

GFRP-RC Seawalls as a Means of Coastal Fortification and Extended Service Life

by Christian C. Steputat, Jim O'Connor, Matt Arrants, Josh Beech, and Antonio Nanni

Constructed in 1670, the Low and High Battery Seawall in Charleston, SC, USA, is known as an iconic defensive seawall with a more recently created scenic seaside promenade. It is this scenic seaside promenade that was initially completed in 1838 along the immediate seawall region with strategic placement of rocks, heavy boulders, and other elected construction materials. The seaside promenade extends along the shoreline of the Cooper River and is geographically located to the east of the peninsula and has become a frequented destination for local residents and tourists alike, due to its scenic views. The battery seawall's name originated from a civil war coastal defense artillery battery that was situated at its location. Historically, this iconic defensive seawall with seaside promenade extends from 40 East Bay Street to Murray Boulevard and King Street. Additionally, the battery is famous for its homes in the neoclassical architectural style of the nineteenth-century Southern United States.

The seawall retrofit and repair were designed and implemented with Phase II substantially completed in April 2022. Phase I was completed in early 2021, while Phase III, consisting of another 1800 ft (550 m) of seawall from Limehouse Street to King Street, was approved by the Charleston City Council in March 2022 and is scheduled to commence immediately after Phase II is completed. The structural retrofit of the existing Low Battery Seawall included extending the height of the seawall, strengthening the seawall by underpinning with micropiles, constructing a new concrete pile cap structurally tied into the existing seawall, replenishing eroded and washed-out soil fill materials, reconstructing the seaward face of the seawall, and structurally supporting a new seaside promenade on the newly installed pile caps to prevent future settlement and tilting

conditions. The structural system includes a one-way concrete slab supported by pairs of micropiles at a maximum design spacing of 9.0 ft (2.7 m) on-center. The seawall is supported by a multispan reinforced concrete (RC) beam with the seawall component immediately above it. The new seawall elevation was raised to the same elevation as the High Battery Seawall to mitigate flooding and sea level rise, and the new promenade is compliant with the Americans with Disability Act (ADA).

A cost-benefit assessment analysis was completed during the planning stage of this project and considered, prior to design finalization, galvanized steel, stainless steel, and glass fiber-reinforced polymer (GFRP) as concrete reinforcement alternatives. Based on the assessment, GFRP was selected for its corrosion resistance and aesthetic performance (that is, no staining of exposed surfaces due to leaching of corrosion products). GFRP reinforcing bars were used in all wall components and for the seaside face of the seawall's full length. The less exposed and not visible buried base slab was reinforced with Grade 60 steel.

Project Specifications and Design Code Provisions

From structural, geotechnical, and materials engineering design and construction basis, 2015 International Building Code (IBC),¹ ASCE 7-10,² ACI 318-14,³ and ACI 301-10⁴ were used for this project. In addition, ACI 440.1R-15,⁵ ASTM D7957/D7957M,⁶ and ACI 440.5-08⁷ were used for the design of the RC elements.

A wind speed criterion of 147 mph (237 km/h), with 3-second gust was applied for the regional location, where Risk Category II is applicable, and a parapet or cladding load of 135 psf (6.5 kN/m²) was used. A static analysis method for

the seismic analysis of structures—including a Seismic Use Group II, a nonbuilding structure seismic resisting system, and an equivalent lateral force (ELF) methodology—was considered. A 5% damped design spectral response acceleration at short periods of 0.2 seconds or S_{DS} of 0.658, a 5% damped design spectral acceleration at a period of 1.0 second or S_{D1} of 0.605, a seismic base shear $V = 0.197w$, where w is the effective seismic weight, an importance factor I of 1.0, and a Seismic Design Category (SDC) D completed the design criteria for this seawall project.

Flood Zone VE is considered herein as a special flood hazard area (SFHA) mainly found along coastlines, where there is an annual 1% chance of flooding, including from waves, as is the case for this seawall. Base flood elevations determined from the hydraulically engineering analysis, and ASCE/SEI 24-05⁸ were considered.

Micropile Substructure

For a typical micropile row spacing of 7.5 ft (2.3 m), the design forces at critical loading conditions on the pile cap resulted in design specifications and dimensions, as shown in Fig. 1.

Geotechnical provisions included the addition of compacted fill material free of organic and other deleterious materials that affect the compactability. The placed soil fill material consisted of a maximum of 20% fines and had a maximum dry density, per modified Proctor test (ASTM D1579) of at least 100 pcf (1602 kg/m³). The liquid limit of the soil fill was recorded at less than 30, and a plasticity index was noted as less than 15. The soil fill material was placed in lifts not to exceed 10 in. (254 mm) and compacted to at least 95% of the modified Proctor maximum dry density. Additionally, construction shoring, bracing, and sheeting was provided in accordance with EM 385-1-1¹⁰, as required for this seawall project.

The structure is supported with drilled micropiles with a required pile tip elevation of EL.-95.00 at 9.0 ft maximum horizontal spacing, and elevation EL.-81.00 at 7.5 ft maximum horizontal spacing. The micropiles are 20 ft (6.1 m) long, cased at top with 7 in. (178 mm) diameter Grade N80 steel casing per API 5CT¹¹, which is a high-strength and high-toughness carbon steel seamless pipe. The remaining length of 6 in. (152 mm) diameter was uncased to the required and indicated tip elevation. The micropiles typically include a 3 in. (76 mm) diameter hollow bar. A concrete grout with compressive strength at 28 days of 4000 psi (28 MPa) was used for the fully grouted micropiles.

Phase I

Construction on the Low Battery Restoration Project began with Phase I extending from Tradd Street to just beyond Ashley Boulevard. Phase I construction started in December 2019 and was completed in January 2021. Approximately 850 linear ft (260 m) of seawall with roadway were rebuilt, raising it nearly 2.0 ft (0.6 m), and a 10 ft (3 m) wide promenade was provided.

ADA-compliant accessibility ramps were added to Tradd Street and Ashley Boulevard. All water and sewer line connections were replaced, including service connections to the right-of-way (Fig. 2).

Micropiles were first installed to support the new wall and elevated seaside promenade. Then, demolition and repairs of the old seawall were conducted in 100 ft (30 m) sections, to assure minimum exposure in the event of a storm or high tide. Micropile installations were completed and grouted to depths reaching 81 ft (25 m), extending into the Cooper Marl stratum, to prevent settlement and tilting of the seawall and promenade. While the wall removal/concrete work proceeded, the existing water main was replaced. This operation included removal and replacement of the existing pipe service connections. The sanitary sewer was installed, and all sewer and laterals were replaced, tested, and placed into service. Approximately 1100 linear ft (336 m) of new storm drains were installed, in addition to new and improved outfall provisions.

Granite curbs play a crucial part in the signature look of the City of Charleston Historic District, and they were salvaged where possible. Granite curb, traffic table granite edging and cobblestones, and traffic delineator cobblestone were installed, and the existing gas line under the existing sidewalk was removed and replaced. Stone edging was added along the length of the seawall, new lights were installed, and palm trees completed this phase of the project.

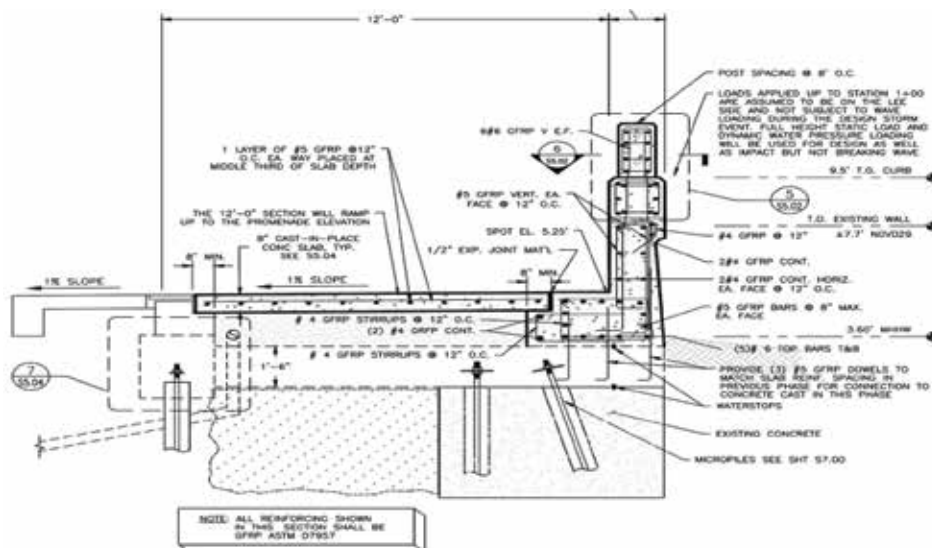


Fig. 1: Typical section showing installed micropiles and GFRP structural reinforcing for the seawall structure with promenade

Approximately 90,700 linear ft (27,700 m) of GFRP bars, both straight and bent shapes, were used in Phase I of the project. Here, corrosion resistance and anticipated long-term benefits were a big draw during the material selection process, and ultimately resulted in GFRP field-implementation. Furthermore, the adaptation of GFRP bars in radial segments, such as the curvilinear section of Phase I (Fig. 2), was demonstrated and validated from a constructability standpoint. One of the benefits of GFRP bars is that they can be premanufactured to desired shapes and specifications.

Phase II

Construction of Phase II extended from the completed Phase I to just before Limehouse Street, for an additional 1100 linear ft (335 m) along the ocean frontage. Phase II (Fig. 3) included the repair of the Low Battery Seawall, which started in February 2021 and was completed in April 2022, at which time Phase III was initiated, the last phase for this project slated to be completed within 18 months of its initiation.

At the end of December 2021, the final concrete section connecting Phase I to Phase II, with drainage pipe incorporated, was placed. This section included the promenade, the raised new seaward wall, a section that integrates into the seawall face and cast-wall, and the mat-type base slab. The concrete reinforcement in these elements consisted of GFRP bars. Low tide conditions were exploited to conduct the concrete placement without the need for additional dewatering. With Phase II substantially completed in April 2022, the successful use of GFRP reinforcement for Phases I and II of this project was realized and was instrumental in the selection of GFRP bars for Phase III.

Construction Stages

Some of the advantages of hydrodemolition include damage-free cleaning of steel reinforcing bars, elimination of dust, and a drastic reduction in noise levels. Hydrodemolition was used on the project to remove deteriorated concrete and expose sound concrete with a roughened surface profile, which was preferred for bonding the shotcrete overlay (construction sequencing is shown in Fig. 4). Shotcrete mixture consisting



Fig. 2: Phase I of the concrete seawall project: (a) concrete placement of curved section; and (b) completed GFRP seawall curved section



Fig. 3: Phase II of the concrete seawall project: (a) a straight section of concrete placement; and (b) placed concrete and installed GFRP reinforcement in the straight seawall section

of cement, sand, and water was applied in layers and at low tide, which resulted in a hard and dense layer of shotcrete.

The consideration of tidal conditions was critical for this project, because completing the seawall retrofit and repairs at low tide allowed the work to proceed without the need for cofferdams.

GFRP Quality Control and Quality Assurance

MATEENBAR™ Fiberglas™ reinforcing bars, comprising E-CR glass and vinyl ester resin, were used for this project. Laboratory testing demonstrated that the selected reinforcement complied with requirements of ASTM D7957/ D7957M and CSA S807¹² material specifications for solid

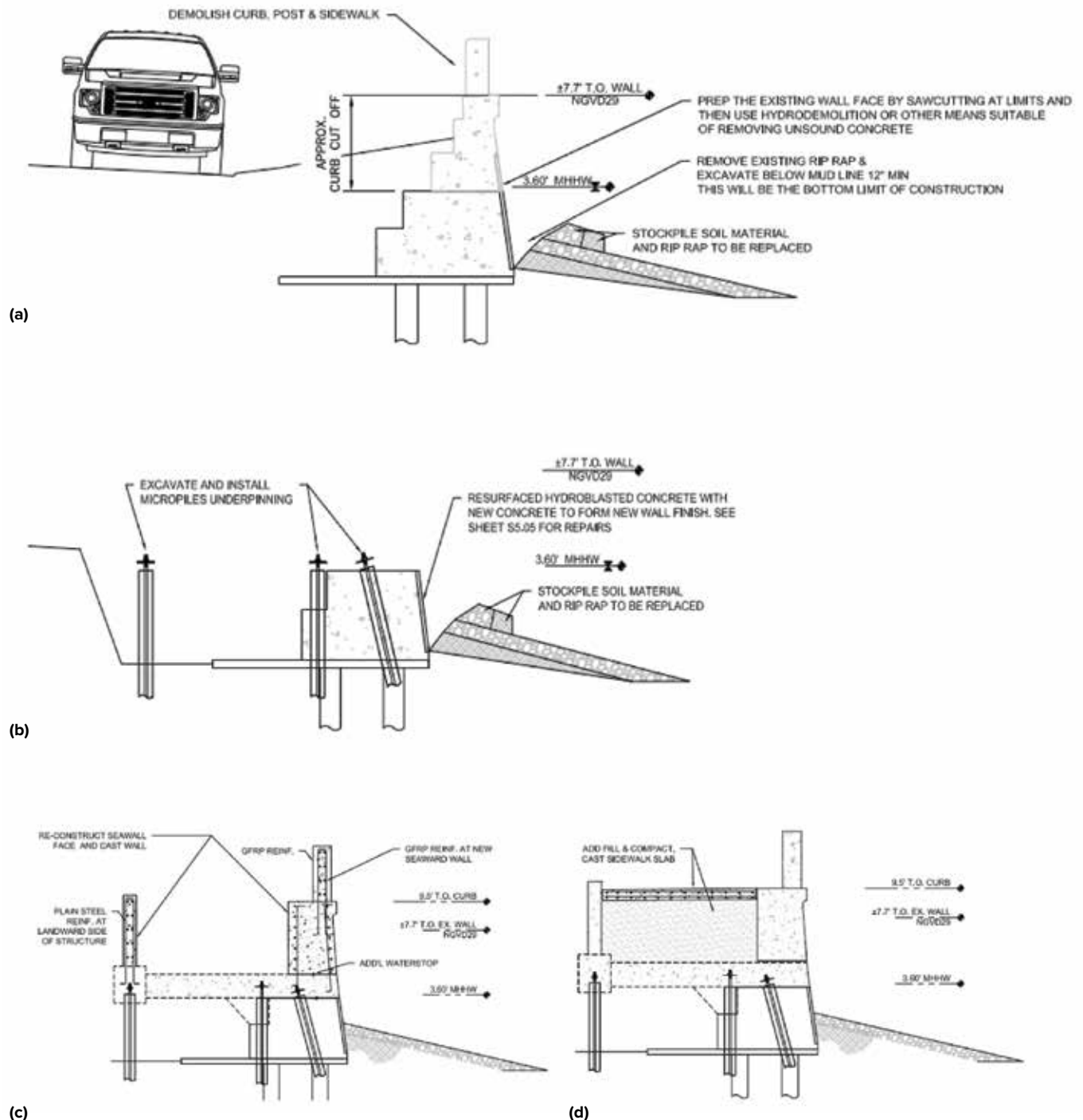


Fig. 4: Construction sequencing for the seawall retrofit: (a) seawall face preparation including saw-cutting and hydrodemolition; (b) micropile installations and seawall resurfacing; (c) reconstruction with GFRP reinforced seaward seawall; and (d) compacted fill placement with sidewalk concrete slab

round GFRP bars for concrete reinforcement (Table 1). Other bar properties included:

- Modulus of elasticity E of 8.7 Mpsi (60.3 GPa);
- Fiber mass content of 80%;
- Moisture absorption in 24 hours of 0.10%;
- Moisture absorption to saturation of 0.50%;
- Mean glass transition temperature (DSC) of 230°F (110°C);
- Mean apparent horizontal shear of 6525 psi (45 MPa); and
- Mean transverse shear strength of 26.1 ksi (180 MPa).

The bond strength of the bars also exceeded requirements of ASTM D7957/D7957M with the bond-dependent coefficient k_b ($1/c_b$) < 1.2.

Material traceability markings per ASTM D7957/D7957M and CSA S807 were clearly visible on the GFRP bars. The bars were covered or stored away from direct sunlight exposure prior to installation as prescribed in ACI 440.5-08. Field forming of large radius curves for the bars was possible.

Constructability Aspects

GFRP reinforcement was used not only in the retrofit and repair areas of the exposed seawall face but also in the thickened mat foundation regions, seawall grade beams, railing column supports, and wall sections. A summary of the GFRP quantities used in the three phases is listed in Table 2.

Table 1:
Straight GFRP bar material properties meeting ASTM D7957/D7957M and CSA S807

Bar size	Diameter, in. (mm)	Area, in. ² (mm ²)	Weight, lb/ft (g/m)	Guaranteed force, kip (kN)	Strength, ksi (MPa)	Strain, %
3	0.375 (10)	0.11 (71)	0.12 (185)	16.0 (71)	145 (1003)	1.70
4	0.500 (13)	0.20 (129)	0.21 (315)	27.9 (124)	140 (962)	1.60
5	0.625 (16)	0.31 (199)	0.32 (476)	41.8 (186)	135 (930)	1.50
6	0.750 (19)	0.44 (284)	0.47 (702)	57.3 (255)	130 (898)	1.50
8	1.000 (25)	0.79 (510)	0.84 (1252)	101.9 (453)	129 (889)	1.50

Table 2:
GFRP bars used on the project exceeded 1M linear ft (305,000 m)

Bar type	Phase I	Phase II	Phase III	Total
Straight GFRP bars, linear ft	45,685	58,995	331,265	435,945
Bent-GFRP bars, linear ft	45,050	51,975	535,970	632,995
Bent-GFRP bars, quantity	10,011	11,550	44,664	66,225
Total length, linear ft	90,735	110,970	867,235	1,068,940

Note: 1 linear ft = 0.3 m

Bent bars were specified to be compliant with the bent bar detailing provided in ASTM D7957/D7957M

Stay Up-to-Date with the ACI Events Calendar!

Whether you're interested in networking with industry leaders, learning a new technology, or wanting to let others know about your upcoming event, be sure to check out the ACI Events Calendar. With just a few clicks, you can connect with an event near you or post your own event to share with the world!



American Concrete Institute
Always advancing

Search your Events Calendar by...



Certifications and Training



Seminars and Webinars



Events

Search, Click, Connect!

Visit the Events Calendar Page at
www.concrete.org/calendar

In Conclusion

Approximately 300 years ago, the Low and High Battery Seawall was constructed in the City of Charleston, SC, to gain valuable land from what was considered unusable, inundated land that was predominantly submerged and subject to frequent flooding. The materials of choice to extend the land surface toward the sea and construct the initial seawall included soil, mud, stone, rock, and more recently, steel reinforcing bars and concrete. The existing Battery Seawalls have outlasted many significant storm events and similarly, were subjected to many repairs over the years. These repairs include the latest project shown in Fig. 5. The photograph in Fig. 5(h) presents the completed face of the seawall at low tidal conditions.

As sea levels rise due to climate change, it will become essential and necessary to increase the heights of coastal fortifications to minimize flooding. This may often involve the use of innovative materials such as GFRP reinforcement. By using corrosion-resistant materials, the expected service life of coastal structures can be extended with a significant reduction of maintenance and repair costs.

Seawall projects incorporating GFRP reinforcement, as in the South Carolina's Battery Wall can provide an effective

solution for constructability, serviceability, and corrosion prevention. As material specifications, design codes, and construction specifications for GFRP materials evolve, this technology can be expected to find wider acceptance and become a valuable tool to address sustainability and resilience of structures.

Acknowledgments

The authors would like to thank the City of Charleston, SC, for the opportunity to conduct this unique GFRP seawall project, Owens Corning Infrastructure Solutions, LLC (MATEENBAR™ Fiberglass™ reinforcing bars), and the National Science Foundation (NSF), under Grant Number 1916342, for their financial support of the lead author.

References

1. "2015 International Building Code (IBC)," International Code Council, Inc., Washington, DC, 2014, 700 pp.
2. ASCE/SEI 7-10, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010, 209 pp.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.

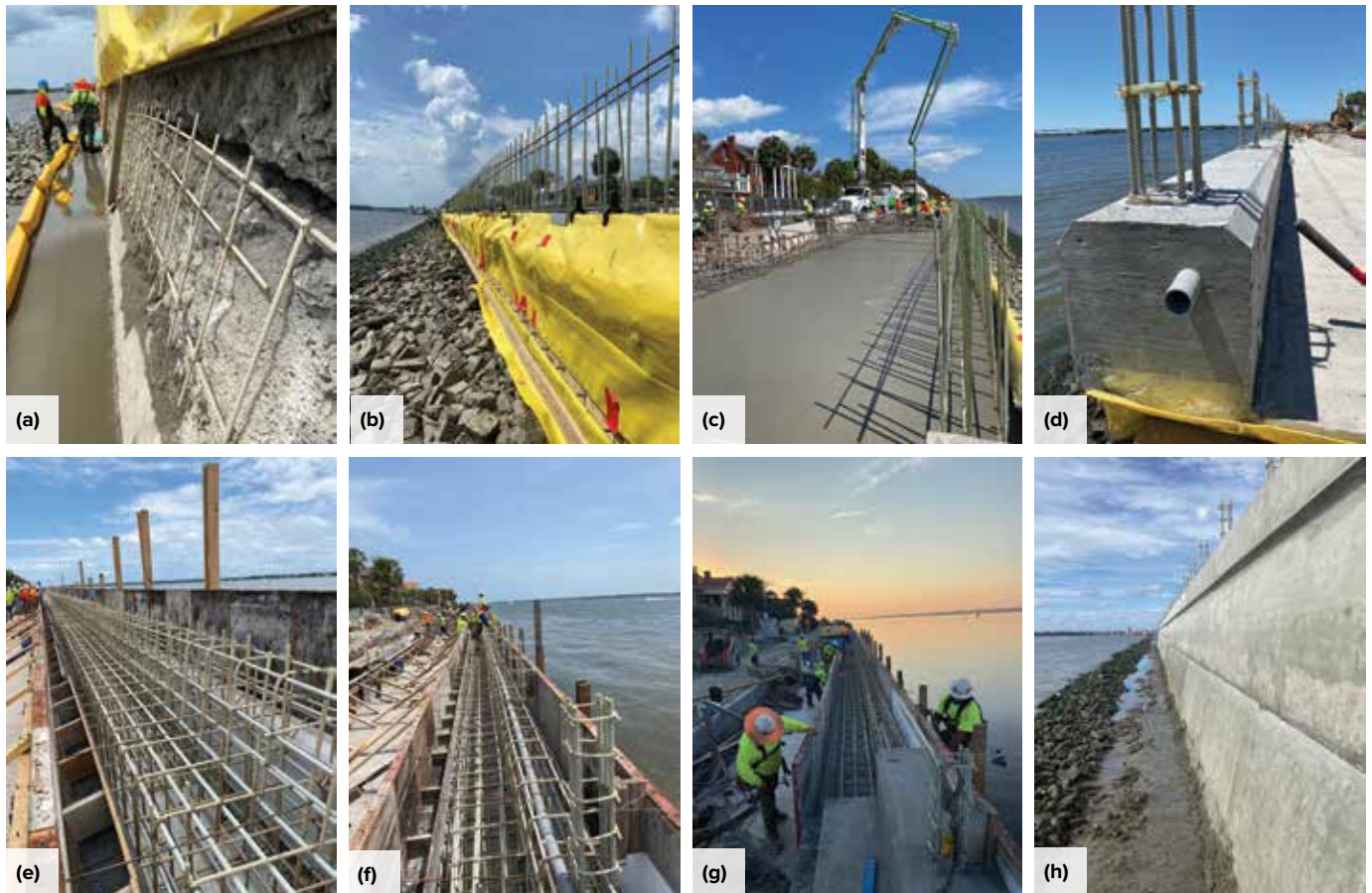


Fig. 5: The battery wall during the main phases of construction: (a) hydrodemolition and repair; (b) protective visqueen barrier; (c) concrete seaside promenade placement; (d) seawall cast-cap; (e) and (f) GFRP grade-type beam; (g) GFRP with and without placed concrete; and (h) finished seawall face at low-tide conditions

4. ACI Committee 301, "Specifications for Structural Concrete (ACI 301-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 77 pp.

5. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 83 pp.

6. ASTM D7957/D7957M-17, "Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 5 pp.

7. ACI Committee 440, "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars (ACI 440.5-08)," Farmington Hills, MI, 2008, 6 pp.

8. ASCE/SEI 24-05, "Flood Resistant Design and Construction," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2005, 80 pp.

9. ASTM D1557-07, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, 13 pp.

10. EM 385-1-1, "Safety and Health Requirements Manual," U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2014, 930 pp.

11. API Specification 5CT, "Casing and Tubing," tenth edition, American Petroleum Institute, Englewood, CO, 2021, 308 pp.

12. CSA S807, "Specification for Fibre-Reinforced Polymers," CSA Group, Canada, 2019, 67 pp.

Selected for reader interest by the editors.



ACI Member **Christian C. Steputat** is a Post-Doctoral Scholar and Lecturer in structural, geotechnical, and materials engineering in the Department of Civil and Architectural Engineering at the University of Miami. He is a licensed professional engineer with expertise in structural, geotechnical, construction, and materials engineering; threshold special inspections; and structural

and materials forensics. His interests include advanced construction materials and their structural performance with field applications, composite materials comprised of carbon, glass, and basalt fibers, and full scale 3-D concrete printing.



Jim O'Connor is a Senior Vice President with Johnson Mirmiran and Thompson. He is serving as a Senior Design Manager for complex projects. Projects include the I-526 Beltway, James Island Expressway, Isle of Palms Connector, Volvo Interchange, and the Port Access Road. He is the design manager for the Low Battery Reconstruction Project in Charleston, SC. He is a licensed

professional engineer and a Chartered Engineer in the Republic of Ireland. He received his BS in civil engineering from The Citadel, the Military College of South Carolina, and his structural focused Engineering Master's Degree from Rutgers University.



Matt Arrants is the Vice President of Gulf Stream Construction, based in Charleston, SC. He provides strategic leadership, direction, management, and vision necessary during construction, to ensure the successful delivery of especially large, complex projects that have critical schedule and time constraints.

Arrants has led a broad spectrum of unique projects that include residential, commercial, industrial, Department of Transportation, and Port projects. He received his BS in biosystems engineering from Clemson University. He is also a licensed professional engineer and LEED AP accredited.



ACI Member **Josh Beech** is the Owner and President of Beech Contractors LLC based in Charleston, SC. His construction experience spans more than 20 years in medical, industrial, power, civil, military, private, and institutional sector projects throughout the southeastern United States. Beech is involved and specializes in design-build foundation projects and

performs value engineering of foundations and structural concrete systems, to assure efficiency of use. He is actively involved in the Low Battery Reconstruction Project in Charleston, SC. Beech is also a member of the Charleston Subcontractors Association.



Antonio Nanni, FACI, is an Inaugural Senior Scholar, Professor, and Chair of the Department of Civil and Architectural Engineering at the University of Miami. He is a member of numerous ACI committees, including ACI Committee 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement. He has received several awards, including the 2014 IIFC Medal from the

International Institute for FRP in Construction and the 2012 ASCE Henry L. Michel Award for Industry Advancement of Research.

Diques de contención de GFRP-RC como medio de fortificación costera y extensión de la vida útil

por Christian C. Steputat, Jim O'Connor, Matt Arrants, Josh Beech, y Antonio Nanni

Construido en 1670, el Dique de la Low y High Battery en Charleston, SC, EE.UU., es conocido como un emblemático dique defensivo con un paseo marítimo creado más recientemente. Este pintoresco paseo marítimo se completó inicialmente en 1838 a lo largo de la región inmediata del dique con la colocación estratégica de rocas, pesados peñascos y otros materiales de construcción elegidos. El paseo marítimo se extiende a lo largo de la orilla del río Cooper y está situado geográficamente al este de la península y se ha convertido en un destino muy frecuentado por los residentes locales y los turistas, debido a sus vistas panorámicas. El nombre del dique de la batería tiene su origen en una batería de artillería de defensa costera de la guerra civil que estaba situada en este lugar. Históricamente, este emblemático dique defensivo con paseo marítimo se extiende desde el número 40 de la calle East Bay hasta el bulevar Murray y la calle King. Además, la batería es famosa por sus casas de estilo arquitectónico neoclásico del siglo XIX en el Sur de Estados Unidos.

El diseño y la reparación del dique se llevaron a cabo con la Fase II prácticamente terminada en abril de 2022. La Fase I se completó a principios de 2021, mientras que la Fase III, que consiste en otros 1800 pies (550 m) de dique de contención desde la calle Limehouse hasta la calle King, fue aprobada por el Consejo de la Ciudad de Charleston en marzo de 2022 y está previsto que comience inmediatamente después de que se complete la Fase II. El reacondicionamiento estructural del

Dique de Low Battery existente incluía la ampliación de la altura del dique, el refuerzo del dique mediante el apuntalamiento con micropilotes, la construcción de un nuevo capitel de concreto ligado estructuralmente al dique existente, la reposición de los materiales de relleno del suelo erosionados y lavados, la reconstrucción de la cara del dique hacia el mar y el apoyo estructural de un nuevo paseo marítimo sobre los capiteles recién instalados para evitar futuros asentamientos y condiciones de inclinación. El sistema estructural incluye una losa de concreto unidireccional soportada por pares de micropilotes con una separación máxima de diseño de 9.0 pies (2.7 m) en el centro. El dique se apoya en una viga de concreto reforzado (RC) de varios tramos con el elemento del dique inmediatamente por encima. La elevación del nuevo dique se situó a la misma altura que la del dique de High Battery para mitigar las inundaciones y la subida del nivel del mar, y el nuevo paseo marítimo cumple con la Ley de Estadounidenses con Discapacidad (ADA, por sus siglas en inglés).

Durante la fase de planificación de este proyecto se realizó un análisis de la relación costo-beneficio y se consideraron, antes de finalizar el diseño, el acero galvanizado, el acero inoxidable y el polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) como alternativas de refuerzo del concreto. Basándose en la evaluación, se seleccionó el GFRP por su resistencia a la corrosión y su rendimiento estético (es decir, la ausencia de manchas en las

Especificaciones del proyecto y disposiciones del Código de Diseño

Se aplicó un criterio de velocidad del viento de 147 mph (237 km/h), con una ráfaga de 3 segundos para la ubicación regional, donde se aplica la Categoría de Riesgo II, y se utilizó una carga de parapeto o revestimiento de 135 psf (6.5 kN/m²). Se ha considerado un método de análisis estático para el análisis sísmico de estructuras, que incluye un Grupo de Uso Sísmico II, un sistema de resistencia sísmica de estructuras no edificadas y una metodología de fuerza lateral equivalente (ELF, por sus siglas en inglés). Una aceleración espectral de respuesta amortiguada del 5% en periodos cortos de 0.2 segundos o S_{DS} de 0.658, una aceleración espectral de diseño amortiguada del 5% en un periodo de 1.0 segundos o S_{D1} de 0.605, un esfuerzo cortante sísmico base $V = 0.197w$, donde w es el peso sísmico efectivo, un factor de importancia I de 1,0 y una categoría de diseño sísmico (SDC) D completaron los criterios de diseño para este proyecto de dique.

Subestructura de micropilote

[illegible]

Las disposiciones geotécnicas incluían la adición de material de relleno compactado libre de materiales orgánicos y otros materiales nocivos que afectan la compactabilidad. El material de relleno colocado estaba compuesto por un máximo de 20% de finos y tenía una densidad seca máxima, según la prueba Proctor modificada (ASTM D1579) de al menos 100 pcf (1602 kg/m³). El límite líquido del relleno de suelo se registró como menor de 30, y se anotó un índice de plasticidad inferior a 15. El material de relleno del suelo se colocó en elevaciones no superiores a 254 mm (10 pulg.) y se compactó hasta alcanzar al menos el 95% de la densidad seca máxima Proctor modificada.

La estructura está soportada por micropilotes perforados con una elevación en la punta del pilote requerida de EL.-95,00 a una distancia horizontal máxima de 9.0 pies, y una elevación EL.-81,00 a una distancia horizontal máxima de 7.5 pies. Los micropilotes tienen una longitud de 6.1 m (20 pies) y están revestidos en su parte superior con una tubería de acero de grado N80 de 178 mm (7 pulgadas) de diámetro según API 5CT¹¹, que es un tubo sin soldadura

de acero al carbono de alta resistencia y dureza. La longitud restante de 152 mm (6 pulg.) de diámetro se desencajó hasta la elevación de la punta requerida e indicada. Los micropilotes suelen incluir una barra hueca de 76 (3 pulg.) de diámetro. Se utilizó una lechada de concreto con una resistencia a la compresión a los 28 días de 4000 psi (28 MPa) para los micropilotes totalmente inyectados.

Fase I

En la Fase I del proyecto se utilizaron aproximadamente 27.700 m (90,700 pies lineales) de barras de GFRP, tanto rectas como dobladas. En este caso, la resistencia a la corrosión y los beneficios previstos a largo plazo fueron una gran atracción durante el proceso de selección del material, y en última instancia dieron lugar a la aplicación del GFRP en campo. Además, la adaptación de las barras de GFRP en segmentos radiales, como la sección curvilínea de la Fase I (Fig. 2), fue demostrada y validada desde el punto de vista de la constructibilidad. Una de las ventajas de las barras de GFRP es que pueden ser prefabricadas con las formas y especificaciones deseadas.

Fase II

La construcción de la Fase II se extendió desde la finalización de la Fase I hasta justo antes de la calle Limehouse, lo que supone 335 m (1100 pies lineales) adicionales a lo largo de la fachada del océano. La Fase II (Fig. 3) incluía la reparación del dique de la Batería Baja, que se inició en febrero de 2021 y se completó en abril de 2022, momento en el que se inició la Fase III, la última fase de este proyecto prevista para ser completada en los 18 meses siguientes a su inicio.



Figura. 2: Fase I del proyecto de dique de concreto:
(a) colocación del concreto de la sección curva; y
(b) sección curva del dique de GFRP terminada



Figura. 3: Fase II del proyecto de dique de concreto:
(a) una sección recta de colocación de concreto; y
(b) el concreto colocado y el refuerzo GFRP instalado en la sección recta del dique

A finales de diciembre de 2021, se colocó el tramo final de concreto que conecta la Fase I a la Fase II, con la tubería de drenaje incorporada. Esta sección incluía el paseo marítimo, el nuevo muro elevado hacia el mar, una sección que se integra en el frente del dique y el muro de contención, y la losa de base de tipo tapete. El refuerzo de concreto en estos elementos consistió en barras de GFRP. Se aprovecharon las condiciones de marea

baja para llevar a cabo la colocación del concreto sin necesidad de realizar un desagüe adicional. Con la Fase II prácticamente terminada en abril de 2022, el uso exitoso del refuerzo de GFRP para las Fases I y II de este proyecto se hizo realidad y fue fundamental para la selección de varillas de GFRP para la Fase III.

Etapas de construcción

Algunas de las ventajas de la hidrodemolición son la limpieza sin daños de las varillas de acero de refuerzo, la eliminación del polvo y la reducción drástica de los niveles de ruido. En el proyecto se utilizó la hidrodemolición para eliminar el concreto deteriorado y exponer el concreto sano con un perfil de superficie rugosa, que se prefirió para adherir el recubrimiento de concreto lanzado (la secuencia de construcción se muestra en la Fig. 4). La mezcla de concreto lanzado consistente en cemento, arena y agua se aplicó en capas y en marea baja, lo que dio como resultado una capa dura y densa de concreto lanzado.

La consideración de las condiciones de las mareas fue fundamental para este proyecto, ya que la finalización de la adaptación del dique y las reparaciones durante la marea baja permitieron realizar los trabajos sin necesidad de usar ataguías.

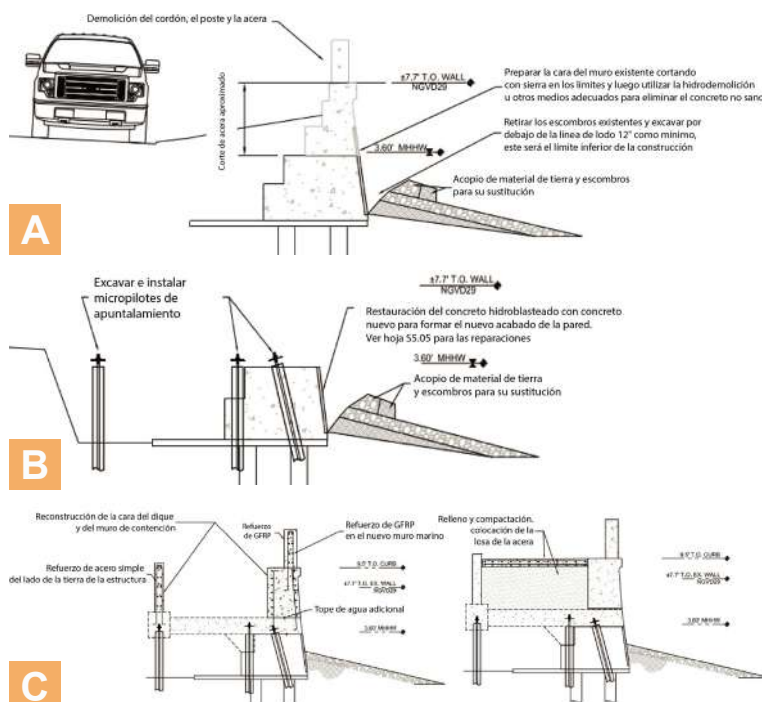


Figura. 4: Secuencia de construcción de la rehabilitación del dique:
 (a) preparación del frente del dique, incluyendo el corte con sierra y la hidrodemolición;
 (b) instalación de micropilotes y repavimentación del dique;
 (c) reconstrucción con refuerzo de GFRP desde el dique; y
 (d) colocación de relleno compactado con losa de concreto en la acera

Control de calidad y garantía de calidad del GFRP

Para este proyecto se utilizaron varillas de refuerzo MATEENBAR™ Fiberglass™, compuestas por vidrio E-CR y resina de éster de vinilo. Las pruebas de laboratorio demostraron que el refuerzo seleccionado cumplía con los requisitos de las especificaciones de materiales ASTM D7957/ D7957M y CSA S807¹² para varillas redondas sólidas de GFRP para el refuerzo del concreto (Tabla 1). Otras propiedades de las barras incluían:

- Módulo de elasticidad E de 8.7 Mpsi (60.3 GPa);
- Contenido de fibra en masa del 80%;
- Absorción de humedad a las 24 horas del 0.10%;
- Absorción de humedad hasta la saturación del 0.50%;
- Temperatura media de transición vítrea (DSC) de 110°C (230°F);
- Resistencia media al cortante horizontal aparente de 6525 psi (45 MPa); y
- Resistencia media al cortante transversal de 26.1 ksi (180 MPa).

La resistencia a la adherencia de las varillas también superó los requisitos de ASTM D7957/D7957M con el coeficiente dependiente de la adherencia k_b ($1/c_b$) < 1.2.

Las marcas de trazabilidad del material según ASTM D7957/D7957M y CSA S807 eran claramente visibles en las varillas de GFRP. Las varillas se cubrieron o se almacenaron lejos de la exposición directa a la luz solar antes de su instalación, tal como se indica en ACI 440.5-08. Se pudieron moldear en el campo las curvas de gran radio de las varillas.

Aspectos de construcción

El refuerzo de GFRP se utilizó no sólo en las áreas de reacondicionamiento y reparación de la cara expuesta del dique, sino también en las regiones de los cimientos con esteras gruesas, en las vigas de nivel del dique, en los soportes de las columnas de las barandillas y en las secciones de los muros. En la tabla 2 se resumen las cantidades de PRFV utilizadas en las tres fases.

Tabla 1: Las propiedades de los materiales de las varillas rectas de GFRP cumplen con ASTM D7957/D7957M y CSA S807

Tamaño de la varilla	Diámetro, pulg. (mm)	Area, pulg. ² (mm ²)	Peso, lb/pie (g/m)	Fuerza de garantía, kip (kN)	Resistencia, ksi (MPa)	Deformación unitaria, %
3	0.375 (10)	0.11 (71)	0.12 (185)	16.0 (71)	145 (1003)	1.70
4	0.500 (13)	0.20 (129)	0.21 (315)	27.9 (124)	140 (962)	1.60
5	0.625 (16)	0.31 (199)	0.32 (476)	41.8 (186)	135 (930)	1.50
6	0.750 (19)	0.44 (284)	0.47 (702)	57.3 (255)	130 (898)	1.50
8	1.000 (25)	0.79 (510)	0.84 (1252)	101.9 (453)	129 (889)	1.50

Tabla 2: Las barras de PRFV utilizadas en el proyecto superaron el millón de pies lineales (305,000 m)

Tipo de varilla	Fase I	Fase II	Fase III	Total
Varillas rectas de GFRP, pies lineales	45,685	58,995	331,265	435,945
Varillas GFRP dobladas, pies lineales	45,050	51,975	535,970	632,995
Varillas GFRP dobladas, cantidad	10,011	11,550	44,664	66,225
Extensión total, pies lineales	90,735	110,970	867,235	1,068,940

Nota: 1 pie lineal = 0.3 m

Las varillas dobladas se especificaron para cumplir con el detallado de las varillas dobladas proporcionado en ASTM D7957/D7957M

En conclusión

Hace aproximadamente 300 años, se construyó el dique de la Low y High Battery en la ciudad de Charleston, SC, para obtener un terreno valioso de lo que se consideraba inutilizable, que estaba predominantemente sumergido y sujeto a frecuentes inundaciones. Los materiales elegidos para extender la superficie del terreno hacia el mar y construir el dique inicial incluían tierra, barro, piedra, roca y, más recientemente, varillas de acero de refuerzo y concreto. Los actuales diques de la batería han resistido a muchas tormentas importantes y, del mismo modo, han sido objeto de muchas reparaciones a lo largo de los años. Estas reparaciones incluyen el último proyecto mostrado en la Fig. 5. La fotografía de la Fig. 5(h) presenta la cara completa del dique en condiciones de marea baja.

A medida que el nivel del mar suba debido al cambio climático, será esencial y necesario aumentar la altura de las fortificaciones costeras para minimizar las inundaciones. A menudo, esto puede implicar el uso de materiales innovadores, como el refuerzo de GFRP. El uso de materiales resistentes a la corrosión permite prolongar la vida útil prevista de las estructuras costeras con una importante reducción de los gastos de mantenimiento y reparación. Los proyectos de diques que incorporan refuerzos de GFRP, como en el Muro de la Batería de Carolina del Sur, pueden proporcionar una solución efectiva para la construcción, la funcionalidad y la prevención de la corrosión. A medida que evolucionen las especificaciones de los materiales, los códigos de diseño y las especificaciones de construcción de los materiales de GFRP, cabe esperar que esta tecnología encuentre una mayor aceptación y se convierta en una valiosa herramienta para abordar la sostenibilidad y la resiliencia de las estructuras.

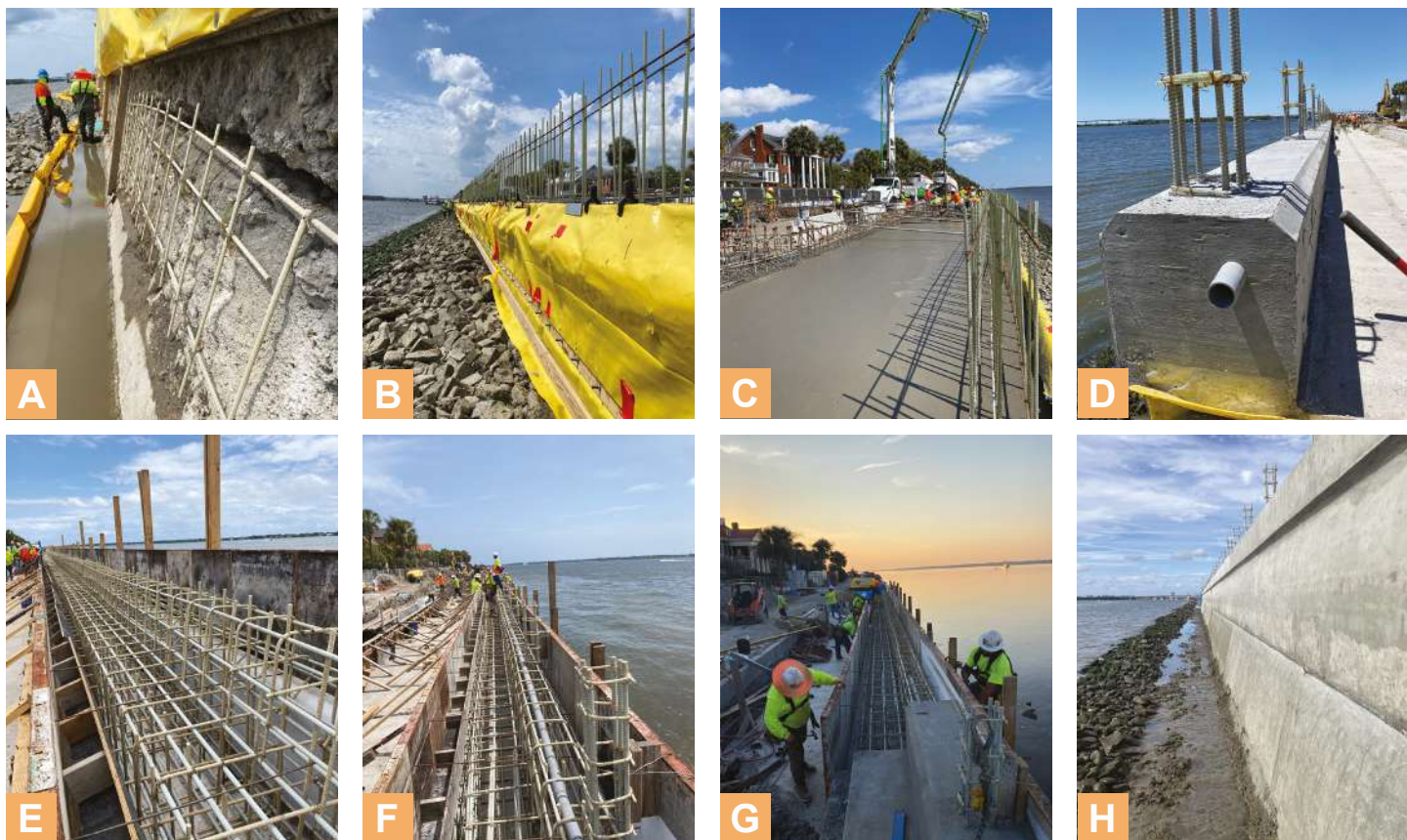


Figura 5: El muro de la batería durante las principales fases de construcción:
 (a) hidrodemolición y reparación; (b) barrera protectora de visqueen; (c) colocación del paseo marítimo de concreto; (d) tapa de fundición del muro de mar; (e) y (f) viga tipo GFRP; (g) GFRP con y sin concreto colocado; y (h) cara del muro de mar terminada en condiciones de marea baja.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la ciudad de Charleston, SC, por la oportunidad de llevar a cabo este excepcional proyecto de dique de contención con GFRP, a Owens Corning Infrastructure Solutions, LLC (barras de refuerzo MATEENBAR™ Fiberglas™), y a la National Science Foundation (NSF), bajo el número de subvención 1916342, por su apoyo financiero al autor principal.

Referencias

1. "2015 International Building Code (IBC)," International Code Council, Inc., Washington, DC, 2014, 700 pp.
2. ASCE/SEI 7-10, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010, 209 pp.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.
4. ACI Committee 301, "Specifications for Structural Concrete (ACI 301-10)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 77 pp.
5. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 83 pp.
6. ASTM D7957/D7957M-17, "Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 5 pp.
7. ACI Committee 440, "Specification for Construction with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars (ACI 440.5-08)," Farmington Hills, MI, 2008, 6 pp.
8. ASCE/SEI 24-05, "Flood Resistant Design and Construction," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2005, 80 pp.
9. ASTM D1557-07, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, 13 pp.
10. EM 385-1-1, "Safety and Health Requirements Manual," U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 2014, 930 pp.
11. API Specification 5CT, "Casing and Tubing," tenth edition, American Petroleum Institute, Englewood, CO, 2021, 308 pp.
12. CSA S807, "Specification for Fibre-Reinforced Polymers," CSA Group, Canada, 2019, 67 pp.



Christian C. Steputat, miembro de la ACI, es becario postdoctoral y profesor de ingeniería estructural, geotécnica y de materiales en el Departamento de Ingeniería Civil y Arquitectónica de la Universidad de Miami. Es un ingeniero profesional autorizado con experiencia en ingeniería estructural, geotécnica, de la construcción y de los materiales; inspecciones especiales de umbrales; y análisis forense de estructuras y materiales. Entre sus intereses se encuentran los materiales de construcción avanzados y su rendimiento estructural con aplicaciones de campo, los materiales compuestos de fibras de carbono, vidrio y basalto, y la impresión de concreto a escala real en 3D.



Matt Arrants, es el vicepresidente de Gulf Stream Construction, con sede en Charleston, SC. Proporciona el liderazgo estratégico, la dirección, la gestión y la visión necesarias durante la construcción, para garantizar la entrega exitosa de proyectos especialmente grandes y complejos que tienen limitaciones críticas de calendario y tiempo. Arrants ha dirigido un amplio espectro de proyectos únicos que incluyen proyectos residenciales, comerciales, industriales del Departamento de Transporte y Portuarios. Se licenció en ingeniería de biosistemas por la Universidad de Clemson. También es un ingeniero profesional licenciado y acreditado LEED AP.



Jim O'Connor, es vicepresidente senior de Johnson Mirmiran y Thompson. Se desempeña como Gerente de Diseño Senior para proyectos complejos. Los proyectos incluyen la I-526 Beltway, James Island Expressway, Isle of Palms Connector, Volvo Interchange y la Port Access Road. Es el director de diseño del proyecto de reconstrucción de Low Battery en Charleston, SC. Es un ingeniero profesional autorizado y un ingeniero colegiado en la República de Irlanda. Se licenció en ingeniería civil por la Citadel, el Colegio Militar de Carolina del Sur, y obtuvo un máster en ingeniería estructural por la Universidad de Rutgers.



Josh Beech, miembro de ACI, es el propietario y presidente de Beech Contractors LLC con sede en Charleston, SC. Su experiencia en la construcción abarca más de 20 años en proyectos del sector médico, industrial, energético, civil, militar, privado e institucional en todo el sureste de Estados Unidos. Beech participa y se especializa en proyectos de diseño y construcción de cimientos y realiza ingeniería de valor de cimientos y sistemas estructurales de concreto, para asegurar la eficiencia de su uso. Participa activamente en el proyecto de reconstrucción de Low Battery en Charleston, SC. Beech también es miembro de la Asociación de Subcontratistas de Charleston.



Antonio Nanni, FACI, es el primer Becario Senior, Profesor y Director del Departamento de Ingeniería Civil y Arquitectónica de la Universidad de Miami. Es miembro de numerosos comités del ACI, incluido el Comité 440 del ACI, Refuerzo de polímeros reforzados con fibra. Ha recibido varios premios, entre ellos la Medalla IIFC 2014 del Instituto Internacional de FRP en la Construcción y el Premio Henry L. Michel 2012 de ASCE por Avances de la Industria en la Investigación.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noreste

Título: Diques de contención de GFRP-RC como medio de fortificación costera y extensión de la vida útil



Traductor:
Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez



Revisor Técnico:
Dr. José Abelardo Valdez Aguilar