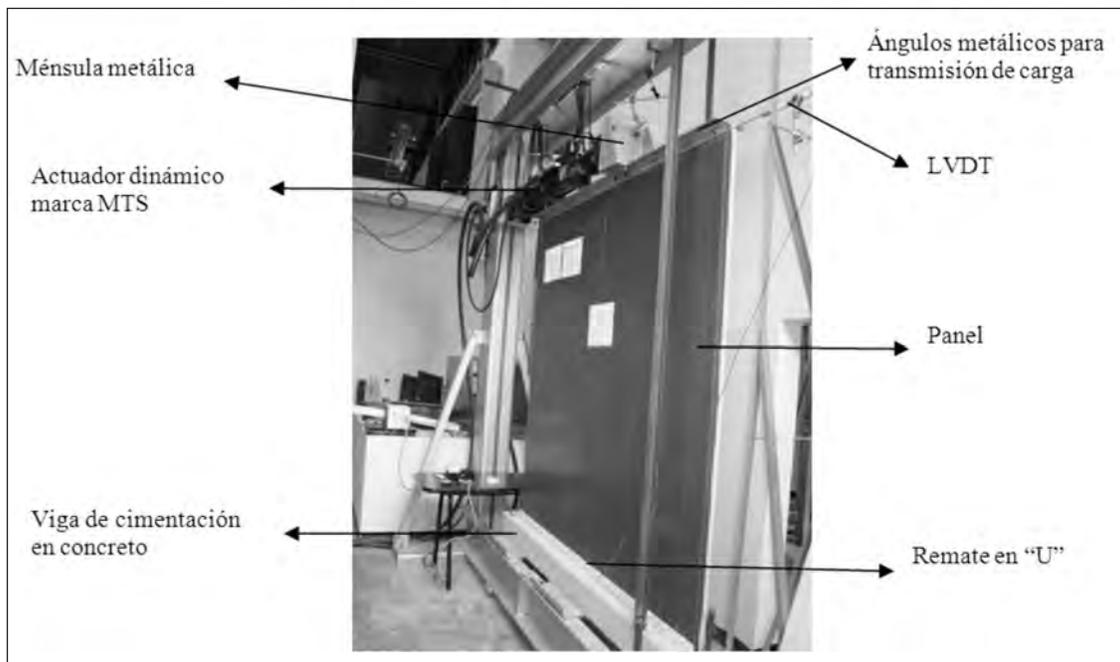


Figura 3.4 Muro instalado e instrumentado.

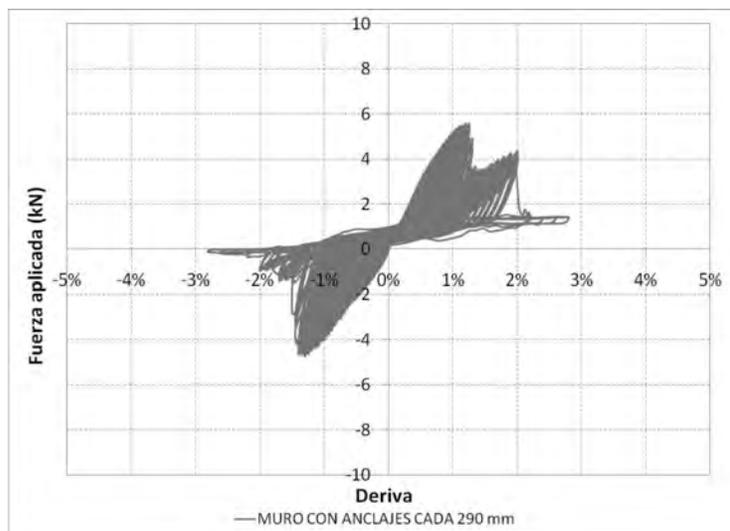


Figura 3.5 Ciclos de histéresis del muro con anclajes cada 290 mm.

mentación para derivas cercanas al 0,5% (figura 3.6a), aunque los anclajes permanecían en su sitio. Para estados avanzados de carga y de daño, los anclajes presentaron dos tipos de falla: o bien se extraían de la viga de cimentación o bien desgarraban la zona inferior del remate en forma de “U” (figuras 3.6b y 3.6c). Para estados avanzados de derivas (superiores al 2%), el muro empezó a

girar alrededor de su centro y sólo permanecían en su sitio los tres anclajes de la zona central (figura 3.6d).

En la figura 3.7 se muestran los ciclos de histéresis del muro con anclajes expansivos cada 150 mm. Es claro que este muro resistió una mayor carga y soportó desplazamientos y derivas mayores que el muro anterior con niveles de daño inferior. La carga máxima resistente fue de 8,78 kN, para una deriva de 2,3%. El muro con anclajes cada 150 mm mantuvo un nivel de carga cercana a la máxima hasta una deriva de 2,8%, punto en el cual la carga resistente cayó hasta 5 kN, para una deriva del 3,7%.

A la luz de los resultados es claro que este muro disipó mayor energía en el rango inelástico que el muro con anclajes cada 290 mm. Si se utilizan las expresiones para amortiguamiento histérico equivalente establecidas en las referencias (García, 1998; ATC, 1996), el amortiguamiento del sistema sería del orden del 8,5%, para una deriva del 2,5%.

Los resultados anteriores se explican mejor si se analiza el mecanismo de funcionamiento durante la pruebaseudodinámica. A diferencia del muro con anclajes cada 290 mm, en el muro con anclajes cada 150 mm el remate en “U” soportó fuerzas y esfuerzos que generaron efectos de flexocompresión generalizados

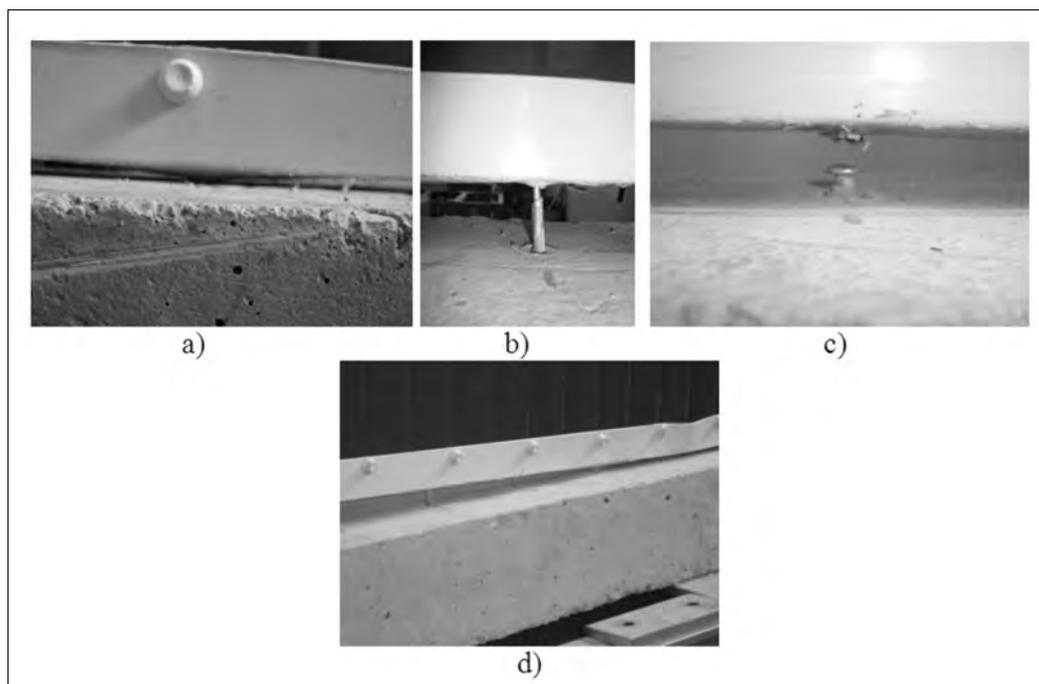


Figura 3.6 Detalles de la falla del muro con anclajes cada 290 mm: a) Levantamiento del remate para derivas de 0,5%. b) Extracción de un anclaje. c) Desgarramiento de la lámina inferior del remate. d) Levantamiento total del remate con el muro.

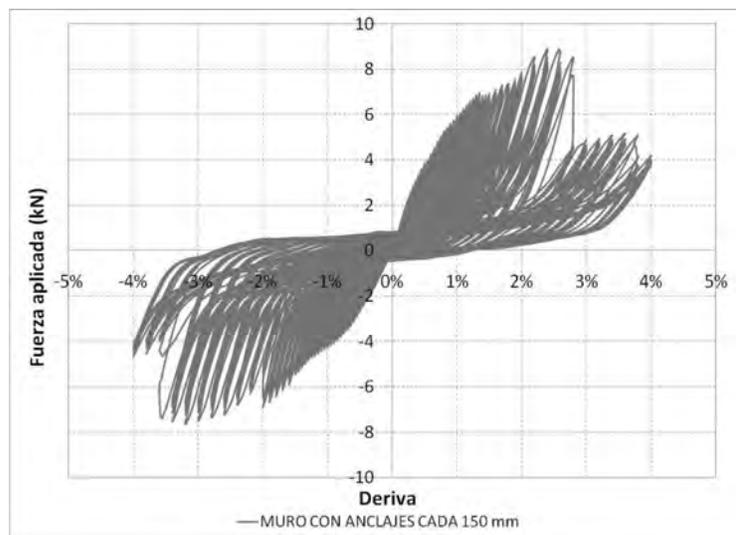


Figura 3.7 Ciclos de histéresis del muro con anclajes cada 150 mm.

que indujeron patrones de movimiento como el ilustrado en la figura 3.8a).

Esta situación denota que las conexiones funcionaron de una mejor manera por cuanto el sistema muro-remate trabajó en forma conjunta, lo que hizo que se empezaran a observar efectos de desgarramiento en las láminas colaborantes (figura 3.8b). No obstante, en estados avanzados de carga de la falla se observaron la extracción de los anclajes expansivos y el desgarramiento del remate en la zona inferior que hicieron levantar por completo el remate en “U” (figura 3.8c).

Vale la pena mencionar que la unión de un panel (de aproximadamente un metro) con el panel contiguo se

hace sólo con dos tornillos autorroscantes en la zona inferior y otros dos en la zona superior. Esto último es evidente al observar la figura 3.9a), en la que se muestra el modelo por elementos finitos desarrollado para el ensayoseudodinámico, para una carga de 8,78 kN. En la figura 3.9 b) se ve que cuando se garantiza una adecuada unión entre los componentes del sistema, se pueden inducir fallas por desgarramiento de las láminas de acero (figura 3.9b).

MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE UNA VIVIENDA SOMETIDA A CARGAS SÍSMICAS

Para hacer aplicables los resultados de este estudio se usó el modelo desarrollado en la referencia (Ruiz et al., 2007), con el fin de establecer los valores máximos de demanda sísmica en las reacciones de una vivienda de interés social ubicada en una zona de amenaza sísmica alta (en el Chocó), construida con el sistema de paneles prefabricados en estudio. Para hacer el análisis conservativo se supuso que los anclajes expansivos estaban situados cada 29 cm. Un esquema de este modelo se puede apreciar en la figura 4.1. El análisis se realiza mediante técnicas modales espectrales y para un espectro derivado de la referencia (AIS, 1998) con una aceleración del terreno de 0,4 g, lo cual implica una aceleración en la rampa del espectro de 1,0 g.

El modelo arroja una fuerza máxima de extracción por nudo para las combinaciones sísmicas (100% del sismo en dirección de “X”, con el 30% del sismo en dirección de “Y”) de 0,321 kN, el cual es claramente in-

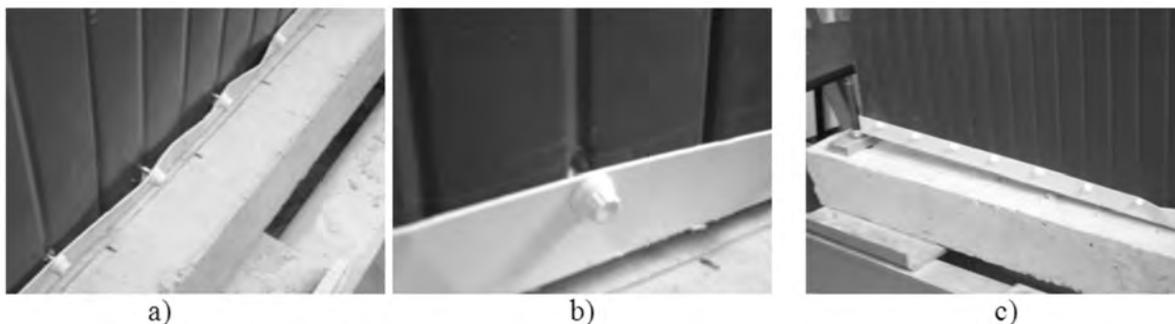


Figura 3.8 Detalles de la falla del muro con anclajes cada 145 mm: a) Desplazamientos inducidos por el muro al remate en “U”. b) Inicios de desgarramiento de las láminas colaborantes en los extremos del muro y en su zona central. c) Levantamiento total del remate con el muro al finalizar la prueba.

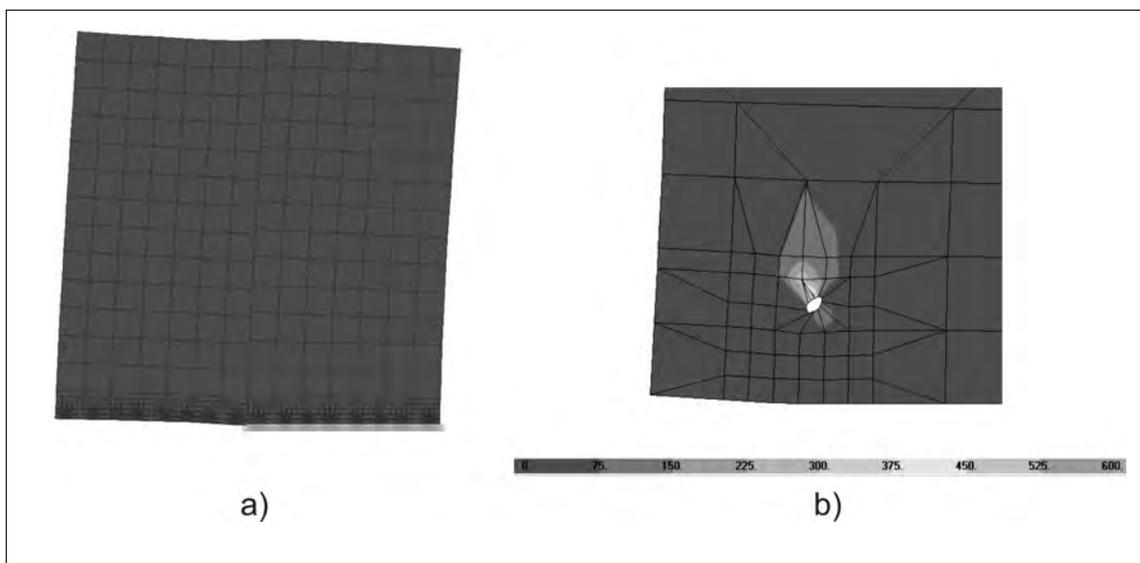


Figura 3.9 Modelo por elementos finitos del muro con anclajes expansivos cada 145 mm: a) Esquema de desplazamientos para la carga horizontal aplicada. b) Estado de esfuerzos en una de las conexiones de los extremos del muro.

ferior a la capacidad resistente de los anclajes ensayados (el valor mínimo resistente fue de 1 kN). Así mismo, los esfuerzos en las zonas de conexión no superaron los 40 MPa, cifra inferior al esfuerzo resistente de las láminas metálicas. Estos bajos niveles de esfuerzo se deben principalmente a que el cortante sísmico en la

base es tan sólo de 6,5 kN (originado en el bajo peso de la vivienda, que se estima en 21 kN). A la luz de los resultados experimentales de los ensayos seudodinámicos, 2,4 metros lineales de muro podrían resistir esta fuerza sísmica en la base para el caso de muros con anclajes cada 290 mm. De acuerdo con este mismo razonamiento, si se usaran muros con anclajes expansivos cada 145 mm se necesitarían 1,5 metros de muro para resistir los 6,5 kN. Sin embargo, al considerar que en cada dirección la vivienda tiene al menos 17 metros lineales de muro, es claro que el sistema podría ofrecer la resistencia suficiente para soportar las condiciones de amenaza sísmica alta de Colombia.

CONCLUSIONES

A la luz de los resultados experimentales, se pueden emitir las siguientes conclusiones:

- Aunque la carga resistente de los anclajes expansivos tiene una alta variabilidad (desde 1,0 hasta 4,2 kN), tendrían la suficiente capacidad para soportar cargas sísmicas de extracción para una separación de anclajes inferior a 290 mm en muros del sistema estudiado para una vivienda de un piso en zona de amenaza sísmica alta.

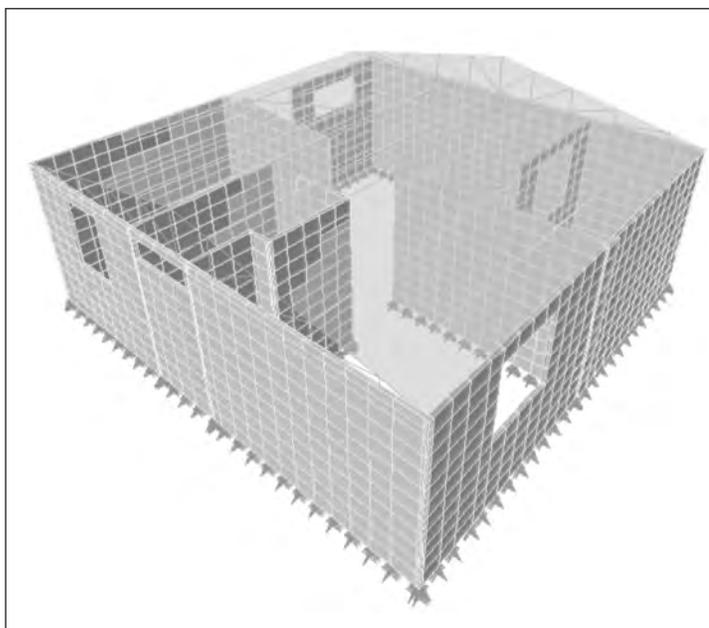


Figura 4.1 Modelo por elementos finitos de una vivienda de interés social con paneles del sistema prefabricado.

- De acuerdo con los resultados de los ensayos seudodinámicos sobre muros, el muro con los anclajes separados cada 150 mm tiene una resistencia cortante promedio por metro lineal de 4,39 kN. Por su parte, el muro con anclajes expansivos cada 290 mm tiene una resistencia al corte promedio por metro lineal de 2,75 kN.
- El muro con anclajes expansivos cada 150 mm tiene una capacidad de deformación en el rango inelástico cercana al 3% de deriva, la cual es más del doble (2,3 veces) que la capacidad de deformación en el rango inelástico del muro con anclajes expansivos ubicados cada 290 mm.
- Las conexiones entre los remates y las láminas colaborantes del sistema de paneles prefabricados (a través de pernos autorroscantes) tiene capacidad de disipación de energía en el rango inelástico.
- El sistema propuesto tiene muchos aspectos a favor para que pueda considerarse un sistema sismorresistente para viviendas de un piso: bajo peso, alta rigidez relativa de sus muros, capacidad de disipación de energía en el rango inelástico, ciclos de histéresis estables, poca degradación de la rigidez, entre otros.

REFERENCIAS

- AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) (1998). Normas colombianas para el diseño y la construcción sismorresistente (NSR-98). Títulos A y B.
- ASTM. American Society for Testing and Materials (2000). ASTM E72, ASTM C271, ASTM C273, ASTM C365, ASTM C364, ASTM C393, ASTM E519.
- ATC (1996). *ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building*, 1. California: Seismic Safety Commission.
- García, L.E. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Icontec (2005). Normas técnicas colombianas (NTC). NTC 2446 y NTC2.
- Computers and Structures (CSI) (2005). *SAP 2000, Nonlinear static and dynamic finite element. Analysis and design*. Berkeley, California.
- Metecno de Colombia (2005.) Manual de instalación. Bogotá, D.C., Colombia.
- Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles (Cimoc) (2000). Informe final: ensayos de resistencia en paneles prefabricados para la construcción de cubiertas y muros en viviendas.
- Ruiz, D., Ochoa, A., Castillo, G. & Robles, A. (2007). Análisis de la resistencia sísmica de un sistema estructural prefabricado de bajo peso para la construcción de viviendas. *Ingeniería y Universidad*, vol. 11, No. 2.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana y a Metecno de Colombia por la financiación del proyecto de investigación que dio origen al presente artículo.

Efecto de las bacterias tiosulfato reductoras en la corrosión de tuberías enterradas en suelos de campos de producción

Effect of thiosulfate-reducing bacteria in the corrosion of buried pipeline in oilfields

SERGIO GARRIDO¹, ANDREA BERNAL², GLADYS ROSERO³, CUSTODIO VÁSQUEZ⁴, RODRIGO TORRES⁵, DARÍO PEÑA

1. ACI Proyectos S.A.

2. Corporación Cima.

3. Instituto Colombiano del Petróleo.

4. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

5. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Química.

sergio.garrido@ecopetrol.com.co - andrea.bernal@corporacion-cima.com - Neira.Rosero@ecopetrol.com.co

Sometido: 09/05/09 Revisado: 30/05/09 Aceptado: 15/06/09

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Se estudió el metabolismo de las bacterias tiosulfato reductoras (BTR) típicas y su efecto en la corrosión externa de ductos enterrados, construidos en acero API 5 L grado B, en campos de producción.

Así mismo, con el propósito de comprender la influencia del suelo sobre el desarrollo de las BTR, se analizaron las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de quince suelos provenientes de cuatro campos de producción y se realizaron experiencias cinéticas de crecimiento bacteriano a 32 °C durante siete días, variando en el medio de cultivo las relaciones de $\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ y nitrógeno/carbono.

Posteriormente se cuantificaron el sulfuro de hidrógeno biogénico y el consumo de fuente de carbono (lactato), sulfato y tiosulfato, y luego se determinó la velocidad de corrosión mediante espectroscopia de impedancia electroquímica, empleando un cupón de acero API 5L grado B, en un rango de frecuencias entre 0,1 - 1×10^5 Hz, a una amplitud de 10 mV durante 278 horas a 32 °C en un electrolito de matriz líquida, inoculado con una población de BTR de 1×10^5 ufc/mL. Sobre el cupón de esta evaluación se identificó, mediante microscopia cofocal, la formación de biopelícula en la

periferia del área del cupón que estuvo expuesta al electrolito y la deposición de productos de corrosión generados por reacciones de oxidorreducción químicas y biológicas propias de la ocurrencia de la degradación estructural del acero.

Palabras claves: bacterias tiosulfato reductoras (BTR), corrosión microbiana (MIC), tuberías, suelos.

Abstract

We studied the typical thiosulfate-reducing bacteria's (TRB) metabolism and their effect in the corrosion of the buried pipeline surfaces, constructed using API 5L grade B pipelines, for oil transportation in oilfields.

In order to understand the influence of soil on the TRB growth, we analyzed some of the physicochemical and microbiological properties of 15 samples of soils collected in four oilfields and carried out kinetic growth trials, using a liquid matrix at 32 °C for 7 days of incubation, being the variables $\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ and nitrogen/carbon ratios. We also quantified the biogenic hydrogen sulfide, the consumption of carbon source (lactate), the sulfate and the thiosulfate.

Then we measured the corrosion rate of steel's coupon API 5L grade B, using Electrochemical Impedance Spectroscopy, at a frequency range of 0.1-1×10⁵ Hz, amplitude of ± 10 mV, in a 278 hours long test, at temperature of 32 °C, in liquid matrix, inoculated with BTR population of 1×10⁵ ufc/mL. On this coupon's surface, through Confocal Microscopy, we examined the biofilm formed around the coupon's exposed area, and identified corrosion deposits generated by chemical and biological Redox reactions, which are associated with steel's degradation by MIC.

Keywords: Thiosulfate Reducing Bacteria (TRB), Microbiologically Influenced Corrosion (MIC), buried pipeline, soils.

INTRODUCCIÓN

La corrosión influenciada microbiológicamente (MIC) es un fenómeno permanente en la industria petrolera, responsable de un 30 - 40% de los problemas de corrosión [1]. Por esta razón, se ha convertido en prioridad identificar las causas y diseñar estrategias de control para disminuir costos generados por la actividad de las bacterias.

Las bacterias sulfato reductoras (BSR) y tiosulfato reductoras (BTR) son los organismos más asociados al fenómeno MIC, siendo el sulfuro de hidrógeno (H₂S), su producto metabólico y el directo implicado en la degradación de superficies metálicas, disminuyendo la integridad estructural de las tuberías debido a reacciones de depolarización catódica por la alteración de los potenciales de oxidorreducción del entorno [2, 3, 4]. A diferencia de las BSR, cuyas rutas metabólicas son las más conocidas, las BTR promueven una mayor velocidad de penetración. No obstante, se dispone de muy poca información acerca de su comportamiento, sobre todo en suelos, por lo que la identificación de este tipo de bacteria en territorio colombiano se convierte en un importante tema de estudio. Las similitudes morfológicas entre las BTR y las BSR son elevadas [5,6,7], lo que permite el desarrollo de este trabajo mediante la comparación de las BTR con estudios teóricos y experimentales realizados a las BSR [8]. Estos ensayos incluyeron pruebas de crecimiento, pruebas de consumo de sustrato y nutrientes, y la aplicación de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para evaluar el daño inducido por las BTR en el acero.

MUESTRAS Y MÉTODO EXPERIMENTAL

Muestreo

A partir de un muestreo previo (45 muestras de suelo) realizado por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), en el que se identificó presencia de BTR en cuatro campos productores, se seleccionaron quince muestras representativas en poblaciones de bacterias altas ($\geq 1 \times 10^5$ ufc/mL), medias ($\geq 1 \times 10^3$ ufc/mL) y bajas (≥ 10 ufc/mL), con el propósito de identificar las propiedades de los suelos que más intervienen en el desarrollo de los microorganismos. Las muestras de suelos se recolectaron a una profundidad entre 1 - 1,5 m y a una distancia de 1 m de los oleoductos.

Caracterización de suelos

Las propiedades caracterizadas en los suelos se muestran en la tabla 1. La selección de estas propiedades está relacionada directamente con la determinación de las condiciones más adecuadas para el desarrollo de colonias de BTR.

Tabla 1
Propiedades del suelo caracterizadas

Propiedades	Técnica o método	Norma
Humedad	Pérdida de peso	Igac
Textura	Hidrómetro Boyoucos	Igac
pH	Potenciométrico	ISO 10390 EPA 9045C
Conductividad	Potenciométrico	Igac
Carbono orgánico total	Walkey-Black	ISO 14235
Nitrógeno total	Kjeldhal	Igac
Aniones (sulfato, tiosulfato, cloruro y nitrato)	HPLC-exclusión iónica	Standard Method 4110 C
BSR	Diluciones seriadas	ASTM D 4412

Igac [9]: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Experiencias de crecimiento cinético

La cinética de crecimiento se realizó con una cepa de BTR típica, aislada de los campos de producción que presentaron poblaciones de BTR mayores de 1×10^4 ufc/mL en suelos; el tiempo de ensayo fue de siete días a una temperatura óptima de incubación de 32 °C, determinada en ensayos preliminares. Los medios de cultivo se prepararon teniendo en cuenta la relación

$SO_4^{2-}/S_2O_3^{2-}$, con un nivel máximo de 25 y un nivel mínimo de 5; de igual manera, se trabajó con la relación carbono/nitrógeno con valores máximo y mínimo de 8 y 5, simulando así los niveles encontrados en los campos de producción durante la caracterización de los suelos, con el propósito de evaluar la capacidad de síntesis de H_2S por parte de las BTR. Se utilizó el medio de cultivo Postgate C [10] como medio de control, utilizado por el Laboratorio de Biotecnología del Instituto Colombiano del Petróleo. Las concentraciones de sulfato, tiosulfato y carbono orgánico (lactato) se cuantificaron en los días 0 y 6 mediante HPLC de exclusión iónica. El sulfuro de hidrógeno se determinó diariamente por medio de un método potenciométrico.

Evaluación de la corrosión
Características del material

El material utilizado fue un cupón de acero API 5L Gr. B, caracterizado mediante el empleo de un análisis metalográfico. La micrografía obtenida a partir de este ensayo se muestra en la figura 1 y revela granos de ferrita y granos de perlita, característicos del acero al carbono.

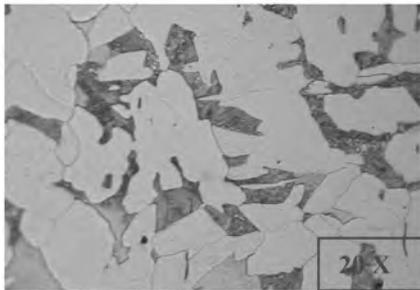


Figura 1. Micrografía común.

Posteriormente, se hicieron ensayos de dureza y determinación de composición química; estos resultados se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla 2
Ensayo de dureza

Muestra	1	2	3	4	5	Promedio (HB)
P1	163	162	165	163	164	163,60±0,89

Tabla 3

Composición química API 5L Gr.B

Elemento %	Muestra P1	API 5L Grado B
C	0,252 ± 0,0029	0,28 Máx.
Mn	0,789 ± 0,0017	1,20 Máx.
P	0,015 ± 0,0013	0,030
S	0,009 ± 0,0038	0,030
Si	0,230 ± 0,0043	-
Cu	0,015 ± 0,0003	-
Ni	0,015 ± 0,0003	-
Cr	0,052 ± 0,0003	-
Mo	0,010 ± 0,0001	-
Nb	0,003 ± 0,0004	-
Co	0,003 ± 0,0001	-
V	0,001 ± 0,0001	-
Fe	Balance	-

Adicionalmente, se efectuó un análisis superficial del cupón con lijas 120, 240, 320, 400 y 600.

Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

El cupón de acero API 5L grado B se utilizó para evaluar el mecanismo de corrosión originado por las BTR. Para esto se empleó la técnica de impedancias, que permite analizar la formación de biopelícula y obtener valores de velocidad de corrosión.

El montaje experimental se muestra en la figura 2. Como electrolito se utilizó el medio Postgate C sin $FeCl_3$, el cual presentó la mayor producción de H_2S (figura 4) en comparación con los medios A y B, asegurando así un ambiente óptimo para el desarrollo metabólico de las BTR.

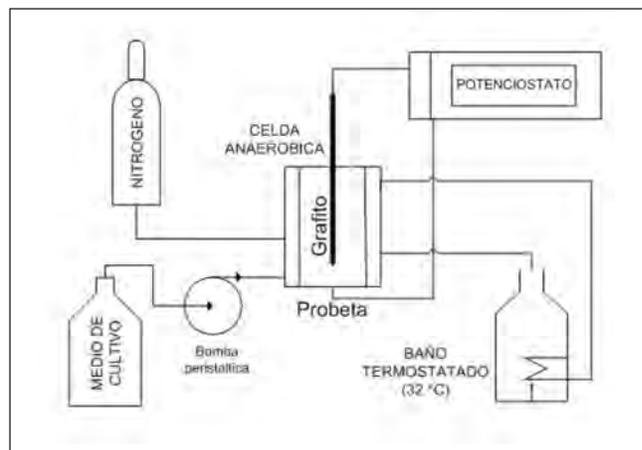


Figura 2. Montaje para evaluación de corrosión.

La técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica se aplicó en un rango de frecuencias desde 0,1 hasta 10^5 Hz, con una amplitud de ± 10 mV. El tiempo de ensayo fue de 278 horas y los datos se registraron cada doce horas, aproximadamente.

Por último, se evaluó la superficie expuesta al electrolito con bacterias, mediante un microscopio confocal, el cual permite obtener un perfil de profundidad de los depósitos originados y visualizar la formación de la biopelícula. Para obtener dichas imágenes la biopelícula se fijó mediante inmersión en glutaraldehído y deshidratada con etanol.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Resultados

Caracterización de suelos

Los valores de las propiedades caracterizadas en las quince muestras de suelo se observan en la tabla 4. Al

relacionar dichas propiedades con el número de BTR cuantificado en cada muestra, no se encontró un patrón exacto que relacione altas poblaciones de bacterias con los niveles determinados de pH, conductividad, textura del suelo y en especial las concentraciones de nutrientes. Se hallaron suelos con altas concentraciones de nutrientes y bajas poblaciones de bacterias y suelos con el caso contrario. Estas condiciones pueden deberse a la variada actividad metabólica bacteriana, razón por la cual los parámetros de ensayo seleccionados para la cinética de crecimiento fueron la conductividad del medio, carbono orgánico total, nitrógeno, sulfato y tiosulfato.

La formulación de los medios de cultivo se muestra en la tabla 5. Estos medios se prepararon con base en los resultados de las propiedades de los suelos obtenidos durante la caracterización, con niveles máximo y mínimo de 8:1 y 5:1, respectivamente, para C:N, y 25:1 y 5:1 para $\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$.

Tabla 4
Caracterización de los suelos

Muestra	H	Ar	Ac	Lm	pH	Cond	COT	NT	$\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$	SO_4^{2-}	Cl ⁻	NO_3^-	BSR	BTR
1	4,94	62,61	33,95	3,4	9,13	28	33	195,8	<4,10	<2,50	7,19	11,20	10	1×10^4
2	4,01	35,85	39,97	24,18	8,62	73,6	12.256	721,8	<4,43	29,41	13,16	20,63	1×10^2	$\geq 1 \times 10^6$
3	3,11	45,14	34,98	19,89	8,65	44,8	2.136	308,5	<4,45	<2,50	12,02	4,33	1×10^2	1×10^5
4	3,90	37,16	35,41	27,43	7,87	275	2.350	298,5	<4,26	197	779	1,79	10	1×10^4
5	8,63	49,72	39,33	10,95	6,44	108,4	2.708	519,7	<4,43	<2,50	313	9,76	10	$\geq 1 \times 10^6$
6	6,06	57,31	38,26	4,43	9,14	66,5	14.268	500,4	<4,27	45,07	9,28	9,73	1×10^2	$\geq 1 \times 10^6$
7	6,43	49,88	42,05	8,07	8,79	62,1	1.210	284,4	<4,32	45,49	25	49,37	1×10^3	1×10^4
8	8,11	49,14	16,42	34,43	5,94	15,42	216	599,2	<4,48	<2,50	23,48	<0,069	1×10^2	1×10^3
9	6,66	44,41	28,62	26,97	6,89	76,2	6.532	547	<4,41	183	14,17	<0,069	1×10^2	$\geq 1 \times 10^6$
10	4,24	36,16	29,8	34,04	5,65	24,7	5.490	550	<4,14	71	6,47	31,08	1×10^3	$\geq 1 \times 10^6$
11	9,87	49,99	7,18	42,83	8,3	34,4	2.011	401,7	<4,31	<2,50	8,53	<0,069	10	1×10^4
12	2,04	84	5,36	10,64	7,5	17,18	94	21,1	<4,13	45,21	13,68	3,10	<10	1×10^2
13	2,03	75,39	11,41	13,2	6,9	62,6	9.924	554,1	<4,48	172	180	53,26	1×10^2	1×10^5
14	6,69	72,61	8,26	19,13	7	24	ND	145,8	<4,45	321	197	13,69	<10	10
15	1,96	70,44	21,77	7,79	5,5	65	3.472	489,3	<4,29	<2,50	9,25	<0,069	<10	1×10^3

Humedad%	(H)		Carbono orgánico (ppm)	(COT)		BSR	(ufc/mL)	
Arena	%	(Ar)	Nitrógeno total	(ppm)	(NT)		BTR	(ufc/
mL)								
Arcilla	%	(Ac)	Sulfato	(ppm)	(SO_4^{2-})			
Limo	%	(Lm)	Tiosulfato	(ppm)	($\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$)			
pH			Cloruros	(ppm)	(Cl)			

Tabla 5
Composición de medios de cultivo

Compuesto	Medio A (g/L)	Medio B (g/L)	Medio Postgate C (g/L)
NH ₄ NO ₃	0,43	0,43	---
Na ₂ S ₂ O ₃	0,14	0,69	1,2
NH ₄ Cl	---	---	1
MgSO ₄	3,72	3,72	---
MgCl	---	---	1,65
C ₃ O ₃ HNa	6 mL	3 mL	3,5 mL
NaH ₂ PO ₄	1,23	1,23	---
NaCl	---	---	1
KH ₂ PO ₄	0,5	0,5	0,5
FeCl ₂	0,36	0,36	0,36
C ₆ H ₈ O ₆	0,1	0,1	0,1
Extracto Levadura	1	1	1
H ₂ O	1L	1L	1L

Cinética de crecimiento

A partir de ensayos preliminares se comprobó que los medios de cultivo formulados eran adecuados para el crecimiento de las BTR a una temperatura de 32 °C.

Durante la cinética, los títulos poblacionales alcanzados para los medios A, B, C en los días 2, 3, 4 sobrepasaron los niveles de producción de biomasa esperados para BTR ($\geq 1 \times 10^{15}$ UFC/mL), hasta un máximo de $\geq 1 \times 10^{24}$ UFC/mL en el día 4, día en el cual se detuvo el recuento bacteriano y se prosiguió con la cinética de

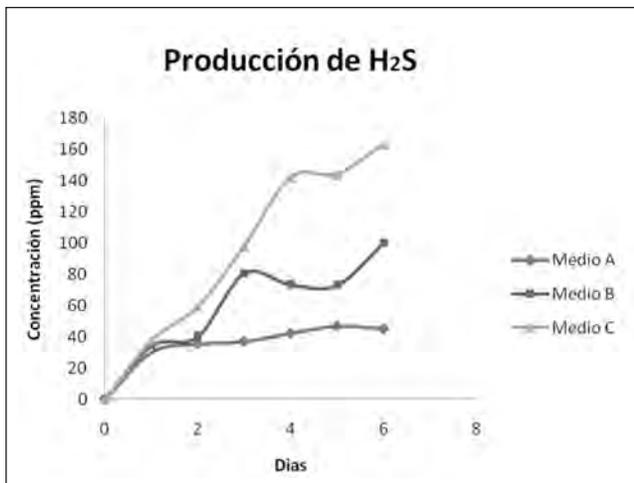


Figura 3. Producción biogénica de H₂S.

producción de H₂S biogénico (figura 3) y consumo de aceptores (sulfato/tiosulfato) y donador de electrones (lactato) (figura 4).

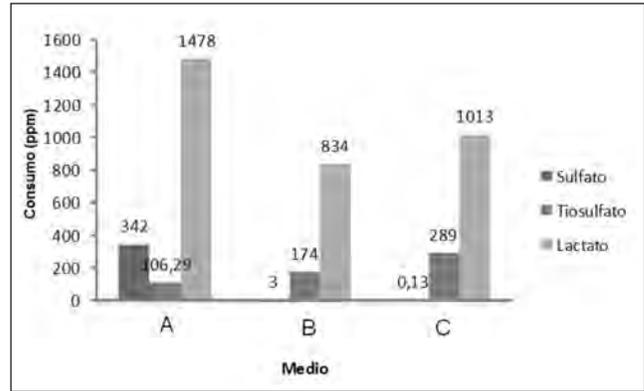


Figura 4. Consumo de tiosulfato, sulfato y lactato.

La cinética utilizó medio Postgate C como referencia. Después de 24 horas, el método de diluciones seriadas registró un crecimiento acelerado de BTR debido a interferencias generadas en el método por la presencia excesiva de precipitados de sulfuros de hierro en el transcurso del primer día de ensayo. La precipitación se produjo por la saturación del medio de cultivo, con H₂S generado por las BTR, las cuales en un día sintetizaron entre 32 y 37 ppm de H₂S, dependiendo del medio de cultivo (figura 3). Las curvas de producción de H₂S presentan un comportamiento exponencial en la fase de crecimiento.

Como se observa en la figura 4, el medio de cultivo A presentó un consumo alto de sulfato, lo que implica que las bacterias tiosulfato reductoras tienen la capacidad para reducir sulfato cuando éste se encuentra en mayor concentración que el tiosulfato. Por otra parte, este mismo medio presentó una baja producción de sulfuro de hidrógeno a pesar de que el consumo de carbono fue elevado, lo cual podría explicarse por reacciones metabólicas incompletas [2, 11]. Se evidencia que a mayores concentraciones de tiosulfato, mayor fue la producción de sulfuro de hidrógeno.

Evaluación de la corrosión

Los diagramas de Nyquist obtenidos durante la aplicación de EIS se muestran en las figuras 5 y 6. Estos datos

fueron los más representativos de los ensayos realizados para el estudio de la MIC.

En la figura 5 se observa que la resistencia a la polarización (R_p), obtenida en un tiempo inicial (cero horas), es un valor relativamente alto; sin embargo, la disminución en los valores de resistencia a la polarización presentados en el intervalo de 15 a 110 horas hace suponer que el proceso de corrosión se ve enaltecido, debido posiblemente a la alta corrosividad del electrolito [4, 12], el cual rompe la capa pasiva formada en el acero durante este intervalo de tiempo.

Los valores de R_p medidos para 134, 143, 158 y 182 horas tienden a un estado estable, que se comprueba también con la variación del potencial de circuito abierto (OCP) (figura 7). La tendencia del sistema hacia un estado estable de corrosión puede originarse por el establecimiento de un equilibrio dinámico entre la formación de una película protectora y su disolución.

En el diagrama de Nyquist presentado en la figura 6 se observan dos semicírculos: uno pequeño a altas frecuencias, originado posiblemente al elevado contenido de sulfuros, valorados durante la cinética (figura 3). El otro rango, de 100 Hz - 10 mHz, está relacionado con la transferencia de carga que experimenta el sistema [4].

En la figura 7 se muestra la variación del potencial de circuito abierto durante el tiempo de ensayo, el cual presenta un aumento durante las primeras horas debido a la formación de productos de corrosión y una posterior estabilidad a causa de la formación de capas pasivas.

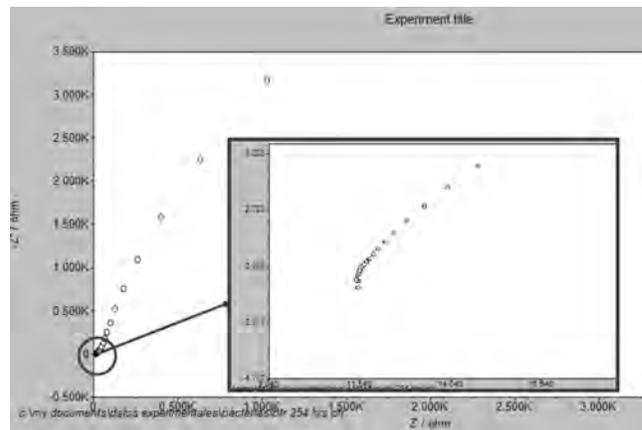


Figura 6. Gráfico de Nyquist.

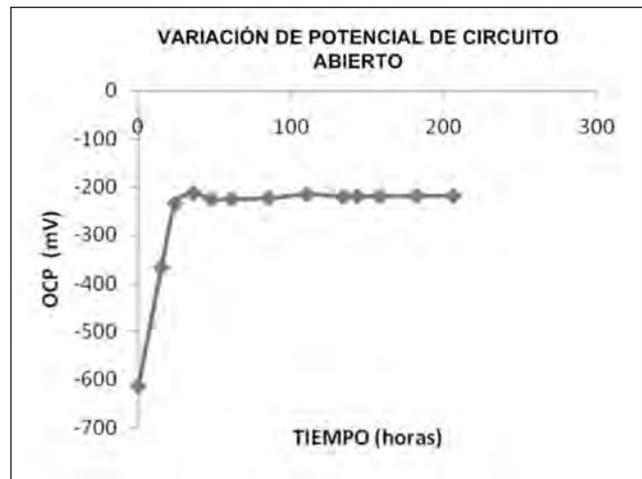


Figura 7. Variación del potencial de circuito abierto.

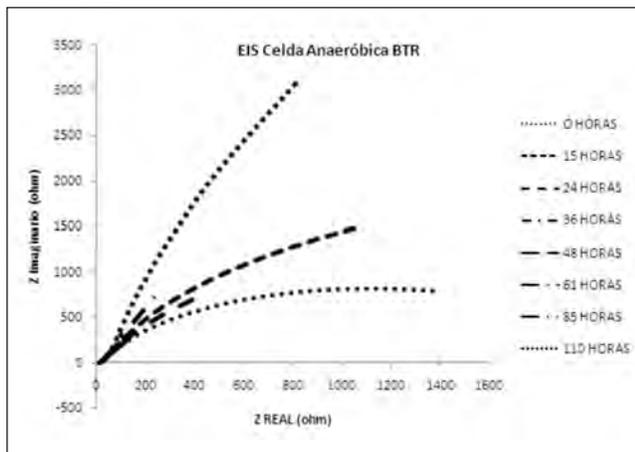


Figura 5. Gráficos de Nyquist.

Así mismo, en la figura 8 se presentan las velocidades de corrosión calculadas utilizando el valor de quince para la constante de Stern Geary. La expresión utilizada es:

$$i = \frac{b}{2.303 \times R_p}$$

Donde i es la densidad de corriente, b es la constante de Stern Geary determinada experimentalmente por Hilbert [12], R_p es la resistencia a la polarización. Finalmente, se calculó la velocidad de corrosión de acuerdo con la expresión:

$$r = \frac{0,129 \times a \times i}{n \times D} \text{ [mpy]}_{[13]}$$

Donde r es la velocidad de corrosión [mpy], a es el peso molecular del hierro, i densidad de corriente, n

es el número de electrones transferidos y D densidad del acero.

En la figura 8 se aprecian marcadas variaciones en los valores de velocidades de corrosión. Durante las primeras cien horas se aprecia un incremento en ésta, debido a las reacciones producidas por el electrolito [14]. En general, los productos de la corrosión (hidróxidos de hierro y sulfuros de hierro), junto con la biopelícula, tienden a formar una capa pasiva a partir de las cien horas. El pico observado a 206 horas puede ser ocasionado por los iones cloruros [4]. Sin embargo, las resistencias de polarización obtenidas a tiempos mayores de 206 horas alcanzaron valores altos, revelando una protección de la superficie del cupón.



Figura 8. Variación de la velocidad de corrosión con el tiempo.

Con el fin de obtener una evidencia física sobre algún indicio de ataque por MIC, se hizo una evaluación visual del área del cupón expuesta al medio de cultivo, una vez terminado el ensayo de impedancias. La evaluación de los depósitos de productos de la corrosión y depósitos de productos orgánicos sobre la superficie expuesta de la probeta se realizó mediante un microscopio confocal. En las figuras 9, 10 y 11 se presentan las fotografías tomadas con el microscopio Hyrox KH-7700 a 20, 100 y 2.100 aumentos. Al obtener el perfil de profundidad en la zona con depósitos se observa una profundidad máxima de 30 micras, que son una combinación de productos de la corrosión con material orgánico.

En la figura 9 se observa una capa de óxido homogénea de color rojizo, característico de la formación de óxidos e hidróxidos de hierro, que cubre la mayor parte del área expuesta al electrolito. Esto confirma los resultados obtenidos a partir de los espectros de impedancias, donde se observó la formación de una capa pasiva que brinda una protección parcial al acero.

La actividad microbiana se desarrolló en las rendijas formadas entre el empaque de caucho, utilizado para asegurar el sello de la celda anaeróbica, y la lámina de acero. Las zonas blancas presentes en las figuras 10 y 11 corresponden a residuos orgánicos (bacterias y biopelícula) [6, 11, 15], adheridos a zonas oscuras que corresponden principalmente a sulfuros de hierro. Los puntos rojos corresponden a óxidos de hierro [16]. La interrelación entre FexSy - biopelícula se debe a la presencia de puntos de nucleación en la estructura de la biopelícula, que favorece la formación de cristales de FexSy [4].

En razón de la complejidad del sistema y al corto tiempo de ensayo, es difícil predecir el carácter agresivo de la biopelícula para el sistema estudiado, por lo que se hace necesario continuar con el estudio de corrosión por MIC, partiendo de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Esta biopelícula tiene una estructura no uniforme, en la cual es posible que se establezcan gradientes de concentración que favorezcan una corrosión localizada [4]. Este tipo de estructuras se caracterizan también por permitir el flujo de materia y gases que dan lugar a puntos con bajas o altas concentraciones de compuestos químicos, originando la formación de celdas de aireación diferencial con puntos anódicos y catódicos.

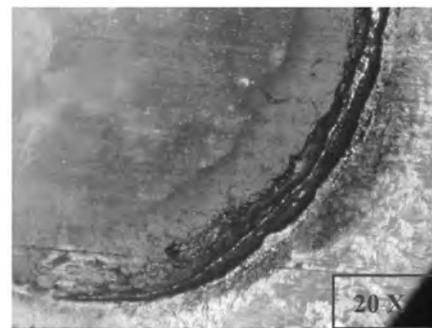


Figura 9. Área atacada, después del ensayo.

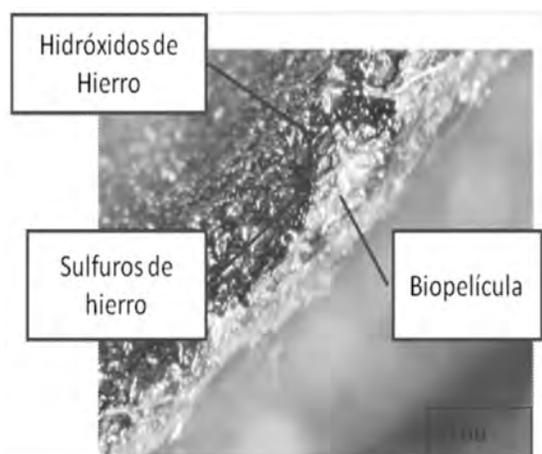


Figura 10. Formación de la biopelícula.

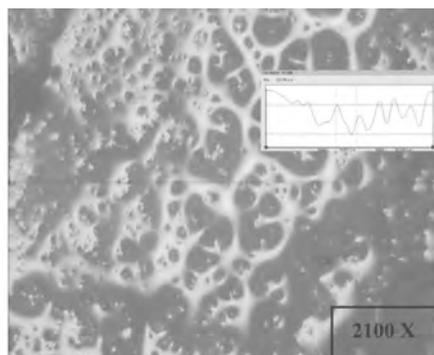


Figura 11. Matriz polimérica de la biopelícula.

CONCLUSIONES

Las bacterias tiosulfato reductoras aisladas utilizaron como aceptor de electrones el sulfato y el tiosulfato, pero la productividad de sulfuro de hidrógeno fue mayor a partir del tiosulfato.

El método de diluciones seriadas no fue adecuado para detectar, en el cultivo de bacterias tiosulfato reductoras, cambios de población en lapsos cortos porque la elevada producción de sulfuro de hidrógeno generó en forma inmediata el precipitado sulfuro de hierro. Sin embargo, este método se podría utilizar, si se establece una etapa de despojo del H_2S en cada submuestra.

En el período examinado, y utilizando un electrolito que contiene suficientes nutrientes para los microorganismos, las velocidades de corrosión del acero API 5L grado B fueron bajas. Este tiempo de experimentación fue insuficiente para percibir las variaciones en la interfaz biopelícula-metal, una vez que se hubiesen disminuido significativamente las especies químicas que constituyen el alimento a las bacterias.

Mediante los resultados de EIS y de microscopia confocal, se evidenció la presencia de sulfuro de hierro, producto de corrosión característico de la degradación por efecto MIC.

Los procedimientos utilizados en este trabajo constituyen herramientas prácticas que podrían usarse para estudiar el comportamiento de biopelículas, variando las condiciones nutricionales del medio y evaluando períodos de exposición prolongados.

REFERENCIAS

- [1] Surkov, Alexander V. (2001). *Int J Sys Evol Microbiol*, No. 51, pp. 327-337.
- [2] Cord-Ruwisch (1987). *J.P.T.*, pp. 97-106.
- [3] Crolet, J. et ál. (1997). *Int J Syst Bacteriol*, vol. 43, No. 3, pp. 818-824.
- [4] Javaherdashti, Reza (2008). *Microbiologically influenced corrosion. An engineering insight*, Ed. Springer.
- [5] Crolet, J. et ál. (1997). *Int J Syst Bacteriol*, vol. 43, No. 3, pp. 818-824.
- [6] Rabot, G. & Magot, M. (1995). *Appl Environ Microbiol*, vol. 61, No. 5, pp. 2053-2055.
- [7] Stewart, P. (1995). *Elsevier Science Ltd.*, vol. 29, No. 8, pp. 2006-2009.
- [8] Videla, A. & Herrera, L. (2005). *Int Microbiol*, No. 8, pp. 169-180.
- [9] Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1990). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*, 5ª ed. Bogotá: Subdirección Agrológica.
- [10] Atlas, Ronald (2004). *Handbook of Microbiological Media*. Ed. Lawrence C. Parks.
- [11] Amman, R. (1992). *Appl Environ. Microbiol*, vol. 58, No. 2, pp. 614-623.
- [12] Hilbert, L.H. Dept. of Manufacturing Engineering and Management. Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark.
- [13] Jones, D. (1996). *Principles and prevention of corrosion*. Ed. Prentice Hall.
- [14] Jones, D. & Amy, P. (2002). *Corrosion*, vol. 58, No. 8, pp. 638 - 645.
- [15] Sheng, X. (2007). *Corrosion*, No. 49, pp. 2159 - 2176.
- [16] Santeagoeds, C. (1998). *Appl Environ Microbiol*, vol. 64, No. 10, pp. 3731 - 3739.