

Guidance Emerges for FRP Retrofits of Concrete Diaphragms

ACI Foundation-funded research project has filled knowledge gaps in design practices

by Victoria K. Sicaras, on behalf of the ACI Foundation

When it comes to rehabilitating older reinforced concrete buildings, engineers often encounter a lack of consensus around design recommendations for strengthening deficient force-resisting systems. Specifically, the limited data regarding the use of fiber-reinforced polymer (FRP) to strengthen concrete floor diaphragms has created uncertainty about which approaches are appropriate. New research funded by the ACI Foundation fills this critical knowledge gap.

The 2-year research project, “Development of FRP Retrofit Guidelines for Deficient Reinforced Concrete Horizontal Lateral Force Resisting Systems,”¹ developed and tested retrofit techniques for diaphragms using externally bonded FRP. The resulting design recommendations are expected to be included in the next revision of ACI PRC-440.2-23, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.”² Currently, FRP retrofits for diaphragms are outside the scope of ACI PRC-440.2 and other FRP-related design documents.

Key findings from the research are being translated into guidance on how to establish the effective FRP design strain and the nominal shear strength contribution of the FRP. The recommendations also address the use of intermediate and end FRP anchors, limitations on the clear spacing between sheets, and other factors pertinent to retrofit design.

“The developed design guidelines will enable the confident reuse and repurposing of existing buildings to meet evolving occupant and societal needs—all while ensuring their structural resilience and safety,” said ACI Foundation Executive Director Ann Masek. “The ACI Foundation was pleased to support this research, which promises far-reaching impacts.”

The Need for Experimental Testing

Externally bonded FRP as a retrofit technique involves using epoxy to adhere sheets of glass or carbon fabric to the

concrete surface. These sheets provide additional tension reinforcement to the structure, which improves strength and performance. Strengthening reinforced concrete diaphragms may be necessary to:

- Enhance seismic performance;
- Address inadequate strength or stiffness;
- Provide missing or incomplete load paths;
- Improve inadequate shear transfer/connection capacity; and
- Accommodate changes in the use and occupancy of the structure.

FRP is a proven construction technology that is widely used for mitigating earthquake vulnerabilities and corrosion-related issues in slabs, moment frames, and shear walls. Yet, there is not enough information on the use of FRP to address horizontal lateral force-resisting system (hLFRS) deficiencies related to inadequate chords, collectors, and in-plane shear capacity to be included in design documents.

“Engineers and manufacturers are doing a fair amount of work retrofitting diaphragms with FRP, but there have been virtually no tests and very little numerical data—or even code provisions—informing them how to best apply externally bonded FRP to diaphragms,” explained Eric Jacques, Principal Investigator of the research project.

Consequently, designers must rely on experimental tests of FRP-strengthened shear walls to justify strengthening applications for an hLFRS. “But without documented knowledge on how a concrete floor diaphragm will behave, and its stress state at various sizes and scales, designs end up being very conservative,” Jacques said. An overly conservative approach can lead to costly and wasteful overdesigns. On the other hand, a design that is not conservative enough can lead to risk, liability, and the highest cost—loss of life.

“Proven methods with the data to back them up lowers risk and raises confidence in design decisions,” Jacques said.

Project Details

Name: Development of FRP Retrofit Guidelines for Deficient Reinforced Concrete Horizontal Lateral Force Resisting Systems.

Principal Investigator: Eric Jacques, Assistant Professor of civil and environmental engineering, Virginia Tech.

Co-Principal Investigator: Matthew R. Eatherton, Professor of civil and environmental engineering, Virginia Tech.

Graduate Research Assistants: Pratiksha Dhakal and Hunter G. Hutton.

ACI Technical Committee Endorsement: 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement.

Funder: ACI Foundation.

Industry Partners: Simpson Strong-Tie, Structural Technologies, Fyfe, GeoTree Solutions; in-kind funding partner: Banker Steel.

Advisory Panel: Tarek Alkhrdaji, Scott Arnold, Aniket Borwankar, Enrique del Rey Castillo, Kent Harries, John Hepfinger, John Hooper, and Ravi Kaniatkar.

Specimen Construction Assistance: Garrett Blankenship, Brett Farmer, and David Mokarem.

Test Assistance: Ray Bodnar, Thomas Bracy, Quinton Moyer, and Grace Whitesell.

About the Research: The objective was to develop design guidelines for strengthening deficient horizontal lateral force-resisting systems (hLFRS) in older reinforced concrete buildings using externally bonded FRP design. To do this, the researchers developed retrofit design approaches that included both conventional and innovative solutions. They conducted a series of large-scale experiments to investigate the behavior, optimal arrangement, and anchorage of FRP in strengthening deficient reinforced concrete diaphragm zones carrying primarily shear.

The test results were used to develop design recommendations for shear strengthening existing concrete diaphragms using externally bonded FRP. These recommendations included guidance on how to establish the effective FRP design strain and the nominal shear strength contribution of the FRP. They also address the use of intermediate and end FRP anchors, limitations on the clear spacing between sheets, and other factors pertinent to retrofit design.

The project contributes to increased infrastructure sustainability by:

- Facilitating reuse and reconfiguration of existing buildings to satisfy changing occupant needs.
- Mitigating structural deficiencies to produce resilient behavior during natural hazards.

The study also revealed the need for more accurate design recommendations, as existing ones tended to underestimate the actual behavior observed during experiments.

Getting Funded

Jacques is an Assistant Professor in the Charles E. Via, Jr. Department of Civil and Environmental Engineering at Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), Blacksburg, VA, USA. His research activities are focused on the analysis, design, and retrofit of reinforced concrete structures as well as blast protection and energetic materials. Matthew Eatherton, a Professor and faculty Fellow in the same department, serves as the project's co-Principal Investigator.

Through discussions with an FRP supplier at an ACI Concrete Convention, Jacques realized the scarcity of relevant data. He and Eatherton began reaching out to manufacturers, engineering firms, and other industry professionals to gauge interest in supporting a program to develop experimentally validated design methods. They found financial and in-kind funding partners in Simpson Strong-Tie, Structural Technologies, Fyfe Co., GeoTree Solutions, and Banker Steel.

“Our industry partners were more than just a funding source,” Jacques said. “They contributed their expertise and technical support, as well. Plus, we had an advisory panel that included academics and engineering consultants. Their feedback and advice were essential to ensuring the relevance and impact of our work in meeting industry needs.”

Jacques and Eatherton also found a champion for the project in the ACI Foundation's Concrete Research Council (CRC). The ACI Foundation's mission is to make strategic investments in ideas, research, and people to create the future of the concrete industry. As part of that mission, CRC offers an annual request for proposal (RFP) program that awards funding to several concrete research projects.

The open RFP program allows researchers to submit unsolicited research projects. The funding is awarded based on relevancy and potential impact of the research, overall proposal quality, researcher capability, supplemental support for the project (that is, collaboration with other funders and organizations), and ACI Technical Committee engagement. Jacques and Eatherton's project had commitments from industry partners and an endorsement by ACI Committee 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement. Their proposal was selected to receive funding in 2021.

As part of the program, the ACI Foundation strives to award at least two grants annually to projects led by an associate or assistant professor, like Jacques, or other type of early career faculty to support their work and research goals. The grants limit funding of indirect costs to 15% to ensure the funds are directed to the people (in the form of stipends and salaries) and activities involved in a project and not the organization's overhead. This gives graduate students an opportunity to participate in important concrete research to help them develop and apply critical technical and professional development skills. The research opportunity on this project was timely for one of the research graduate students involved: Hunter Hutton, the 2022-2023 ACI Foundation Robert F. Mast Memorial Fellowship awardee (refer to sidebar on p. 60).



Members of the Virginia Tech research team include (from left): Principal Investigator Eric Jacques, Co-Principal Investigator Matthew Eatherton, and Graduate Research Assistants Pratiksha Dhakal and Hunter Hutton



Large-scale tests demonstrated that externally bonded FRP retrofitting significantly improved both the shear strength and stiffness of deficient reinforced concrete diaphragms

“Being awarded the funding and having an ACI Foundation fellowship awardee on the project was a happy coincidence, and Hunter played a huge role in the research. We are grateful to the ACI Foundation and the ACI members who recognized the importance of this project—the need for it—and worked with us to make it a reality,” Jacques said.

Laying the Groundwork

“Investigating the behavior of diaphragms, both with and without FRP strengthening, poses significant challenges,” Jacques said. “To accurately understand their behavior, they need to be tested at scales approaching their real-world application.”

The researchers kicked off the project by conducting a workshop with their industry partners and advisory panel to better understand the state of the practice and the knowledge gaps to address. Throughout the project, the team met regularly with the advisory panel to share updates and receive guidance and recommendations.

Fortified by insights from the workshop, the team created large-scale specimens and a total of eight tests to investigate the behavior, optimal arrangement, and anchorage of FRP in strengthening deficient reinforced concrete diaphragm zones carrying primarily shear. The tests included a baseline unretrofitted concrete specimen and five retrofitted specimens with different configurations of externally bonded FRP. Each retrofitted specimen was designed to maintain a similar FRP axial stiffness while varying the FRP retrofit parameters.

Jacques credited graduate research students Pratiksha Dhakal and Hunter Hutton for executing the work that was conceived. While Dhakal, a doctoral student, focused on numerical modeling, Hutton performed laboratory testing.

As the lead student on the ACI Foundation-funded project, Hutton conducted a comprehensive literature review, designed and constructed the specimens, and analyzed the results of the

retrofitted tests. The test setup featured a unique configuration involving two specimens joined by a reusable steel frame, where one specimen was integrated into the setup for the other. The arrangement allowed for the simultaneous construction and rapid testing of two large-scale specimens, significantly accelerating the pace of the research in an otherwise slow process that relies on placed concrete to harden.

“He really laid the groundwork for how these tests should be conducted,” Jacques said.

Meanwhile, Dhakal carried out a finite element analysis of the experimental configuration to validate Hutton’s design calculations and predict the shear behavior of the strengthened diaphragms. Both students analyzed the results and applied equations and theory to make sense of it all while diligently documenting their work. They maintained open communication with the Advisory Panel, sharing the team’s most recent findings and coordinating upcoming tests.

Project Outcomes

“We demonstrated that FRP retrofits are effective for addressing structural deficiencies in reinforced concrete diaphragms and increasing shear strength,” Jacques said. “We also developed an experimental test method to assess various FRP retrofit arrangements and their design variables on the shear behavior of diaphragms.”

The team’s accomplishments include developing a calculation procedure to predict the shear strength of diaphragms with FRP. The calculations were benchmarked against the experiments to determine their accuracy.

Engineers designing FRP retrofits for diaphragms face uncertainties regarding the proportioning and detailing of strengthening schemes. Another challenge is confidently calculating the strength enhancement offered by these externally bonded composites. The research team found the

retrofitted specimens' overall performance was significantly affected by the proportioning and detailing of FRP retrofit schemes. FRP applied parallel to the shear direction enhanced diaphragm strength most effectively, while perpendicular application improved ductility.

The shear strength contribution of externally bonded FRP was also greatly influenced by the extent of retrofit surface coverage, showing that spreading less dense fabric more uniformly over the surface offered better shear crack control than narrow, high-density fabric strips. Moreover, no substantial performance differences were noted between diaphragms strengthened with glass or carbon FRP composites when retrofits were similarly proportioned, indicating either type of composite fabric may be used.

"The test results underscored the importance of adding mechanical anchorage to supplement the epoxy's chemical bond that secures the FRP to the concrete surface," Jacques said. "The major failure mode is debonding of the FRP from the concrete surface. While the anchorage doesn't enhance strength, it plays a crucial role in arresting and delaying the onset of debonding, if it occurs."

Lasting Impacts

The ACI Foundation-funded portion of the research project concluded in July 2023, having produced a wealth of information that can be distilled into design documents and shared at conferences. The team is currently collaborating with ACI Subcommittee 440-F, FRP-Repair-Strengthening, to add diaphragm shear strengthening provisions in the next revision cycle of ACI PRC-440.2. Advisory Panel members are incorporating the recommendations into their work.

The research also attracted attention and funding from the National Science Foundation (NSF). The NSF-funded component explores the use of topology optimization to develop patterns of non-orthogonal FRP diaphragm strengthening.

"While the ACI Foundation was interested in generating design provisions and guidance for the safe, efficient use of these materials, the NSF is interested in understanding the science behind the strengthening technique," Jacques said.

Dhakal is performing the deep-dive theoretical portion. She is exploring how to optimize FRP to strengthen diaphragms, particularly with respect to how it is oriented on the diaphragm. She is also investigating how the retrofit of the

Meet Hunter Hutton

ACI Foundation's 2022-2023 Robert F. Mast Memorial Fellowship recipient



Hunter Hutton

Investing in people is a critical component of the ACI Foundation's mission. When the Foundation staff learned one of their fellowship recipients was also a student lead in a Foundation-funded concrete research project, "we were thrilled," said Ann Masek, ACI Foundation Executive Director.

Hunter Hutton was awarded the Robert F. Mast Memorial Fellowship for 2022-2023. ACI Foundation student fellowships are offered to high-potential students in concrete-related studies who are endorsed by an ACI member. At the time, Hutton was a graduate student at Virginia Tech, where he was studying structural engineering. The cash award that comes with the fellowship aided Hutton in completing his graduate research.

"It was an honor to receive the fellowship," Hutton said. "It helped lift financial burdens from my shoulders while also providing incredible networking opportunities where I received guidance from fellow concrete enthusiasts and structural engineers. I aim to inspire future engineers by designing innovative structural solutions in practice and translating my knowledge to the classroom as an adjunct professor later in life."

Hutton completed his master's research under the direction of Assistant Professor Eric Jacques. When

Jacques became principal investigator for the research project, "Development of FRP Retrofit Guidelines for Deficient Reinforced Concrete Lateral Force Resisting Systems," Hutton earned a spot as one of the project's first two graduate research assistants. Graduate students participating in such roles enhance their experience while pursuing a degree.

"I was very fortunate to have the opportunity to work as a graduate research assistant while at Virginia Tech and lead an ACI and industry co-funded project focused on retrofitting shear deficient reinforced concrete diaphragms with FRP laminates," Hutton said. "This position allowed me to pursue my master's degree, in which I vastly expanded my knowledge of structural engineering."

Hutton now works as a structural engineer at McSweeney Engineers in South Carolina, USA. Since he graduated from Virginia Tech, other graduate students have joined the research project.

"Having excellent students like Hunter involved is instrumental to the project's success and continued momentum," Jacques said.

The purpose of ACI Foundation's Student Fellowship Program is to identify, attract, and develop outstanding professionals for productive careers in the concrete field. All donations made to the ACI Foundation go directly to students, research, and innovation. Learn more at www.acifoundation.org/scholarships.aspx.

floor impacts the global structural response.

As for practical testing, more tests are being conducted based on requests from the industry. For example, because there are currently no code requirements for the FRP retrofits, building officials typically require a test report with in-depth analysis to demonstrate the design will work.

“Companies approach us to test unique aspects of their diaphragm shear retrofit designs and provide a test report along with calculations and analysis,” Jacques said. “Lately, they’re coming to us with scenarios we hadn’t considered, like retrofits that employ more FRP than what code normally allows or diaphragms made with subpar materials or lightweight concrete. We’ve conducted 10 such tests so far, and our lab is scheduled to continue these tests for the next year and a half.”

Supporting the Future of the Concrete Industry

The FRP retrofit for diaphragm guidelines project highlights the importance of funding initiatives like those provided by the ACI Foundation’s CRC. Such projects not only support early-career researchers and graduate students but also drive advancements in technology, materials, and building methods to ultimately shape a more sustainable future for the concrete industry. Through collaborative research efforts and funding support, the concrete construction industry can continue to innovate and adapt to meet evolving needs while upholding the highest standards of safety and sustainability.

“Ultimately, the public stands to gain the most from this research,” Jacques added. “As engineers, we have a duty to ensure the safety of the public, communities, and the environment. As good stewards of the built environment, we aim to enhance its safety and resilience while reducing

construction waste sent to landfills by avoiding unnecessary demolitions and rebuilds.”

The ACI Foundation continues to fund the people, research, and innovations that provide needed solutions. Organizations can aid the Foundation’s efforts and support concrete-related research and technology advancements by contributing their expertise, experience, and donations. For more information, visit www.acifoundation.org/giving.

References

1. Hutton, H.G.; Dhakal, P.; Eatherton, M.R.; and Jacques, E., “Development of FRP Retrofit Guidelines for Deficient Reinforced Concrete Horizontal Lateral Force Resisting Systems,” Virginia Tech Research Report No. CE/VPI-ST-23/07, Blacksburg, VA, July 2023, 200 pp., <https://www.acifoundation.org/Portals/12/xBlog/uploads/2023/8/24/VirginiaTechCE-VPI-ST-23-07FRPRetrofitofDeficientReinforcedConcreteHorizontalLateralForceResistingSystems.pdf>.
2. ACI Committee 440, “Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Systems for Strengthening Concrete Structures—Guide (ACI PRC-440.2-23),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 109 pp.

Selected for reader interest by the editors.



Victoria (Vikki) K. Sicaras is an Account Manager with Advancing Organizational Excellence (AOE), an ACI subsidiary that provides marketing and association management consulting services. She has more than 20 years of experience writing and editing for leading construction industry publishers, with a focus on concrete construction.

How to Become ACI-CERTIFIED



If you're a craftsman, technician, or inspector, earning an ACI Certification provides you with the credentials to build the best concrete structures in the world. If you're a specifier or owner, you know many codes require ACI-certified personnel on the jobsite. Visit concrete.org/certification.

- TESTING/TRAINING CENTERS**
ACI has partnered with like-minded organizations across the globe to train candidates and administer written and performance exams
- PROMETRIC TESTING CENTERS**
ACI also has partnered with Prometric to allow candidates to take written exams at their convenience
- CCRL TOURS**
Performance exams for select programs can be taken during your CCRL lab evaluation

03

Guía para la rehabilitación de diafragmas de concreto con FRP

Un proyecto de investigación financiado por la Fundación ACI ha llenado brechas de conocimiento en prácticas de diseño

Por Victoria K. Sicaras, en nombre de la Fundación ACI

Cuando se trata de rehabilitar edificios antiguos de concreto reforzado, los ingenieros a menudo no logran un consenso en torno a las recomendaciones de diseño para reforzar sistemas resistentes a cargas en estado deficiente. En específico, la escasez de datos sobre el uso de polímero reforzado con fibras (FRP) para reforzar diafragmas de piso de concreto, ha creado incertidumbre sobre qué enfoques serían apropiados. Una nueva investigación financiada por la Fundación ACI ha permitido cubrir este crítico vacío de conocimiento. El proyecto de investigación, de 2 años de duración, denominado “Desarrollo de directrices de rehabilitación con FRP para sistemas de concreto reforzado deficientes ante fuerzas laterales horizontales”¹, desarrolló y probó técnicas de rehabilitación para diafragmas utilizando FRP adherido externamente. Se espera que las recomendaciones de diseño obtenidas se incluyan en la próxima revisión de ACI PRC-440.2-23, “Guía para el diseño y la construcción de sistemas de FRP adherido externamente, para el reforzamiento de estructuras de concreto”². En la actualidad, el reforzamiento de diafragmas con FRP se encuentra fuera del alcance de ACI PRC-440.2 y de otros documentos de diseño relacionados con FRP. Los resultados más importantes de la investigación se están plasmando en directrices sobre cómo establecer la deformación unitaria efectiva para diseño del FRP, así como la contribución del FRP en la resistencia nominal a cortante. Las recomendaciones también abordan el uso de anclajes intermedios y extremos de FRP, las limitaciones en el espaciamiento libre entre bandas y otros factores pertinentes para el diseño de la rehabilitación.

“Las directrices de diseño desarrolladas permitirán el uso confiable de edificios existentes, satisfaciendo las necesidades cambiantes de los ocupantes y de la sociedad, garantizando al mismo tiempo su resiliencia y seguridad estructural”, declaró Ann Masek, Directora Ejecutiva de la Fundación ACI. “La Fundación ACI tuvo el placer de apoyar esta investigación, que promete impactos de gran alcance”.

La necesidad de pruebas experimentales

El uso de FRP adherido externamente como una técnica de rehabilitación implica el uso de epóxico para adherir bandas de tejido de vidrio o carbono a la superficie del concreto. Estas bandas brindan a la estructura un refuerzo adicional a tracción, lo que mejora su resistencia y comportamiento. El reforzamiento de diafragmas de concreto reforzado puede ser necesario para:

- Mejorar el comportamiento sísmico;
- Corregir propiedades de resistencia o rigidez inadecuadas;
- Proporcionar trayectorias de carga faltantes o incompletas;
- Mejorar la capacidad en zonas de inadecuada transferencia/conexión a cortante; y
- Adaptarse a los cambios de uso y ocupación de la estructura.

El FRP es una tecnología de construcción comprobada, que se utiliza ampliamente para mitigar las vulnerabilidades sísmicas y los problemas relacionados con la corrosión en losas, pórticos resistentes a momento y muros de cortante. Sin embargo, no se ha podido incluir en documentos de diseño, debido a insuficiente información sobre el uso de FRP para solucionar deficiencias de sistemas resistentes a fuerzas horizontales laterales (hLFRS), relacionadas con cuerdas y colectores inadecuados, así como también con una inapropiada capacidad a corte en el plano. “Los ingenieros y los fabricantes están trabajando bastante en la rehabilitación de diafragmas con FRP, pero en la práctica no se han realizado ensayos y se dispone de muy pocos datos numéricos, e incluso de disposiciones normativas, que indiquen la mejor forma de aplicar FRP adherido externamente a diafragmas”, explicó Eric Jacques, investigador principal del proyecto de investigación. Consecuentemente, los diseñadores deben basarse en ensayos experimentales de muros de cortante reforzados con FRP para justificar las aplicaciones de reforzamiento de un hLFRS.

“Pero sin un conocimiento documentado, relacionado al comportamiento de un diafragma de piso de concreto, y de su estado de esfuerzos en distintas geometrías y escalas, los diseños resultan muy conservadores”, afirma Jacques. Un enfoque demasiado conservador puede dar lugar a diseños excesivamente costosos. Por otro lado, un diseño que no sea lo bastante conservador puede acarrear riesgos, responsabilidades y el mayor de los costos: la pérdida de vidas humanas”.

“Los métodos demostrados y respaldados con datos reducen el riesgo y aumentan la confianza en las decisiones de diseño”, afirma Jacques.

Conseguir financiación

Jacques es profesor adjunto en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental “Charles E. Via, Jr.” del Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), Blacksburg, VA, EE. UU. Sus actividades de investigación se centran en el análisis, diseño y rehabilitación de estructuras de concreto reforzado, así como en la protección contra explosiones y materiales energéticos. Matthew Eatherton, profesor y miembro de la facultad en el mismo departamento, es el co-investigador principal del proyecto.

Detalles del Proyecto

Nombre: Desarrollo de Directrices de Rehabilitación con FRP para Sistemas Resistentes a Fuerzas Laterales Horizontales Deficientes en Concreto Reforzado.

Investigador principal: Eric Jacques, Profesor Adjunto de Ingeniería Civil y Ambiental, Virginia Tech.

Co-investigador principal: Matthew R. Eatherton, Profesor de Ingeniería Civil y Ambiental, Virginia Tech.

Asistentes graduados de investigación: Pratiksha Dhakal y Hunter G. Hutton.

Aprobación del Comité Técnico del ACI: 440, Refuerzo con Polímeros Reforzados con Fibra.

Financiador: Fundación ACI.

Socios industriales: Simpson Strong-Tie, Structural Technologies, Fyfe, GeoTree Solutions; socio financiador en especie: Banker Steel.

Comisión asesora: Tarek Alkhrdaji, Scott Arnold, Aniket Borwankar, Enrique del Rey Castillo, Kent Harries, John Hepfinger, John Hooper y Ravi Kanitkar.

Asistencia en la construcción de especímenes: Garrett Blankenship, Brett Farmer y David Mokarem.

Asistencia en las pruebas: Ray Bodnar, Thomas Bracy, Quinton Moyer y Grace Whitesell.

Acerca de la investigación: El objetivo es desarrollar directrices de diseño para reforzar deficiencias en sistemas resistentes a fuerzas horizontales laterales (hLFRS) pertenecientes a edificios antiguos de concreto reforzado, empleando el diseño de FRP adherido externamente. Para ello, los investigadores

desarrollaron enfoques de diseño de rehabilitación que incluían tanto soluciones convencionales como innovadoras. Llevaron a cabo una serie de experimentos a gran escala para investigar el comportamiento, la disposición óptima y el anclaje del FRP para el reforzamiento de zonas deficientes de diafragmas de concreto reforzado que soportan principalmente cortante. Los resultados de las pruebas se utilizaron para desarrollar recomendaciones de diseño para el reforzamiento a cortante de diafragmas de concreto existentes, utilizando FRP adherido externamente. Estas recomendaciones incluyen una guía sobre cómo establecer la deformación unitaria efectiva de diseño del FRP y la contribución a cortante nominal por parte del FRP. También abordan el uso de anclajes intermedios y extremos de FRP, limitaciones en la separación libre entre bandas, y otros factores pertinentes en el diseño de la rehabilitación.

El proyecto contribuye a aumentar la sostenibilidad en la infraestructura por:

- Facilitar la reutilización y reconfiguración de edificaciones existentes para satisfacer las necesidades cambiantes de los ocupantes.
- Mitigar las deficiencias estructurales para producir un comportamiento resiliente durante las eventualidades de amenazas naturales.

El estudio también reveló la necesidad de recomendaciones de diseño más precisas, ya que las existentes tendían a subestimar el comportamiento real observado durante los experimentos.

Por medio de conversaciones con un proveedor de FRP en una convención sobre concreto de la ACI, Jacques se dio cuenta de la escasez de datos relevantes. Él y Eatherton procedieron a contactar con fabricantes, empresas de ingeniería y otros profesionales del sector para conocer su interés en apoyar un programa de desarrollo de métodos de diseño validados experimentalmente. Encontraron socios financieros y de apoyo en especie en Simpson Strong-Tie, Structural Technologies, Fyfe Co, GeoTree Solutions y Banker Steel.

“Nuestros socios industriales fueron algo más que una fuente de financiamiento”, afirma Jacques. “También aportaron su experiencia y apoyo técnico. Además, contábamos con un grupo asesor formado por académicos y consultores de ingeniería. Su retroalimentación y consejos fueron esenciales para garantizar la pertinencia y el impacto de nuestro trabajo para satisfacer las necesidades de la industria.”

Jacques y Eatherton también encontraron un defensor del proyecto en el Consejo de Investigación del Concreto (CRC) de la Fundación ACI. La misión de la Fundación ACI es realizar inversiones estratégicas en ideas, investigación y personas, para crear el futuro de la industria del concreto. Como parte de esa misión, el CRC ofrece un programa anual de solicitud de propuestas (RFP) que concede financiamiento a varios proyectos de investigación sobre el concreto.

El programa abierto RFP permite a los investigadores presentar proyectos de investigación. El financiamiento se concede en función de la relevancia y el potencial de impacto de la investigación, la calidad general de la propuesta, la capacidad del investigador, el apoyo complementario al proyecto (es decir, la colaboración con otros financiadores y organizaciones) y el compromiso del Comité Técnico de ACI. El proyecto de Jacques y Eatherton contaba con el compromiso de socios industriales y el respaldo del Comité 440 de ACI, Refuerzo con polímeros reforzados con fibras. Su propuesta fue seleccionada para recibir financiamiento en 2021.

Como parte del programa, la Fundación ACI se esfuerza por conceder al menos dos subvenciones anuales a proyectos dirigidos por un profesor asociado o adjunto, como Jacques, o por otro miembro del profesorado que inicie su carrera, para apoyar su trabajo y sus objetivos de investigación. Las subvenciones limitan el financiamiento de los costos indirectos al 15% para garantizar que los fondos se destinan a las personas (en forma de becas y salarios) y a las actividades implicadas en un proyecto, y no a los gastos generales de

la organización. Esto brinda a los estudiantes de posgrado la oportunidad de participar en importantes investigaciones que les ayudan a desarrollar y aplicar competencias técnicas y de desarrollo profesional. La oportunidad de investigar en este proyecto fue oportuna para uno de los estudiantes de posgrado de investigación implicados: Hunter Hutton, receptor de la beca Robert F. Mast, 2022-2023, de la Fundación ACI (véase la nota al margen en la pág. 60).

“Recibir el financiamiento y contar con un becario de la Fundación ACI en el proyecto fue una feliz coincidencia, y Hunter desempeñó un papel muy importante en la investigación. Estamos muy agradecidos con la Fundación ACI y a los miembros del ACI que reconocieron la importancia de este proyecto, su necesidad, y que colaboraron con nosotros para hacerlo realidad”, afirma Jacques.



Miembros del equipo de investigación de Virginia Tech. De izquierda a derecha: el investigador principal Eric Jacques, el coinvestigador principal Matthew Eatherton, y los asistentes de investigación Pratiksha Dhakal y Hunter Hutton.



Las pruebas a gran escala demostraron que el refuerzo con FRP adherido externamente mejoraba significativamente tanto la resistencia al corte como la rigidez de los diafragmas de concreto reforzado con deficiencias estructurales.

Establecer las bases

“Investigar el comportamiento de los diafragmas, tanto con o sin refuerzo de FRP, plantea retos importantes”, dijo Jacques. “Para comprender con precisión su comportamiento, es necesario ensayarlos a escalas que se aproximen a su aplicación en el mundo real”.

Los investigadores pusieron en marcha el proyecto organizando un taller con sus socios del sector empresarial y con el grupo de asesores, para comprender mejor el estado de la práctica y los vacíos de conocimiento a abordar. A lo largo del proyecto, el equipo se reunió periódicamente con el grupo asesor para compartir información actualizada y recibir guía y recomendaciones.

Basándose en los conocimientos adquiridos en el taller, el equipo construyó especímenes a gran escala y realizó un total de ocho pruebas para investigar el comportamiento, la disposición óptima y el anclaje del FRP en el reforzamiento de zonas con propiedades deficientes de diafragmas de concreto reforzado que soportan principalmente fuerza cortante. Las pruebas incluían una estructura de concreto sin reforzar y cinco estructuras reforzadas con diferentes configuraciones de FRP adherido externamente. Cada espécimen reforzado con FRP se diseñó para mantener una rigidez axial similar, variando al mismo tiempo los parámetros de reforzamiento con FRP.

Jacques atribuyó a los estudiantes de investigación, Pratiksha Dhakal y Hunter Hutton, la ejecución del trabajo concebido. Mientras Dhakal, estudiante de doctorado, se centró en el modelado numérico, Hutton realizó las pruebas de laboratorio.

Como estudiante principal del proyecto financiado por la Fundación ACI, Hutton llevó a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica, diseñó y construyó las muestras, y analizó los resultados de los especímenes reforzados. El montaje de las pruebas presentaba una configuración única que incluía dos especímenes de ensayo unidos por un marco de acero reutilizable, donde un espécimen se encontraba integrado con el otro. La disposición permitió la construcción simultánea y el ensayo rápido de dos muestras a gran escala, acelerando significativamente el ritmo de la investigación en un proceso que, de otro modo, sería lento y dependería del tiempo de endurecimiento del concreto colocado.

“Hutton realmente estableció las bases de cómo deben realizarse estas pruebas”, afirmó Jacques.

Mientras tanto, Dhakal llevó a cabo un análisis de elementos finitos de la configuración experimental, para validar los cálculos de diseño de Hutton y predecir el comportamiento a cortante de los diafragmas reforzados. Ambos estudiantes analizaron los resultados y aplicaron ecuaciones y teorías para darles sentido, al tiempo que documentaban diligentemente su trabajo. Mantuvieron una comunicación abierta con la Comisión Asesora, compartiendo los resultados más recientes del equipo y coordinando las próximas pruebas.

Resultados del proyecto

“Demostramos que las reparaciones con FRP son eficaces para resolver las deficiencias estructurales de los diafragmas de concreto reforzado y aumentar su resistencia al corte”, dijo Jacques. “También desarrollamos un método de prueba experimental para evaluar diversas disposiciones de reforzamiento con FRP y sus variables de diseño, sobre el comportamiento a cortante de los diafragmas”.

Los logros del equipo incluyen el desarrollo de un procedimiento de cálculo para predecir la resistencia al corte de diafragmas con FRP. Los cálculos se contrastaron con los obtenidos en los experimentos, para determinar su precisión.

Los ingenieros que diseñan esquemas de rehabilitación de diafragmas utilizando FRP, se enfrentan a incertidumbres sobre el diseño y detallado de los esquemas de refuerzo. Otro reto es calcular, de manera confiable, la ganancia de resistencia proporcionada por estos compuestos adheridos externamente. El equipo de investigación encontró que el comportamiento general de los especímenes reforzados se veía afectado, principalmente, por la distribución y el detallado de los esquemas de refuerzo con FRP. El FRP aplicado en paralelo a la dirección del cortante mejoraba la resistencia del diafragma de forma más eficaz, mientras que la aplicación perpendicular mejoraba la ductilidad.

La contribución a la resistencia al corte del FRP adherido externamente también se vio muy influenciada por la extensión superficial de la rehabilitación, demostrando que utilizar tejido menos denso, que cubre una mayor área sobre la superficie, ofrecía un mejor control de las grietas por corte, en comparación con la utilización de bandas más angostas de tejido de alta densidad. Adicionalmente, no se observaron diferencias sustanciales de resistencia entre los diafragmas reforzados con materiales compuestos de FRP de

vidrio, en comparación con los de carbono, cuando las rehabilitaciones tenían dimensiones similares, indicando que puede utilizarse cualquiera de los dos tipos de tejido compuesto.

“Los resultados de las pruebas subrayaron la importancia de añadir un anclaje mecánico para complementar la unión química del epóxico que fija el FRP a la superficie de concreto”, afirmó Jacques. “El principal modo de falla es la separación del FRP de la superficie de concreto. Aunque el anclaje no aumenta la resistencia, desempeña un papel crucial a la hora de detener y retrasar el desprendimiento, si se llega a producir”.

Conozca a Hunter Hutton Beneficiario de la Beca Robert F. Mast 2022-2023 de la Fundación ACI



Invertir en las personas es un componente fundamental de la misión de la Fundación ACI. Cuando el personal de la Fundación se enteró de que uno de sus becarios era también un estudiante líder en un proyecto de investigación sobre el concreto financiado por la Fundación, “nos emocionamos”, dijo Ann Masek, Directora Ejecutiva de la Fundación ACI.

Hunter Hutton recibió la beca Robert F. Mast Memorial para el período 2022-2023. Las becas para estudiantes de la Fundación ACI se ofrecen a estudiantes de alto potencial en estudios relacionados con el concreto, que estén avalados por un miembro de ACI. En aquel momento, Hutton era estudiante de posgrado en Virginia Tech, donde estudiaba ingeniería estructural. El premio en efectivo que incorpora la beca, ayudó a Hutton a completar su investigación de posgrado.

“Fue un honor recibir la beca”, dijo Hutton. “Me ayudó a quitarme un peso financiero de encima y, al mismo tiempo, me proporcionó increíbles oportunidades para establecer contactos y recibir orientación de otros entusiastas del concreto e ingenieros estructurales. Mi objetivo es inspirar a futuros ingenieros diseñando soluciones estructurales innovadoras en la práctica, y trasladando mis conocimientos a las aulas como profesor más adelante.”

Hutton completó su investigación de maestría bajo la dirección del profesor adjunto Eric Jacques. Cuando Jacques se convirtió

Impactos a largo plazo

La parte del proyecto de investigación financiada por la Fundación ACI concluyó en julio de 2023, tras haber producido una gran cantidad de información que puede incorporarse a documentos de diseño y compartirse en conferencias. El equipo colabora actualmente con el Subcomité 440-F de ACI, Reparación y Reforzamiento con FRP, para añadir lineamientos de reforzamiento a cortante de diafragmas, en el próximo ciclo de revisión de ACI PRC-440.2. Los miembros de la Comisión Asesora están incorporando las recomendaciones a su trabajo.

en investigador principal del proyecto de investigación, “ Desarrollo de Directrices de Rehabilitación con FRP para Sistemas Resistentes a Fuerzas Laterales Horizontales Deficientes en Concreto Reforzado “, Hutton se ganó un puesto como uno de los dos primeros asistentes graduados de investigación en el proyecto. Los estudiantes de posgrado que participan en este tipo de actividades mejoran su experiencia al tiempo que obtienen su título.

“Fui muy afortunado de tener la oportunidad de trabajar como asistente de investigación de posgrado mientras estaba en Virginia Tech, y liderar un proyecto cofinanciado por el ACI y la industria, centrado en la rehabilitación con FRP de diafragmas de concreto reforzado con deficiencias a corte”, dijo Hutton. “Este puesto me permitió cursar mi máster, en el que amplí enormemente mis conocimientos en ingeniería estructural”.

Hutton trabaja ahora como ingeniero de estructuras en McSweeney Engineers, en Carolina del Sur (EE. UU.). Desde que se graduó de Virginia Tech, otros estudiantes de posgrado se han unido al proyecto de investigación.

“Contar con la participación de estudiantes excelentes como Hunter, es fundamental para el éxito del proyecto y mantener su impulso”, afirmó Jacques.

El objetivo del Programa de Becas para Estudiantes de la Fundación ACI es identificar, atraer y desarrollar profesionales destacados, para que desarrollen carreras productivas en el campo del concreto. Todas las donaciones realizadas a la Fundación ACI se destinan directamente a los estudiantes, a la investigación y a la innovación. Más información en www.acifoundation.org/scholarships.aspx.

La investigación también atrajo la atención y financiamiento de la National Science Foundation (NSF). El componente financiado por la NSF explora el uso de la optimización topológica para desarrollar patrones de refuerzo no ortogonales de FRP en diafragmas.

“Mientras que la Fundación ACI estaba interesada en generar disposiciones de diseño y orientación para el uso seguro y eficiente de estos materiales, la NSF está interesada en comprender la ciencia que hay detrás de la técnica de refuerzo”, dijo Jacques.

Dhokal se encarga de la parte de fundamentación teórica. Está estudiando cómo optimizar el FRP para reforzar los diafragmas, sobre todo en lo que respecta a su orientación en el diafragma. También está investigando cómo repercute la rehabilitación del piso en el comportamiento global de la estructura.

En cuanto a los ensayos prácticos, se están realizando más pruebas a petición de la industria. Por ejemplo, dado que actualmente no existen requisitos normativos para rehabilitaciones con FRP, las entidades responsables de la construcción suelen exigir un informe de pruebas con un análisis en profundidad para demostrar que el diseño es adecuado.

“Las empresas se ponen en contacto con nosotros para comprobar aspectos exclusivos de sus diseños de rehabilitación a cortante de diafragmas, y para facilitarles un informe de pruebas en conjunto con los cálculos y su correspondiente análisis”, explica Jacques. “Últimamente, nos plantean situaciones que no habíamos considerado, como rehabilitaciones que emplean más FRP del que permite normalmente el código, o diafragmas contruidos con materiales deficientes o concreto ligero. Hasta ahora, hemos realizado 10 pruebas de este tipo, y nuestro laboratorio tiene previsto seguir haciéndolas durante el próximo año y medio.”

Apoyando el futuro de la industria del concreto

El proyecto de rehabilitación de diafragmas con FRP para nuevos lineamientos, resalta la importancia de financiar iniciativas como las que ofrece el CRC de la Fundación ACI. Dichos proyectos no sólo apoyan a los investigadores principiantes y a los estudiantes de posgrado, sino que también impulsan los avances en tecnología, materiales y métodos de construcción para, en última instancia, dar forma a un futuro más sostenible para la industria del concreto. A través de los esfuerzos de investigación colaborativos, y del apoyo financiero,

la industria de la construcción en concreto puede continuar innovando y adaptándose para satisfacer las necesidades cambiantes, mientras mantiene los más altos estándares de seguridad y sostenibilidad.

“En última instancia, el público es el que más se beneficia de esta investigación”, añadió Jacques. “Como ingenieros, tenemos el deber de garantizar la seguridad de los ciudadanos, las comunidades y el medio ambiente. Como buenos administradores del entorno construido, nuestro objetivo es mejorar su seguridad y resiliencia, al tiempo que reducimos los residuos de construcción enviados a los vertederos, evitando demoliciones y reconstrucciones innecesarias.”

La Fundación ACI continúa financiando a las personas, la investigación y las innovaciones que aportan las soluciones necesarias. Las organizaciones pueden ayudar a los esfuerzos de la Fundación y apoyar la investigación y los avances tecnológicos relacionados con el concreto, aportando sus conocimientos, experiencia y donaciones. Para más información, visite www.acifoundation.org/giving.

Referencias

1. Hutton, H.G.; Dhokal, P.; Eatherton, M.R.; y Jacques, E., “Development of FRP Retrofit Guidelines for Deficient Reinforced Concrete Horizontal Lateral Force Resisting Systems,” Virginia Tech Research Report No. CE/VPI-ST-23/07, Blacksburg, VA, July 2023, 200 pp, <https://www.acifoundation.org/Portals/12/xBlog/uploads/2023/8/24/VirginiaTechCE-VPI-ST-23-07FRPRetrofitofDeficientReinforcedConcreteHorizontalLateralForceResistingSystems.pdf>.
2. ACI Committee 440, “Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Systems for Strengthening Concrete Structures-Guide (ACI PRC-440.2-23),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 109 pp.

Seleccionados por el interés de los lectores

Victoria (Vikki) K. Sicaras es administradora de contabilidad de Advancing Organizational Excellence (AOE), una filial de ACI que ofrece servicios de consultoría en marketing y gestión de asociaciones. Tiene más de 20 años de experiencia escribiendo y editando para editoriales reconocidas en la industria de la construcción, con énfasis en la construcción en concreto.



Título original en inglés:
**Guidance Emerges for FRP
Retrofits of Concrete Diaphragms.**
ACI Foundation-funded research project has filled
knowledge gaps in design practices

**La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo
de Colombia**



Traductor:
**Kevin Andrés Tami
Torres**



Revisora Técnica:
**Nancy Torres
Castellanos**