

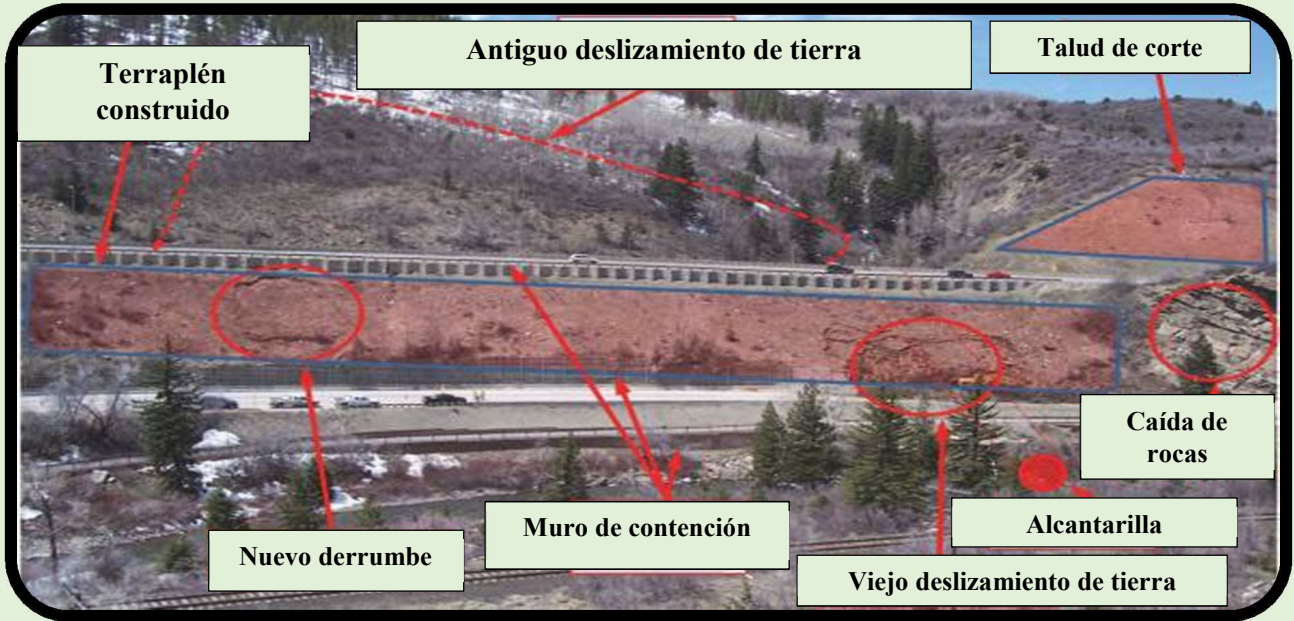


REVISTA INTERNACIONAL

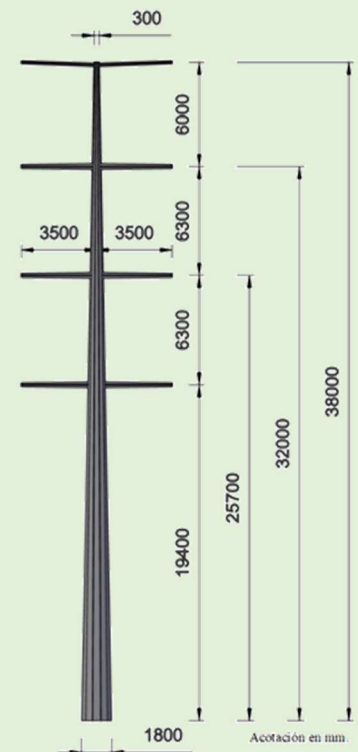
DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL

ISSN 1535-0088

Volumen 23 ● Número 1 ● Mayo - Junio 2023



Realidad Virtual



REVISTA INTERNACIONAL DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL



PRESIDENTE COMISIÓN EDITORIAL INTERNACIONAL

BENJAMÍN COLUCCI-RÍOS

*Catedrático y Director, Cátedra Abertis-Puerto Rico
Director, Centro de Transferencia de Tecnología en Transportación
Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico*

MIEMBROS FUNDADORES Y EDITORES EMÉRITOS

LUIS E. SUÁREZ-COLCHE

Catedrático, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico

LUIS A. GODOY

Profesor Titular Plenario, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

COMISIÓN EDITORIAL

SERGIO M. ALCOCER

*Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional
Autónoma de México, CDMX*

MIGUEL CANALS SILANDER

*Universidad de Puerto Rico, Mayagüez,
Puerto Rico*

CARLOS M. CHANG

*Florida International University, USA
(Representando Perú)*

ALBERTO M. FIGUEROA MEDINA

*Universidad de Puerto Rico,
Mayagüez, Puerto Rico*

CARLOS HUERTA LÓPEZ

*Universidad de Puerto Rico, Mayagüez,
Puerto Rico (Representando México)*

SANGCHUL HWANG

*Texas State University, USA
(Representando Corea del Sur)*

XIAOPENG LI

*University of South Florida, USA
(Representando China)*

RICARDO R. LÓPEZ

*Universidad de Puerto Rico, Mayagüez,
Puerto Rico*

CARLA LÓPEZ DEL PUERTO

*Universidad de Puerto Rico, Mayagüez,
Puerto Rico*

ALESANDRA MORALES

Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico

EUGENIO OÑATE

Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

GUSTAVO PACHECO-CROSETTI

*Universidad Politécnica de Puerto Rico
(Representando Argentina)*

ISMAEL PAGÁN-TRINIDAD

*Director, Departamento de Ing. Civil y Agrimensura,
Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico*

MIGUEL A. PANDO

Drexel University, Philadelphia, Pennsylvania, USA

FRANCESC ROBUSTÉ

*Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España*

ANDRÉS RODRÍGUEZ

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

ARTURO TENA COLUNGA

*Universidad Autónoma Metropolitana,
México, CDMX*

DIDIER M. VALDÉS DÍAZ

*Universidad de Puerto Rico,
Mayagüez, Puerto Rico (Representando Colombia)*

JORGE A. VANEGAS

*Presidente, Academia Panamericana de Ingeniería (API),
Texas A&M University, USA
(Representando Colombia)*

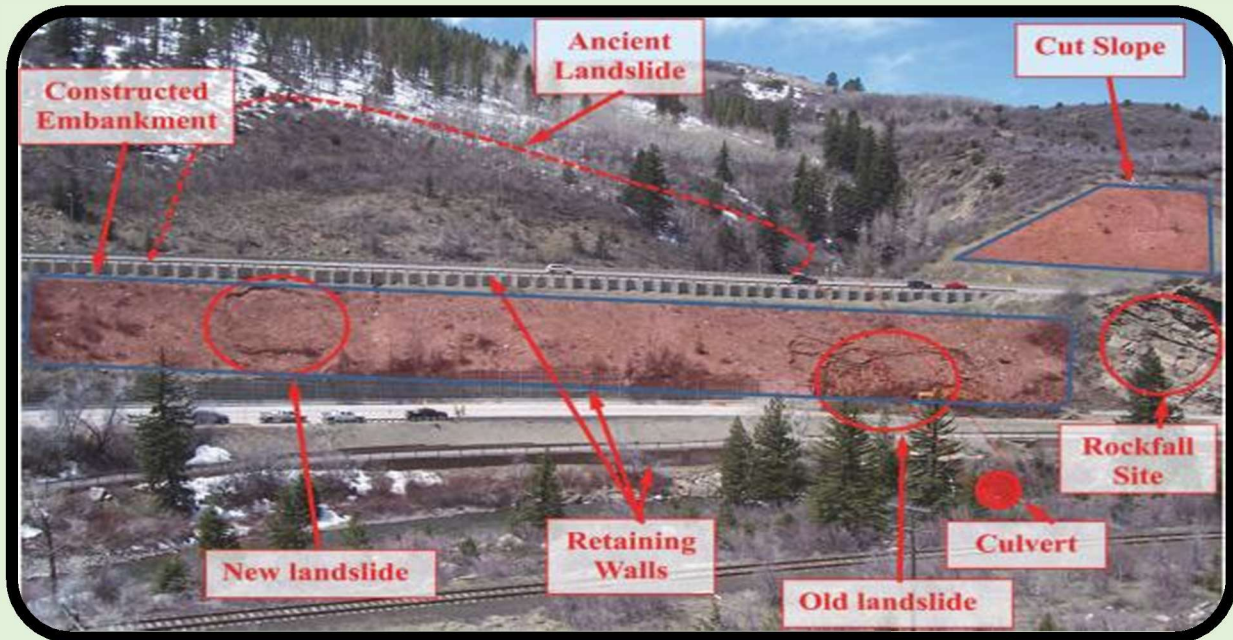


INTERNATIONAL JOURNAL

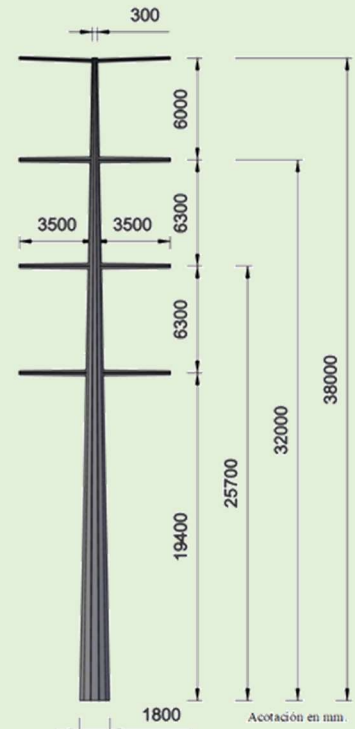
NATURAL DISASTERS, ACCIDENTS AND CIVIL INFRASTRUCTURE

ISSN 1535-0088

Volume 23 ● Number 1 ● May - June 2023



Virtual Reality



REVISTA INTERNACIONAL DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL



COLABORADORES ACADÉMICOS, SECTOR PRIVADO Y FEDERAL

HERNÁN O. FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ

Profesor Emérito, Universidad del Cauca, Colombia

JOSÉ DOMINGO PÉREZ

Presidente Electo 2022-2024, Academia Panamericana de Ingeniería (API)

JUAN CARLOS RIVERA

Administración Federal de Carreteras, División de Puerto Rico e Islas Vírgenes

CARLOS E. RUIZ

U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi, USA

DENNIS TRUAX

Presidente 2022, Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE)

APOYO ADMINISTRATIVO AL EDITOR

CIARA TORO ROSARIO

Asistente Administrativo III, UPR-Mayagüez



REVISTA INTERNACIONAL DE DESASTRES NATURALES, ACCIDENTES E INFRAESTRUCTURA CIVIL



Volumen 23, Número 1, Mayo - Junio 2023

ISSN 1535-0088

CONTENIDO	Págs.
Mensaje del Presidente de la Comisión Editorial RIDNAIC Message from the President of the RIDNAIC Editorial Commission Benjamín Colucci-Ríos	1
Mensaje del Director del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura-UPRM Message from the Director of the Civil Engineering and Surveying Department-UPRM Ismael Pagán-Trinidad	5
Climate Change and How ASCE is Helping our Communities to Adapt Cambio Climático y cómo la ASCE está Ayudando a Nuestras Comunidades a Adaptarse Marsia Geldert-Murphy	7
Análisis Comparativo Tensional en Codos de Sistemas de Cañerías aplicando el Margen Normativo de Seguridad Alejandro José Giudici, Nicolás Federico Wechselberg, José Enrique Stuardi, Guillermo Chiappero	17
Sustainable Development of Smart Cities based on Information Technology and Education Carlos M. Chang, Teresa Salinas-Gamero, Mario Vélez-Chanchanya, Gianine Tejada-Salinas	37
Contribuciones e Innovaciones en la Práctica de la Ingeniería Geotécnica de la Oficina de Ingeniería de Suelos de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico Ricardo J. Romero-Ramírez, María E. Arroyo-Caraballo	50
Reflexiones acerca del Diseño de Postes de Acero para Líneas de Transmisión en México Cuauhtémoc Cordero-Macías, Luis Ángel Mendoza-Mendoza	58
Seismic Soil Pressures on Embedded Walls with Varying Stiffness and Contact Conditions Andrea E. Cruz-Chamorro, Aidcer L. Vidot-Vega	75
State of Practice in Nature-based/Inspired Solutions for Coastal Erosion Suhey Ortiz-Rosa, Ismael Pagán-Trinidad	86
Pedestrian Performance on Mid-Block Crossings using a Road Information Assistance System in a Virtual Reality Experiment Alberto M. Figueroa-Medina, Didier M. Valdés-Díaz, Natacha N. Cardona-Rodríguez, Andrés D. Chamorro-Parejo	99
Congresos y Seminarios	113
Normas para Publicación de Artículos Técnicos	115

MENSAJE DEL PRESIDENTE COMISIÓN EDITORIAL RIDNAIC



¡Saludos! Esta edición de la Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil (RIDNAIC) consiste de ocho (8) escritos técnicos preparados por veintiún autores de renombre internacional. Los trabajos de investigación están relacionados a cambio climático, aumento del nivel del mar (SLR), desarrollo sostenible de ciudades inteligentes e infraestructura civil, soluciones innovadoras para mitigar la erosión en zonas costaneras inspiradas en la naturaleza, innovaciones en ingeniería geotécnica y uso de sistema de asistencia de información vial y la tecnología de realidad virtual para el análisis de seguridad peatonal en áreas urbanas.

Esta edición comienza con una reflexión de la Ing. Marsia Geldert-Murphey, Presidenta Electa de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) sobre cómo esta sociedad está colaborando con las comunidades en el proceso de adaptación debido al cambio climático a nivel mundial.

En el segundo escrito, *Análisis Comparativo Tensional en Codos de Sistemas de Cañerías aplicando el Margen Normativo de Seguridad*, los autores estudian los niveles de tensión en codos provocados por momentos externos y presiones internas. El estudio se basa en un análisis comparativo de los esfuerzos en tensión aplicando los códigos ASME B31.1 y ASME B31.3 con los obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, a través de un novedoso indicador denominado Margen Normativo de Seguridad.

En el tercer escrito, *Sustainable Development of Smart Cities based on Information Technology and Education*, los autores describen el concepto de Ciudad Inteligente con énfasis en la calidad de vida y el rol de la educación en su desarrollo y sostenibilidad, integrando tecnología moderna para una interacción eficiente de subsistemas como de salud, seguridad pública, entre otros.

En el cuarto escrito, *Contribuciones e Innovaciones en la Práctica de la Ingeniería Geotécnica de la Oficina de Suelos de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico*, los autores exponen los avances de la ingeniería geotécnica en el archipiélago de Puerto Rico, métodos innovadores exploratorios de suelos y las correspondientes lecciones aprendidas a raíz de los movimientos telúricos en la isla a finales del 2020 y principios del 2021.

En el quinto escrito, *Reflexiones acerca del Diseño de Postes de Acero para Líneas de Transmisión en México*, los autores estudian las diferentes etapas del diseño de postes metálicos para líneas de transmisión en la ciudad Mexicali, México basado en un análisis comprensivo de 90 postes. Se presentaron recomendaciones puntuales para los diferentes tipos de acero que cumplen con los límites de falla y de servicio para el acero según lo dispone los ASTM A572-65, ASTM A572-60 y ASTM A36.

En el sexto escrito, *Seismic Soils Pressures on Embedded Walls with Varying Stiffness and Contact Conditions*, las autoras buscan evaluar cómo las presiones sísmicas desarrolladas en muros enterrados en la tierra se ven afectadas por diferentes rigideces de muros y diversas condiciones de contacto suelo-muro. El resultado de esta investigación demuestra que los muros rígidos desarrollan mayores presiones sísmicas que los muros flexibles sometidas a los mismos registros sísmicos.

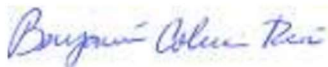
En el séptimo escrito, *State of the Practice in Nature-Based/Inspired Solutions for Coastal Erosion*, los autores describen soluciones basadas o inspiradas en la naturaleza (NbS) a causa de efectos del cambio climático y alteraciones realizadas por el ser humano, específicamente en áreas costeras.

En el octavo y último escrito, *Pedestrian Performance on Mid-Block Crossings using a Road Information Assistance System in a Virtual Reality Experiment*, los autores presentan los resultados de un experimento utilizando la tecnología de realidad virtual. El experimento, consistía en estudiar el desempeño de peatones en cruces a media cuadra en calles urbanas y el impacto de un Sistema de Asistencia con Información Vial (SAIV). Los resultados del experimento de realidad virtual demostraron que el grupo de participantes que usó el SAIV sencillo tuvo el peor desempeño y el promedio más alto de la brecha aceptada para cruzar la calle.

Agradezco a los Miembros de la Comisión Editorial de RIDNAIC y a los autores que sometieron sus artículos para hacer una realidad esta edición. Un agradecimiento muy especial a la Srta. Ciara Toro-Rosario Asistente Administrativo del Centro de Transferencia de Tecnología en Transportación por su titánico apoyo en el montaje de esta edición.

Espero que esta Edición de la Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil (RIDNAIC) sirva su misión para identificar soluciones innovadoras que contribuyan a reducir la vulnerabilidad de la infraestructura civil ante los fenómenos naturales extremos para el bienestar de la humanidad.

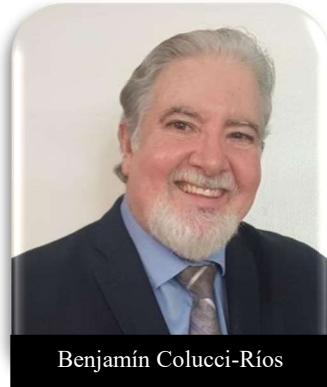
Con mi mayor aprecio y admiración,



Benjamín Colucci-Ríos, PhD, PE, PTOE, F. ASCE, F.ITE, API, JD
Presidente, Comisión Editorial Internacional RIDNAIC
Catedrático, Universidad de Puerto Rico-Mayagüez



MESSAGE FROM THE PRESIDENT OF THE RIDNAIC EDITORIAL COMMISSION



Greetings! This edition of the International Journal of Natural Disasters, Accidents and Civil Infrastructure (RIDNAIC) consists of eight (8) technical articles prepared by twenty-one internationally renowned authors. The research works are related to climate change and sea level rise (SLR), sustainable development of smart cities and civil infrastructure, innovative solutions to mitigate erosion in coastal areas inspired by nature, innovations in geotechnical engineering and use of road information assistance system and technology of virtual reality for the analysis of pedestrian safety in urban areas.

This edition begins with a reflection by Eng. Marsia Geldert-Murphey, President Elect of the American Society of Civil Engineers (ASCE) on how this society is collaborating with communities in the adaptation process due to climate change worldwide.

In the second article, *Comparative Stress Analysis of Elbows in Piping Systems applying the Normative Safety Margin*, the authors study the stress levels in elbows caused by external moments and internal pressures. The research study is based on a comparative stress analysis in accordance to ASME B31.1 and ASME B31.3 codes and compared with those obtained by a finite element numerical model, based on the innovative Regulatory Safety Margin indicator.

In the third article, *Sustainable Development of Smart Cities based on Information Technology and Education*, the authors describe the concept of Smart City with emphasis on quality of life and the role of education in its development and sustainability, integrating modern technology for interaction efficiency of subsystems such as health, public safety, among others.

In the fourth article, *Contributions and Innovations in the Geotechnical Engineering Practice of the Soils Engineering Office of the Puerto Rico Highways and Transportation Authority*, the authors expose the advances of geotechnical engineering in the Puerto Rican archipelago, innovative exploratory methods of soils and the corresponding lessons learned as a result of the telluric movements on the island at the end of 2020 and beginning of 2021.

In the fifth article, *Reflections on the Design of Steel Poles for Transmission Lines in Mexico*, the authors study the different stages of the design of metal poles for transmission lines in the city of Mexicali, Mexico based on a comprehensive analysis of 90 poles. Specific recommendations were presented for the different types of steel that meet the failure and service limits for steel as provided by ASTM A572-65, ASTM A572-60 and ASTM A36.

In the sixth article, *Seismic Soils Pressures on Embedded Walls with Varying Stiffness and Contact Conditions*, the authors seek to assess how the seismic pressures developed in walls buried in the ground are affected by different wall stiffnesses and various soil-wall contact conditions. The result of this research shows that rigid walls develop higher seismic pressures than flexible walls subjected to the same seismic records.

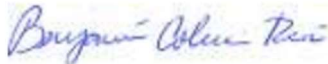
In the seventh article, *State of the Practice in Nature-Based/Inspired Solutions for Coastal Erosion*, the authors describe nature-based or inspired (NbS) solutions to the effects of climate change and human-made disturbances, specifically in seaside.

In the eighth and final article, *Pedestrian Performance on Mid-Block Crossings using a Road Information Assistance System in a Virtual Reality Experiment*, the authors present the results of an experiment using virtual reality technology. The experiment consisted of studying the performance of pedestrians at half-block crossings in urban streets and the impact of a Road Information Assistance System (SAIV). The results of the virtual reality experiment showed that the group of participants who used the simple SAIV had the worst performance and the highest mean of the accepted gap to cross the street.

I am grateful to the Members of the RIDNAIC Editorial Commission and the authors who submitted their articles to make this edition a reality. A very special thanks to Ms. Ciara Toro-Rosario Administrative Assistant of the Transportation Technology Transfer Center for her titanic support in the preparation of this edition.

I hope that this Edition of the International Journal of Natural Disasters, Accidents and Civil Infrastructure (RIDNAIC) serves its mission to identify innovative solutions that contribute to reducing the vulnerability of civil infrastructure to extreme natural phenomena for the well-being of humanity.

With my greatest appreciation and admiration,



Benjamín Colucci-Ríos, PhD, PE, PTOE, F. ASCE, F.ITE, API, JD
President, RIDNAIC International Editorial Commission
Professor, University of Puerto Rico-Mayagüez



MENSAJE DEL DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRIMENSURA-UPRM

Prof. Ismael Pagán-Trinidad

Director, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura-UPRM



A través de las últimas décadas, la naturaleza se ha encargado de presentarnos nuevos retos y desafíos como producto de la amplificación de las variaciones extremas del clima y el tiempo causados por el calentamiento continuo de la Tierra. Ante los nuevos retos, la Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil (RIDNAIC) cobra mayor relevancia y pertinencia. El cambio climático causado por los efectos de invernadero a causa de las emisiones gaseosas de bióxido de carbono y otras emisiones de contaminantes a la atmósfera, ha sido documentado no solo por una tendencia de calentamiento continuo de la atmósfera, sino también por un aumento significativo de la razón a la cual la atmósfera se está calentando. La variabilidad del clima (tendencia continua de cambio del patrón del tiempo) ha provocado eventos extremos más significativos, redistribución espacial y temporal del patrón del tiempo, y redistribución de los riesgos y los impactos de estos fenómenos. Por ello, el estado del arte (del conocimiento) en la ingeniería requiere adaptarse y transferirse a través de educación formal y profesional para proveer las herramientas y soluciones en una generación nueva de profesionales capaces de adaptar las comunidades y su infraestructura crítica para resistir y responder los efectos de los fenómenos extremos cambiantes. El efecto del cambio climático no se limita exclusivamente al impacto sobre la infraestructura construida crítica y natural, pero también impacta todas las facetas de nuestras vidas y recurso, a saber, salud y medicina, agricultura y alimentos, energía, ambiente, ecosistemas, educación y ciencia, política, economía, aspectos de derecho, sociedad y muchas otras. Las comunidades costeras parecen más expuestas por el efecto directo del levantamiento del nivel del mar, el cual no parece ser un asunto de urgencia cuando se habla de milímetros por año, pero el efecto acumulativo y creciente se proyecta en uno potencialmente catastrófico en el futuro. Sin embargo, es pertinente entender todas las comunidades se proyectan a ser afectadas por lo cual lo que no se haga para prevenir o mitigar el impacto del cambio climático ahora será motivo de efectos en catastróficos en cascadas en el futuro. Se debe resaltar que las comunidades marginadas y socialmente más necesitadas tienen mayor probabilidad de ser más afectadas.

Nuestra sociedad civil se enfrentará a retos de investigación y educación diferentes a los que veíamos medio siglo atrás, pero en objetivos similares, divulgar conocimientos para ayudar la comunidad científica a enfrentar los riesgos de eventos naturales y accidentes extremos. Por ello esta Revista, la investigación que aquí se divulga, y nuestros currículos deben ayudar una nueva generación de fuerza laboral preparada para adaptarse profesionalmente a los nuevos retos y trabajar en equipos de trabajos de conocimiento diverso. Es pertinente impulsar soluciones basadas en economía enfocadas en infraestructura con énfasis a incorporar infraestructura verde, azul e híbrida. Este nuevo enfoque facilitaría el desarrollo de economías verde y azul para el desarrollo sostenible y resiliente del futuro. Es relevante conocer que la Fundación Nacional de Ciencias (NSF) tiene como parte de sus prioridades de apoyo a investigación e innovación en conocimiento nuevo dirigido a atender asuntos relacionados al cambio climático. Le recomendamos al lector que se refiera al informe: “*The Role of Engineering to Address Climate Change: A Visioning Event Report of the NSF Engineering Research Visioning Alliance (ERVA), July 27, 2022*” (<https://www.ervacommunity.org/visioning-report/visioning-event-report/>) en donde se abunda sobre el rol de la ingeniería en el cambio climático.

MESSAGE FROM THE DIRECTOR OF THE CIVIL ENGINEERING AND SURVEYING DEPARTMENT-UPRM

Prof. Ismael Pagán-Trinidad

Director, Civil Engineering and Surveying Department-UPRM



Through the last decades, nature has been in charge of presenting us with new challenges as a product of the amplification of the extreme variations of climate and weather caused by the continuous warming of the Earth. Faced with the new challenges, the International Journal of Natural Disasters, Accidents and Civil Infrastructure (RIDNAIC) becomes more relevant. Climate change caused by greenhouse effects due to gaseous emissions of carbon dioxide and other emissions of pollutants into the atmosphere, has been documented not only by a continuous warming trend in the atmosphere, but also by a significant increase in the rate at which the atmosphere is warming. Climate variability (continuous trend of change in the weather pattern) has caused more significant extreme events, spatial and temporal redistribution of the weather pattern, and redistribution of the risks and impacts of these phenomena. Therefore, the state of the art (of knowledge) in engineering requires adaptation and transfer through formal and professional education to provide the tools and solutions to a new generation of professionals capable of adapting communities and their critical infrastructure to resist and respond the effects of changing extreme events. The effect of climate change is not limited exclusively to the impact on critical and natural built infrastructure, but also impacts all facets of our lives and resources, namely, health and medicine, agriculture and food, energy, environment, ecosystems, education and science, politics, economics, aspects of law, society and many others. Coastal communities seem more exposed to the direct effect of sea level rise (SLR), which does not seem to be a matter of urgency when it comes to millimeters per year, but the cumulative and increasing effect is projected to be potentially catastrophic in the future. However, it is pertinent to understand all communities are projected to be affected, so what is not done to prevent or mitigate the impact of climate change now will cause catastrophic effects in cascades in the future. It should be noted that the most marginalized and socially needy communities are more likely to be most affected.

Our civil society will face research and education challenges that are different from half a century ago, but with similar objectives: to disseminate knowledge to assist the scientific community face the risks of natural events and extreme accidents. That is why the research published in RIDNAIC Journal and our curricula should help a new generation of labor force prepared to professionally adapt to new challenges and work in teams of diverse knowledge works. It is pertinent to promote solutions based on economy focused on infrastructure with an emphasis on incorporating green, blue and hybrid infrastructure. This new approach would facilitate the development of green and blue economies for the sustainable and resilient development of the future. It is relevant to know that the National Science Foundation (NSF) has in its priorities to support research and innovation in new knowledge aimed at addressing issues related to climate change. I recommend the reader to refer to the report: “*The Role of Engineering to Address Climate Change: A Visioning Event Report of the NSF Engineering Research Visioning Alliance (ERVA)*, July 27, 2022)” (<https://www.ervacommunity.org/visioning-report/visioning-event-report/>) which elaborates on the role of engineering in climate change.

CLIMATE CHANGE AND HOW ASCE IS HELPING OUR COMMUNITIES TO ADAPT

Marsia Geldert-Murphey, P.E., F. ASCE

2023 American Society of Civil Engineers President Elect
Chair of the South Dakota State University Civil & Environmental Engineering
Department Industry Advisory Board



The acceleration of climate change worldwide is threatening existing infrastructure networks that we rely upon every day. According to the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), in 2022 there were 18 climate disaster events causing at least \$1 billion in damages in the United States (US), the third most billion-dollar disaster events in a year since NOAA began tracking them in 1980.

In 2021 the number of billion-dollar disaster events was 20, and in 2020 the US experienced a record-setting 22 such events. In the past five years (2018-2022), the US experienced 89-billion-dollar disaster events resulting in over \$600 billion in damages and 1,751 deaths, or roughly 350 per year. Compare these figures to the 67 such events in the 2000s, resulting in \$587 billion in damages, and 55 such events in the 1990s and it is clear that climate-related disasters are occurring more frequently and bearing increasingly severe costs.

Similarly, according to the United Nations Office for the Coordination of Human Affairs, or OCHA, Latin America and the Caribbean is the second most disaster-prone region in the world with more than 152 million residents affected by 1,205 natural disasters between 2000-2019. The majority of these were floods, totaling 548 during that span. On 12 occasions between 2000-2019, floods in the region caused more than \$1 billion in total damages. Although the death toll for flooding specifically has been relatively low in this region, other disasters such as earthquakes, hurricanes and landslides have caused a significant number of fatalities. The catastrophic earthquake in Haiti in 2010 caused more than 222,000 deaths, while tropical storms have caused more than 5,000 deaths and landslides have caused more than 3,000 deaths.

Rising sea levels and increasing rates of precipitation are contributing to severe flooding events, while hurricanes and tornadoes are occurring more frequently and devastating communities, including some which previously had not dealt with these environmental disasters. Combatting these trends requires developers to incorporate resilient materials and practices to ensure that the built environment is able to withstand omnipresent environmental hazards. Buildings in cities like Miami, US that are threatened by sea level rise (SLR) and hurricanes will have to meet requirements that can counter those threats, while high altitude cities in South America such as Bogotá and Colombia will have different requirements.

As climate threats have intensified, as has the need to incorporate current and future climate scenario data into building codes, design standards and public policy. Engineers, designers, planners, and policymakers must incorporate system resilience into the decision-making process. This requires policymakers to focus on long-term solutions rather than upfront costs, which can often become a major hurdle but will save communities money in the long-run.

The increasingly strong storms that our infrastructure faces have changed project requirements and expectations. When the next “big event” hits a community, a variety of factors will determine which structures will incur the most damage. Many infrastructure owners now ask to include climate requirements in the design. Unfortunately, what is now happening, as a result, is that designers and engineers are being forced to improvise and they are asking for updated codes and standards to assist them.

The American Society of Civil Engineers (ASCE), represents more than 150,000 civil engineers worldwide and is uniquely suited to provide training and outreach on the need to update building codes and to educate state and local officials on standards that can increase resilience. ASCE has a network of engineers that can be called upon to provide trainings, contact legislators, and educate communities on the benefits of codes and standards.

ASCE has developed building codes and design standards unique to each community's challenges across the globe. ASCE 7 is the Society's most widely used professional standard and a critical tool in a civil engineer's commitment to protecting the health, safety, and welfare of the public. This tool tells engineer how to design buildings to withstand certain hazards, such as severe winds, seismic activity, flooding, and more. The standard has stood for more than 20 years as the authoritative source for specifications of loads and related criteria used by engineers to design safe, economical, and reliable structures. This standard is updated on a cyclical basis by hundreds of professional civil and structural engineers, researchers, buildings officials, and construction professionals, with the most recent edition being released in late 2021 (*ASCE/SEI 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Building and Other Structures*).

The most recent edition includes the first ever criteria for tornado resistant design. The new update also draws on updated methods for more accurate snow loads and includes a new multipoint seismic spectrum for all sites. ASCE 7-22 now requires use of digital data uniquely identified in hazard-specific geodatabases. The digital data is available through open access from the ASCE 7 Hazard Tool. This hazard tool provides a quick, reliable way to look up hazard data for seven environmental hazards, including wind, seismic, ice, rain, snow, flood, and tsunami. Anyone from around the globe has access to the ASCE 7 Hazard Tool.

ASCE's publication Climate-Resilient Infrastructure (MOP 140) includes a discussion of analytical methods to describe climate - including possible changes and extreme events - for planning and engineering design of the built and natural environments. ASCE's many committees and experts are working towards provisions and recommendations to advance sustainable infrastructure design to be included in published standards, manuals of practice, and guidelines.

While these standards are essential for protecting the public, the same can be said about the need to update and distribute relevant data with the most current climate models, which are not only critical for the development of standards, but for engineers to have the information that they need to make educated design decisions. In 2021, ASCE signed a memorandum of understanding with the University of Maryland (UMD) and NOAA to identify and collect climate data that will help inform future ASCE standards. In February 2023, ASCE joined these organizations to hold the first-ever Summit on Climate-Ready Infrastructure and discuss how the nation's engineering profession can account for climate change in the design and construction of future building and infrastructure projects. At the Summit a new memorandum of understanding (MOU) with NOAA was unveiled, detailing the ways that NOAA's science and products will be used to inform the building and civil engineering codes, standards and best practice manuals developed by ASCE.

NOAA has tools to track precipitation patterns all over the world, including the U.S., Caribbean, Central America, Mexico and South America. This data allows regions to prepare for heavy rainfall or drought over the course of a week, month, or entire season. NOAA has also developed an interactive National Hurricane Center Storm Surge Risk Maps to analyze storm surge flooding vulnerability in hurricane-prone coastal areas. The map includes the U.S., Puerto Rico, Guam, the U.S. Virgin Islands, Hispaniola and parts of the Yucatan Peninsula. Tools such as these can help inform decision makers and encourage them to follow design standards which will protect at-risk populations.

The continued collaboration between ASCE and NOAA will also focus on inequities in climate resilience. Low-income communities suffer more damage and are at greater risk from extreme events. Furthermore, the effects of climate change on vulnerable populations are frequently compounded by exacerbating other risks, such as inland flooding, urban heat islands and poor air quality. NOAA and ASCE will work together to address these inequities, for example, in the process of identifying particular needs for climate-resilient infrastructure in urban, rural and low-income communities.

In October 2022, ASCE continued its dedication to addressing climate change by holding a Structural Engineering Institute Climate Impacts Workshop, a series of events designed to connect leaders from ASCE with leading climate scientists and partners, including NOAA, the National Institute of Standards and Technology (NIST), and the Federal Emergency Management Agency (FEMA), to work toward climate-forward standards that could be integrated into the next addition of ASCE 7, which will be released in 2028 (and will subsequently be recognized as ASCE 7-28). The Society's Board of Direction approved recommendations to keep ASCE standards up to date with the latest climate change developments so that engineers around the world can begin integrating these practices into infrastructure designs. ASCE 7-28, will put this recommendation into practice and act as a guidepost for climate ready infrastructure into the future.

Climate change data updates and integration will need to go beyond ASCE 7 as well. *ASCE 24-14: Improving the Performance of Buildings and Structures in Flood Hazard Areas*, addresses minimum design and construction requirements for structures located in flood hazard areas. These areas are based on hazard maps and studies, but many of these maps are outdated and do not include current climate projections accounting for SLR and modern precipitation patterns.

ASCE 24-14 was last updated in 2014 and focuses on resilience to 100-year floods, which describes a flood that has a one percent chance of hitting an area in any given year. An area that has a one-percent chance of flood is on the 100-year floodplain. ASCE is working on a supplement to ASCE 7's Chapter 5 on flooding, so that the standard adopts 500-year flood outlooks now that these events have become more common. A 500-year flood is described as a flood having a 0.2% probability – or 1 in 500 – of occurring in a given year. As referenced prior, the Americas have endured severe floods with increasing frequency in the past two decades, warranting adjustments be made to how engineers approach flood prone infrastructure planning and construction.

Updating codes and standards are important, but adopting and enforcing them is another matter altogether. ASCE's standards program is regularly audited to ensure compliance with the ASCE Rules for Standards Committees and that it is consistent with requirements from the American National Standards Institute (ANSI). In its Hazard Mitigation Assistance (HMA) programs, FEMA utilizes the ASCE 24-14, or the latest edition, to establish minimum design and construction requirements for structure elevation, dry floodproofing, and mitigation reconstruction. Buildings and structures within the scope of the International Building Code (IBC) proposed to be located in any flood hazard area must be designed in accordance with ASCE 24.

The newest version of ASCE 7 (ASCE 7-22) has also been adopted by the IBC. However, the version of ASCE 7 a region uses is dependent on which version of the IBC they have adopted. To date, adopters of the IBC, and, therefore, ASCE 7, include Colombia, Jamaica, Mexico, Tobago, and Trinidad, and the US. How strictly these standards are enforced is difficult to gauge, but the newest standards combined with firm enforcement will help keep communities safe.

When a series of catastrophic earthquakes, measuring 7.8 and 7.5 on the magnitude scale, struck the border of Turkey and Syria in February 2023, more than 40,000 residents were killed despite several communities adopting strict seismic standards. However, investigations found that the enforcement of these standards was inconsistent. Turkey does not enforce independent construction observations, but instead allows the contractor to provide their own assessments. This led to many buildings in the region not being built to the seismic standards that could have prevented structures from collapsing. In Turkey, the government has provided “construction amnesties,” in exchange for payment, to structures built without the latest safety standards. Up to 75,000 buildings across the affected earthquake zone in southern Turkey have been given construction amnesties. The seismic disasters that struck the region in February underscore the importance of adhering to the strictest codes and standards meant to make structures more resilient.

Enforcement can also vary within the U.S., which is why ASCE works with state legislators to educate them on the most up to date standards and the benefits of the Society's hazard mapping tool. Communities which adhere to the most stringent ASCE standards have been far more successful avoiding catastrophes than those that choose to forego these standards. For example, in November 2018, Anchorage, Alaska was hit with a

magnitude 7.1 earthquake. The areas with updated building codes experienced minimal damages and zero fatalities occurred. Of the 40 structures around Anchorage to experience damages in the 2018 event, only one of them was located within the region that requires use of ASCE 7 standards. While the most stringent codes and standards cannot guarantee full protection against catastrophic events such as earthquakes, hurricanes, or tornadoes, they can improve the likelihood of affected structures remaining stable throughout the event.

In 2010, ASCE in conjunction with the American Public Works Association (APWA), the American Council of Engineering Companies (ACEC), and the Zofnass Program for Sustainable Infrastructure at the Harvard University Graduate School of Design established the Institute for Sustainable Infrastructure (ISI). ISI provides resources and guides needed to ensure all infrastructure projects are built to be sustainable, resilient, and equitable. To accomplish this, ISI developed, manages, and administers Envision – a holistic framework and rating system that examines civil infrastructure’s sustainability and resiliency. ISI trains and credentials stakeholders in the architecture, engineering, and construction industry on Envision, while a third-party verification program rates the projects.

To date, Envision is the only comprehensive tool in North America that can assist private and public agencies in delivering infrastructure that addresses climate change, public health needs, environmental justice, and job creation. Envision has been applied to more than 100 infrastructure projects collectively worth more than \$106 billion. This tool is applicable to any type of infrastructure project, whether that fall under broadband, energy, transportation, water, or waste. Envision uses a “Mitigation Hierarchy” to prioritize steps taken when building civil infrastructure:

- **Avoidance** – measures taken from the outset to avoid creating negative environmental impacts.
- **Minimization** – measures taken to reduce the duration, intensity or extent of impacts that cannot be avoided.
- **Abatement** – measures taken to rehabilitate degraded ecosystems.
- **Offsetting** – measures taken to compensate for any residual adverse impacts.

Envision’s “Mitigation Hierarchy” is meant to enhance environmental protections while also conserving resources and promoting social well-being. Our future depends on resilient infrastructure, and as civil engineers, we are thinking about building infrastructure that will last for one hundred years, or more. ASCE is proud to be working on its own standard to complement Envision in the future. These tools can prolong the life cycles of our infrastructure and mitigate possible disaster events.

After decades of neglect, the U.S. – once considered to have the best infrastructure network in the world – had fallen to a ranking of 13th best infrastructure according to the World Economic Forum (WEF). The U.S. has the highest-ranked infrastructure in the Americas according to the WEF ranking, with the next highest ranking in the region being that of Chile at 42nd.

To combat these declining conditions, the U.S. federal government finally took steps towards improving its infrastructure networks and addressing the resilience components of its vital structures by passing the Infrastructure Investment and Jobs Act (IIJA) in 2021, followed by the Inflation Reduction Act of 2022. The IIJA is the largest federal investment in U.S. infrastructure systems in history, totaling \$1.2 trillion over five years to improve the country’s surface transportation networks, energy grid, water infrastructure systems, broadband coverage, and more. The bill also dedicates more than \$50 billion strictly for making infrastructure more resilient and safeguarding communities from flooding, drought, wildfires, severe storms, and more.

The Inflation Reduction Act is the largest U.S. bill aimed at addressing climate change in the nation’s history. The bill invests \$369 billion for energy security and climate change programs, which are expected to lead to a 40 percent reduction in carbon emissions by 2030 and boost domestic energy production and manufacturing. This means more U.S. jobs and increased energy independence. Communities across the nation have experienced unreliable energy service due to increasingly severe and unpredictable weather patterns and surging capacity needs, making the need for a grid capable of withstanding extreme conditions with a reduced carbon footprint even more essential.

These investments could not have come at a more critical time. Every four years since 1998, ASCE releases its renowned *Infrastructure Report Card*, an assessment of 17 categories of U.S. infrastructure systems produced by a committee of industry leaders volunteering their time and expertise. In its more recent report, the *2021 Report Card for America's Infrastructure*, the U.S. received a cumulative grade of “C-.” Eleven of the 17 categories in the Report Card received a grade in the 'D' range: aviation, dams, hazardous waste, inland waterways, levees, public parks, roads, schools, stormwater, transit, and wastewater. The report, which was released eight months prior to the passage of the IJJA, estimated that the U.S. was set to underinvest in its infrastructure systems by roughly \$2.6 trillion over a 10-year span.

The ASCE Infrastructure Report Card grades are based on eight key criteria: capacity, condition, funding future need, operation and maintenance, public safety, resilience, and innovation. When considering resilience for each of the 17 categories, the report analyzes the sector's overall capability to prevent or protect against significant multi-hazard threats and incidents. The resilience criteria also consider how quickly the infrastructure network is able to recover and resume critical services with minimum consequences for public safety and health.

In its recommendations to raise the “C-” grade, ASCE calls for a focus on resilience by enabling communities to develop and institute their own resilience pathway for their infrastructure portfolios. Streamlining asset management techniques, implementing life cycle cost analysis into routing planning processes, and integrating climate change projections into long-term capital improvement plans can accomplish this goal, as can incentivizing and enforcing the use of ASCE's codes and standards. Improving land use planning to strike a balance between the built and natural environments and enhancing natural or “green” infrastructure are also a part of the Society's recommendations to raise the grade.

ASCE's report card program has expanded to include state report cards, with more than 40 U.S. states and provinces being represented by a recent report card emulating the national report. Puerto Rico released its *2019 Report Card for Puerto Rico's Infrastructure* in November 2019, assigning the island a cumulative grade of “D-”. The report made headlines for featuring the first category to receive a failing grade of “F” since the report card series began. Energy received the failing grade, citing frequent blackouts and an inability to withstand severe weather impacts, as was the case in the aftermath of Hurricane Maria. This report card has been used to advocate to policymakers for a more resilient infrastructure network by incorporating the latest materials, regularly collecting and aggregating data, and most importantly, building according to adequate codes and standards.

Through codes and standards, regularly updated and widely distributed reports, industry partnerships and workshops, and global advocacy efforts, ASCE and its network of 150,000 civil engineers are working to address current and future challenges presented by a changing climate. Building a more resilient infrastructure network can mitigate climate hazards and better protect the public for decades to come. ASCE will continue to work with industry leaders to develop the best practices for climate resilient infrastructure and will continue advocating to policymakers that these practices be implemented in communities around the world.

CAMBIO CLIMÁTICO Y CÓMO LA ASCE ESTÁ AYUDANDO A NUESTRAS COMUNIDADES A ADAPTARSE

Marsia Geldert-Murphey, P.E., F. ASCE

Presidenta Electa de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles ASCE para 2023
Presidenta de la Junta Asesora de la Industria del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Estatal de Dakota del Sur



La aceleración del cambio climático alrededor del mundo está amenazando las redes de infraestructura existentes de las cuales dependemos día a día. De acuerdo a la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), en 2022 hubo 18 desastres climáticos que causaron al menos \$1 billón en daños en los Estados Unidos (EE.UU.). La tercera cantidad mayor de desastres que costaron miles de millones de dólares en un año desde que la NOAA comenzó a darles seguimiento en 1980.

En 2021, la cantidad de eventos de desastres de miles de millones de dólares fue de 20, y en 2020, EE.UU. experimentó un récord de 22 eventos de este tipo. En los últimos cinco años (2018-2022), EE.UU. experimentó desastres de 89,000 millones de dólares que resultaron en más de \$600,000 millones en daños y 1,751 muertes, o aproximadamente 350 por año. Compare estas cifras con los 67 eventos de este tipo en la década del 2000, que resultaron en \$587 mil millones en daños, y los 55 eventos de este tipo en la década de 1990 y está claro que los desastres relacionados con el clima ocurren con mayor frecuencia y tienen costos cada vez más severos.

De manera similar, según la Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanos, OCHA, América Latina y el Caribe es la segunda región más propensa a desastres en el mundo con más de 152 millones de habitantes afectados por 1,205 desastres naturales entre 2000-2019. La mayoría de estas fueron inundaciones, con un total de 548 durante ese lapso. En 12 ocasiones entre 2000 y 2019, las inundaciones en la región causaron más de mil millones de dólares en daños totales. Aunque el número de muertos por inundaciones específicamente ha sido relativamente bajo en esta región, otros desastres como terremotos, huracanes y deslizamientos de tierra han causado un número significativo de muertes. El catastrófico terremoto de Haití en 2010 causó más de 222,000 muertes, mientras que las tormentas tropicales han causado más de 5,000 muertes y los deslizamientos de tierra han provocado más de 3,000 muertes.

El aumento del nivel del mar y el aumento de las tasas de precipitación están contribuyendo a graves inundaciones, mientras que los huracanes y los tornados ocurren con mayor frecuencia y devastan comunidades, incluidas algunas que anteriormente no habían enfrentado estos desastres ambientales. Combatir estas tendencias requiere que los desarrolladores incorporen materiales y prácticas resilientes para garantizar que el entorno construido pueda resistir los peligros ambientales omnipresentes. Los edificios en ciudades como Miami, EE. UU., que están amenazados por el aumento del nivel del mar y los huracanes, deberán cumplir con requisitos que puedan contrarrestar esas amenazas, mientras que las ciudades de gran altitud América del Sur como Bogotá y Colombia, tendrán requisitos diferentes.

A medida que las amenazas climáticas se han intensificado, también lo ha hecho la necesidad de incorporar datos de escenarios climáticos actuales y futuros en códigos de construcción, estándares de diseño y políticas públicas. Los ingenieros, diseñadores, planificadores y legisladores deben incorporar la resiliencia del sistema en el proceso de toma de decisiones. Esto requiere que los formuladores de políticas se centren en soluciones a largo plazo en lugar de costos iniciales, que a menudo pueden convertirse en un obstáculo importante, pero ahorrarán dinero a las comunidades a largo plazo.

Las tormentas cada vez más fuertes que enfrenta nuestra infraestructura han cambiado los requisitos y expectativas de los proyectos. Cuando el próximo "gran evento" golpee a una comunidad, una variedad de factores determinará qué estructuras sufrirán el mayor daño. Muchos propietarios de infraestructura ahora solicitan incluir requisitos climáticos en el diseño. Desafortunadamente, lo que está sucediendo ahora, como resultado, es que los diseñadores e ingenieros se ven obligados a improvisar y están pidiendo códigos y estándares actualizados para ayudarlos.

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), representa a más de 150,000 ingenieros civiles en todo el mundo y está especialmente preparada para brindar capacitación y divulgación sobre la necesidad de actualizar los códigos de construcción y educar a los funcionarios estatales y locales sobre los estándares que pueden aumentar la resiliencia. La ASCE tiene una red de ingenieros a los que se puede recurrir para brindar capacitación, comunicarse con los legisladores y educar a las comunidades sobre los beneficios de los códigos y estándares.

La ASCE ha desarrollado códigos de construcción y estándares de diseño únicos para los desafíos de cada comunidad en todo el mundo. El ASCE 7 es el estándar profesional más utilizado de la Sociedad y una herramienta fundamental en el compromiso de un ingeniero civil de proteger la salud, la seguridad y el bienestar del público. Esta herramienta le dice al ingeniero que diseñe edificios para resistir ciertos peligros, como vientos fuertes, actividad sísmica, inundaciones y más. El estándar se ha mantenido durante más de 20 años como la fuente autorizada de especificaciones de cargas y criterios relacionados que utilizan los ingenieros para diseñar estructuras seguras, económicas y confiables. Este estándar es actualizado de forma cíclica por cientos de ingenieros civiles y estructurales profesionales, investigadores, funcionarios de edificios y profesionales de la construcción, y la edición más reciente se publicó a finales de 2021 (*ASCE/SEI 7-22 Cargas mínimas de diseño y criterios asociados para Edificación y Otras Estructuras*).

La edición más reciente incluye los primeros criterios para el diseño resistente a tornados. La nueva actualización también se basa en métodos actualizados para cargas de nieve más precisas e incluye un nuevo espectro sísmico multipunto para todos los sitios. El ASCE 7-22 ahora requiere el uso de datos digitales identificados de forma única en bases de datos geográficas específicas de amenazas. Los datos digitales están disponibles a través de acceso abierto desde la herramienta de peligro ASCE 7. Esta herramienta de amenazas brinda una forma rápida y confiable de buscar datos de amenazas para siete amenazas ambientales, que incluyen viento, sísmica, hielo, lluvia, nieve, inundación y tsunami. Cualquier persona de todo el mundo tiene acceso a la herramienta de peligro ASCE 7.

La publicación de ASCE Infraestructura Resistente al Clima (MOP 140) incluye una discusión de métodos analíticos para describir el clima, incluidos posibles cambios y eventos extremos, para la planificación y el diseño de ingeniería de los entornos naturales y construidos. Los numerosos comités y expertos de la ASCE están trabajando en disposiciones y recomendaciones para promover el diseño de infraestructura sostenible que se incluirán en los estándares, manuales de práctica y directrices publicados.

Si bien estos estándares son esenciales para proteger al público, lo mismo se puede decir sobre la necesidad de actualizar y distribuir datos relevantes con los modelos climáticos más actuales, que no solo son críticos para el desarrollo de estándares, sino también para que los ingenieros tengan la información que necesitan. necesitan tomar decisiones de diseño informadas. En 2021, la ASCE firmó un memorando de entendimiento con la Universidad de Maryland (UMD) y la NOAA para identificar y recopilar datos climáticos que ayudarán a informar los futuros estándares de la ASCE. En febrero de 2023, ASCE se unió a estas organizaciones para celebrar la primera Cumbre sobre Infraestructura Preparada para el Clima y analizar cómo la profesión de ingeniería de la nación puede tener en cuenta el cambio climático en el diseño y la construcción de futuros proyectos de infraestructura y edificación. En la Cumbre se dio a conocer un nuevo memorando de entendimiento (MOU) con NOAA, que detalla las formas en que la ciencia y los productos de NOAA se utilizarán para informar los códigos, estándares y mejores prácticas de construcción e ingeniería civil desarrollados por ASCE.

NOAA tiene herramientas para rastrear patrones de precipitación en todo el mundo, incluidos EE. UU., el Caribe, América Central, México y América del Sur. Estos datos permiten que las regiones se preparen para fuertes lluvias o sequías en el transcurso de una semana, un mes o una temporada completa. La NOAA también ha desarrollado mapas interactivos de riesgo de marejadas ciclónicas del Centro Nacional de Huracanes para analizar la vulnerabilidad a inundaciones por marejadas ciclónicas en áreas costeras propensas a huracanes. El mapa incluye los EE. UU., Puerto Rico, Guam, las Islas Vírgenes de los EE. UU., La Española y partes de la Península de Yucatán. Herramientas como estas pueden ayudar a informar a los tomadores de decisiones y alentarlos a seguir estándares de diseño que protegerán a las poblaciones en riesgo.

La colaboración continua entre ASCE y NOAA también se centrará en las desigualdades en la resiliencia climática. Las comunidades de bajos ingresos sufren más daños y corren un mayor riesgo ante eventos extremos. Además, los efectos del cambio climático en las poblaciones vulnerables se ven agravados con frecuencia por la exacerbación de otros riesgos, como las inundaciones tierra adentro, las islas de calor urbanas y la mala calidad del aire. Para abordar

estas desigualdades, la NOAA y la ASCE trabajarán juntas para identificar las necesidades particulares de infraestructura resiliente al clima en comunidades urbanas, rurales y de bajos ingresos, por ejemplo.

En octubre de 2022, ASCE continuó su dedicación para abordar el cambio climático mediante la celebración de un Taller de Impactos Climáticos del Instituto de Ingeniería Estructural, una serie de eventos diseñados para conectar a los líderes de ASCE con científicos y socios climáticos líderes, incluido NOAA, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) y la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA), para trabajar en estándares climáticos avanzados que podrían integrarse en la próxima incorporación de ASCE 7, que se lanzará en 2028 (y posteriormente será reconocido como ASCE 7-28) . La Junta Directiva de la Sociedad aprobó recomendaciones para mantener los estándares de ASCE actualizados con los últimos desarrollos sobre el cambio climático para que los ingenieros de todo el mundo puedan comenzar a integrar estas prácticas en los diseños de infraestructura. ASCE 7-28, pondrá en práctica esta recomendación y actuará como una guía para la infraestructura preparada para el clima en el futuro.

Las actualizaciones e integración de datos sobre el cambio climático también deberán ir más allá de ASCE 7. ASCE 24-14: Mejora del desempeño de edificios y estructuras en áreas de riesgo de inundación, aborda los requisitos mínimos de diseño y construcción para estructuras ubicadas en áreas de riesgo de inundación. Estas áreas se basan en estudios y mapas de amenazas, pero muchos de estos mapas están desactualizados y no incluyen proyecciones climáticas actuales que tengan en cuenta el aumento del nivel del mar y los patrones de precipitación modernos.

La ASCE 24-14 se actualizó por última vez en 2014 y se centra en la resiliencia a las inundaciones de 100 años, que describe una inundación que tiene un uno por ciento de probabilidad de afectar un área en un año determinado. Un área que tiene un uno por ciento de probabilidad de inundación se encuentra en la llanura aluvial de 100 años. La ASCE está trabajando en un complemento del Capítulo 5 de ASCE 7 sobre inundaciones, de modo que el estándar adopte perspectivas de inundación de 500 años ahora que estos eventos se han vuelto más comunes. Una inundación de 500 años se describe como una inundación que tiene una probabilidad del 0,2%, o 1 en 500, de ocurrir en un año determinado. Como se mencionó anteriormente, las Américas han sufrido inundaciones severas con una frecuencia cada vez mayor en las últimas dos décadas, lo que justifica que se realicen ajustes en la forma en que los ingenieros abordan la planificación y construcción de infraestructuras propensas a inundaciones.

Actualizar los códigos y estándares es importante, pero adoptarlos y hacerlos cumplir es otra cuestión completamente diferente. El programa de normas de la ASCE se audita periódicamente para garantizar el cumplimiento de las Reglas de la ASCE para los comités de normas y que sea coherente con los requisitos del Instituto Nacional Estadounidense de Normas (ANSI). En sus programas de Asistencia para la Mitigación de Riesgos (HMA), FEMA utiliza el ASCE 24-14, o la última edición, para establecer requisitos mínimos de diseño y construcción para la elevación de estructuras, impermeabilización en seco y reconstrucción de mitigación. Los edificios y estructuras dentro del alcance del Código Internacional de Construcción (IBC) propuestos para ubicarse en cualquier área de riesgo de inundación deben diseñarse de acuerdo con ASCE 24.

La versión más reciente de ASCE 7 (ASCE 7-22) también ha sido adoptada por el IBC. Sin embargo, la versión de ASCE 7 que usa una región depende de la versión de IBC que hayan adoptado. Hasta la fecha, los adoptantes del IBC y, por lo tanto, del ASCE 7 incluyen a Colombia, Jamaica, México, Tobago, Trinidad y EE.UU. Es difícil medir qué tan estrictamente se aplican estos estándares, pero los estándares más nuevos combinados con una aplicación firme ayudarán a mantener seguras a las comunidades.

Cuando una serie de terremotos catastróficos, de 7.8 y 7.5 en la escala de magnitud, golpeó la frontera de Turquía y Siria en febrero de 2023, más de 40,000 residentes murieron a pesar de que varias comunidades adoptaron estrictos estándares sísmicos. Sin embargo, las investigaciones encontraron que la aplicación de estos estándares era inconsistente. Turquía no impone observaciones de construcción independientes, sino que permite que el contratista proporcione sus propias evaluaciones. Esto llevó a que muchos edificios en la región no se construyeran de acuerdo con los estándares sísmicos que podrían haber evitado que las estructuras se derrumbaran. En Turquía, el gobierno ha proporcionado “amnistías de construcción”, a cambio de pago, a estructuras construidas sin los últimos estándares de seguridad. Hasta 75,000 edificios en la zona afectada por el terremoto en el sur de Turquía han recibido amnistías de construcción. Los desastres sísmicos que azotaron la región en febrero subrayan la importancia de adherirse a los códigos y estándares más estrictos destinados a hacer que las estructuras sean más resistentes.

La aplicación también puede variar dentro de los EE. UU., razón por la cual la ASCE trabaja con los legisladores estatales para educarlos sobre los estándares más actualizados y los beneficios de la herramienta de mapeo de peligros de la Sociedad. Las comunidades que se adhieren a los estándares ASCE más estrictos han tenido mucho más éxito en evitar catástrofes que aquellas que optan por renunciar a estos estándares. Por ejemplo, en noviembre de 2018, Anchorage, Alaska, sufrió un terremoto de magnitud 7.1. Las áreas con códigos de construcción actualizados experimentaron daños mínimos y no hubo fatalidades. De las 40 estructuras alrededor de Anchorage que experimentaron daños en el evento de 2018, solo una de ellas estaba ubicada dentro de la región que requiere el uso de los estándares ASCE 7. Si bien los códigos y estándares más estrictos no pueden garantizar una protección total contra eventos catastróficos como terremotos, huracanes o tornados, pueden mejorar la probabilidad de que las estructuras afectadas permanezcan estables durante el evento.

En 2010, la ASCE, junto con la Asociación Estadounidense de Obras Públicas (APWA), el Consejo Estadounidense de Empresas de Ingeniería (ACEC) y el Programa Zofnass para Infraestructura Sostenible de la Escuela de Posgrado en Diseño de la Universidad de Harvard, establecieron el Instituto de Infraestructura Sostenible (ISI). ISI proporciona los recursos y las guías necesarios para garantizar que todos los proyectos de infraestructura se construyan para que sean sostenibles, resilientes y equitativos. Para lograr esto, ISI desarrolló, gestiona y administra Envision, un marco holístico y un sistema de clasificación que examina la sostenibilidad y la resiliencia de la infraestructura civil. ISI capacita y acredita a las partes interesadas en la industria de la arquitectura, la ingeniería y la construcción en Envision, mientras que un programa de verificación de terceros califica los proyectos.

Hasta la fecha, Envision es la única herramienta integral en América del Norte que puede ayudar a las agencias públicas y privadas a brindar infraestructura que aborde el cambio climático, las necesidades de salud pública, la justicia ambiental y la creación de empleo. Envision se ha aplicado a más de 100 proyectos de infraestructura con un valor colectivo de más de \$106 mil millones. Esta herramienta es aplicable a cualquier tipo de proyecto de infraestructura, ya sea de banda ancha, energía, transporte, agua o residuos. Envision utiliza una "jerarquía de mitigación" para priorizar los pasos que se toman al construir infraestructura civil:

- **Evitación** – medidas tomadas desde el principio para evitar la creación de impactos ambientales negativos.
- **Minimización** – medidas adoptadas para reducir la duración, la intensidad o el alcance de los impactos que no pueden evitarse.
- **Disminución** – medidas adoptadas para rehabilitar ecosistemas degradados.
- **Compensación** – medidas tomadas para compensar cualquier impacto adverso residual.

La "Jerarquía de Mitigación" de Envision está destinada a mejorar las protecciones ambientales al mismo tiempo que conserva los recursos y promueve el bienestar social. Nuestro futuro depende de una infraestructura resiliente y, como ingenieros civiles, estamos pensando en construir una infraestructura que dure cien años o más. La ASCE se enorgullece de trabajar en su propio estándar para complementar a Envision en el futuro. Estas herramientas pueden prolongar los ciclos de vida de nuestra infraestructura y mitigar posibles eventos de desastre.

Después de décadas de abandono, EE. UU., que alguna vez se consideró que tenía la mejor red de infraestructura del mundo, había caído al puesto 13 entre las mejores infraestructuras según el Foro Económico Mundial (WEF). EE.UU. tiene la infraestructura mejor clasificada en las Américas según la clasificación WEF, y la siguiente clasificación más alta en la región es la de Chile en el puesto 42.

Para combatir estas condiciones en declive, el gobierno federal de EE. UU. finalmente tomó medidas para mejorar sus redes de infraestructura y abordar los componentes de resiliencia de sus estructuras vitales al aprobar la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleos (IIJA) en 2021, seguida de la Ley de Reducción de la Inflación de 2022. El IIJA es la inversión federal más grande en la historia de los sistemas de infraestructura de EE. UU., con un total de \$ 1.2 billones durante cinco años para mejorar las redes de transporte de superficie del país, la red de energía, los sistemas de infraestructura de agua, la cobertura de banda ancha y más. El proyecto de ley también dedica más de \$ 50 mil millones estrictamente para hacer que la infraestructura sea más resistente y proteger a las comunidades de inundaciones, sequías, incendios forestales, tormentas severas y más.

La Ley de Reducción de la Inflación es el mayor proyecto de ley de EE. UU. destinado a abordar el cambio climático en la historia de la nación. El proyecto de ley invierte \$ 369 mil millones en programas de seguridad energética y cambio climático, que se espera que conduzcan a una reducción del 40 por ciento en las emisiones de carbono para

2030 e impulsen la producción y fabricación de energía doméstica. Esto significa más empleos en los EE. UU. y una mayor independencia energética. Las comunidades de todo el país han experimentado un servicio de energía poco confiable debido a patrones climáticos cada vez más severos e impredecibles y necesidades de capacidad crecientes, lo que hace que la necesidad de una red capaz de soportar condiciones extremas con una huella de carbono reducida sea aún más esencial.

Estas inversiones no podrían haber llegado en un momento más crítico. Cada cuatro años desde 1998, ASCE publica su renombrado Informe de infraestructura, una evaluación de 17 categorías de sistemas de infraestructura de EE. UU. producida por un comité de líderes de la industria que ofrecen su tiempo y experiencia como voluntarios. En su informe más reciente, el Boletín de calificaciones de 2021 para la infraestructura de EE. UU. recibió una calificación acumulada de "C-". Once de las 17 categorías en el Report Card recibieron una calificación en el rango 'D': aviación, represas, desechos peligrosos, vías navegables interiores, diques, parques públicos, carreteras, escuelas, aguas pluviales, tránsito y aguas residuales. El informe, que se publicó ocho meses antes de la aprobación del IJJA, estimó que EE. UU. estaba destinado a invertir menos de \$2,6 billones en sus sistemas de infraestructura en un lapso de 10 años.

Las calificaciones de la boleta de calificaciones de infraestructura de la ASCE se basan en ocho criterios clave: capacidad, condición, necesidades futuras de financiamiento, operación y mantenimiento, seguridad pública, resiliencia e innovación. Al considerar la resiliencia para cada una de las 17 categorías, el informe analiza la capacidad general del sector para prevenir o proteger contra amenazas e incidentes significativos de amenazas múltiples. El criterio de resiliencia también considera qué tan rápido la red de infraestructura puede recuperar y reanudar los servicios críticos con consecuencias mínimas para la seguridad y la salud pública.

En sus recomendaciones para elevar la calificación "C-", la ASCE pide un enfoque en la resiliencia al permitir que las comunidades desarrollen e instituyan su propio camino de resiliencia para sus carteras de infraestructura. La simplificación de las técnicas de gestión de activos, la implementación del análisis de costos del ciclo de vida en los procesos de planificación de enrutamiento y la integración de las proyecciones del cambio climático en los planes de mejora de capital a largo plazo pueden lograr este objetivo, al igual que incentivar y hacer cumplir el uso de los códigos y estándares de ASCE. Mejorar la planificación del uso de la tierra para lograr un equilibrio entre los entornos construidos y naturales y mejorar la infraestructura natural o "verde" también son parte de las recomendaciones de la Sociedad para elevar la calificación.

El programa de boletas de calificaciones de la ASCE se ha ampliado para incluir boletas de calificaciones estatales, con más de 40 estados y provincias de EE. UU. representados por una boleta de calificaciones reciente que emula el informe nacional. Puerto Rico publicó su Boleta de calificaciones de 2019 para la infraestructura de Puerto Rico en noviembre de 2019, asignando a la isla una calificación acumulativa de "D-". El informe llegó a los titulares por presentar la primera categoría en recibir una calificación reprobatoria de "F" desde que comenzó la serie de boletas de calificaciones. Energy recibió la calificación reprobatoria, citando apagones frecuentes y la incapacidad de resistir los impactos del clima severo, como fue el caso después del huracán María. Esta boleta de calificaciones se ha utilizado para abogar ante los formuladores de políticas por una red de infraestructura más resistente mediante la incorporación de los materiales más recientes, la recopilación y agregación periódica de datos y, lo que es más importante, la construcción de acuerdo con los códigos y estándares adecuados.

A través de códigos y estándares, informes actualizados regularmente y ampliamente distribuidos, asociaciones y talleres de la industria y esfuerzos de defensa global, ASCE y su red de 150,000 ingenieros civiles están trabajando para abordar los desafíos actuales y futuros que presenta un clima cambiante. Construir una red de infraestructura más resiliente puede mitigar los peligros climáticos y proteger mejor al público en las próximas décadas. ASCE continuará trabajando con los líderes de la industria para desarrollar las mejores prácticas para una infraestructura resiliente al clima y seguirá abogando ante los legisladores para que estas prácticas se implementen en comunidades de todo el mundo.

ANÁLISIS COMPARATIVO TENSIONAL EN CODOS DE SISTEMAS DE CAÑERÍAS APLICANDO EL MARGEN NORMATIVO DE SEGURIDAD¹

Alejandro José Giudici², Nicolás Federico Wechselberg³,
José Enrique Stuardi⁴, Guillermo Daniel Chiappero⁵

RESUMEN: Los codos son componentes en los sistemas de tuberías cuya función principal es lograr un cambio en la dirección del flujo. Su estudio es relevante, ya que presentan niveles de tensión superiores a los observados en tramos rectos. Las primeras investigaciones determinaron que esto es causado por el efecto de ovalización y la presencia de momentos externos. La capacidad de ovalización de una sección transversal cuando se aplican cargas externas da como resultado una mayor flexibilidad de los codos al disminuir el momento de inercia en comparación con una tubería recta. En este trabajo se estudian los niveles de tensión en codos provocados por momentos externos y presiones internas. Como caso de estudio se propone una serie de codos de varios diámetros y espesores con características adecuadas para la comprensión del fenómeno de la ovalización y la comparación de diferentes metodologías de cálculo. Los esfuerzos obtenidos aplicando los códigos ASME B31.1 y ASME B31.3 se comparan con los obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, a través de un novedoso indicador denominado Margen Normativo de Seguridad. Este indicador considera los esfuerzos admisibles establecidos por las especificaciones para los materiales de los accesorios. Aplicando el Código B31.1 se obtienen márgenes normativos de seguridad superiores a los obtenidos con el B31.3. Para toda la serie en estudio y todo tipo de cargas aplicadas, se obtuvieron menores márgenes normativos de seguridad cuando los accesorios son más flexibles.

Palabras claves: codos, Margen Normativo de Seguridad, métodos numéricos, normas, ovalización

COMPARATIVE STRESS ANALYSIS OF ELBOWS IN PIPING SYSTEMS APPLYING THE NORMATIVE SAFETY MARGIN

ABSTRACT: Elbows are components in piping systems whose primary function is to achieve a change in flow direction. Their study is relevant, since they present higher stress levels than those observed in straight sections. Early investigations determined that this effect is caused by the ovalization effect and the presence of external moments. The capacity of a cross section to ovalize when external loads are applied results in increased flexibility of the elbows by decreasing the moment of inertia compared to a straight pipe. In this work, stress levels in elbows caused by external moments and internal pressure are studied. As a case study, a series of elbows of various diameters and thicknesses with suitable characteristics for understanding the phenomenon of ovalization and the comparison of different calculation methodologies is proposed. The stresses obtained by applying the ASME B31.1 and ASME B31.3 codes are compared with those obtained by a numerical model of finite elements, through a novel indicator called the Normative Safety Margin. This indicator considers the admissible stresses established by the specifications for the materials of the accessories. Applying B31.1 Code, higher normative safety margins are obtained than those obtained with B31.3. For the entire series under study and all types of applied loads, lower normative safety margins were obtained when the accessories are more flexible.

Keywords: elbows, Normative Safety Margin, numerical methods, standards, ovalization

¹ Artículo recibido el 10 de agosto de 2022 y aceptado para publicación el 13 de abril de 2023.

² Profesor Titular, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina. E-mail: ajjudici@unc.edu.ar

³ Aspirante a Adscripto, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: nicolas.wechselberg@mi.unc.edu.ar

⁴ Profesor Titular, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: jose.stuardi@unc.edu.ar

⁵ Profesor Adjunto, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. E-mail: guillermo.chiappero@unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Los codos y curvas se utilizan en los sistemas de cañerías y su función principal es lograr un cambio de dirección del flujo. Es habitual que en estos elementos se presenten niveles de tensión superiores a los observados en los tramos rectos, por ello en la bibliografía de esta temática, se recomienda un análisis tensional más detallado.

Los estudios realizados por Von Kármán (1911) sobre estos accesorios determinaron que una de las causas principales de los elevados niveles de tensión es el efecto de ovalización provocado por la presencia de momentos externos. La ovalización de la sección transversal cuando se aplican cargas externas da como resultado un aumento de la flexibilidad de los codos y curvas en comparación con la cañería recta, y su consecuente aumento de las deformaciones y de los niveles de tensión. Von Kármán introdujo las nociones de "factor de flexibilidad" y "factor de intensificación de la tensión" para comparar estos aumentos de flexibilidad y tensión respecto a las de una cañería recta equivalente. Clark y Reissner (1951) y Rodabaugh y George (1957), formalizaron los factores de flexibilidad e intensificación de tensiones que se introdujeron en el análisis convencional de los sistemas de cañerías. Códigos y normas, tales como los ASME B31.1 y ASME B31.3, consideran el efecto de la ovalización de los codos y curvas de la tubería mediante el uso de estos factores, los cuales permanecen sin cambios hasta la actualidad. Es importante destacar que estos factores se obtuvieron para el caso específico de un momento flector de cierre en el plano y presión interna; pero se utilizan, generalmente sin modificación, para momentos flectores de apertura en el plano, momentos flectores fuera del plano y momentos torsores.

A lo largo de las últimas décadas, se presentaron numerosos trabajos que comparan las tensiones en codos y curvas calculadas con los factores de intensificación normativos con valores experimentales y/o determinados por el método de los elementos finitos (MEF). En general estos trabajos, tratan casos específicos, tanto en la geometría de los accesorios como en las cargas aplicadas, por ello sus resultados se limitan a los casos tratados (Sobel, 1977; Quezon, 1984, Matzen y Yu, 1998; Lubis y Boyle, 2004, Shi et al., 2010, Kireev et al., 2013, Abdulhameed et al., 2017, Jacimovic, 2018, Jacimovic et al., 2021).

OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo del trabajo es estudiar los estados tensionales en codos provocados por la presencia de momentos externos y presión interna del fluido que transportan los sistemas de cañerías.

Se plantea como caso de estudio una serie de codos de diversos diámetros y espesores de pared que presentan características adecuadas para el análisis y comprensión de fenómeno de la ovalización, la comparación de las metodologías de cálculo y la discusión de los resultados obtenidos. Se comparan los resultados calculados mediante la aplicación de los códigos y normas vigentes con aquellos obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, a fin de profundizar el estudio de los estados tensionales en estos elementos y determinar los márgenes de seguridad que se obtienen de esa comparación, según las cargas aplicadas.

CASO DE ESTUDIO

Los codos de la serie que se estudian son de 90° y radio largo (RL) y dimensionalmente responden a la norma ASME B16.9 (2018). Se tomaron tres diámetros nominales típicos para cañería, 150 mm (6"), 300 mm (12") y 600 mm (24"). En la Figura 1 se muestra las dimensiones características de los codos, donde t_n es el espesor nominal del codo, R es el radio de curvatura y r es el radio medio del codo.

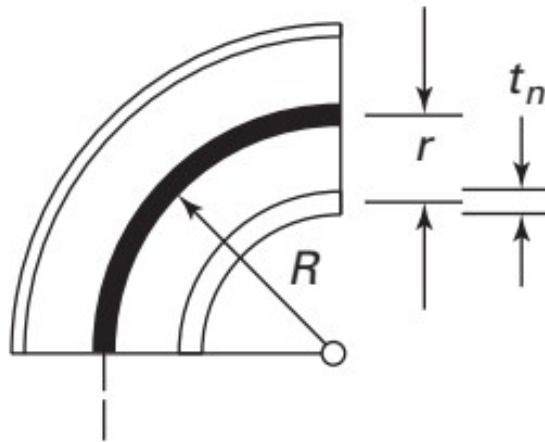


Figura 1: Codo para soldar (ASME B31.1, 2020).

En la Tabla 1 se detallan las características dimensionales de los codos seleccionados en la serie.

Tabla 1: Codos de la serie de 90° y radio largo (RL).

Diámetro nominal (D_n) (mm/")	150 / 6		300 / 12		600 / 24	
Diámetro externo (D_o) (mm)	168,3		323,8		610	
Espesor nominal (t_n) (mm)	2,77	7,11	3,96	9,53	6,35	17,48
Denominación espesor	Sch.5	Sch.40 - STD	Sch.5	STD	Sch.10	Sch.40
Radio medio (r) (mm)	82,8	80,6	159,9	157,1	301,8	296,3
Radio de curvatura R (mm) (RL)	229,0		457,0		914,0	
Flexibilidad característica (h)	0,093	0,251	0,071	0,176	0,064	0,182

La flexibilidad característica h es un parámetro que indica la capacidad de flexionarse que tiene un codo, y se define como:

$$h = \frac{t_n R}{r^2} \quad (1)$$

En la Tabla 1 se puede observar que, para cada diámetro, se seleccionaron codos de “baja y alta” flexibilidad característica; esto para incluir en la serie un rango amplio de codos desde el punto de vista de su flexibilidad.

El material constitutivo de los codos de la serie es acero API 5L X52, típico de los sistemas de cañerías, cuya tensión de fluencia es $S_y = 360$ MPa y tensión de rotura $S_u = 455$ MPa. Además, se adopta como módulo de Young $E = 206.000$ MPa y módulo de Poisson $\nu = 0,3$.

Las cargas aplicadas, tanto la presión interna P como los momentos M , son relacionadas con la tensión de fluencia considerando las tensiones que ellas provocan en el codo y evitando aplicar cargas excesivas.

Para determinar el rango de presiones a aplicar en el codo se utiliza la fórmula de Barlow, que define la tensión circunferencial S_c provocada sólo por la presión interna P :

$$S_c = \frac{P D_o}{2 t_n} \Rightarrow P = \frac{2 S_c t_n}{D_o} \quad (2)$$

El rango de tensiones circunferenciales propuesto y consecuentemente el rango de presiones adoptado es:

$$0 \leq S_c \leq 0,5 S_y \Rightarrow 0 \leq P \leq \frac{360 t_n}{D_o} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Para determinar el rango de momentos a aplicar en el codo se utiliza la fórmula de tensión simple (asumiendo en primera instancia la presencia de solo un momento flector) para determinar la tensión longitudinal S_l :

$$S_l = \frac{M}{Z} \Rightarrow M = S_l Z \quad (4)$$

donde Z es el módulo resistente de la sección anular del codo: $Z = \pi r^2 t_n$

El rango tensiones longitudinales propuesto y consecuentemente el rango de momentos adoptados son:

$$0 \leq S_l \leq 0,2 S_y \Rightarrow 0 \leq M \leq 72 Z \text{ [Nmm]} \quad (5)$$

Es importante destacar que en este trabajo se adoptan los espesores nominales establecidos por la norma ASME B16.9 (2018) para determinar los parámetros geométricos y las tensiones establecidas por los códigos estudiados, si bien los espesores reales encontrados habitualmente en los codos fabricados exceden los nominales.

DETERMINACIÓN DE TENSIONES APLICANDO LOS CÓDIGOS VIGENTES

En este punto se presenta la metodología utilizada para la determinación de las tensiones existentes en un codo de acuerdo con los rangos de presiones internas y momentos adoptados.

En los dos códigos estudiados, ASME B31.1 y ASME B31.3, las verificaciones previstas tratan las tensiones circunferenciales y longitudinales de manera independiente. A modo de ejemplo, se presenta la metodología para determinar las tensiones según el Código ASME B31.1, indicando que los resultados obtenidos para el otro código resultan de aplicar sus correspondientes verificaciones.

A partir de la verificación de la norma respecto al espesor mínimo requerido t_m para una curva, se determina la tensión circunferencial:

$$t_m = \frac{P D_o}{2(S E / I + P y)} + A \quad (6)$$

donde: S es la tensión admisible del material a la temperatura de diseño, E es el factor de eficiencia de junta, en este caso es $E = 1$ teniendo en cuenta que estos accesorios son forjados; y es un factor que depende el tipo de material y la temperatura de trabajo, en este caso $y = 0,4$; A es el espesor adicional, se adopta $A = 0$ e I es el factor de multiplicación debido a la curvatura, que para la parte interna de la curva es: $I = (4(R/D_o) - 1) / (4(R/D_o) - 2)$.

De acuerdo con lo indicado, la tensión circunferencial puede ser despejada de la ecuación 6 considerando el espesor nominal de los codos t_n :

$$S_c = \left(\frac{P D_o}{2 t_n} - P y \right) I \quad (7)$$

Para la tensión longitudinal S_l , se adopta la siguiente expresión del código:

$$S_l = \frac{P D_o}{4 t_n} + \frac{C_i M}{Z} \quad (8)$$

donde: $C_i = \text{mayor}(1; 0,75 i)$, i es el factor de intensificación de tensiones y M es el momento resultante aplicado.

El factor de intensificación de tensiones i se define:

$$i = \frac{0,9}{h^{2/3}} \quad (9)$$

El momento resultante aplicado M resulta de considerar todos los posibles momentos presentes en la sección en estudio: el momento en el plano del codo M_i , el momento flector fuera de plano del codo M_o y el momento torsor M_t (ver Figura 2):

$$M = \sqrt{(M_i)^2 + (M_o)^2 + (M_t)^2} \quad (10)$$

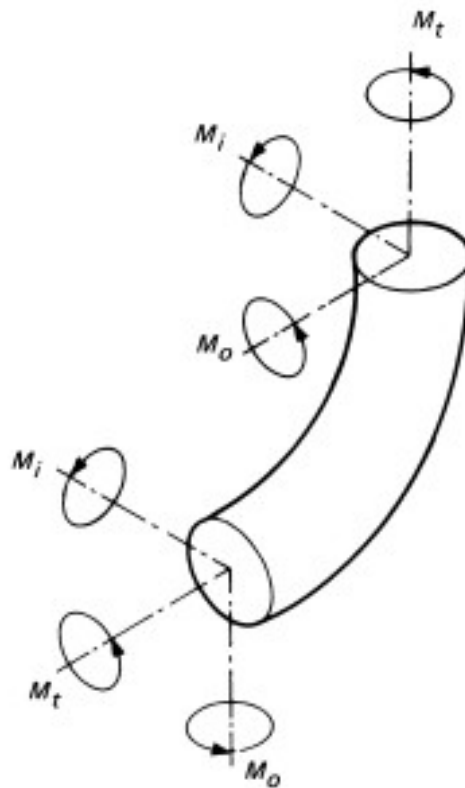


Figura 2: Momentos aplicados de los extremos del codo o curva (ASME B31.1, 2020).

En codos y curvas de gran diámetro y de pared delgada, se debe considerar que la presión interna puede disminuir el factor de intensificación de tensiones i . En tal caso se aplica el factor de intensificación de tensiones ajustado i_p :

$$i_p = \frac{i}{1 + 3,25 (P/E_y) (r/t_n)^{5/2} (R/r)^{2/3}} \quad (11)$$

donde E_y es el módulo de Young.

Tanto la tensión circunferencial S_c como la tensión longitudinal S_l deben resultar menores o iguales a la tensión admisible a máxima temperatura de trabajo S_h :

$$S_c \leq S_h \quad ; \quad S_l \leq S_h \quad (12)$$

En este trabajo se adopta como máxima temperatura de trabajo la correspondiente a la temperatura de ambiente, entonces $S_h = S$.

Las tensiones admisibles para los materiales establecidas en este Código ASME B31.1, sigue los lineamientos adoptados en el Apéndice 1 de la Parte D del Código ASME BPVC.II (2021). Para el tipo de acero adoptado para los codos de la serie estudiada (API 5L X52), la tensión admisible es:

$$S = \frac{S_u}{3,5} \Rightarrow S = 130 \text{ [MPa]} \quad (13)$$

DETERMINACIÓN DE TENSIONES APLICANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

Para el análisis numérico de la serie de codos en estudio se utilizó el método de los elementos finitos (MEF) empleando un software comercial. La configuración utilizada en este trabajo es un codo de 90° de RL que está unido en sus extremos a dos tramos de cañería recta (ver la Figura 3). Esta configuración es frecuentemente utilizada para estudiar el comportamiento mecánico de codos y curvas (Abdulhameed et al., 2017). La longitud de cada uno de los tramos rectos L es diez veces el diámetro exterior de la cañería ($L = 10 D_o$), de modo que el codo no sea afectado por las condiciones de apoyo de los extremos del modelo (Matzen y Yu, 1998).

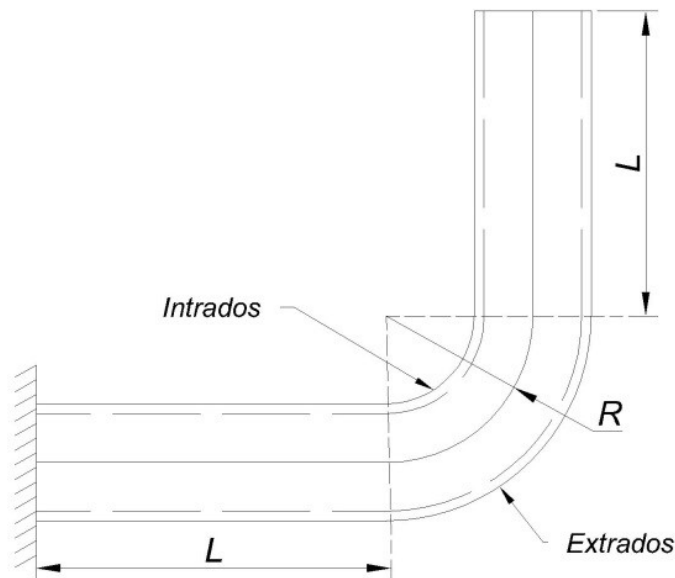


Figura 3: Configuración adoptada para el análisis numérico.

Para facilitar la definición de las condiciones de borde se generaron dos puntos de referencia RP-1 y RP-2 situados en el eje longitudinal y en las respectivas secciones transversales de apoyo, como se muestra en la Figura 4. Estos puntos están vinculados a cada una de las secciones extremas del modelo (bordes rojos) mediante una restricción de acoplamiento cinemático, que permite el desplazamiento radial de las secciones finales de la cañería (ver Figuras 5 y 6).

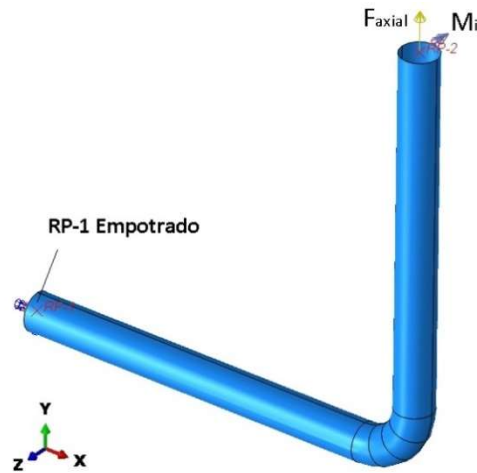


Figura 4: Modelo para el análisis numérico.

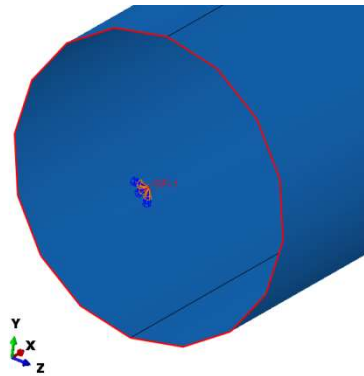


Figura 5: Detalle condición de apoyo. RP-1 empotrado.

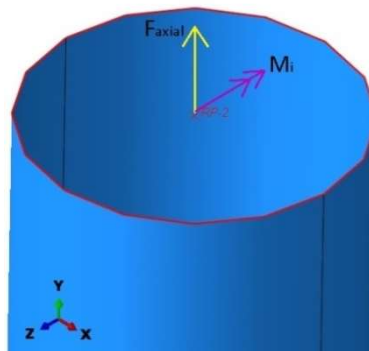


Figura 6: Detalle condición de borde. Cargas aplicadas en RP-2.

Respecto a los apoyos y las cargas, el punto de referencia RP-1 se lo define como empotrado, mientras que en el punto de referencia RP-2 se aplican los momentos externos. La presión se incorpora en la cara interior del conjunto. Es importante destacar que la aplicación de la presión en la cara interna del codo genera una fuerza que tiende a “enderezar” el modelo, esto se lo conoce como “efecto Bourdon”. El origen de esta fuerza es la mayor superficie expuesta a la presión interna que tiene el codo en su parte exterior, “extrados” respecto a la parte interior “intrados” (ver Figura 3). Para equilibrar la componente vertical de esta fuerza se aplica una fuerza axial en el punto de referencia RP-2 y la componente horizontal se equilibra en el punto de empotramiento RP-1.

Tanto el codo como los tramos rectos se modelan utilizando elementos de cáscara cuadrilátero de cuatro nodos con integración reducida. El tamaño de la malla se densifica en el codo para captar más adecuadamente las variaciones en deformaciones y tensiones (ver Figura 7). Se utiliza un material elástico lineal para el modelo en estudio.

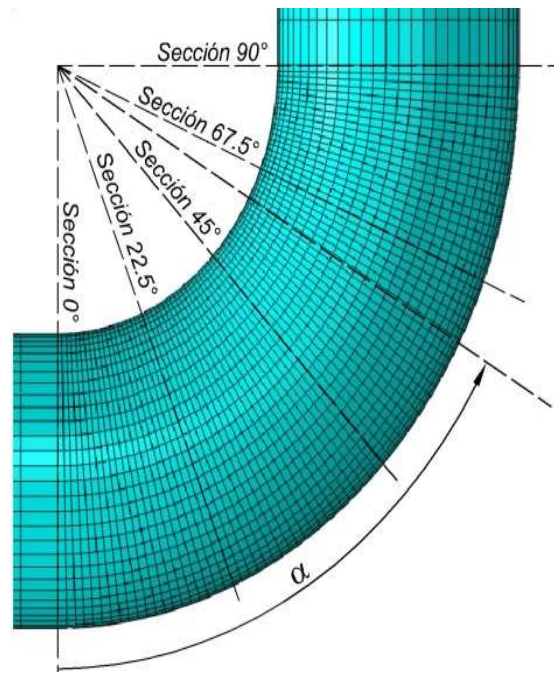


Figura 7: Detalle del modelo del codo y sus secciones transversales con indicación del ángulo α .

Las tensiones que se consideran para este trabajo son las circunferenciales, longitudinales y de Von Mises obtenidas del modelo en las distintas secciones perpendiculares al desarrollo del codo (Cook y Young, 1999). Además, se analizan las tensiones en las fibras exteriores, interiores e intermedias según el espesor de elemento para las distintas secciones α en el plano XY y para distintos puntos de su sección transversal (ver Figura 7).

La Figura 8 representa una sección del codo, donde el sector interior (intradós) se lo ubica a $\varphi = 0^\circ$ y el exterior (extradós) a $\varphi = 180^\circ$.

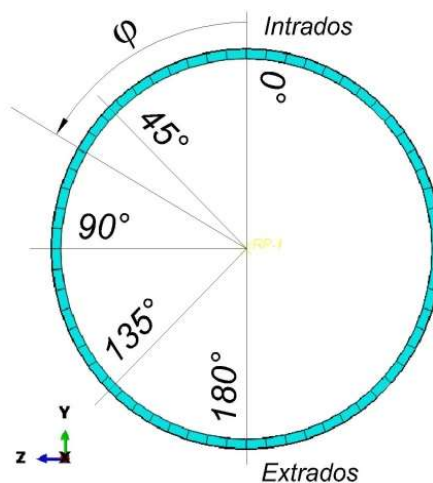


Figura 8: Sección del codo con indicación del ángulo φ .

Para las distintas configuraciones de la serie en estudio, la sección más comprometida del codo es la sección $\alpha = 45^\circ$. En las Figuras 9, 10 y 11 se muestran las tensiones circunferenciales, longitudinales y de Von Mises presentes en la sección $\alpha = 45^\circ$ de un codo de $D_n = 300$ mm (12"), $t_n = 9,53$ mm, con un momento flector en el plano del codo de $M_i = 2,66 \times 10^7$ N mm (corresponde a $M = 36 Z$, según la ecuación 5), que provoca la apertura del conjunto (ver Figura 4), presión interna $P = 10,6$ MPa (corresponde a $P = 360 t_n / D_o$, según la ecuación 3) y como fuerza axial $F = 8,71 \times 10^5$ N. Con color verde se indica las tensiones en las fibras interiores, con color azul las tensiones en las fibras exteriores y con rojo las tensiones de las fibras medias.

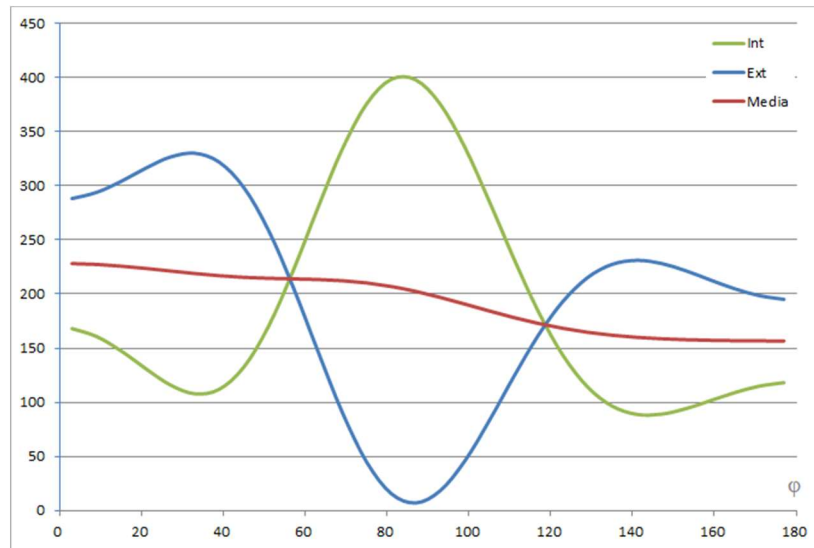


Figura 9: Tensiones circunferenciales (MPa) en codo de 300 mm (sección $\alpha = 45^\circ$).

Cuando el momento flector aplicado tiende a cerrar el conjunto, es decir es de sentido opuesto al caso anterior, las tensiones circunferenciales y longitudinales, tienen la misma magnitud, pero de signo opuesto, es decir que las curvas resultantes se presentan espejadas respecto al eje de abscisas para las Figuras 9 y 10, mientras que las tensiones de Von Mises presentan el mismo comportamiento que el mostrado en la Figura 11.

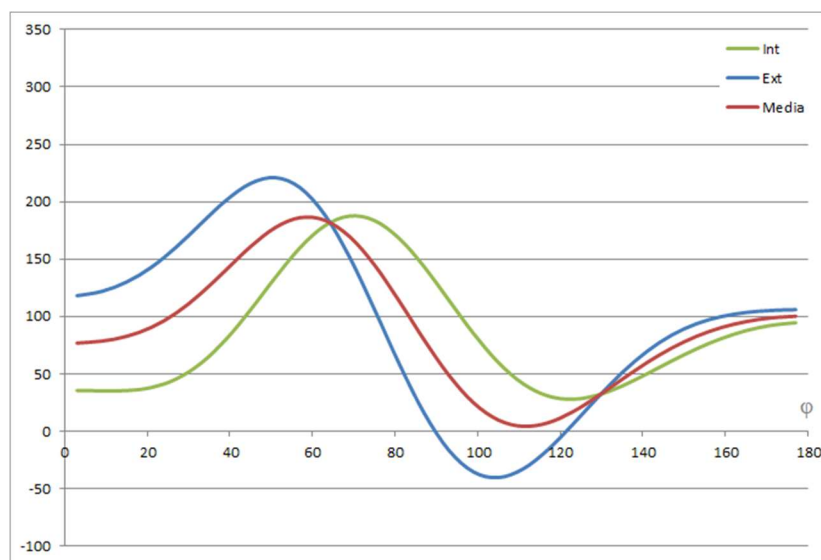


Figura 10: Tensiones longitudinales (MPa) en codo de 300 mm (sección $\alpha = 45^\circ$).

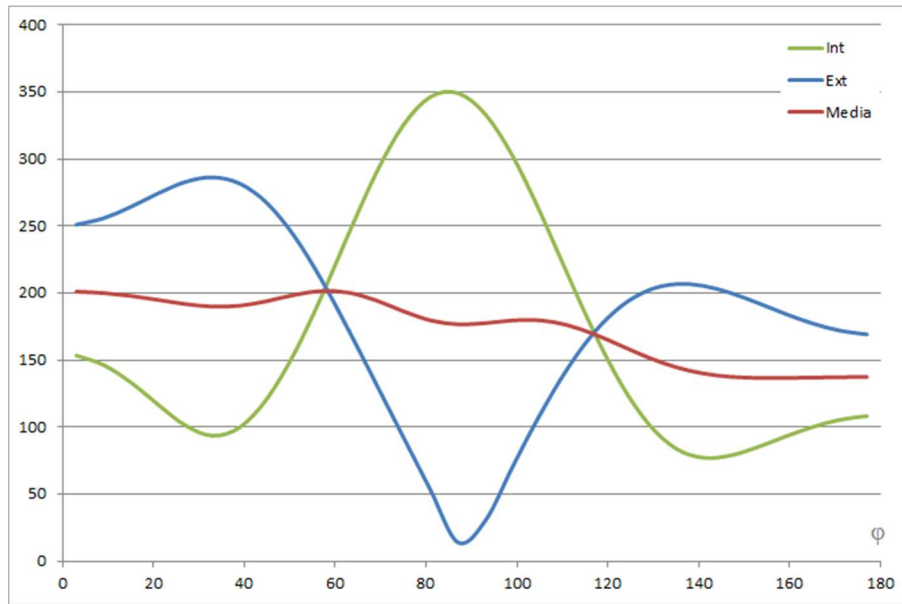


Figura 11: Tensiones de Von Mises (MPa) en codo de 300 mm (sección $\alpha = 45^\circ$).

En la Figura 12, se presenta el codo de 300 mm donde se muestra las tensiones de Von Mises en las fibras internas; mientras que en la Figura 13, se muestra las tensiones de Von Mises en las fibras externas.

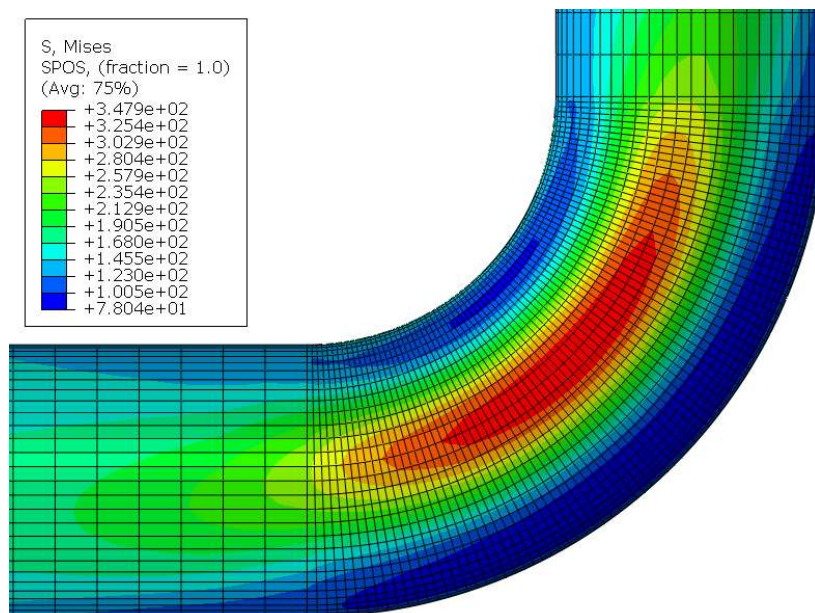


Figura 12: Detalle del codo y las tensiones de Von Mises en las fibras internas.

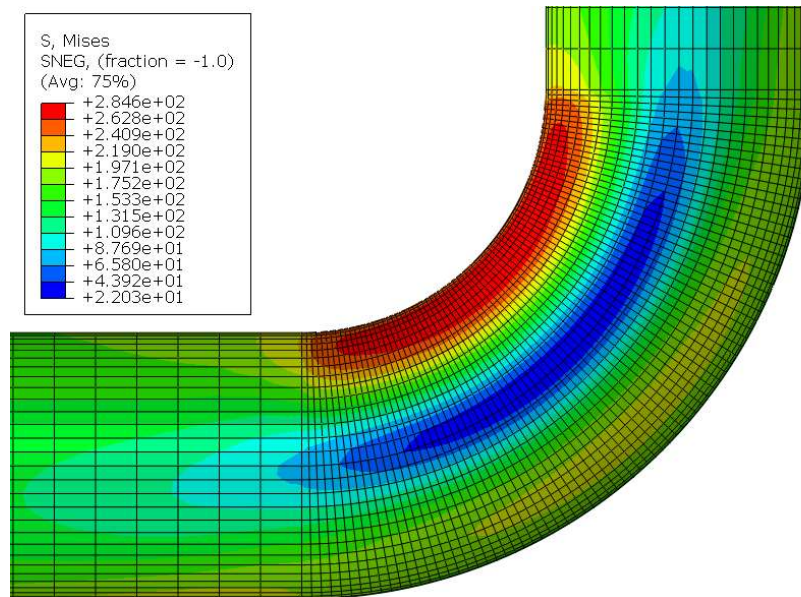


Figura 13: Detalle del codo de 300 mm y las tensiones de Von Mises en las fibras externas.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Para comparar los resultados calculados mediante la aplicación de los códigos AB31.1 o ASME B31.3 con aquellos obtenidos por el MEF se define un indicador que llamaremos Margen Normativo de Seguridad (*MNS*). Este índice compara dos relaciones de tensiones, en el numerador la relación calculada por la aplicación del código y en el denominador la relación que incluye la tensión obtenida por MEF, de la siguiente manera:

$$MNS = \frac{\text{mayor}(S_c, S_l)/S}{S_{VM}/S_u} \quad (14)$$

La relación correspondiente al código considera la mayor de las tensiones, circunferencial S_c o longitudinal S_l , calculadas en un punto del codo frente a la tensión admisible S establecida por dicho código (ver ecuaciones 12 y 13). La relación en el denominador considera la tensión obtenida por el MEF respecto a la tensión de rotura S_u del material.

Así definido, el *MNS* es un parámetro de control que permite evaluar el nivel de seguridad de los códigos estudiados frente a los resultados numéricos de los casos de estudio. En un punto del accesorio, si el *MNS* es mayor a uno se puede asegurar que cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código que se está aplicando, la tensión de Von Mises no supera la tensión de rotura S_u del material. Por otra parte, el *MNS* menor a uno indica que la tensión de Von Mises ha superado la tensión de rotura S_u del material aun cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código.

En primera instancia se comparan los resultados obtenidos por la aplicación de los códigos estudiados, ASME B31.1 y ASME B31.3 y los correspondientes al MEF, para el caso del codo de $D_n = 300$ mm (12”), espesores t_n igual a 3,96 mm y 9,53 mm, con presión interna P y un momento flector en el plano del codo (M_i) variables en el rango de estudio.

En las Tablas 2 y 3 se comparan las tensiones resultantes de la aplicación creciente de las cargas externas. En la columna 1 se indica la presión interna aplicada creciente en el codo dentro del rango establecido en la ecuación 3 y en la columna 2 se presenta el momento flector aplicado creciente dentro del

rango establecido en la ecuación 5. En las columnas 3 y 4 se muestran las tensiones circunferenciales y longitudinales determinadas por el Código ASME B31.1 y la relación de la mayor de ellas (columna 5) con la tensión admisible del material (columna 6). Para este código la tensión admisible es $S = 130$ MPa, según la ecuación 13. Además, se incluye las máximas tensiones de Von Mises S_{VM} , en el codo obtenidas por el MEF (columna 7) y su relación con la tensión de rotura del material $S_u = 455$ MPa (columna 8). En la columna 9 se presenta el MNS que surge de la relación entre las columnas 6 y 8

Tabla 2: Comparación de tensiones en codos de $D_n = 300$ mm (12”) y $t_n = 3,96$ mm – Código ASME B31.1 y MEF.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
P (MPa)	M_i (Nmm)	S_c	S_l	mayor (S_c, S_l) (a)	(a) / S (%) (b)	S_{VM}	S_{VM} / S_u (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	71	71	55%	179	39%	1,39
	36 Z	0	142	142	109%	358	79%	1,39
	54 Z	0	213	213	164%	536	118%	1,39
	72 Z	0	284	284	218%	714	157%	1,39
90 t_n/D_o	0	56	23	56	43%	50	11%	3,90
	18 Z	56	75	75	58%	216	47%	1,22
	36 Z	56	127	127	98%	395	87%	1,12
	54 Z	56	179	179	138%	573	126%	1,09
	72 Z	56	231	231	178%	750	165%	1,08
180 t_n/D_o	0	111	45	111	85%	101	22%	3,86
	18 Z	111	86	111	85%	253	56%	1,53
	36 Z	111	127	127	98%	433	95%	1,03
	54 Z	111	168	168	129%	610	134%	0,96
	72 Z	111	209	209	161%	787	173%	0,93
270 t_n/D_o	0	167	67	167	128%	151	33%	3,88
	18 Z	167	101	167	128%	291	64%	2,01
	36 Z	167	135	167	128%	470	103%	1,24
	54 Z	167	169	169	130%	647	142%	0,91
	72 Z	167	203	203	156%	825	181%	0,86
360 t_n/D_o	0	223	90	223	172%	201	44%	3,88
	18 Z	223	119	223	172%	330	73%	2,36
	36 Z	223	148	223	172%	508	112%	1,54
	54 Z	223	177	223	172%	685	150%	1,14
	72 Z	223	206	223	172%	862	189%	0,91

Tabla 3: Comparación de tensiones en codos de $D_n = 300$ mm (12") y $t_n = 9,53$ mm - Código ASME B31.1 y MEF.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
P (MPa)	M_i (Nmm)	S_c	S_t	mayor (S_c , S_t) (a)	(a) / S (%) (b)	S_{VM}	S_{VM} / S_u (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	39	39	30%	96	21%	1,42
	36 Z	0	77	77	59%	192	42%	1,40
	54 Z	0	116	116	89%	288	63%	1,41
	72 Z	0	155	155	119%	384	84%	1,41
$90 t_n/D_o$	0	55	23	55	42%	50	11%	3,81
	18 Z	55	58	58	45%	135	30%	1,51
	36 Z	55	93	93	72%	231	51%	1,41
	54 Z	55	128	128	98%	327	72%	1,37
	72 Z	55	164	164	126%	423	93%	1,36
$180 t_n/D_o$	0	110	45	110	85%	101	22%	3,82
	18 Z	110	77	110	85%	174	38%	2,21
	36 Z	110	110	110	85%	270	59%	1,43
	54 Z	110	142	142	109%	366	80%	1,36
	72 Z	110	175	175	135%	462	101%	1,33
$270 t_n/D_o$	0	165	67	165	127%	151	33%	3,81
	18 Z	165	98	165	127%	213	47%	2,71
	36 Z	165	128	165	127%	309	68%	1,87
	54 Z	165	157	165	127%	404	89%	1,43
	72 Z	165	188	188	145%	500	110%	1,32
$360 t_n/D_o$	0	220	90	220	169%	202	44%	3,81
	18 Z	220	118	220	169%	253	56%	3,05
	36 Z	220	146	220	169%	348	76%	2,21
	54 Z	220	174	220	169%	444	97%	1,74
	72 Z	220	202	220	169%	539	119%	1,43

En las tablas anteriores están resaltadas en verde aquellas celdas entre las cuales se alcanza la tensión admisible a medida que crecen las cargas aplicadas. A partir de las celdas mencionadas se obtiene el MNS para las distintas combinaciones de cargas (en azul). Se aprecia que el MNS varía entre 1,03 y 1,41. Como se indicó precedentemente, estos valores en el MNS aseguran que ningún punto del codo llegará a la tensión de rotura S_u del material. Para los casos donde la presión interna es $P = 270 t_n/D_o$ o $P = 360 t_n/D_o$, la tensión calculada por el código supera la tensión admisible (celdas en amarillo) por lo cual en estos tramos no se realiza la comparación.

En las Tablas 4 y 5 se comparan los resultados obtenidos por la aplicación del Código B31.3 y los correspondientes al MEF. Se observa que el MNS varía entre 0,82 y 1,21 cuando se alcanza la tensión admisible según este código. La tensión admisible establecida por este Código ASME B31.3 para el material adoptado API 5L X52 es $S = 152$ MPa.

Tabla 4: Comparación de tensiones en codos de $D_n = 300$ mm (12") y $t_n = 3,96$ mm – Código ASME B31.3 y MEF.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
P (MPa)	M_i (Nmm)	S_c	S_t	mayor (S_c, S_t) (a)	(a) / S (%) (b)	S_{VM}	S_{VM} / S_u (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	71	71	47%	179	39%	1,19
	36 Z	0	142	142	93%	358	79%	1,19
	54 Z	0	213	213	140%	536	118%	1,19
	72 Z	0	284	284	187%	714	157%	1,19
$90 t_n/D_o$	0	56	23	56	37%	50	11%	3,33
	18 Z	56	75	75	49%	216	47%	1,04
	36 Z	56	127	127	84%	395	87%	0,96
	54 Z	56	179	179	118%	573	126%	0,94
	72 Z	56	231	231	152%	750	165%	0,92
$180 t_n/D_o$	0	111	45	111	73%	101	22%	3,30
	18 Z	111	86	111	73%	253	56%	1,31
	36 Z	111	127	127	84%	433	95%	0,88
	54 Z	111	168	168	111%	610	134%	0,82
	72 Z	111	209	209	138%	787	173%	0,79
$270 t_n/D_o$	0	167	67	167	110%	151	33%	3,31
	18 Z	167	101	167	110%	291	64%	1,72
	36 Z	167	135	167	110%	470	103%	1,06
	54 Z	167	169	169	111%	647	142%	0,78
	72 Z	167	203	203	134%	825	181%	0,74
$360 t_n/D_o$	0	223	90	223	147%	201	44%	3,32
	18 Z	223	119	223	147%	330	73%	2,02
	36 Z	223	148	223	147%	508	112%	1,31
	54 Z	223	177	223	147%	685	150%	0,97
	72 Z	223	206	223	147%	862	189%	0,77

El mismo estudio se realiza para los casos de codos de: a) $D_n = 150$ mm (6"), espesores t_n igual a 2,77 mm y 7,11 mm y b) $D_n = 600$ mm (24"), espesores t_n igual a 6,35 mm y 17,48 mm, con presión interna P y un momento flector en el plano del codo (M_i) variables en los rangos de estudio.

En la Tabla 6 se presentan los rangos del MNS , para los Códigos ASME B31.1 y ASME B31.3, obtenidos en los codos de diámetros, espesores y flexibilidad característica h , indicados en la Tabla 1, con cargas aplicadas de presión interna P y momento flector en el plano del codo (M_i), variables en los rangos de estudio.

Tabla 5: Comparación de tensiones en codos de $D_n = 300$ mm (12”) y $t_n = 9,53$ mm - Código ASME B31.3 y MEF.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
P (MPa)	M_i (Nmm)	S_c	S_i	mayor (S_c, S_i) (a)	(a) / S (%) (b)	S_{VM}	S_{VM} / S_u (%) (c)	$MNS = (b) / (c)$
0	0	0	0	0	0%	0	0%	
	18 Z	0	39	39	26%	96	21%	1,21
	36 Z	0	77	77	51%	192	42%	1,20
	54 Z	0	116	116	76%	288	63%	1,20
	72 Z	0	155	155	102%	384	84%	1,21
$90 t_n/D_o$	0	55	23	55	36%	50	11%	3,26
	18 Z	55	58	58	38%	135	30%	1,29
	36 Z	55	93	93	61%	231	51%	1,21
	54 Z	55	128	128	84%	327	72%	1,17
	72 Z	55	164	164	108%	423	93%	1,16
$180 t_n/D_o$	0	110	45	110	72%	101	22%	3,26
	18 Z	110	77	110	72%	174	38%	1,89
	36 Z	110	110	110	72%	270	59%	1,22
	54 Z	110	142	142	93%	366	80%	1,16
	72 Z	110	175	175	115%	462	101%	1,14
$270 t_n/D_o$	0	165	67	165	109%	151	33%	3,26
	18 Z	165	98	165	109%	213	47%	2,32
	36 Z	165	128	165	109%	309	68%	1,60
	54 Z	165	157	165	109%	404	89%	1,22
	72 Z	165	188	188	124%	500	110%	1,12
$360 t_n/D_o$	0	220	90	220	145%	202	44%	3,26
	18 Z	220	118	220	145%	253	56%	2,61
	36 Z	220	146	220	145%	348	76%	1,89
	54 Z	220	174	220	145%	444	97%	1,48
	72 Z	220	202	220	145%	539	119%	1,22

Tabla 6: Rangos del margen normativo de seguridad (MNS), con presión interna P y un momento flector en el plano del codo (M_i), variables en los rangos de estudio.

Diámetro nominal (D_n) (mm ^{nom})	150 / 6		300 / 12		600 / 24	
Diámetro externo (D_o) (mm)	168,3		323,8		610	
Espesor nominal (t_n) (mm)	2,77	7,11	3,96	9,53	6,35	17,48
Denominación espesor	Sch.5	Sch.40 – STD	Sch.5	STD	Sch.10	Sch.40
Flexibilidad característica h	0,093	0,251	0,071	0,176	0,064	0,182
Rangos MNS – ASME B31.1	1,20 -1,41	1,42 -1,48	1,03 -1,39	1,36 -1,41	0,93 -1,38	1,36 -1,40
Rangos MNS – ASME B31.3	0,97 -1,20	1,20 -1,24	0,82 -1,19	1,16 -1,21	0,74 -1,18	1,15 -1,20

Para completar el estudio, se aplica el rango de momentos no solo en el plano del codo (M_i), sino momentos flectores aplicados fuera del plano (M_o), momentos torsores (M_t) y una combinación de los tres momentos mencionados anteriormente. La combinación de momentos corresponde al caso cuyos módulos son $|\overline{M}_j| = \sqrt{3}/3$ por lo tanto el vector final se ubica a 45° de los ejes principales.

En la Tabla 7 se presentan los rangos del *MNS*, para los Códigos ASME B31.1 y ASME B31.3, obtenidos para el diámetro $D_n = 300$ mm (12”), con cargas aplicadas de presión interna P y un momento según lo indicado precedentemente.

Tabla 7: Rangos del margen normativo de seguridad (*MNS*), con presión interna P , momento flector aplicado fuera del plano (M_o), momento torsor (M_t) y combinaciones de los tres momentos, variables en los rangos de estudio.

Diámetro nominal (D_n) (mm/”)	300 / 12					
Diámetro externo (D_o) (mm)	323,8					
Espesor nominal (t_n) (mm)	3,96	9,53	3,96	9,53	3,96	9,53
Denominación espesor	Sch.5	STD	Sch.5	STD	Sch.5	STD
Flexibilidad característica h	0,071	0,176	0,071	0,176	0,071	0,176
Carga aplicada	Momento flector fuera del plano (M_o)		Momento torsor (M_t)		Combinación de los tres momentos (M_i , M_o y M_t)	
Rangos <i>MNS</i> – ASME B31.1	1,45 -2,28	1,83 -2,12	1,45 -2,28	1,82 -2,12	1,35 -2,07	1,87 -2,16
Rangos <i>MNS</i> – ASME B31.3	1,09 -1,63	1,36 -1,51	0,49 -0,76	0,84 -0,99	0,98-1,36	1,38 -1,47

De la observación de las Tablas 6 y 7, surge en primera instancia que los *MNS* obtenidos con el Código B31.1 son mayores respecto a los del Código B31.3. En casi todos los casos estos son mayores a uno (con la única excepción correspondiente a los codos de 600 mm (24”) de mayor flexibilidad), llegando a valores mayores a 2 cuando las cargas son momento flector fuera del plano M_o , momento torsor M_t o combinación de los tres momentos (M_i , M_o y M_t).

Los *MNS* obtenidos con el Código B31.3 son menores a los del Código B31.1, siendo una de las causas principales, la mayor tensión admisible establecida por el Código B31.3 para el material seleccionado.

Además, los diferentes coeficientes de intensificación de tensiones (o su distinta aplicación) en los códigos en estudio, pueden dar como resultado tensiones de trabajo distintas, frente a la aplicación de las mismas cargas. Esto sucede cuando se aplica momento flector fuera del plano M_o o momento torsor M_t ; en estos casos aplicando el Código B31.1 se obtienen tensiones de trabajo mayores a los resultados obtenidos por el otro código. Esto trae como consecuencia que los *MNS* del Código B31.1 sean los mayores.

Por otra parte, para todos los diámetros de los codos y todos los tipos de cargas aplicadas, los *MNS* son menores cuando los accesorios presentan menor flexibilidad característica h . Esto indica que cuando los codos tienen más condiciones para la ovalización (menor h) los resultados obtenidos por los códigos son menos conservativos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron los estados tensionales en codos provocados por la presencia de momentos externos y presión interna del fluido que transportan los sistemas de cañerías.

Se planteó como caso de estudio una serie de codos de diversos diámetros y espesores de pared con características adecuadas para el análisis y comprensión del fenómeno de la ovalización. Se compararon los resultados obtenidos mediante la aplicación de los códigos ASME B31.1 y ASME B31.3 con los obtenidos por un modelo numérico de elementos finitos, con el objetivo de profundizar el estudio de los estados tensionales en estos elementos y visualizar los márgenes de seguridad presentes según las cargas aplicadas.

Se definió como margen normativo de seguridad (*MNS*) a la relación de tensiones establecida por los códigos ASME con la relación de tensiones de Von Mises calculadas por MEF y la tensión de rotura del material, de manera de definir un parámetro de control que indique la presencia de tensiones de rotura no detectadas mediante los cálculos normativos. De esta forma, un *MNS* mayor a uno asegura que cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código que se está aplicando, la tensión de Von Mises no supera la tensión de rotura S_u del material. En cambio, cuando el *MNS* es menor a uno indica que la tensión de Von Mises ha superado la tensión de rotura del material aun cuando se cumplan las verificaciones previstas en el código.

Se concluyó que los márgenes normativos de seguridad obtenidos con el Código B31.1 son mayores respecto a los del Código B31.3, siendo una de las causas principales la mayor tensión admisible establecida por el Código B31.3 para el material seleccionado. Se determinó que los márgenes normativos de seguridad son afectados por los diferentes coeficientes de intensificación de tensiones (o su distinta aplicación) según el código en estudio, pudiendo dar como resultado tensiones de trabajo distintas, frente a la aplicación de las mismas cargas; en todos los casos aplicando el Código B31.1 se obtienen tensiones de trabajo mayores a los resultados obtenidos por el otro código.

Para toda la serie en estudio y todos los tipos de cargas aplicadas, se obtuvieron menores márgenes normativos de seguridad cuando los accesorios tenían menor flexibilidad característica, es decir cuando los codos tienen más condiciones para la ovalización. Se concluye que los códigos estudiados son menos conservativos para los accesorios más flexibles.

Como conclusión general se indica que en casi toda la serie de codos en estudio y con todos los tipos de cargas aplicadas, el cumplimiento de las verificaciones pedidas por el Código ASME B31.1 garantizó que en estos accesorios no se supere la tensión de rotura del material. Cuando se aplica el Código B31.3 se observó que, en los casos donde los codos son flexibles o la carga aplicada principal es momento torsor, se presentaron sectores en los codos que superan la tensión de rotura del material. La seguridad en estos casos quedaría librada a la existencia de sobre espesores, los que son habituales en la fabricación de los accesorios o a otros fenómenos, tal como la redistribución de tensiones. Por lo expuesto, se considera necesario tener en cuenta lo expuesto anteriormente y eventualmente realizar un análisis con métodos numéricos en aquellos casos donde los niveles de tensión obtenidos por el Código B31.3 superan el 80% de la tensión admisible, o cuando el esfuerzo predominante es la torsión.

REFERENCIAS

- Abdulhameed D., Martens, M., Roger Cheng, J.J. y Adeeb, S. (2017). "Investigation of Smooth Pipe Bends under the Effect of In-Plane Bending". *Proceedings of the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference*. PVP2017 - 65818.
- ASME B16.9 (2018). "Factory-Made Wrought Butt Welding Fittings", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- ASME B31.1 (2020). "Power Piping", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- ASME B31.3 (2020). "Process Piping", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- ASME BPVC II (2021). "Boiler and Pressure Vessel Code, Section II", American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- Clark, R.A. y Reissner, E. (1951). "Bending of Curved Tubes". *Advances in Applied Mechanics*. Vol. II, pp. 93-122.
- Cook, R.D. y Young, W.C. (1999). "Advanced Mechanics of Materials", Prentice Hall, New Jersey, NJ, USA.
- Jacimovic, N. (2018). "Analysis of Piping Stress Intensification Factors based of Numerical Models". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 163, pp. 8–14.
- Jacimovic, N., Ivancic, Z. y Ivošević, M. (2021). "Finite element analysis of 90-degree pipe elbow sustained stress indices". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol.192, 104401.
- Kireev, O., Kireev, D. y Berkovsky, A. (2013). "Parametric Study of Flexibility Factor for Curved Pipe and Welding Elbows". *Transactions of 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, San Francisco, California, USA
- Lubis, A. y Boyle, J.T. (2004). "The Pressure Reduction Effect in Smooth Piping Elbows – Revisited". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 81, pp. 119–125.
- Matzen, B.C. y Yu, L. (1998). "Elbow Stress Indices using Finite Element Analysis". *Nuclear Engineering and Design*. Vol.181, pp. 257–65.
- Quezon, A.J. (1984). "Effect of Internal Pressure on Flexibility and Stress Intensification Factors for Pipe Elbows Analyzed by the Finite Element Method". Report DTNSRDC/CMLD-84/19, David Taylor Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, Maryland, USA.
- Rodabaugh, E.C. y George, H.H. (1957). "Effect of internal pressure on flexibility and stress-intensification factors of curved pipes or welding elbows". *Transactions of the ASME*. Vol.79. pp. 939–948.
- Shi, J., Lee, G., Blythe, D., Buckland, J., Lie, Y. y Soanes, T. (2010). "Stress Predictions at Elbow Ends under Internal Pressure and System Moments". *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference*. PVP2010 - 25055.
- Sobel, L.H. (1977). "In Plane Bending of Elbow". *Computers & Structures*. Vol. I, pp. 701-715.
- Von Karman, Th. (1911). "Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleich Rohre", *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*. Vol. 55, Part 2. pp. 1889-1895

RESEÑA DE AUTORES



A. Giudici

*I*ngeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina y Magister en Dirección de Empresas egresado de la Universidad Católica de Córdoba, Argentina. Es Profesor Titular concursado, en la Cátedra Cálculo Estructural II, para las carreras de Ingenierías Mecánica, Mecánica Electricista y Aeronáutica, en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Además, es Docente Investigador, en el marco del Programa de Incentivos a docentes investigadores de Universidades Nacionales de Argentina; participando en diversos proyectos de investigación en el área de la ingeniería mecánica. Cuenta con publicaciones en revistas con referato y presentaciones en congresos nacionales e internacionales. Las líneas de investigación son: a) Seguridad de los sistemas de distribución de gas y su entorno. b) Análisis estructural de componentes mecánicos, utilizando simulación numérica y técnicas experimentales. Ha desarrollado su actividad profesional en empresas de distribución y transporte de gas, tales como Gas del Estado S.E. y Distribuidora de Gas del Centro S.A. de Argentina. Además, trabajos de consultoría a empresas constructoras en el desarrollo de proyectos de instalaciones específicas para la provisión de gas.



N. Wechselberg

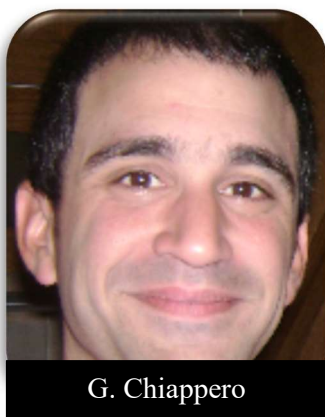
*I*ngeniero Mecánico e Ingeniero Electromecánico egresado de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Es Aspirante a Adscripto de la asignatura Cálculo Estructural II (IM-IME) del Departamento de Estructuras correspondiente a la/s carrera/s Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecánica Electricista. La línea de trabajo es la modelación y cálculo de componentes mecánicos en código de análisis estructural avanzado y su verificación experimental en laboratorio de los casos estudiados. Desarrolla su actividad profesional en empresa ligada a energía eléctrica con proyectos electromecánicos de baja y media tensión.

RESEÑA DE AUTORES (CONT.)



J. Stuardi

*I*ngeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina y Doctor en Ciencias de la Ingeniería egresado de la Universidad Técnica de Berlín, Alemania. Profesor Titular concursado en la Cátedra Vibraciones Mecánicas y Dinámica de Máquinas en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Además, es Docente Investigador participando en diversos proyectos de investigación en el área de la ingeniería mecánica. Cuenta con numerosas publicaciones en revistas internacionales con referato y presentaciones en congresos nacionales e internacionales. Las áreas de investigación son: a) Seguridad de los sistemas de distribución de gas y su entorno b) Análisis estructural estático y dinámico de componentes mecánicos mediante simulación numérica y técnicas experimentales. Se desempeña como consultor en el Área de Vibraciones Mecánicas en el ámbito civil y mecánico. Es representante de Gerb Schwingungsisolierungen GmbH teniendo a cargo proyectos asociados con dinámica estructural y control de vibraciones en cañerías, edificios, máquinas pesadas, puentes, etc.



G. Chiappero

*I*ngeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina y Magister en Ingeniería egresado de la Universidad Nacional del Sur de Bahía Blanca, Argentina. Es Profesor Adjunto concursado, en la Cátedra Vibraciones Mecánicas y dinámica de Máquinas para la carrera de Ingenierías Mecánica en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Además, es Docente Investigador, en el marco del Programa de Incentivos a docentes investigadores de Universidades Nacionales de Argentina; participando en diversos proyectos de investigación en el área de la ingeniería mecánica. Cuenta con publicaciones en revistas con referato y presentaciones en congresos nacionales e internacionales. Las áreas de investigación son: a) Seguridad de los sistemas de distribución de gas y su entorno b) Análisis estructural de componentes mecánicos, utilizando simulación numérica y técnicas experimentales. Ha desarrollado su actividad profesional en empresas de procesos y de energía tales como Alto Paraná SA y ABB SA. Además, ha realizado consultoría a empresas de diversos rubros en temas de vibraciones mecánicas en máquinas rotativas y en problemas asociados a la dinámica estructural.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF SMART CITIES BASED ON INFORMATION TECHNOLOGY AND EDUCATION¹

Carlos M. Chang², Teresa Salinas-Gamero³, Mario Vélez-Canchanya⁴, Gianine Tejada-Salinas⁵

ABSTRACT: Cities have become much more complex, and public agencies are facing increasing challenges to provide efficient and inclusive services to the community. Cities are highly dependent on civil infrastructure and the technologies adopted for the management of public services including transportation, energy, security, water resources, first aid, and supply chain systems. The Smart City concept is interdisciplinary in nature and represents a new way of managing civil infrastructure by identifying problems with the support of advanced technologies. Within this concept, it is necessary to model various scenarios and analyze potential outcomes to seek the best solution for the situations raised. However, the technological components are insufficient by themselves if they do not allow interaction among the parties involved in the management process. In this context, Building Information Modeling (BIM) is a tool that can improve collaboration and communication among the parties involved in the management of civil infrastructure in a city. This article describes a humanistic concept of a Smart City with emphasis on the quality of life and the role of education in its development and sustainability, integrating modern technology for an efficient interaction of health, transportation, public safety, energy, building management subsystems, among others. These interconnected subsystems must provide the services to sustain the quality of life of citizens. In this humanistic approach, practice of civic values has a fundamental role in the responsible use of resources and technological tools to transform a city into a smart one.

Keywords: BIM, Humanistic Education, Infrastructure Management, Smart City

DESARROLLO SOSTENIBLE DE CIUDADES INTELIGENTES BASADO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y EDUCACIÓN

RESUMEN: Las ciudades se han vuelto mucho más complejas y las agencias públicas enfrentan desafíos cada vez mayores para brindar servicios eficientes e inclusivos a la comunidad. Las ciudades dependen en gran medida del desarrollo de infraestructura civil y de las tecnologías adoptadas para la gestión integrada de los servicios públicos de transporte, energía, seguridad, recursos hídricos, primeros auxilios, y sistemas en la cadena de suministros. El concepto de Ciudad Inteligente es de naturaleza interdisciplinaria y representa una nueva manera de gestionar la infraestructura civil identificando problemas con el apoyo de tecnologías de avanzada. Dentro de este concepto, es necesario modelar diversos escenarios y analizar posibles resultados en busca de la mejor solución a las situaciones planteadas. Sin embargo, los componentes tecnológicos son insuficientes por sí solos si es que no permiten la interacción entre las partes involucradas en el proceso de gestión. En este contexto, el Modelo de Información de Construcción (BIM, por sus siglas en inglés) es una herramienta que puede mejorar la colaboración y comunicación entre las partes involucradas en el proceso de gestión de la infraestructura civil en una ciudad. Este artículo describe una concepción humanística de la Ciudad Inteligente con énfasis en la calidad de vida y el rol de la educación en su desarrollo y sostenimiento, integrando tecnología moderna para una interacción eficiente de los subsistemas de salud, transporte, seguridad pública, energía, gestión de edificios, entre otros. Estos subsistemas interconectados deben proporcionar los servicios para sostener la calidad de vida de los ciudadanos. En este enfoque humanista, la práctica de valores cívicos tiene un rol fundamental en el uso responsable de los recursos y herramientas tecnológicas apropiadas para transformar una ciudad en inteligente.

Palabras clave: BIM, Educación Humanística, Gestión de Infraestructura, Ciudad Inteligente

¹ Article received on February 22, 2023 and accepted for publication on April 12, 2023.

² Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Florida International University, 10555 W Flagler Street, EC 3680, Miami, Florida 33174. E-mail: cachang@fiu.edu

³ Executive Director, Instituto del Pensamiento Complejo Edgar Morin, Universidad Ricardo Palma, Av. Benavides 5440, Santiago de Surco, Lima 33, Perú, Apartado postal 1801. E-mail: teresa.salinas@urp.edu.pe

⁴ General Manager, MAVC Mario Vélez Project Management, Lima, Perú. E-mail: mariovelez@mavcproyectos.com

⁵ Professor, Faculty of Engineering, Universidad Ricardo Palma. E-mail: Gianine.tejada@urp.edu.pe

INTRODUCTION

The expression "Smart City" appeared in the 1990s and there are several definitions to describe its multiple aspects. In all these definitions, it is mentioned the term "Information and Communication Technology" (ICT) for the citizens to participate in management processes towards the improvement of public services. It promotes the development of knowledge networks that support economic and social development and emphasizes the integration of technology to build a living environment that fosters the interaction of people through interconnected virtual platforms. Within this general concept are the ICT components adopted in urban areas. Therefore, Smart Cities are defined based on the level of the interaction between civil infrastructure service systems and human-social development and ICTs by the hardware and software components.

The technological components and supporting tools for civil infrastructure are insufficient by themselves for the development of a Smart City. It is essential to consider the expected results when investing in these technologies. A Smart City must be dynamic with the ability to innovate, reorganize, and adapt to changing conditions. It should provide a living environment where all citizens are engaged with those who make decisions and be empowered to contribute overcome problems towards the development of healthier and safer neighborhoods.

This article emphasizes the humanistic aspect of a Smart City focusing on the quality of life and the role of education in development and sustainability. In this view, practice of civic values has a fundamental role in the responsible use of resources and technological tools to transform a city into a smart one. Respect for nature, learning to live together with solidarity, citizen identity, and value of local culture are pillars to build the foundations of a Smart City. The connection between these pillars with the integration of modern technology should lead to an efficient interaction of public services including health, transportation, public safety, energy, and building management subsystems among others. As shown in Figure 1, this interaction should result on equitable and sustainable socio-economic developed communities fostering the well-being of the citizens.

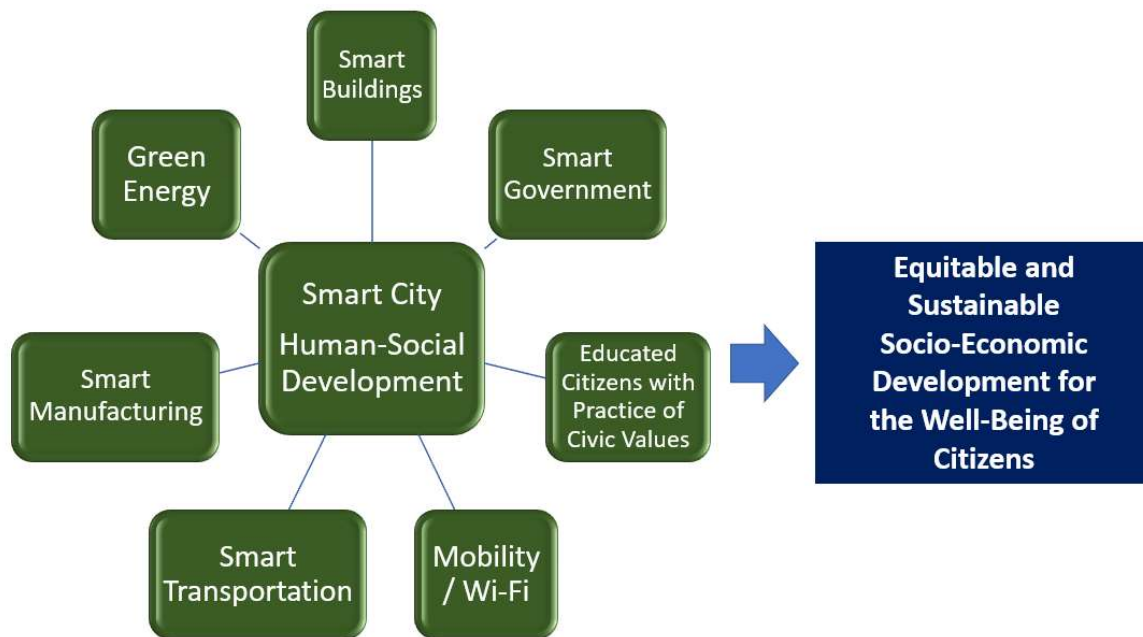


Figure 1: Humanistic centered development approach of a Smart City.

DEVELOPMENT OF SMART CITIES

There are many trends that have led to the rise of smart cities, one of which begins with the rapid urbanization of the world's population. Rural to urban migration began with the agricultural and industrial revolution in the late 18th century. Today, more than 50 percent of the world's population lives in cities. By 2050, it is projected that nearly 70 percent of the world's population, equivalent to more than six billion people, will live in urban areas (United Nations, 2018). This critical mass of people has laid the groundwork for the rise of smart cities.

To provide solutions to the complex problems faced by the cities, it is necessary to articulate multiple subsystems using appropriate technologies while building strong knowledge management networks. The main challenge in the development of a Smart City is to integrate knowledge in order to address present and future needs. Linear, disjointed, fragmented approaches have been used to manage a city while new innovative approaches are required to provide citizens with greater capacity to overcome complex challenges.

The development of a Smart City requires the efficient interaction of multiple subsystems including transportation, citizen security, energy, building management, among others. These interconnected subsystems must provide the necessary services to sustain the quality of life of the citizens. For this development, it is necessary to establish generic and specific objectives. Generic objectives support the identity of civil infrastructure, that is, its own history, culture, environment, or aesthetics. The specific objectives are related to the optimization of energy consumption, the improvement of air quality, the reduction of noise, and the regulation of transport systems to mention some examples (Chang, 2019).

The use of the information collected in each phase of the life cycle of infrastructure projects is complex (Boorman Et al., 2018). Digital tools, such as computer-aided design (CAD) and computer-aided engineering (CAE), have been traditionally used to design, build, and operate civil infrastructure (Czmoch and Pakala, 2014). More recently, one of the ICTs with great potential is Building Information Modeling (BIM). BIM describes the process of creating digital building models for operation and maintenance over the entire project life cycle (Boorman Et al., 2018).

In BIM, data are gathered from the design and construction phases and stored in a visual virtual database. Any change made to the model is immediately reflected in the database (Blanco and Chen, 2018). At the design phase, project alternatives are evaluated by visualizing geometric and geographic information to analyze spatial relationships. Design options are optimized with additional labor and material cost information. In the construction phase, the building process is simulated and it is later used to monitor the work progress. Digital data can maintain civil infrastructure information updated over the entire life cycle.

In practice, the methodology to develop a Smart City using support tools, such as BIM technology, involves several stages:

1. Establish generic and specific multidimensional objectives.
2. Analyze the local context and the interdependence of the factors that influence the development of the Smart City.
3. Design a conceptual management model adapted to local conditions.
4. Select support technology tools for the implementation of the smart city conceptual model.
5. Develop a program of activities and formulate short, medium, and long-term budgets for the implementation of the conceptual model with the support of technological tools.

6. Implement a program of activities including a plan to collect information for later evaluation of the results.
7. Provide feedback based on the results of the implementation to periodically refine the use of technological support tools.

It should be emphasized the importance of understanding the aspects that define the multidimensional character of a Smart City, as well as adapting them to the local culture in order to select appropriate technological tools to implement the conceptual model efficiently. Figure 2 shows examples of BIM applications for a Smart City over the life cycle.

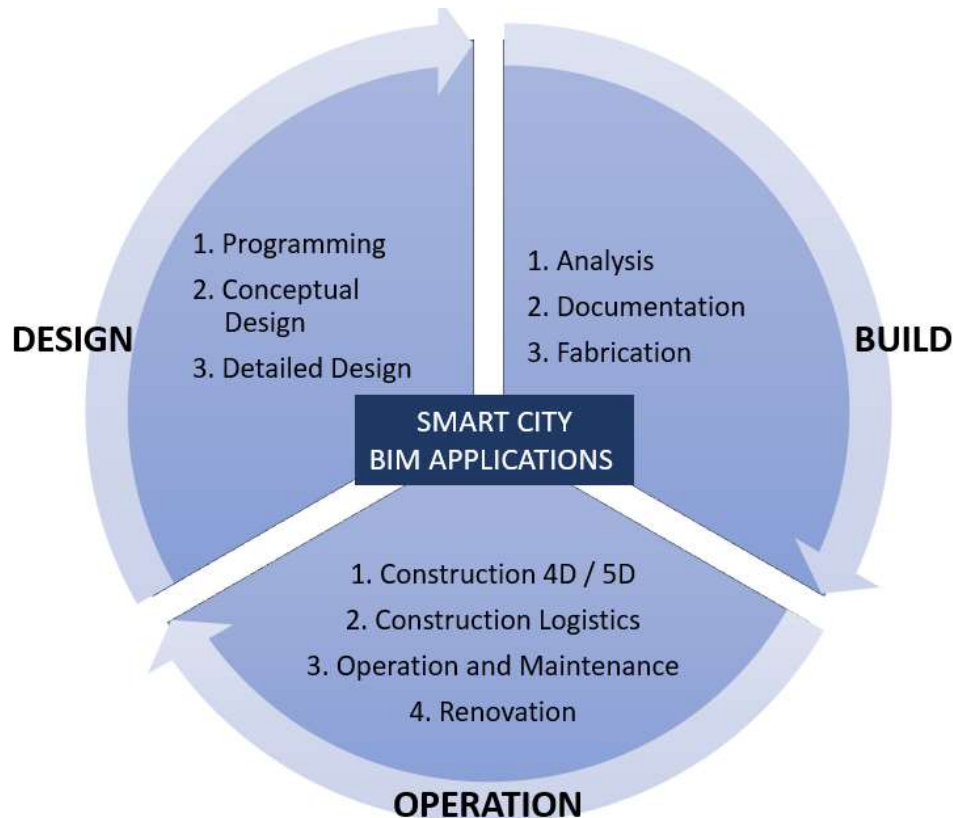


Figure 2: BIM applications over the life cycle of civil infrastructure.

In the next sections, the multidimensional aspects to characterize a Smart City are described, then it is explained how BIM technology could be integrated to provide support for the implementation of the Smart City conceptual model.

MULTIDIMENSIONAL ASPECTS OF A SMART CITY

Cities have high complexity in their function and there are multidimensional aspects in constant change and transformation. The interactions and retroactions of these multidimensional aspects generate new and unpredictable scenarios. Cities are “Systems that contain adaptive components and capabilities that allow systems to change and evolve over time in response to feedback and changes in the system context. Complex adaptive systems have memory, so past experiences can shape future behavior, they have multiple modes of behavior, the ability to transform, and they have dynamic resilience.” (Sellberg et al., 2021). Figure 3 shows the interaction of multidimensional main aspects or dimensions of Smart Cities.

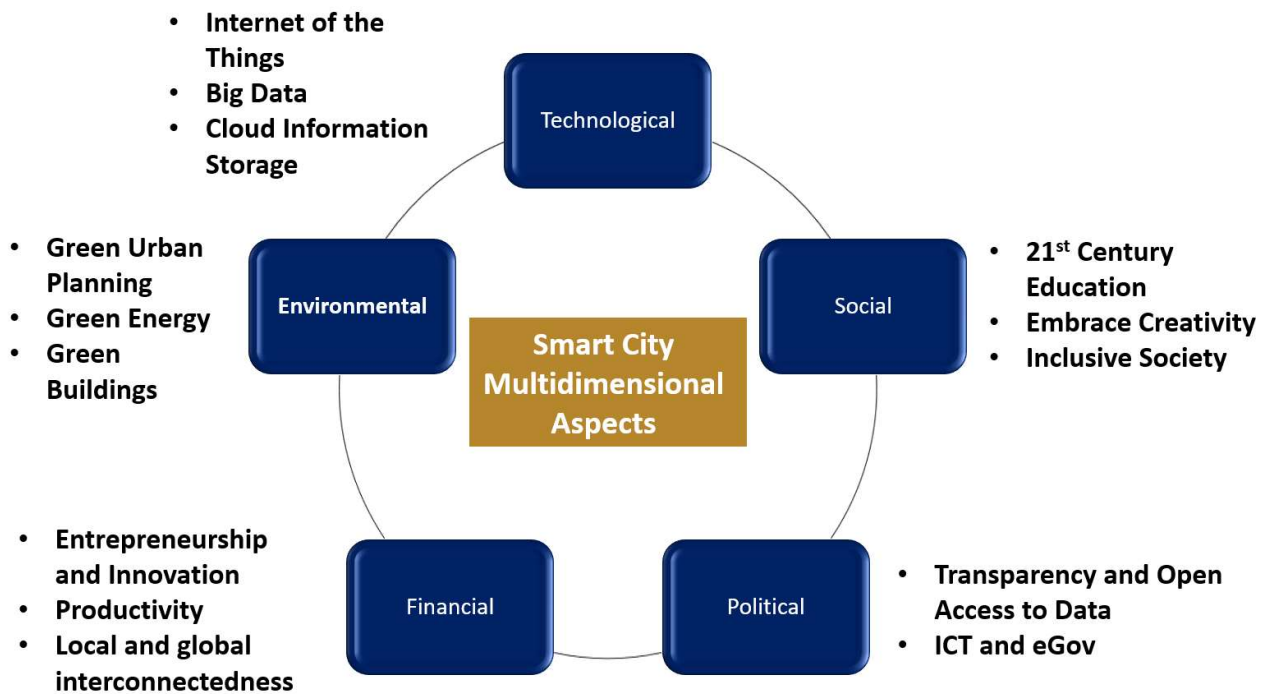


Figure 3: Multidimensional main aspects or dimensions of a Smart City.

Environmental: This aspect is related to the importance of the "responsibility" that people should have for our natural environment. This aspect has led to a growing demand for carbon neutral power supply systems and guidelines for green urban planning of civil infrastructure (e.g. Green Buildings). That is, replacing fossil fuels with wind, solar, and geothermal green energy more friendly alternatives to our physical environment (e.g. automated climate control, environmentally friendly materials). It also involves modifying job habits and working environments (e.g. virtual meetings, telecommuting).

Financial: The globalization of the world economy and the rapid increase in quality demands on the "standard of living" have influenced the rise of smart cities. While it is true that developed countries are constantly pushing the frontiers of innovation, they are often hampered or limited by out-of-date infrastructure systems, higher salaries, and social systems with greater coverage (e.g. insurance rates, retirement costs). While cities in developed countries are adapting innovative smart city technologies (e.g. synchronizing street signs), many cities in developing countries are building smart cities from scratch. Emphasis should be given to fostering entrepreneurship and innovation to increase productivity by improving local and global interconnectedness,

Political: Citizens demand more transparency and accountability from local governments. Governments should provide policies to regulate the implementation of advanced technologies while considering economic, environmental, and social benefits. Policies should regulate data access, data management, and usage of real-time applications. Transparency and open access to data with the implementation of appropriate Information Technology Tools and electronic government platforms (eGov) should facilitate the management processes.

Social: Technological advances have led to significant changes in our social life. An increasingly interconnected world with mobile smartphones and virtual tools residing in the "cloud" has resulted in a mobile workforce that conducts work from anywhere at any time. At the same time, these advances have

led to increased concerns about privacy, security, and data integrity. In addition, societal expectations also demand a real-time response. Therefore, finding a balance between work and personal life has become harder. 21st education should consider all these factors while encouraging to embrace creativity and tolerance towards the development of an inclusive society.

Technological: Rapid decrease in the costs of communications technology has led to the development of the “Internet of the Things” and "Big Data" to store massive information in a virtual cloud. Big data is a term that describes the large volume of data, structured and unstructured, that is transmitted continuously. Millions of sensors, interconnected by software and hardware, connect civil infrastructure with users. Examples include solar energy and integrated control systems adopted in buildings; smart grid power transmission and sewage network systems; automated tolls in transportation systems; and real-time route data for public transportation.

Big Data can be analyzed to obtain insights that should lead to better management decisions to support the development of a Smart City. Their use is becoming common practice in organizations to improve their efficiency by adopting better strategies as a result of the data analyses.

Figure 4 shows that big data applications for Smart Cities require to consider the veracity of the data, volumen of information, velocity of transferring this information, variety of unstructure data from different subsystems, and the value or cost of data processing.

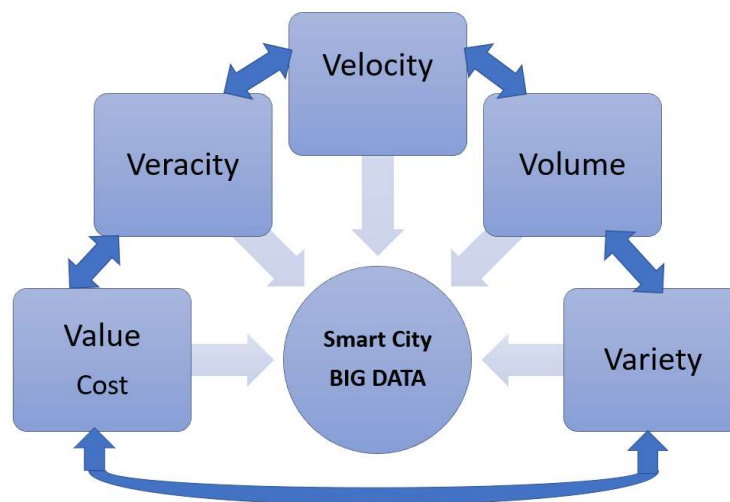


Figure 4: Big data requirements for Smart City applications.

The BIM model is essential to work virtually, carrying out simulations that, accompanied by the Big Data tool, allow organizations to be fully aware of all their resources, giving them the ability to respond to any situation quickly and efficiently. Through a BIM supported by Big Data, organizations are able to:

- Know in real time the use of resources to optimize energy consumption.
- Optimize designs by learning about the performance of civil infrastructure.
- Predict behavior and risk situations to alert users.
- Supervise actions through virtually integrated platforms for monitoring the response of different management agents.
- Simulate proposals and evaluate management actions before implementing them.
- Provide technical resources to record and retrieve information from a trusted source.
- Integrate more complex systems that are required to develop and sustain a Smart City.

BIM TECHNOLOGIES FOR SMART CITIES

Various disciplines are involved in the design, construction, and operation of a project (Borman Et al., 2018). All parties involved in the life cycle of a project - owner, designer, contractor, subcontractor, and supplier - should collaborate to build civil infrastructure cost effectively. Many projects lack technical components to support a collaborative management approach. A collaborative approach to manage civil infrastructure emerges as the cornerstone to integrate information across the strategic, network, and project management levels. To coordinate activities and efficiently integrate different management levels, it is necessary to use advanced technological tools such as BIM.

ISO 19650 (ISO, 2020) describes a Building Information Model as a shared digital representation of an information model to facilitate the design, construction, and management. BIM provides a complete digital representation of a project including dimensions, spatial relationships, geographic information, quantities, and properties of construction components. Additional information includes execution time, cost of labor, material, and equipment (Azhar, 2011). Multidimensional BIM tools can be classified into categories composed of three dimensions (3D), four dimensions (4D), five dimensions (5D), six dimensions (6D) and seven dimensions (7D). As the number of dimensions increases, more data and models should be integrated (Gourlis and Kovacic, 2017).

The maturity level of BIM in an organization is established by the degree of integration of the team working around a single model to collect, store, and extract information about the project. Level 0 describes the traditional 2D work practice based on sharing drawings on paper. Level 1 includes the combination of 3D virtual models and 2D drawings. Data can be shared by exchanging individual files using ISO standards. At level 2, BIM models created by various disciplines are combined to check for conflicts or discrepancies. Level 3 describes the integration of BIM models for the entire life cycle of an infrastructure project. All data can be shared through a central platform. Project data is managed using cloud services, so that the information can be managed through the entire life cycle of a project.

Information Requirements for the Use of BIM

The ISO 19650 (ISO, 2020) series is based on the British standards BS 1192-2 (Richards, 2010) and PAS 1192 (PAS, 2014). It summarizes the approach to work with BIM. Being the collecting and managing project information the main objectives of the BIM methodology, it is necessary to establish the information requirements at the different stages of the life cycle, and to delimit both factors in an efficient, effective, and timely manner.

ISO 19650 provides a set of specifications about what information is to be produced, when it is to be produced, its method of production, and its recipient. The information requirements are initially defined by the contracting party, and they may be extended by establishing particular requirements. It is important that the contracting party explains the main reasons why the information is required for a better understanding of the collaborative work to be carried out. All the participants have a level of responsibility in the definition of the following information requirements:

- OIR: Information Requirements of the Organization related to its objectives.
- PIR: Project Information Requirements related to its development.
- AIR: Information Requirements of the Infrastructure Project as related to its operation.
- EIR: Information Exchange Requirements between two parties subjected to a contract.

The collaborative approach using BIM for the management of civil infrastructure information is aimed at improving the standards used for the evaluation of investments, contracting and formulation of public budgets. BIM deliverables are classified in:

- PIM: Project Information Model as related to the development phase.
- AIM: Information Model of the Infrastructure Project as related to the operation phase.

It is common practice to begin with the end of the process when establishing the use of BIM, because the operational and management stage usually counts as the highest percentage of expenses in the service life of an asset.

Benefits of BIM towards Sustainable Smart Cities

Infrastructure management is a complex decision-making process due to many disciplines involved in the process, multiple objectives, and different perspectives. BIM can improve the collaboration and communication between the parties involved in this process. Having an accurate BIM, developed with the collaboration of all interested parties (client, designer, builder, operation manager) from the earliest stages of a project life cycle, is fundamental for the development of a Smart City. For example, BIM can be used in the evaluation of design alternatives, activity scheduling, cost estimation, material selection, prefabrication opportunities, placement on site, and life cycle cost analysis.

BIM should add value in the development and management of civil infrastructure by offering solid, coherent, and useful information that should lead to the following expected results:

- A clear definition of the information required to manage civil infrastructure, as well as the methods, processes, deadlines, and protocols required to achieve generic and specific multidimensional objectives of a Smart City.
- Quantity and quality of the information to meet the requirements defined in the conceptual model of a Smart City.
- Efficient and effective transfer of information among the participants involved at each stage of the life cycle of civil infrastructure.

Among the benefits of using BIM is the generation of a digital twin that is updated dynamically throughout the life cycle of a project. BIM allows to carry out simulations at the planning, design, construction, and management stages. A digital twin refers to a digital replica of physical assets, processes, people, places, systems, and devices that can be used for various purposes.

A digital representation provides the elements and dynamics of how a device works and performs as part of the Internet of Things (IoT) throughout its life cycle. In the first place, the connection created by a digital twin between the physical model and the virtual model or virtual counterpart is needed. This connection is established by generating data in real time through the use of sensors. With a digital model, an organization can estimate costs and analyze existing conditions at the planning stage. At the design stage, interference detection, energy analysis, structural analysis, environmental evaluation, and others can be performed. Simulation of construction processes, digital manufacturing to build models to produce as-built documents can be carried out at the construction stage. Finally, maintenance and risk control strategies can be established and implemented at the management stage.

ROLE OF EDUCATION TO SUSTAIN SMART CITIES

Among the goals of the United Nations is the development of cities that are safe, resilient, and sustainable. Other goals are to quality education and to develop industry through innovative infrastructure solutions. These objectives are related and require information technology to achieve them (United Nations, 2022).

A Smart City uses the advances of technology as a means to care for and sustain the quality of life. However, it is required to build the necessary knowledge through the implementation of educational programs. To educate is to create, carry out, and validate a particular form of coexistence. This is performed through a dialogue to harmonize thoughts with emotions. In this sense, the preservation of cultural and social values should be Smart City foundation. This also means providing an education that promotes respect for natural resources with citizens socially and ecologically responsible for their actions. In this educational process, there are three main challenges:

The first challenge is to develop a knowledge structure that is:

- How do people build knowledge?
- How does knowledge build people?
- How does knowledge build the patterns of the mind?
- How do we build cities and how do cities build us?

The second challenge is to overcome the reductionist and fragmented vision of the educational traditional system. Education should not be reduced to formal areas, education through life experience is essential. In this sense, it is critical to provide public spaces and interactive knowledge centers to support effective learning.

The third challenge is community education focused on building values of trust, harmony, and reciprocity. Solidarity and tolerance to face uncertainties while overcoming problems of poverty, violence, crime, hunger, and climate adaptability among others.

To address these challenges, the traditional dominant thought approach that isolates and separates knowledge content must be replaced by a complex thought approach that unites and distinguishes knowledge from different sources. Disjunctive and reducing thinking approaches must be replaced in the educational process by a “complex thinking” approach that fosters cooperative actions.

The characteristics of a dominant thought knowledge approach are summarized as:

- Fragmented perception of the world.
- Absolute truths.
- Static vision
- Linear language in the description of the world.
- Controller

The characteristics of a complex thought knowledge approach are summarized as:

- Complex perception of the world.
- Uncertainty.
- Dynamic vision
- In the description of the world, use a circular language.
- Participatory and resilient

From an ethical perspective, educational efforts in the planning and development stages of a city should allow the implementation of a more rational usage of existing resources. This effort should contribute to the development of equitable and sustainable socio-economic communities. It involves using technical knowledge to sustain the quality of life of the people who live in the city. The main purpose in the development of a city should be the well-being of citizens. In this context, universities have the duty of providing high quality education to address the inclusive needs of a community with respect and dignity.

CONCLUSIONS

1. The development of a Smart City is interdisciplinary in nature and requires the integration of knowledge about cultural identity and social community values with innovative technologies, supported by an education plan towards the development of sustainable civil infrastructure solutions to address the inclusive needs of the citizens.
2. Smart cities must be able to innovate, reorganize, and adapt to environmental, economic, and social dynamic changes. Citizens must be actively engaged with local governments to solve problems that affect the development of healthier living environments and safer neighborhoods.
3. It is essential to understand the multidimensional aspects that define the character of a Smart City: environmental, financial, political, social, and technological. These aspects must be adapted to the local culture and appropriate technological tools should be selected accordingly for managing civil infrastructure. The alignment of strategies, plans, and contracting acquisitions with public services that address the needs of citizens should be the ultimate purpose of a Smart City.
4. BIM technology can be fundamental in the development of a Smart City. Defining what a BIM is, objectives and uses, as well as the level of development (LOD) or level of information (LOI), allows better understanding of its potential as a support tool for managing civil urban infrastructure.
5. The use of BIM as a support tool at different stages of the infrastructure life cycle involves the need for a common virtual environment from the beginning. The best time to introduce BIM is at the planning stage. At this stage, there will be the greatest probability of positively influencing the quality of services provided by civil infrastructure to the citizens.
6. A digital twin of civil infrastructure is considered an important collaboration tool. Adequate and timely specification of digital twin models for a city allow both to receive and to generate large volumes of information that becomes big data. This information is useful to carry out simulations of potential threats in order to alert the citizens and prepare them to respond to these situations.
7. The success in the development of a Smart City, administrative or technological, lies mainly in the human factor. BIM, as a collaborative tool, does not escape this reality. It is very important to educate citizens and to train local government staff in the development and implementation of efficient management processes.
8. It is necessary to change the fragmented, linear, reductionist thinking traditional approach by an integrative complex thought innovative knowledge approach. This innovative knowledge approach should foster active participation of the citizens in a dynamic complex environment towards better informed management decisions in local governments.

9. Education is required to build values with respect for cultural identity and social inclusiveness as the foundation of a Smart City. In this humanistic approach, the practice of civic values is fundamental for a responsible usage of resources and technological tools. In this sense, universities have the fundamental role of providing high quality education to address the inclusive needs of a community.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge the support of Dr. Iván Rodríguez Chávez, President of the Universidad Ricardo Palma, to the research project titled “Sustainable and Resilient Smart Cities”. In addition, our special appreciation to the International Society for Maintenance and Rehabilitation of Transport Infrastructures (iSMARTI) and the Instituto de Construcción y Gerencia (ICG) for hosting the 5th International Conference on Transportation Infrastructures in August 2022 (V ICTI). Presentations related to the content of this article were delivered at V ICTI. This article merges concepts and content from two presentations: “Planning and Development of Smart Cities Using BIM Tools: An Integrated Management Approach” and “Education, Sustainability, and Development of Smart Cities”. For additional information, please refer to the conference proceedings. It is noted that some extracts were modified and translated into English from the article titled: “Planificación y Desarrollo de Ciudades Inteligentes Utilizando Herramientas BIM: Un Enfoque Integral de Gestión” by C. Chang and M. Vélez Canchanya, published on the Journal of Engineering Profiles by the Universidad Ricardo Palma in December 2021 (DOI: https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v17i17.4575).

REFERENCES

- Borrmann A., M. König, C. Koch, and J. Beetz. (2018). Building Information Modeling – Why? Que? How? Chapter 1. Automation in Construction Journal 94, 257-281.
- Chang, C., M. Svitek, and T. Hora. (2019). Asset Management Systems for A Sustainable Development of Smart Cities. International Conference on Smart Cities, iSMARTI, South Korea.
- Chang C. and M. Vélez-Canchanya. (2021). Planning and Development of Smart Cities by Means of BIM Tools: A Comprehensive Management Approach. Ricardo Palma University. Journal of Engineering Profiles. DOI: https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v17i17.4575.
- FGB Blanco and H. Chen. (2014). The Implementation of Building Information Modeling in the United Kingdom by the Transport Industry. Procedia-Social and Behavioral Sciences 138, 510-520.
- G. Gourlis and I. Kovacic. (2017). Building Information Modeling for Analysis of Energy Efficient Industrial Buildings – A Case Study. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, 953-963.
- I. Czmocho and A. Pękala. (2014). Traditional Design versus BIM Based Design. Procedural Engineering 91, 210-215.
- ISO 19650. (2020). Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modeling (BIM) – Information management using building information modelling.
- M. M. Sellberg, A. Quinlan, R. Preiser, K. Malmborg, and G. D. Peterson. (2021). Engaging with complexity in resilience practice. Ecology and Society 26(3):8. <https://doi.org/10.5751/ES-12311-260308>
- M. Richards. BS 1192. (2010). Building Information Management.
- PAS 1192-2-2013. (2013). Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modeling.
- S. Azhar. (2011). Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risk, and Challenges for the AEC Industry. Leadership and Management in Engineering 11(3), 241-252.

AUTHORS BIOSKETCH



C. Chang

Associate Professor in the Department of Civil and Environmental Engineering at Florida International University (FIU). Prior to joining FIU, Dr. Chang worked as an Associate Professor at the Department of Civil Engineering at the University of Texas at El Paso (UTEP), Associate Researcher at the Texas A&M Transportation Institute (TTI), and international consultant for the Inter-American Development Bank (IDB) and engineering companies in road projects overseas. Dr. Chang graduated as a Civil Engineer from the Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) in Perú, Master of Science and Doctor of Philosophy degrees from Texas A&M University in the United States. His main research interest is on asset management with emphasis on “smart” civil infrastructure systems. Dr. Chang is licensed as a professional engineer in Florida, Texas, and Perú.

Dr. Chang is the Vice President of the International Society for Maintenance and Rehabilitation of Transport Infrastructures (iSMARTI) in the United States, past Chair of the American Society of Civil Engineers Infrastructure Systems Committee (ASCE – ISC), and Research Coordinator of the Transportation Research Board Pavement Management Systems Committee. He serves as the Chair of the International Road Federation (IRF) Asset Management Task Force and has served as Chair of the V International Conference on Transportation and Infrastructure (ICTI) in 2022. In addition, Dr. Chang is the current U.S. Delegate of the Ibero-Latin-American Asphalt Congress (CILA) and Chair of the Committee for the Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design (CIDMEP). Dr. Chang has been recipient of several awards including the "International Road Federation Fellowship", and has been awarded the recognition on three occasions of the "National Council of Examiners for Engineering and Surveying" (NCEES) for connecting education with professional practice. His academic work is documented in more than 200 publications in peer- review national and international journals, conference proceedings, books, and technical reports.



G. Tejada-Salinas

Professor in the Faculty of Engineering at Universidad Ricardo Palma University in Perú (2018-Present). Coordinator of the Master's and Doctorate Programs financed by CONCYTEC at the Universidad Nacional de Ingeniería (2016-2021). Policy Director, Sub-director of Innovation and Technology Transfer (2015) and Executive Director of FONDECYT at CONCYTEC (2012, 2013 and 2014), Director of CTeI Policies of CONCYTEC (2011), Planning Manager of Compañía Consultora de Petróleos S.A. (2006-2011). Doctoral student in Public Management at the Universidad Nacional de Ingeniería, Master degree in Administration from the Universidad del Pacífico, and Industrial Engineer from Universidad Ricardo Palma. Tejada-Salinas was selected in an international competition to participate in the 15th Training Program in Science and Technology for Parks in South Korea (2015) organized by the INNOPOLIS Foundation as part of an agreement of cooperation between South Korea and Perú. Specialization on Public Investment Projects (SNIP) from the Universidad Nacional de San Marcos.

AUTHORS BIOSKETCH (CONT.)



F. Salinas-Gamero

*E*xecutive Director and Founder of the Instituto Peruano de Pensamiento Complejo Edgar Morin (IPCEM) at the Universidad Ricardo Palma in Perú. Executive Director and Founder of the Regional Center of Competencies in Education for Sustainable Development for Metropolitan Lima and the Callao Region, RCE Lima-Callao, affiliated with the United Nations University -UNU (2011-2014). Former Director of the Science and Technology Update Office of the National Science and Technology Council of Perú (CONCYTEC). Former Director and Founder of the National Program for the Popularization of Science and Technology (CONCYTEC). General Coordinator of the Diploma in Biodiversity and Intercultural Knowledge (Financed by Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit -GIZ and the United Nations Environment Program -UNEP) held in the San Martín Region (Perú, 2011-2013) awarded with the "RCE

Recognition Award/ Outstanding Flagship Project" by the United Nations University (Japan, 2014) within the framework of the evaluation activities of the Decade of Education for Sustainable Development. Coordinator for Perú of the ALFA III USO+I Project: "Improving the relevance of engineering education in Latin American universities" (funded by the European Union, 2011), Regional Coordinator of the Project: "Articulation of the work of educators and scientists for the relevance and quality of education in science and technology in Latin America" (financed by UNESCO-Paris, OREAL-Chile, and CONCYTEC-Perú, 2006). Member of the UNESCO Chair of Science Education for Latin America and the Caribbean. Magister in Educational Administration from the University of Lima (Summa Cum Laude Degree), Bachelor of Education in Educational Sciences, Physics-Mathematics from the Universidad Nacional de San Agustín in Arequipa (Perú). Professor of Physics at the Ricardo Palma University in the Faculty of Engineering (Perú). Postgraduate courses at the National Distance Education University (UNED) in Madrid, visiting professor at the Universidad de Alcalá de Henares and the Universidad de Barcelona in Spain. Scholar of the Spanish Agency for International Cooperation (AECI).



M. Vélez

*S*enior Executive, Magister, CIP civil engineer. Specialized in Project Management, certified as Project Management Professional - (PMP) ® awarded by the Project Management Institute - PMI. BIM collaborative approach. Graduated from the National Engineering University - UNI, with postgraduate studies at the Building Research Institute - Ministry of Construction of Japan - BRI, participant in a program for senior executives at the IESE Business School of the University of Navarra, held in New York and Miami. International Master's Degree in BIM Manager at Zigurat Global Institute of Technology at the Universidad de Barcelona. Successful results in infrastructure projects, through transformational and transcendent planning and leadership. Ability for analysis, decision making and management of personnel in charge. Vélez served as Project Manager and General Manager of EATHISA Perú and Deputy CEO at EATHISA Corporate. He currently works as an independent consultant and director of the company MAVC.

CONTRIBUCIONES E INNOVACIONES EN LA PRÁCTICA DE LA INGENIERÍA GEOTÉCNICA DE LA OFICINA DE INGENIERÍA DE SUELOS DE LA AUTORIDAD DE CARRETERAS Y TRANSPORTACIÓN DE PUERTO RICO¹

Ricardo J. Romero-Ramírez², María E. Arroyo-Caraballo³

RESUMEN: La Oficina de Ingeniería de Suelos (OIS) de Puerto Rico fue fundada en el 1975 y en la actualidad está adscrita al Área de Diseño de la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT). En su fundación la OIS estaba compuesta de la División de Ingeniería de Suelos y la División de Geología. Su función principal era la investigación del subsuelo para las estructuras geotécnicas diseñadas y construidas por la ACT. Con el transcurso del tiempo las funciones de la OIS fueron evolucionando al mismo tiempo que se desarrollaba la ingeniería de suelos y la ingeniería de rocas. En el presente la OIS continúa atendiendo consultas durante la etapa de diseño y construcción. En adición, la OIS atiende una serie de innovaciones geotécnicas en las que podemos mencionar Gerencia de Activos Geotécnicos y Gerencia de Taludes Inestables, entre otras. En este artículo se presentan las contribuciones e innovaciones en la práctica de la ingeniería geotécnica que ha atendido y ha tenido un rol protagónico la OIS con énfasis en los nuevos análisis y equipos que cumplen con los requerimientos estatales y federales y códigos vigentes que tienen un potencial de implantarse en áreas geográficas con similares características geotécnicas y geológicas en el Caribe y América latina.

Palabras claves: escaneo láser terrestre, gerencia de activos geotécnicos, gerencia de taludes inestables, ingeniería geotécnica, sistemas de información geográficos

CONTRIBUTIONS AND INNOVATIONS IN THE GEOTECHNICAL ENGINEERING PRACTICE OF THE SOILS ENGINEERING OFFICE OF THE PUERTO RICO HIGHWAYS AND TRANSPORTATION AUTHORITY

ABSTRACT: The Puerto Rico Soil Engineering Office (OIS) was founded in 1975 and is currently under the Design Area of the Highway and Transportation Authority (ACT). In its foundation, the SEO was composed of a Soils Engineering Division and a Geology Division. Its main function was the subsoil exploration for the geotechnical structures designed and constructed by the PRHTA. Over time, the functions of the SEO evolved while soil engineering and rock engineering were evolving. Today, the SEO continues to attend to inquiries during projects' design and construction phases. Additionally, the SEO attends several geotechnical initiatives like Geotechnical Asset Management and Unstable Slope Management. This article presents the contributions and innovations in the practice of geotechnical engineering that the OIS has attended and has had a leading role with emphasis on new analyzes and equipment that meet state and federal requirements and current codes that have potential to be implemented in geographic areas in the Caribbean and Latin America with similar geotechnical and geological characteristics.

Keywords: terrestrial laser scanning, geotechnical asset management, unstable slope management, geotechnical engineering, geographic information systems

¹ Artículo recibido el 4 de abril de 2023 y aceptado para publicación el 18 de abril de 2023

² Jefe de Oficina de Ingeniería, Oficina de Ingeniería de Suelos, Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico, P.O. Box 42007, San Juan, PR 00940-2007. Email: rromero@dtop.pr.gov

³ Ingeniero III, Oficina de Ingeniería de Suelos, Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico. Email: mearroyo@dtop.pr.gov

INTRODUCCIÓN

La Autoridad de Carreteras (AC) de Puerto Rico es una corporación pública creada al amparo de la Ley 74 del 23 de junio de 1965 (ELA, 1965). En sus comienzos, la AC era responsable de desarrollar, operar y mantener las autopistas, expresos, puentes, túneles, entre otras. En la década de 1970, se crea el Negociado de Pruebas de Materiales, Suelos y Geología. Posteriormente, en el 1975, se crea la Oficina de Ingeniería de Suelos (OIS) la cual estaba compuesta de la División de Ingeniería de Suelos y la División de Geología. El 6 de marzo de 1991 la legislatura de Puerto Rico aprueba la Ley Núm. 1 conocida como la ley de la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) de Puerto Rico (ELA, 1991). Desde el punto de vista organizacional, bajo la nueva ley, la OIS pertenece al área de diseño de la ACT.

La *misión* de la OIS es proveer servicios geotécnicos para la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de transportación seguro y accesible para el pueblo de Puerto Rico. La *visión* de la OIS es proveer servicios geotécnicos prácticos, eficientes y de excelencia para el pueblo de Puerto Rico. La OIS atiende los proyectos desde la etapa de diseño hasta la etapa de construcción, así como solicitudes de otras agencias. Además, provee apoyo técnico en los siguientes casos: estabilidad de taludes en suelo y roca, fundaciones profundas (pruebas de carga dinámicas), fundaciones llanas, conductos, sumideros y asentamientos de terraplenes, entre otros.

A partir del año fiscal 2015-2016, la OIS comenzó a participar y colaborar en varios programas e iniciativas innovadoras con fondos provenientes de la Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés), División de Puerto Rico e Islas Vírgenes. Entre las iniciativas innovadoras resaltan los siguientes: el Programa de Investigación y Planificación (SPR por sus siglas en inglés), el programa Cada Día Cuenta (EDC por sus siglas en inglés), el Concilio Estatal de Innovación en Transportación (STIC, por sus siglas en inglés) y el programa de Gerencia de Activos Geotécnicos (GAM por sus siglas en inglés).

Durante el transcurso de este periodo de tiempo de casi cinco (5) décadas, las funciones originales de la OIS han evolucionado para atemperarse con el estado de la práctica de la Ingeniería Geotécnica y las necesidades de la ACT. Entre dichas funciones de la OIS resaltamos las siguientes:

- Exploración de subsuelo mediante equipo de barrenado y equipo geofísico;
- Monitoreo de pilotes mediante pruebas de carga dinámicas y estáticas;
- Monitoreo de terraplenes mediante inclinómetros y piezómetros;
- Implementación de Gerencia de Activos Geotécnicos (GAM por sus siglas en inglés);
- Patrocinio de talleres en ingeniería geotécnica e ingeniería geológica;
- Ofrecimiento de talleres sobre la implementación de Métodos Avanzados de Exploración Geotécnica (A-GaME por sus siglas en inglés) y
- Desarrollo de programas innovadores como monitoreo de taludes en suelo y roca utilizando escaneo láser terrestre.

En este artículo se presentará en más detalle las funciones mencionadas previamente. Finalmente, se expondrán los desafíos, logros y próximos pasos para que el pueblo de Puerto Rico cuente con servicios geotécnicos prácticos, eficientes y de excelencia.

PROGRAMA DE GERENCIA DE ACTIVOS GEOTÉCNICOS DE LA OFICINA DE INGENIERÍA DE SUELOS

De acuerdo con la “*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*” (NASEM, 2019), un activo puede ser definido como un objeto, cosa o entidad que tiene valor, potencial o actual, para una organización. La NASEM define activos tangibles (o físicos) como aquellos que forman parte integral del sistema de transportación o corredor. Activos intangibles componen el restante de los activos de una organización como lo son el conocimiento y datos. Por otro lado, la NASEM define la gerencia de activos como el esfuerzo coordinado de una organización para entender el valor de sus activos. Por tanto, la gerencia de activos de transportación es un método estratégico de operación, mantenimiento, mejoramiento y expansión de los activos de transportación a través de su vida útil. El objetivo de un programa de gerencia de activos de transportación es minimizar los costos durante la vida útil de estos mediante la evaluación objetiva y mantenimiento de los activos. Actualmente, el programa de Gerencia de Activos de Transportación de la ACT incluye solo pavimentos y puentes. Dicho programa no incluye activos geotécnicos; los cuales serán descritos a continuación.

Antes de definir activos geotécnicos debemos definir Ingeniería Geotécnica. La Ingeniería Geotécnica es la rama de la Ingeniería Civil que estudia el comportamiento de los materiales terrestres. Esta utiliza los principios de mecánica de suelos y mecánica de rocas para la solución de problemas ingenieriles. Entonces, los activos geotécnicos (tangibles como se discutirá más adelante) son aquellos relacionados a la mecánica de suelos y mecánica de rocas que pueden fallar y afectar el funcionamiento de los sistemas de transportación. Entre los activos geotécnicos tangibles podemos mencionar taludes en roca, taludes en suelo, atarjeas y estructuras de retención (ver Figura 1). Ejemplos de activos geotécnicos intangibles serían reportes geotécnicos y bitácoras de barrenado. En la Figura 2 se pueden apreciar los activos antes mencionados, entre otros. Un programa de gerencia de activos geotécnicos permite a las agencias cuantificar y gerenciar la inversión de capital basado en el desempeño, costo y tolerancia al riesgo. También, puede reducir el costo de reparaciones no planificadas. Sin un programa de gerencia de activos geotécnicos las agencias aceptan la incertidumbre, magnitudes de riesgo desconocidas y toma decisiones de inversión desinformadas.

La OIS sometió al programa SPR, para el año fiscal 2015-2016, las siguientes propuestas: Inventario y Evaluación de Atarjeas, Inventario y Evaluación de Muros de Retención, Inventario de Reportes Geotécnicos y Desarrollo de un Programa de Gerencia de Taludes Inestables. Las tareas propuestas estaban orientadas principalmente a la gerencia de activos geotécnicos dentro del Sistema Nacional de Carreteras (NHS por sus siglas en inglés). Una vez las propuestas fueron aprobadas por la FHWA, se adquirieron computadoras personales, distanciómetros, tabletas, el programa ArcGIS© de la compañía ESRI y se participó en adiestramientos en el uso de dicho programa. Posteriormente, se contrataron servicios profesionales de técnicos en sistemas de información geográfica para crear una serie de formularios de colección de datos de campo en ArcGIS Collector©. Dichos datos eran georreferenciados y subidos constantemente al sistema de nube de ArcGIS conocido como ArcGIS Online. Los detalles específicos de los procesos realizados para cada una de las tareas se mencionarán a continuación.

Inventario y Evaluación de Atarjeas

El Inventario y Evaluación de Atarjeas comenzó con un formulario desarrollado en la OIS basado en la experiencia del personal de la oficina (ingenieros y auxiliares de ingeniería). Los datos se colectaban en el campo mediante el programa ArcGIS Collector©. Posteriormente, se adoptaron las recomendaciones de la FHWA (2012) y se migraron los datos previamente colectados a ArcGIS Survey 123©. Al momento, se han inventariado sobre 4,000 atarjeas alrededor de la Isla.

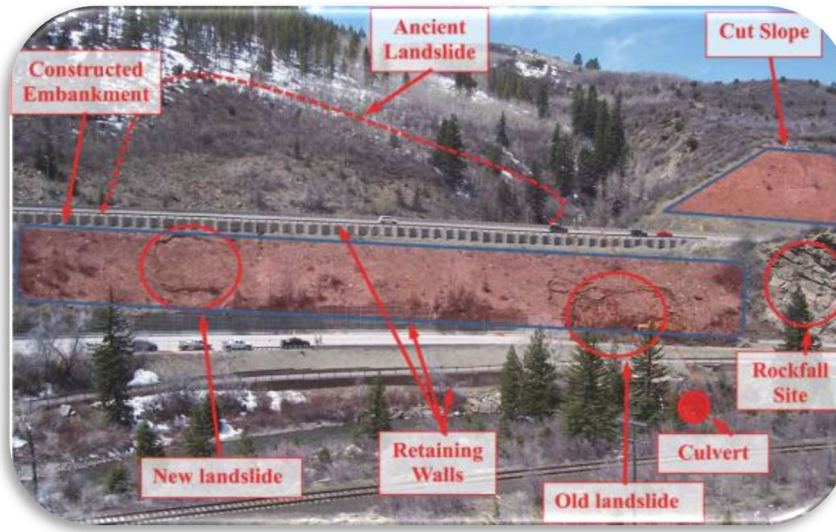


Figura 1: Activos geotécnicos (modificado de FHWA, 2013).

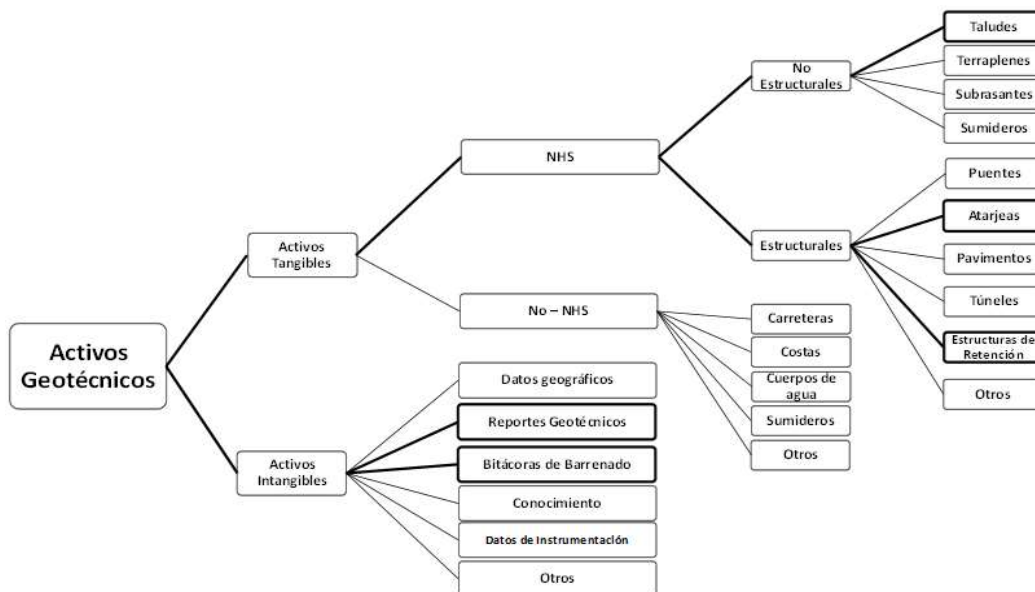


Figura 2: Taxonomía de activos geotécnicos (modificado de NASEM, 2019).

Inventario y Evaluación de Muros de Retención

El Inventario y Evaluación de Muros de Retención también comenzó con un formulario desarrollado por el personal de la OIS el cual fue convertido a una plantilla de ArcGIS Collector©. Luego de haber colectado información de sobre 250 muros, se decidió implementar las recomendaciones del Departamento de Transportación de Carolina del Norte (2015). Los datos previamente colectados fueron migrados a ArcGIS Survey 123©. Sobre 350 muros de retención han sido inventariados.

Inventario de Reportes Geotécnicos

El Inventario de Reportes Geotécnicos fue creado con el propósito de manejar sobre 2,600 reportes geotécnicos que se encuentran almacenados en la OIS y que datan de la década de los 70 hasta el presente. En el principio, dichos reportes eran inventariados utilizando un sistema manual de tarjetas. Luego, el sistema de tarjetas se migró a Microsoft Access. Por último, el Inventario de Reportes Geotécnicos se migró a ArcGIS Online y cada uno de los reportes geotécnicos fueron georreferenciados y escaneados en formato digital de Adobe®. En la Figura 3 podemos observar que los 2,658 reportes contienen 26,277 bitácoras de barrenado. Con esto en mente, la OIS decidió crear un inventario georreferenciado de bitácoras de barrenado. En la Figura 4 podemos apreciar que al momento se han georreferenciado sobre 16,000 bitácoras de barrenado. Finalmente, se creó una aplicación para compartir los reportes geotécnicos con el público y actualmente se encuentra en el proceso de hacer lo mismo con el Inventario de Bitácoras de Barrenado.



Figura 3: Tablero de ArcGIS del Inventario de Reportes Geotécnicos.

Inventario de Taludes

El inventario de taludes se comenzó con un formulario creado por el personal de la OIS basado en experiencias previas. En el 2019 se celebró en la Isla el primer "Geotechnical Asset Management Peer Exchange" (GAMPE) y basados en las recomendaciones de los expertos que participaron de dicho evento, se decidió adoptar las recomendaciones establecidas por FHWA (2019). A la misma vez, el alcance del inventario se amplió para incluir la evaluación de los taludes. Esta tarea se conoce como Programa de Gerencia de Taludes Inestables (USMP, por sus siglas en inglés). En el USMP de la ACT se describen, localizan y evalúan las condiciones de los taludes dentro del NHS. El programa incluye cortes en roca y taludes naturales en roca sobre la vía de rodaje. En el caso de taludes en suelos, se decidió inventariar los terraplenes, cortes y taludes naturales. Al momento, se han inventariado sobre 700 taludes, como se puede apreciar en la Figura 5.

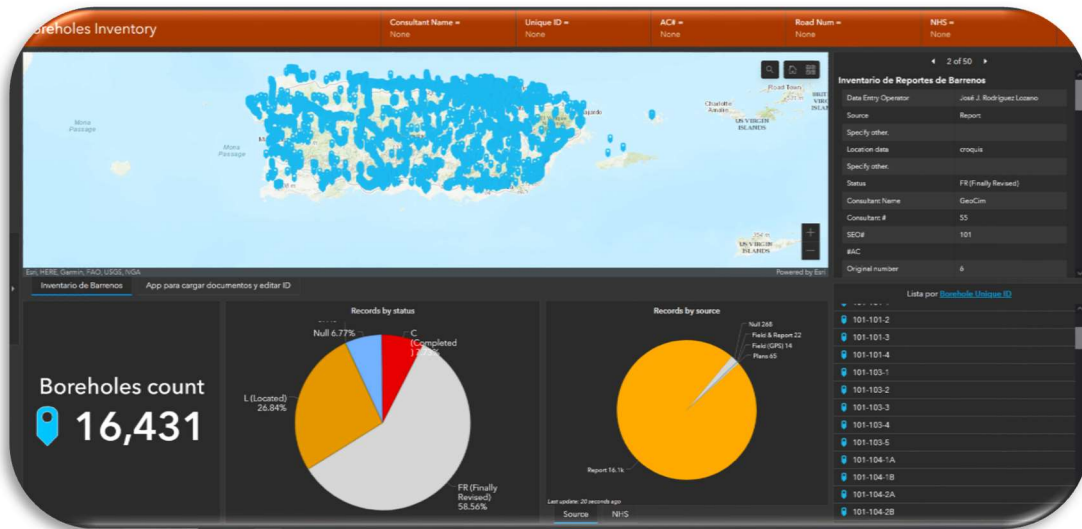


Figura 4: Tablero de ArcGIS del Inventario de Bitácoras de Barrenado.

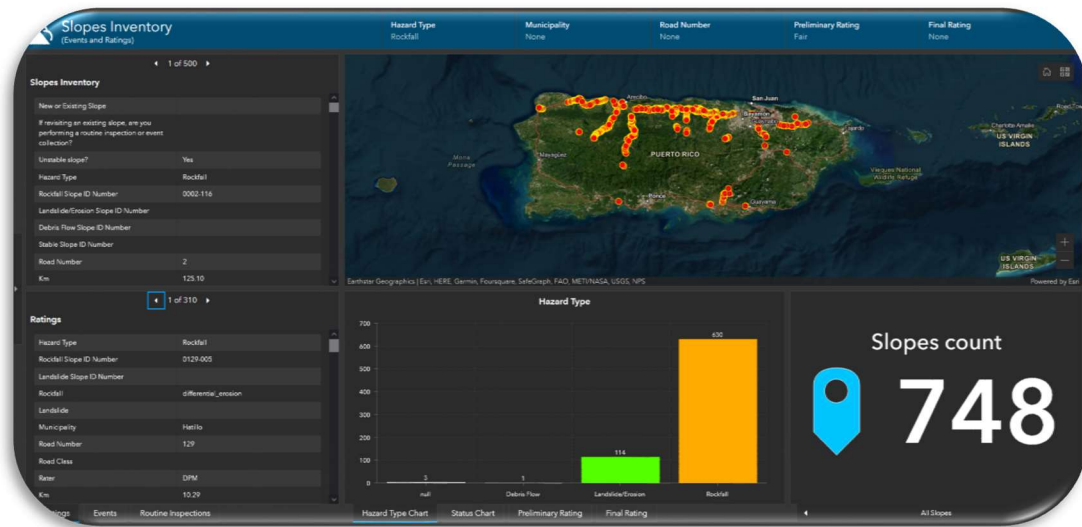


Figura 5: Tablero de ArcGIS del Programa de Gerencia de Taludes Inestables.

OTRAS INICIATIVAS GEOTECNICAS DE LA OFICINA DE INGENIERÍA DE SUELOS

En el año fiscal 2018-2019, la OIS participó de la conferencia anual del programa Cada Día Cuenta (EDC por sus siglas en inglés) de la FHWA. La OIS aceptó ser el campeón de la ACT para la iniciativa de Métodos Avanzados de Exploración Geotécnica (A-GaME por sus siglas en inglés). A-GaME consiste en emplear una serie de tecnologías, que, aunque han probado ser efectivas, son poco utilizadas en la exploración geotécnica. Cuando dichas tecnologías son combinadas con los métodos tradicionales de investigación de subsuelo permiten que se realice una mejor caracterización del subsuelo. Como parte de la iniciativa A-GaME, la OIS celebró un taller virtual en el 2020 en el cual participaron empleados públicos, diseñadores y consultores. Posteriormente, en el 2022, la OIS fue anfitrión del taller Caracterización de Suelos del Instituto Nacional de Carreteras (NHI, por sus siglas en inglés) en el cual se presentaron varios métodos del A-GaME. Esta innovación, se estará incorporando en la nueva edición del Manual de Guías de Exploración Geotécnica de la OIS.

En el 2022, la OIS participó en la Conferencia de Ingeniería Geotécnica en Transportación del Sureste (STGEC, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos (EE.UU.) La STGEC es una reunión anual que se ha llevado a cabo desde el 1969 cuando la FHWA propuso que los doce estados del sureste (Alabama, Arkansas, Florida, Georgia, Kentucky, Louisiana, Mississippi, North Carolina, South Carolina, Tennessee, Virginia y West Virginia) se reunieran anualmente para discutir problemas de asentamientos y deslizamientos. El STGEC tiene un comité timón que actúa como órgano rector y está compuesto por un miembro de cada agencia de transportación estatal, un miembro de la FHWA y un miembro de la Junta de Investigación en Transportación (TRB, por sus siglas en inglés). El objetivo principal del STGEC es discutir la transferencia de tecnología concerniente a los avances en tecnología sobre ingeniería geotécnica y compartir experiencias o problemas en el campo de la ingeniería geotécnica para alcanzar las metas de tener un sistema de transportación eficiente y económico. La sede de las conferencias del STGEC se rota entre los estados miembros para asegurarse de que cada uno de los estados actúa como anfitrión de la conferencia. En el 2022 la OIS participó en la conferencia STGEC en donde presentó los esfuerzos que se han realizado para implementar un programa de gerencia de activos geotécnicos. El comité timón del STGEC aceptó a un miembro de la OIS de la ACT de Puerto Rico a formar parte de dicho comité. En el 2027, Puerto Rico será la sede de la conferencia STGEC.

La OIS a su vez ha participado por varios años en el “*Highway Geology Symposium*” (HGS). El HGS es una conferencia anual que celebra en diferentes estados de los EE.UU. El HGS fue organizado en el 1950 (hace más de 72 años) para establecer una relación de colaboración entre ingenieros civiles y geólogos para poder atender en conjunto problemas en las carreteras. Cabe señalar que en el HGS del 2022 se llevó a cabo el segundo GAMPE a nivel nacional, siendo el primero, como se mencionó anteriormente, en Puerto Rico.

RETOS Y PRÓXIMOS PASOS DE LA OIS

La OIS ha atravesado en la última década por una serie de desafíos relacionados a la inestabilidad económica de la ACT. Entre los desafíos podemos mencionar los siguientes: falta de personal, equipo, fondos para contratar consultores y entendimiento de la necesidad de un programa de gerencia de activos geotécnicos. La limitación de recursos humanos para realizar los inventarios ha sido tal vez uno de los desafíos más grandes del programa de Gerencia de Activos Geotécnicos de la OIS. El programa de Gerencia de Activos Geotécnicos de la OIS, estará trabajando en nuevas iniciativas considerando los desafíos y retos presentados. Entre las iniciativas y metas a partir del 2023 podemos mencionar:

1. Someter nuevas propuestas al SPR;
2. Tratar de incorporar el programa de Gerencia de Activos Geotécnicos dentro del programa global de Gerencia de Activos de Transportación de la ACT;
3. Complementar el Programa de Gerencia de Taludes Inestables (USMP) utilizando un escáner láser terrestre y desarrollar un programa de notificación de movimientos de taludes inestables;
5. Establecer un procedimiento para que los consultores sometan los reportes geotécnicos en un formato digital uniforme para continuar mejorando el Inventario de Reportes Geotécnicos;
6. Desarrollar una base de datos georreferenciada que pueda interactuar con las otras bases de datos de la ACT (e.g., puentes y pavimentos);
7. Crear un sistema de acceso para que el público (consultores, diseñadores, etc.) pueda acceder las bases de datos de los inventarios de reportes geotécnicos y bitácoras de barrenado; y
8. Georreferenciar los tramos de carretera que componen el sistema NHS de tal forma que pueda interactuar con las otras bases de datos georreferenciadas de la OIS.

REFERENCIAS

- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (1965). Ley de la Autoridad de Carreteras de Puerto Rico. Ley Núm. 74 de 23 de junio de 1965. 9 L.P.R.A.
- Estado Libre Asociado de Puerto Rico. (1991). Ley de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico. Ley Núm. 1 de 6 de marzo de 1991. 9 L.P.R.A.
- Federal Highway Administration. (2010). Culvert Assessment and Decision-Making Procedures Manual for Federal Lands Highway, Publication No. FHWA-CFL/TD-10-005. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/50273>.
- Federal Highway Administration. (2013). Geotechnical Asset Management Implementation Concepts and Strategies. Publication No. FHWA-CFL/TD-13-003.
- Federal Highway Administration. (2019). Unstable Slope Management Program for Federal Land Management Agencies. Publication No. FHWA-FLH-19-002.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). Geotechnical Asset Management for Transportation Agencies, Volume 2: Implementation Manual. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25364>.
- North Carolina Department of Transportation. (2015). Retaining Wall Inventory and Assessment System. Publication No. FHWA/NC/2014-10.

RESEÑA DE AUTORES



*J*efe de la Oficina de Ingeniería de Suelos de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico. Obtuvo el Bachillerato en Ciencias en Ingeniería Civil (BSCE) y la Maestría en Ingeniería Civil con especialidad en Geotecnia de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez (UPRM). Posteriormente obtuvo el Doctorado en Filosofía (PhD) con especialidad en Geotecnia de la Universidad de Missouri en Columbia y el Doctorado en Filosofía en Ingeniería Geológica (Ingeniería de Rocas) de la Universidad de Ciencias y Tecnología de Missouri. Las áreas de interés incluyen resistencia al corte de suelos y detección de movimiento en taludes en roca usando escaneo láser terrestre.



*I*ngeniera de la Oficina de Ingeniería de Suelos de la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) de Puerto Rico. Obtuvo el Bachillerato en Ciencias en Ingeniería Civil (BSCE) y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Civil (MSCE) con especialidad en Geotecnia en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez (UPRM). Las áreas de interés incluyen estabilidad de taludes y gerencia de activos geotécnicos.

REFLEXIONES ACERCA DEL DISEÑO DE POSTES DE ACERO PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN MÉXICO¹

Cuauhtémoc Cordero-Macías², Luis Ángel Mendoza-Mendoza³

RESUMEN: El uso de postes de acero como estructuras de soporte para líneas en México se ha incrementado en los últimos 30 años, debido principalmente al aumento de la mancha urbana y suburbana que demandan menos derecho de vía de este tipo de infraestructura y menos espacio para sus cimentaciones. Con la finalidad de cumplir estos fines, se han realizado numerosos estudios relacionados con el dimensionamiento dieléctrico, la optimización de la distancia entre fases para reducir pérdidas eléctricas, el peligro eólico asociado al sistema cables-aisladores-herrajes-estructura-cimentación, los criterios de diseño estructural basados en confiabilidad, pruebas mecánicas a escala natural, entre otros. En este artículo se presentan algunas reflexiones relacionadas con las diferentes etapas del diseño de postes metálicos para líneas de transmisión, desde los datos de entrada hasta los diseños estructurales, siguiendo los criterios de la industria eléctrica mexicana para un poste de 230 kV, 2 circuitos, ubicado en Mexicali, B.C.

Palabras clave: diseño estructural, líneas de transmisión, peligro eólico, postes de acero

REFLECTIONS ON THE DESIGN OF STEEL POLES FOR TRANSMISSION LINES IN MEXICO

ABSTRACT: The use of steel poles as support structures for lines in Mexico has increased in the last 30 years, mainly due to the increase in urban and suburban sprawl that demand less right of way for this type of infrastructure and less space for their foundations. To fulfill these requirements, numerous studies have been carried out related to dielectric sizing, optimization of the distance between phases to reduce electrical losses, wind hazard associated with the cable-insulator-hardware-structure-foundation system, structural design criteria based on reliability, natural-scale mechanical tests, among others. This article presents some reflections related to the different stages of the design of metal poles for transmission lines, from input data to structural designs, following the criteria of the Mexican electrical industry for a 230 kV pole, 2 circuits, located in Mexicali, B.C.

Keywords: structural design, transmission lines, wind hazard, steel poles

INTRODUCCIÓN

En México se considera a las líneas de transmisión a aquellos sistemas que conducen energía eléctrica para tensiones de 115 kV o mayores, interconectados y que constituyen el Sistema Eléctrico Nacional. Las estructuras que soportan estas líneas se clasifican en: torres, postes y marcos; la gran mayoría de las estructuras están fabricadas de acero galvanizado por inmersión en caliente.

Existen muchos documentos de suma importancia que nos conducen al diseño eléctrico y civil de postes de acero, pero quiero referirme a dos en particular: los relacionados a niveles isoceraunicos y los de velocidades de viento máximas.

La densidad de descargas atmosféricas se ha obtenido a partir de mapas. Los primeros mapas datan del año 1986 y fueron publicados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Comisión Federal de Electricidad, 1986). El siguiente estudio fue realizado entre la misma CFE y el Instituto de Investigaciones

¹Artículo recibido el 6 de octubre de 2022 y aceptado para publicación el 4 de abril de 2023.

² Profesor del Posgrado en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional, Av. Miguel Bernard 322, La Escalera, 07320, Ciudad de México, México. E-mail: ccorderom@ipn.mx

³ Maestro en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional. E-mail: lmendoza1100@outlook.com

Eléctricas en el periodo de 1983 a 1993 (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1994). Finalmente, con un mayor nivel de detalle, pero como un grupo de mapas mensuales (no anuales), la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Centro de Ciencias de la Atmósfera, publica el Atlas Climático Digital de México con información del 2006 al 2010 (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM, 2012) (Castillo, 2018). Dadas las condiciones ambientales actuales, es conveniente una actualización de estos mapas, tanto a nivel mensual como anual.

A partir de la primera edición del Manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC) de la CFE en 1969, Capítulo de Diseño por Viento (Comisión Federal de Electricidad, 1969), por primera vez se definió de manera probabilista la distribución de las velocidades de viento regionales en la República Mexicana. En 1983 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se avocó en definir una metodología integral que recopilaba y analizaba las velocidades del viento máximas registradas desde 1940 en sesenta estaciones meteorológicas alrededor de la República Mexicana, así como las producidas por huracanes. A partir de esta base de datos depurada y consistente, se generaron los primeros mapas de isotacas de la República Mexicana con fines de diseño de líneas de transmisión (Sánchez & Aguirre, 1983). En 1993, el IIE editó la nueva versión del MDOC-DV (Comisión Federal de Electricidad, 1993), el cual incluía la actualización de los mapas de isotacas del país y en 1994 actualizaba los procedimientos de diseño mecánico de líneas de transmisión de la CFE adicionando otros mapas de isotacas para periodos de retorno adecuados al diseño de líneas y unificando también los criterios para el cálculo de presiones, flechas y tensiones de estos sistemas de gran importancia (López et al, 1994). Posteriormente, CFE por conducto del IIE realiza la actualización de los mapas de velocidades de viento para periodos de retorno fijo: 10, 50, 100 y 200 años, así como para diseño óptimo (Comisión Federal de Electricidad, 2008). En 2020 CFE publica la más reciente actualización del MDOC-DV, donde se presentan mapas de velocidades máximas de viento para periodos de retorno fijo: 10, 50 y 200 años, para velocidades regionales óptimas para factores de importancia de pérdidas $Q=5$ y $Q=15$, así como por tornados con periodos de retorno de 10,000,000 de años (Comisión Federal de Electricidad, 2020).

DISEÑO ELÉCTRICO

Las características electromecánicas de los postes generalmente son proporcionadas por medio de tablas. La Tabla 1 muestra las del caso en estudio.

Tabla 1: Características electromecánicas de poste de transmisión para 230 kV, 2 circuitos, 1 conductor/fase.

Característica	Valor
Tensión nominal (kV)	230.00
Número de circuitos	2
Disposición de conductores	Vertical
Tipo de conductor	1113 ACSR/AS
Número de conductores por fase	1
Tensión mecánica del conductor por fase (kN)	19.00
Tipo de cable de guarda	CGFO
Tensión mecánica del hilo de guarda (kN)	9.00
Utilización (Deflexión y Remate)	90° / 190 / 175

Deflexión, δ ($^{\circ}$)	90.00
Claro medio horizontal, CMH (m)	190.00
Claro vertical, CV (m)	175.00
Altitud sobre el nivel del mar (m)	50.00
Distancia dieléctrica de la fase lateral, d (m)	2.50
Distancia entre fases e hilo de guarda, G (m)	6.00
Distancia mínima vertical entre crucetas, Fv (m)	6.00
Distancia mínima horizontal entre fases, FH (m)	6.50
Arreglo de la cadena de tensión	Sencilla
No. de aisladores de tensión (Normales)	19.00
Tipo de aisladores	112 KN
Tipo de aisladores para puentes (Normales)	18.00
Ángulo de blindaje, α ($^{\circ}$)	0.00
Ángulo vertical de salida de conductores, β ($^{\circ}$)	10.00
Altura de conductor inferior a piso (m)	19.00

Las tensiones mecánicas del conductor e hilo de guarda deben estar en función del análisis de flechas y tensiones para las diferentes condiciones de tendido y operación, tanto iniciales como finales; por lo que el valor indicado en tablas similares a la Tabla 1 debe ser enunciativo más no limitativo.

En algunos casos, el ángulo de blindaje es negativo. Esta condición, desde el punto de vista estructural presenta el inconveniente de que transmite momentos flexionantes y torsionantes mayores en el fuste, comparados con los correspondientes a ángulos de blindaje de 0° . A partir de estas características eléctricas se procede a realizar la llamada “silueta del poste”, la cual corresponde al topológico que se utilizará en el análisis estructural.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar el análisis de un poste de 230 kV, 2 circuitos, ubicados en la ciudad de Mexicali, B.C. Un circuito está formado por tres fases y generalmente cada fase esta soportada por un brazo de conductor, de tal forma que un poste de 2 circuitos tiene dos brazos de guarda y seis brazos de conductores.

A partir de los datos del sitio, se obtuvieron las velocidades máximas por viento para periodos de retorno fijo de 10 ($V_{R 10}$) y 50 ($V_{R 50}$) años, indicadas en la tabla C.1 del MDOC-DV (Comisión Federal de Electricidad, 2020).

$$V_{R 50} = 123.20 \text{ km/h}$$

$$V_{R 10} = 110.20 \text{ km/h}$$

En la Figura 1 se señala el sitio en estudio, mientras que la Tabla 2 indica las características físicas de los cables conductores y de guarda empleados en el análisis.



Figura 1: Ubicación satelital de la SE Ruiz Cortines, municipio de Mexicali, B.C.. (Google, 2023)

Tabla 2: Características físicas de los cables.

Característica	Conductor	Guarda	Unidad
Tipo de cable	1113 ACSR/AS	OPGW	---
Área de la sección transversal, S	603.00	123.00	mm ²
Diámetro externo, θ	31.98	14.50	mm
Peso por unidad de longitud, p	1.82	0.61	kg/m
Peso específico, W	0.003021559	0.0049675	kg/m/mm ²
Módulo de elasticidad inicial, Ei			kg/mm ²
Módulo de elasticidad final, Ef	6587.10	9700.00	kg/mm ²
Coefficiente de dilatación, α	2.08E-05	1.70E-05	1/°C
Tensión de ruptura, Tr	13286.00	7134.00	kg

Las diferentes partes que constituyen un poste se muestran en la Figura 2.

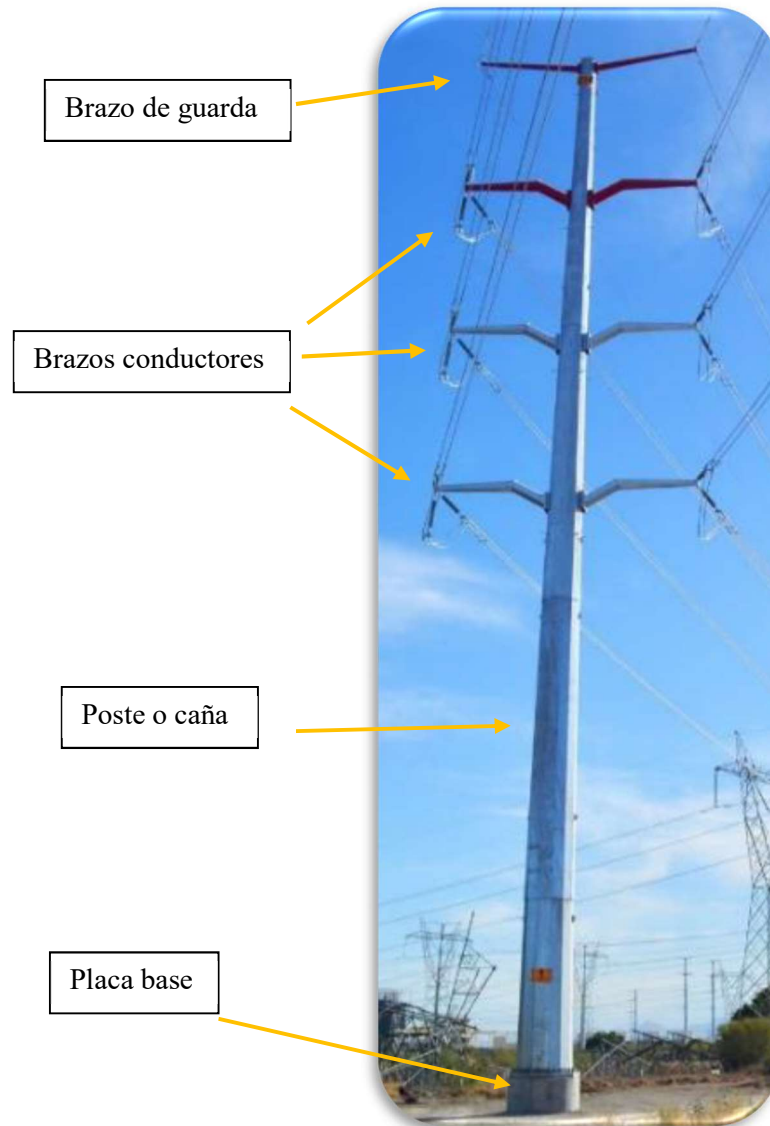


Figura 2: Partes principales que constituyen un poste.

El MDOC-DV considera al terreno como categoría 2. De acuerdo con la tabla 2.2 del mismo Manual, las variables para obtener el factor de exposición (F_{rz}) local son: (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

$$c = 1.00$$

$$\alpha = 0.095$$

$$\delta = 350 \text{ m}$$

Con estos valores y a partir de la ecuación 2.4 de este último Manual (Figura 3), se obtuvieron los siguientes valores del factor de exposición, para las alturas efectivas de cables y estructura (Mendoza, 2022):

$$F_{rz} = c \quad \text{si} \quad z \leq 10 \quad (2.3)$$

$$F_{rz} = c \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad \text{si} \quad 10 < z < \delta \quad (2.4)$$

$$F_{rz} = c \left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha \quad \text{si} \quad z \geq \delta \quad (2.5)$$

donde

c	coeficiente de escala de rugosidad, adimensional,
z	altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m,
α	exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional, y
δ	altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y puede suponerse constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente, en m.

Figura 3: Factor de exposición. (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

Para z_{ec} ; $F_{rz} = 1.09$

Para z_{ec} ; $F_{rz} = 1.11$

Conforme a la ecuación 2.1 de la Figura 4, a partir de los datos del sitio de estos datos y de la silueta del poste en estudio mostrada en la Figura 5, se obtuvieron las velocidades de diseño siguientes indicadas en Tabla 3:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad (2.1)$$

donde

F_T	factor que depende de la topografía local, adimensional,
F_{rz}	factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional,
V_R	velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en km/h.

Figura 4: Obtención de la velocidad de diseño. (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

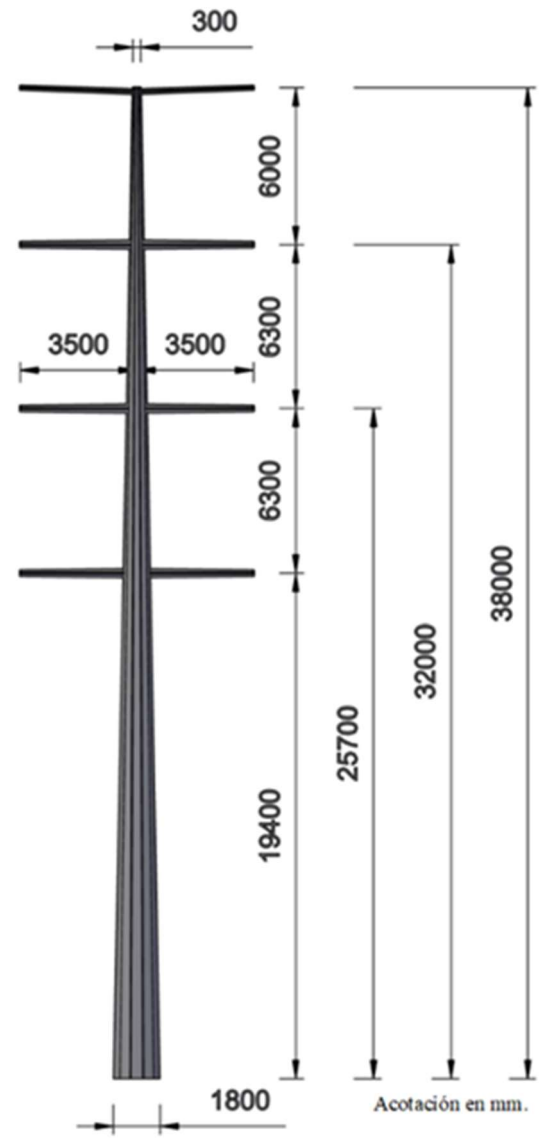


Figura 5: Silueta del poste en estudio.

Tabla 3: Velocidades de viento de diseño para diferentes periodos de retorno. (Mendoza, 2022)

COMPONENTE	Velocidades básicas de diseño para diferentes periodos de retorno (km/h)	
	50 años	10 años
Estructura	134.29	60.06
Cables	136.75	61.16

Las presiones dinámicas de base se obtuvieron de las ecuaciones 3.1 y 3.2 del MDOC-DV (Figura 6) para las condiciones de temperatura y altitud del sitio, $\tau = 1^\circ\text{C}$ y $\Omega = 756$ mm de Hg, las cuales se muestran en la Tabla 4.

$$q_z = 0.047 G V_D^2 \quad (3.1)$$

$$q_z = 0.0048 G V_D^2 \text{ (en kg/m}^2\text{)} \quad (3.1.a)$$

donde:

V_D velocidad básica de diseño, en km/h, definida en el inciso 2, y
 G factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional.

El valor de G , adimensional, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{0.392 \Omega}{273 + \tau} \quad (3.2)$$

donde:

Ω presión barométrica, en mm de Hg, y
 τ valor medio anual de las temperaturas mínimas diarias, en °C.

Figura 6: Expresiones para obtener la presión dinámica de base. (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

Tabla 4: Valores de la presión dinámica de base. (Mendoza, 2022)

COMPONENTE	Presiones dinámicas de base (Pa)	
	50 años	10 años
Estructura	917.09	183.44
Cables	951.00	190.22

La presión del viento sobre estructuras de soporte o cables de la línea se obtiene considerando el efecto dinámico del viento y se puede obtener a partir de presiones equivalentes que emplean factores de respuesta dinámica que dependen de las condiciones de flujo y de las propiedades dinámicas del componente. La presión equivalente actuante en la estructura de soporte se calcula conforme a la especificación CFE J6100-54 (Comisión Federal de Electricidad, 2019) mediante la ecuación (1):

$$P_{ze} = F_{ge} C_a e q_z \quad (1)$$

Donde F_{ge} es el factor de respuesta dinámica de estructuras de soporte que se obtiene de la ecuación (2) de la especificación mencionada:

$$F_{ge} = \frac{1}{g_z^2} \left[1 + 12.86 \sqrt{K} \left(\frac{10}{h_o} \right)^{\alpha'} \left(\frac{1}{1 + 0.563 \frac{h_o}{L_s}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

Obteniéndose un valor de $F_{ge} = 3.33$

El coeficiente de arrastre se obtiene de la Tabla A5 del mismo documento normativo para una sección transversal dodecagonal con relación H/b = 31.5, a saber: $C_{ac} = 1.20$

De forma análoga se obtiene la presión equivalente sobre cables por medio de la ecuación (3):

$$P_z = 0.6 F_{gc} C_{ac} Q_z \quad (3)$$

En donde el factor de respuesta dinámica de cables se obtiene con la ecuación (4):

$$F_{gc} = \frac{1}{g_z^2} \left[1 + 12.86 \sqrt{K} \left(\frac{10}{z} \right)^{\alpha'} \left(\frac{1}{1 + 0.8 \frac{L}{L_s}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

L es el claro medio horizontal = 190 m, por lo que $F_{gc} = 2.69$ y $C_{ac} = 1.00$ según el inciso A.4.2 de la misma Especificación.

A manera de resumen, en la Tabla 5 se muestran los valores de las presiones de viento para estructura y cables.

Tabla 5: Presiones de viento. (Mendoza, 2022)

COMPONENTE	Presiones de viento (Pa)	
	50 años	10 años
Estructura	3665	733
Cables	1535	307

Las presiones de viento sobre la estructura se consideraron constantes con la altura, mientras que para cables se consideró la misma presión para todos (guarda y conductor).

Las tensiones mecánicas impuestas por los cables bajo diferentes condiciones meteorológicas se obtuvieron aplicando el método de la catenaria, ver ecuación (5), y la ecuación general de cambio de estado, ver ecuación (6). (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1993)

$$\frac{H_2}{w_2} \sinh \left(\frac{w_2 d}{2H_2} \right) - \frac{H_1}{w_1} \sinh \left(\frac{w_1 d}{2H_1} \right) (1 + \alpha \Delta\theta + \Delta\varepsilon) = 0 \quad (5)$$

$$\alpha \Delta\theta + \frac{\Delta H}{\varepsilon \varphi} = \frac{d^2}{24} \left[\frac{w_2^2}{H_2^2} - \frac{w_1^2}{H_1^2} \right] \quad (6)$$

Donde:

H_1, H_2 Tensiones inicial y final

w_1 y w_2 Cargas inicial y final

d Claro

α Coeficiente de dilatación del cable

$\Delta\theta$ Variación de temperatura del cable

$\Delta\varepsilon$ Variación del módulo de elasticidad del cable

Con las combinaciones y factores de carga indicados en la especificación CFE J6100-54 (ver Tabla 6), se elaboró el árbol de cargas correspondiente.

Tabla 6: Combinaciones y factores de carga. (Comisión Federal de Electricidad, 2019)

Hipótesis de carga	Combinación de carga	Deformación permisible en fuste (%)	Viento
Servicio (deflexión)	(PC + PA + PE + CT) 1.0	3.00	---
Servicio (remate)	(PC + PA + PE + FL + CT) 1.0	3.00	---
Máxima sin hielo (deflexión)	(PC + PA + PE + VC + VE + CT) 1.26	---	VM
Máxima sin hielo (remate)	(PC + PA + PE + VC + VE + FL + CT) 1.26	---	VM
Máxima con hielo (deflexión)	(PCH + PA + PE + VCH + VEH + CT) 1.26	---	VR
Máxima con hielo (remate)	(PCH + PA + PE + VCH + VEH + FL) 1.26	---	VR
Tendido y mantenimiento	(PC + PA + PE + PVM + FL + CT) 1.0	---	---

En las condiciones básicas de carga empleadas para el análisis de los postes se identifican las cargas con las siguientes letras:

PC = Carga vertical en kN debida a la masa de los cables conductores y de guarda.

PCH = Carga vertical en kN debida al hielo acumulado en los cables.

PA = Carga vertical en kN debida a la masa de los aisladores, herrajes y accesorios.

PE = Masa propia del poste en kN.

PVM = Carga vertical de montaje y/o mantenimiento, la cual es de 2.9 kN para los brazos de cables de guarda y 4.9 kN para los brazos de cables conductores.

VC = Carga transversal en kN debida a la acción de VM sobre los cables de guarda y de conductor.

VCH = Carga transversal en kN debida a la acción de VR sobre los cables de guarda y de conductor ante la presencia de hielo acumulado.

VM = Velocidad regional máxima de viento coma para un periodo de retorno de 50 años.

VR = Velocidad reducida de viento. Se considera igual al 50% de la velocidad regional máxima de la zona de la línea, para un periodo de retorno de 10 años.

VE = Fuerza transversal coma en kN producida por la acción de viento VM sobre el poste.

VEH = Fuerza transversal coma en kN producida por la acción de viento VR sobre el poste.

FL = Fuerza longitudinal, en kN debida a la tensión en los cables. Para las condiciones de carga de servicio y de tendido se debe considerar la tensión diaria EDS (“Every Day Strenght”) en cables, para la condición de carga máxima se debe emplear la tensión obtenida con presiones de viento.

VM y para la condición máxima con hielo es la tensión aplicando VR y con presencia de hielo en caso de que éste exista.

CT = Componente transversal, en kN producida por la tensión de los cables de vida a la de flexión de la línea. Para las condiciones de carga de servicio y de tendido se debe considerar la tensión obtenida con presiones de viento VM y para la condición máxima con hielo es la tensión aplicando VR y considerando presencia de hielo en caso de que éste exista.

Algunas consideraciones adicionales que aplican a esta estructura son:

- a) Para el diseño, las hipótesis en un solo circuito instalado en disposición vertical y dos cables de guarda.
- b) PCH solo se presenta cuando se acumula una capa helada de 5mm de espesor en los cables.
- c) Para postes de remate, agregar una hipótesis adicional con el viento longitudinal.
- d) Para el cálculo de cargas transversales de tendido y mantenimiento, se usa la componente CT una vez.
- e) La aplicación de la carga por tendido y mantenimiento es una fase a la vez.

Con base en las combinaciones de carga anteriores y sus consideraciones adicionales, se definieron para los análisis 37 casos de carga. En la Figura 7 se muestran los puntos de aplicación de dichas cargas y la dirección preferencial de la presión de viento en estructura.

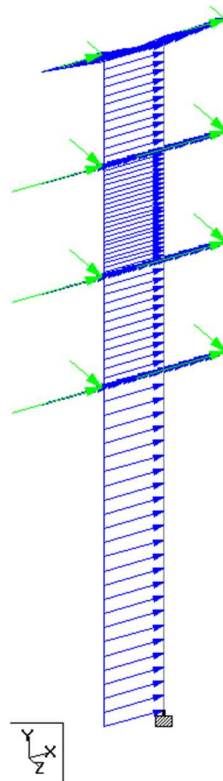


Figura 7: Vectores de carga y puntos de aplicación; presión transversal uniforme debida al viento en estructura.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Dada la gran deformidad de este tipo de estructuras, el análisis estructural que se emplea es no lineal, asistido por computadora, para este caso se utilizó STAAD.Pro Connect Edición V22. En cuanto a las secciones transversales, la práctica de fabricación mexicana ha sido que las secciones de postes sean telescópicas dodecagonales y de los brazos son hexagonales, ambos en configuración vértice-vértice (P-P); esto permite secciones más eficientes desde el punto de vista esfuerzos y deformaciones. El fuste puede fabricarse en dos o hasta cuatro “medias cañas”, dependiendo de las dimensiones de su sección transversal y de las máquinas dobladoras de placa. La dimensión mínima en la corona debe ser de 30 cm, para que se pueda doblar la placa, mientras que la máxima en la base depende de la capacidad de doblez del equipo. De preferencia los tramos de postes deben tener una longitud máxima de 12 m, lo anterior obedece al largo de las tinajas de galvanizado para evitar doble inmersión, así como a la facilidad de transporte desde la fábrica hasta el sitio donde serán instalados o almacenados (Cordero, 2001).

Para modelar y analizar la estructura de soporte de la línea de transmisión aérea se consideraron elementos viga, el fuste del poste de acero es modelado con seis elementos para representar adecuadamente la rigidez que se desarrolla en el acoplamiento entre secciones y a su vez para conectar la caña con los nodos de cada uno de los brazos, modeladas por un solo elemento (Figura 8). Se asigna a los elementos viga conicidad, variando el diámetro inicial y final. (Ver Figura 9)

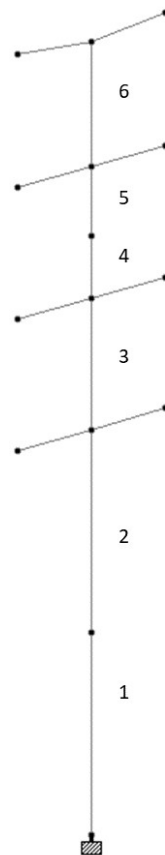


Figura 8: Modelo estructural del poste.

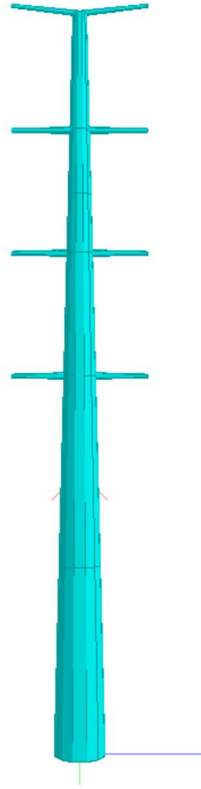


Figura 9: Conicidad de cada elemento.

Las propiedades asignadas a los postes corresponden con el tipo de acero utilizado en la fabricación de postes, según la especificación CFE J6100-54 (Comisión Federal de Electricidad, 2019) y son:

- a) ASTM A572 grado 60, con f_y mínimo de 413 MPa.
- b) ASTM A572 grado 65, con f_y mínimo de 448 MPa.
- c) ASTM A36, con f_y mínimo de 248 MPa.

Se realiza un análisis P-Delta, para tomar en cuenta los efectos de segundo orden producto de la deformación generada al aplicar la carga lateral de viento, la convergencia se define hasta que los esfuerzos inducidos ya no sean significativos.

DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño se realizó por esfuerzos admisibles con ayuda del Manual ASCE/SEI 48-19 (American Society of Civil Engineers, 2019), conforme lo indica la especificación CFE antes mencionada. En cuanto a las deformaciones admisibles, la caña del poste no debe exceder el 3% para las combinaciones de carga en servicio. Esta deformación horizontal corresponde al 3% de la altura total del poste medida desde la placa base hasta la corona del poste.

Se realizaron 90 análisis de postes, entre los más representativos resaltan 35 análisis para el acero ASTM A572-65, 15 análisis para ASTM A572-60 y 20 para ASTM A36. En la Tabla 7 se muestran los resultados de 39 postes analizados, con contorno verde están los postes que cumplen tanto por estado límite de falla como estado límite de servicio, mientras que **en negritas** se resaltan además los de **menor peso para las tres calidades de acero**.

Tabla 7: Resultados más significativos de los diseños obtenidos.

ID	Acero ASTM	Diámetro (mm)		Espesor ¹ (mm)	Deformación máxima en el fuste ² (m)	Porcentaje de trabajo máximo (%)	Peso total de acero (kN)
		Inferior	Superior				
1	A572-65	1800	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.27	213	134
2	A572-60	1800	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.27	231	135
3	A36	1800	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.27	384	137
4	A572-65	1800	800	12.7-12.7-12.7-12.7	0.82	205	164
5	A572-65	1900	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.10	192	140
6	A572-65	2000	900	12.7-12.7-12.7-12.7	0.59	166	182
7	A572-65	2000	800	12.7-12.7-12.7-12.7	0.63	1.66	176
8	A572-65	2000	700	12.7-12.7-12.7-12.7	0.67	1.66	170
9	A572-65	2000	600	12.7-12.7-12.7-12.7	0.72	1.66	164
10	A572-65	2000	500	12.7-12.7-12.7-12.7	0.78	166	158
11	A572-65	2000	400	12.7-12.7-12.7-12.7	0.86	168	152
12	A572-65	2000	300	12.7-12.7-12.7-12.7	0.96	174	146
13	A572-65	2000	700	12.7-12.7-12.7-9.5	0.67	166	164
14	A572-65	2000	700	12.7-12.7-12.7-6.35	0.69	165	158
15	A572-65	2000	700	12.7-12.7-9.5-9.5	0.71	165	156
16	A572-65	2000	700	12.7-12.7-9.5-6.35	0.72	165	149
17	A572-65	2600	900	12.7-12.7-12.7-12.7	0.30	97	218
18	A572-65	2600	900	12.7-12.7-12.7-9.5	0.31	97	210
19	A572-65	2600	900	12.7-12.7-12.7-6.35	0.31	97	202
20	A572-65	2600	900	12.7-12.7-9.5-9.5	0.32	97	199
21	A572-65	2600	900	12.7-12.7-9.5-6.35	0.19	97	191
22	A572-65	2600	300	12.7-12.7-12.7-12.7	0.47	104	182
23	A572-65	2600	500	12.7-12.7-12.7-12.7	0.39	99	194
24	A572-65	2600	500	12.7-12.7-12.7-9.5	0.40	99	189
25	A572-65	2600	800	12.7-12.7-9.5-6.35	0.35	97	187
26	A572-65	2600	700	12.7-12.7-9.5-6.35	0.38	97	183
27	A572-65	2600	600	12.7-12.7-12.7-6.35	0.38	97	188
28	A572-65	2700	300	12.7-12.7-12.7-12.7	0.43	97	188
29	A572-65	2700	300	12.7-12.7-12.7-9.5	0.44	97	184
30	A572-65	2700	400	12.7-12.7-12.7-12.7	0.39	95	194
31	A572-65	2700	400	12.7-12.7-12.7-9.5	0.40	95	189
32	A572-65	2700	500	12.7-12.7-12.7-9.5	0.36	92	195
33	A572-65	2700	600	12.7-12.7-9.5-6.35	0.37	97	184
34	A572-65	2800	500	12.7-12.7-9.5-6.35	0.37	99	185

¹Los cuatro espesores de placa pertenecen a las cuatro secciones del fuste desde la base a la corona.

² La deformación permisible en el fuste es de 1.14 m, correspondiente al 3% de la altura del poste (38.00 m).

ID	Acero ASTM	Diámetro (mm)		Espesor ¹ (mm)	Deformación máxima en el fuste ² (m)	Porcentaje de trabajo máximo (%)	Peso total de acero (kN)
		Inferior	Superior				
35	A572-60	2700	600	12.7-12.7-12.7-6.35	0.35	98	194
36	A572-60	2700	700	12.7-12.7-9.5-6.35	0.34	99	188
37	A572-60	2800	600	12.7-12.7-9.5-6.35	0.34	99	190
38	A36	3500	900	12.7-12.7-9.5-6.35	0.16	98	243
39	A36	3600	800	12.7-12.7-9.5-6.35	0.15	98	244

La conexión con la cimentación se realiza mediante una placa base, los diámetros mínimos de éstas, para los tres postes obtenidos del diseño estructural con el menor peso para cada tipo de acero, se muestran en la Figura 10 en color rojo, mientras que el diámetro mínimo de las pilas de cimentación se representa por el mayor círculo.

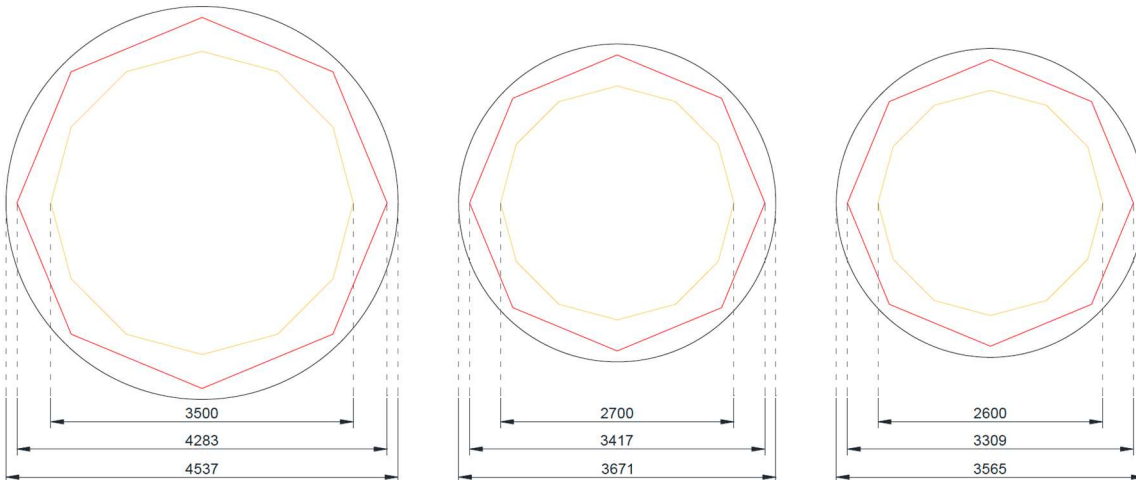


Figura 10: Dimensiones de las bases, placas base y pilas de cimentación para los tres diferentes tipos de acero: ASTM A-36 a la izquierda, A572 grado 60 al centro y A572 grado 65 a la derecha.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron tres postes optimizados para los diferentes tipos de acero que cumplen con los estados límite de falla y de servicio:

- 1) Poste troncocónico con acero ASTM A572-65, diámetro en base de 2.60 m y en la corona con 0.70 m, formado por cuatro secciones con espesores de placa de 12.7, 12.7, 9.5 y 6.35 mm, respectivamente. El orden descrito es de la parte inferior a la superior en cada sección. Los brazos para conductor fueron de 330 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. Los brazos de guarda resultaron de 250 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. El peso total del poste, sin placa base fue de 182.6 kN.

- 2) Poste troncocónico con acero ASTM A572-60, diámetro en base de 2.70 m y en la corona con 0.70 m, formado por cuatro secciones con espesores de placa de 12.7, 12.7, 9.5 y 6.35 mm, respectivamente. Los brazos para conductor fueron de 340 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. Los brazos de guarda resultaron de 260 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. El peso total del poste, sin placa base fue de 188.3 kN.
- 3) Poste troncocónico con acero ASTM A36, diámetro en base de 3.50 m y en la corona con 0.90 m, formado por cuatro secciones con espesores de placa de 12.7, 12.7, 9.5 y 6.35 mm, respectivamente. Los brazos para conductor fueron de 430 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. Los brazos de guarda resultaron de 320 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. El peso total del poste, sin placa base fue de 242.9 kN.

El diseño de la estructura está gobernado más por los esfuerzos generados en cada sección de la caña, que por las deformaciones máximas permisibles; incluso utilizando aceros de mayor esfuerzo de fluencia, que permiten usar elementos más esbeltos pero que son más flexibles.

El rango de los espesores de placa que se utilizan está limitado a la capacidad de la máquina para conformar el doblez y mientras más difícil le sea ejecutarlo mayor sería el costo de fabricación. De lo contrario la sección más elevada del fuste de los postes podría incrementar su porcentaje de trabajo y disminuir el peso. El poste más ligero de los tres obtenidos es el correspondiente al mayor esfuerzo de fluencia, mientras que el más pesado corresponde con el acero ASTM A36. Dada la variación del precio de la placa de acero, no se hizo una comparativa del costo final de cada uno.

REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers. (2019). *Design of Steel Transmission Pole Structures*. Reston: ASCE.
- Castillo, E. (2018). Importancia estadística de la densidad de descargas atmosféricas a tierra; lógica difusa en la evaluación de riesgos de impacto de rayo en el Valle de Matatipac. *EDUCATECONCIENCIA*, 104-133.
- Comisión Federal de Electricidad. (1969). *Manual de diseño de Obras Civiles. Diseño por viento*. México, México: CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (1986). *Mapa de isodensidad de descargas atmosféricas en la República Mexicana*. México: CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (1993). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Actualización de los mapas georreferenciados de velocidades de viento máximas para fines de diseño de estructuras para subestaciones y líneas de transmisión*. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Comisión Federal de Electricidad. (2019). *Especificación para diseño de postes metálicos para líneas Postes metálicos para líneas de transmisión y subtransmisión de 69 kV y mayores. Especificación J6100-54*. México, México: CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (2020). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento. Capítulo C.1.4*. México: Amazon. Versión Kindle.
- Cordero, C. (2001). Diseño de postes metálicos para líneas de transmisión. *BiTree* (p. 7). México: Biental de Transmisión.
- Google. (2023). *Google Earth*. Retrieved from <https://earth.google.com/>

- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM. (2012). *Descargas eléctricas mensuales, nube a tierra*. México, México: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas. (1993). *Definición de las condiciones básicas de carga y sus combinaciones para el diseño de estructuras de soporte de líneas de transmisión*. Cuernavaca: IIE.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas. (1994). *Proyecto para la determinación de Isolíneas de densidad de descargas de rayos a tierra*. Cuernavaca, México: IIE.
- López et al, A. (1994). *Unificación de criterios en el cálculo de presiones, flechas y tensiones para el diseño mecánico de torres de transmisión*. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Mendoza, L. A. (2022). *Diseño óptimo de estructura y cimentación para un poste de transmisión de energía eléctrica*. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Sánchez, J., & Aguirre, J. E. (1983). *Mapas de velocidad máxima de viento en México*. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.

RESEÑA DE AUTORES



C. Cordero-Macías

Ingeniero Civil y Maestro en Ciencias en Mecánica de Suelos por la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional, México. Autor y coautor de 12 artículos técnicos publicados en revistas y memorias de congresos nacionales e internacionales. Profesor del Posgrado en Ingeniería Civil de dicho Instituto desde 1986. Actualmente se desempeña en calidad Jefe del Área Disciplinaria de Geotecnia. Socio de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. Cordero-Macías es recipiente del Premio Nacional “José A. Cuevas” otorgado por el Colegio de Ingenieros Civiles de México al mejor artículo técnico de 2015.



L. Mendoza-Mendoza

Ingeniero Civil y Maestro en Ingeniería con énfasis en Geotecnia por la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Politécnico Nacional, México. Coautor de la publicación del artículo “Estudio comparativo del diseño de cimentaciones profundas para un poste de transmisión” para la XXXI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica celebrada en Guadalajara, Jal. México. Actualmente trabaja para la empresa Grupo Sandstorm GAM abordando proyectos en el occidente de México sobre cimentaciones profundas y estabilización de taludes aplicando el método de elementos finitos.

SEISMIC SOIL PRESSURES ON EMBEDDED WALLS WITH VARYING STIFFNESS AND CONTACT CONDITIONS¹

Andrea E. Cruz-Chamorro², Aidcer L. Vidot-Vega³

ABSTRACT: This article evaluates how the seismic pressures developed in embedded walls are affected by different wall stiffness and various contact soil-wall conditions. Several two-dimensional numerical models of an embedded wall-soil system were developed in Abaqus® by varying the wall stiffness. One model considered the wall as very rigid with a large modulus of elasticity and the other one considered the wall as flexible with original modulus of elasticity. Wall heights of 10, 20 and 30 meters were considered on the models to obtain different wall stiffness. The contact between the soil and the wall is modified by changing the friction coefficient between 0 to 0.75. The response of the soil is validated using 1D nonlinear site response analyses. The analyses are performed using records that match a narrow-band modified target spectrum for a moment magnitude of 7.70. The results show that the rigid walls developed larger seismic pressures than the flexible walls when subjected to the same earthquake records. The seismic soil pressures in the rigid walls do not change considerably by varying the contact condition between the soil and wall. Changes in the friction coefficient have a major impact on the seismic pressure distributions on flexible walls.

Keywords: contact, embedded walls, friction, seismic pressures, wall stiffness

PRESIONES SÍSMICAS DEL SUELO EN MUROS ENTERRADOS CON RIGIDECES Y CONDICIONES DE CONTACTO VARIABLES

RESUMEN: Este artículo evalúa cómo las presiones sísmicas desarrolladas en muros enterrados en la tierra se ven afectadas por diferentes rigideces de muros y diversas condiciones de contacto suelo-muro. En Abaqus® se desarrollaron varios modelos numéricos en dos dimensiones de un sistema pared enterrada y suelo variando la rigidez de la pared. Un modelo consideró la pared como muy rígida con un módulo de elasticidad bien grande y el otro consideró la pared como flexible con módulo de elasticidad original. En los modelos se consideraron alturas de pared de 10, 20 y 30 m para obtener diferentes rigideces de pared. El contacto entre el suelo y la pared se modifica cambiando el coeficiente de fricción entre 0 y 0.75. La respuesta del suelo se valida mediante análisis de respuesta de sitio no lineales en una dimensión. Los análisis se realizan utilizando registros que coinciden con un espectro modificado de banda estrecha para una magnitud de momento de 7.70. Los resultados muestran que los muros rígidos desarrollaron mayores presiones sísmicas que los muros flexibles cuando se sometieron a los mismos registros sísmicos. Las presiones sísmicas del suelo en los muros rígidos no cambian considerablemente al variar la condición de contacto entre el suelo y el muro. Los cambios en el coeficiente de fricción tienen un gran impacto en las distribuciones de presión sísmica en las paredes flexibles.

Palabras claves: contacto, paredes enterradas, fricción, presiones sísmicas, rigidez de pared

INTRODUCTION

According to the World Nuclear Association (WNA), there are 439 nuclear reactors in operation in 30 countries around the world. The United States had the largest number of nuclear power reactors in operation at the time (92 units). France gets around 70% of its electricity from nuclear energy. However, in Latin America there are only seven nuclear power reactors in operation, producing just 2.2% of total energy consumption in Latin America. From these reactors, three are in Argentina, two in Brazil and two in Mexico (WNA, 2021). WNA also estimated that 20% of the operating nuclear reactors are located in earthquake

¹ Article received on March 20, 2023 and accepted for publication on April 25, 2023.

² PhD Candidate, Dept. of Civil Engineering and Surveying, University of Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681. Email: andrea.cruz1@upr.edu

³ Professor, Dept. of Engineering Sciences and Materials, University of Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico. Email: aidcer.vidot@upr.edu

hazard zones. Seismic analyses of nuclear power plants are important to determine appropriate design actions that ensure the safety integrity of all elements during a major earthquake event. Most of the nuclear power plant buildings are partially or deeply embedded in soil requiring the incorporation of soil-structure interaction (SSI) effects in the analyses. Therefore, to obtain a more accurate result, it is recommended to consider SSI effects, taking into consideration that both systems will not necessarily act as completely bonded during an earthquake event. In estimating the seismic induced soil pressure, an important consideration, and a real challenge in developing the SSI model is how to represent the structure-soil interface as close as possible to the real situation (Xu et al., 2006). The numerical modelling of the contact between soil and structures at the interface is key to obtaining realistic solutions for the response of the soil structure interaction system (Datta et al., 2018). Therefore, the objective of this article is to study how the soil-wall interaction is affected by different contact friction conditions during an earthquake event. SSI effects in induced seismic pressures are considered in several soil-wall finite element models by varying the coefficient of friction at the interface. All the results are compared with a bonded soil-wall case.

FINITE ELEMENT MODELS

Two-dimensional finite element models of embedded wall–soil systems were developed in Abaqus®. One of the models considered the wall as very rigid with a large modulus of elasticity ($1000 \cdot E$) and the other one considered the wall as flexible with original modulus of elasticity (E). The densities of the wall material and soil were $2,400 \text{ kg/m}^3$ and $2,200 \text{ kg/m}^3$, respectively. The Poisson’s coefficients of the wall material and soil were 0.20 and 0.25, respectively. The pressure-dependent hyperbolic model (MKZ) developed by Matasovic (1993), which is a modification of the model by Konder and Zelasko (1963), was used to model the nonlinear behavior of the soil and to obtain the backbone curve for the analyses. The equation for the shear strength of the backbone curve is presented in equation (1) varying the value of the shear strain (equation 2). For this case, the shear wave velocity of the soil deposit is 350 m/s. The parameters used for the soil in the finite element analyses performed in this work are for granular soil (sand) with no water and no liquefaction in the soil. If liquefaction of soil is expected, the results of these analyses can vary significantly. The rock was considered as an elastic and linear material, with a shear wave velocity of 1800 m/s. Table 1 shows all the material properties used in the analyses. Table 2 shows the properties of the walls in the models. Figure 1 shows an example of how the backbone curve behaves when varying the β parameter, showing that the smaller the variable is, the larger shear strength is reached.

Table 1: Soil and rock properties.

	Soil	Rock
Density ρ (kg/m^3)	2200	2800
Poisson’s ratio ν	0.25	0.3
Shear Modulus G_o (MPa)	269.5	9072
S	0.6	-
γ_r	0.0003	-
β	0.85	-
σ_{ref} [MPa]	0.20	-

Table 2: Flexible and rigid wall properties.

	Flexible Wall	Rigid Wall (1000*E)
Density ρ [kg/m^3]	2400	2400
Poisson's ratio ν	0.2	0.2
Compressive strength f_c [MPa]	28	28
Young Modulus E [MPa]	24870.06	24870062.32

A built-in user material available in the Abaqus 2016 version was used for the hysteretic soil model including the backbone obtained from the MKZ model (Figure 1). This option allows to simulate the response of the soil under seismic loads (ABQ_HYST_SOIL). A characteristic of this material is that it is similar to the MAT_079 material in LS_DYNA. This model is a nested surface model that incorporates up to ten layers of elasto-perfectly plastic material. The hysteretic behavior is generated by superimposing various layers of the material. The value of stress at any instant is the sum of the stresses at each individual layer, resulting in a piecewise-linear backbone. This curve is broken into ten layers each having a value of elastic moduli and yield stress (Bolisetti and Whittaker, 2015). These properties are pressure dependent and are described by Equations 3 to 4. The values for the different hysteretic material parameters are the following: b (exponent for pressure-sensitive moduli) = 0, yield constants $a_0 = 0$, $a_1 = 0$, and $a_2 = 1$. These values represent typical values for this type of analysis.

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \quad (1)$$

$$\gamma_r = \gamma_{ref} \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_r}\right)^b \quad (2)$$

Where,

τ = shear strength

G_0 = initial shear modulus

γ = shear strain

γ_r = reference shear strain

γ_{ref} = reference shear strain at the reference pressure

σ_r = reference shear stress

σ'_v = effective vertical stress

β and s = stress-strain curve parameter

b = pressure dependent parameter

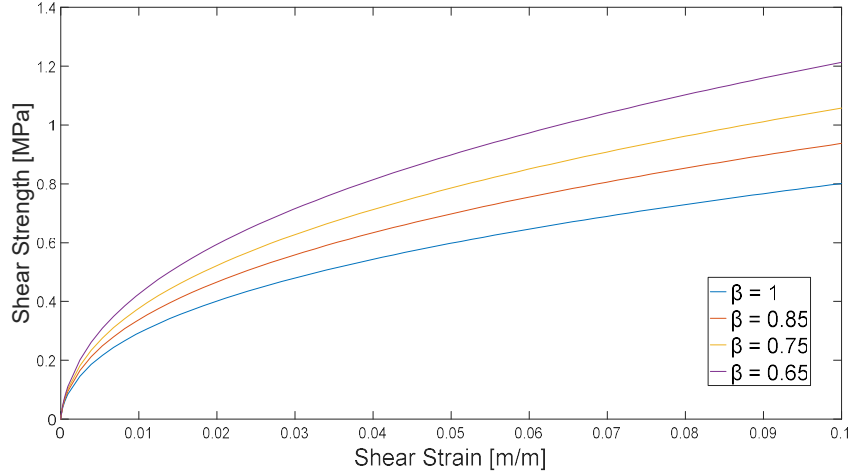


Figure 1: Pressure-Dependent Hyperbolic Model Backbone Curve

$$G(p) = \frac{G_r(p - p_0)^b}{(p_{ref} - p_0)^b} \quad (3)$$

$$\frac{\tau(p)}{\tau(p_{ref})} = \sqrt{\frac{a_0 + a_1(p - p_0) + a_2(p - p_0)^2}{a_0 + a_1(p_{ref} - p_0) + a_2(p_{ref} - p_0)^2}} \quad (4)$$

G_r = is the shear modulus at the layer of reference pressure

p = current pressure

p_0 = cut-off pressure. This value must be less than zero to withstand tension = -1e6

p_{ref} = reference pressure of the backbone curve

$\tau(p_{ref})$ = yield stress of the layer at reference pressure

$\tau(p)$ = yield stress of the layer at pressure p

The friction coefficient in the finite element models varied from 0 to 0.75 considering the Coulomb friction model. These values correspond to friction angles between 14 to 37 degrees. Three different wall heights were considered in this study (10m, 20m and 30m). Solid elements of 8 nodes with incompatible modes (C3D8I) were chosen for the wall because they can model its response accurately by improving the bending behavior (Abaqus, 2016). Figure 2 shows the finite element of the soil-wall system in Abaqus and the soil-column model developed to validate the results from the program. In the left of the model (Figure 2b), the element length is 4 times the length of the rest of the elements. This part of the model is used to simulate the free field behavior. The length of each element in each direction (dx and dy) was set to 2m. Constraints were assigned to the black nodes in the x and z direction in order to have the same displacement during the analysis. Likewise, constraints were assigned to all the nodes of the finite element model to have the same displacement in the y direction and consequently avoid warping deformations. Displacements out of plane (y-direction) are also constrained because the Abaqus/Explicit soil model consists of solid elements for rock and soil causing the model to be considered in 3D to assign the hysteretic material to the soil

elements. Three dashpots were incorporated at the base to model absorbing boundary conditions for the wave propagation. This finite element model is based on the one developed by Luna-Tezna et al. (2018) to study analytical seismic pressures in rigid retaining walls comparing them with simplified pressure approaches used in engineering practice. The method developed by Lysmer-Kuhlemeyer (1969) was used to calculate the dashpot coefficient (c_h and c_v) in the different directions. Equation 5 calculates the coefficient for the x and y directions, and equation 6 for the z (vertical) direction. The properties used in the damping calculations are shown in Tables 1 and 2.

$$c_h = A_{rock} \sqrt{G_{rock} * \rho_{rock}} \quad (5)$$

$$c_v = A_{rock} \sqrt{E_p * \rho_{rock}} \quad (6)$$

where:

A_{rock} = surface area of the rock in the horizontal direction.

G_{rock} = rock shear modulus

ρ_{rock} = rock density

E_p = normal stiffness rock modulus = $(2\nu-2)/(2\nu-1) G_{rock}$

The model was validated with one-dimensional nonlinear site response analyses (Figure 2a) using DeepSoil (Hashash et al., 2016) and compared with the response obtained of a soil-column model in Abaqus® (Figure 2b). The first model that was developed in ABAQUS does not include the wall in order to validate the results of the soil model used in the analyses. Figure 3 shows the accelerations and relative velocity results of the soil-column models developed from both programs. They show that results agree with each other. These results were obtained using a ground motion record from Northridge Earthquake ($M_w = 6.7$) scaled to 0.7g. Figure 4 shows the shear stress vs strain hysteretic results for an element in the bottom of the model between the soil and rock together with the backbone curve (showing only one direction). Shear strains are lower than 0.1% considered in the range of small deformations. The agreement of both program responses gave confidence to include the wall in the soil model in ABAQUS (Figure 2b).

Three non-pulse like earthquake ground records with a moment magnitude of 7.70 were used for the rest of the analyses with the soil-wall model. Non-pulse-like ground motions were obtained from a study performed by Roman-Velez and Montejo (2020). They took the task of generating 1624 compatible ground motions that would match the seven target spectra of moderate to strong magnitude earthquakes. From the NGA-West2 database they obtained the seed records (Ancheta et al., 2013). Figure 5 shows the acceleration time histories with the pseudo acceleration and velocity response spectrums of these earthquakes.

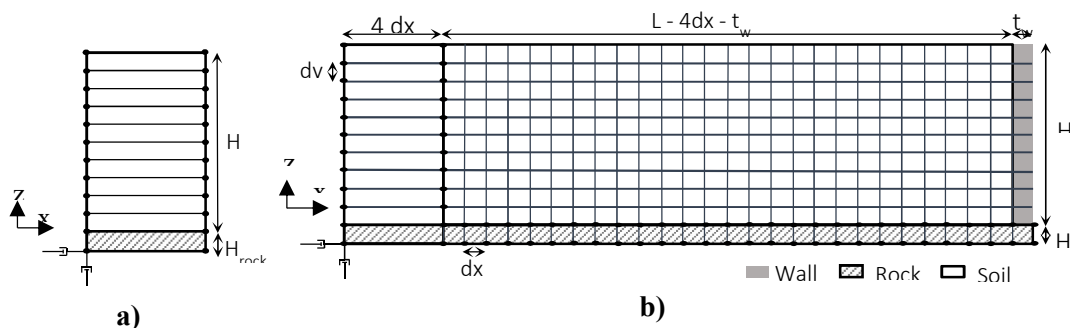


Figure 2: a) Finite element model soil column. b) Soil – wall finite element model. (Luna-Tezna et al. 2018)

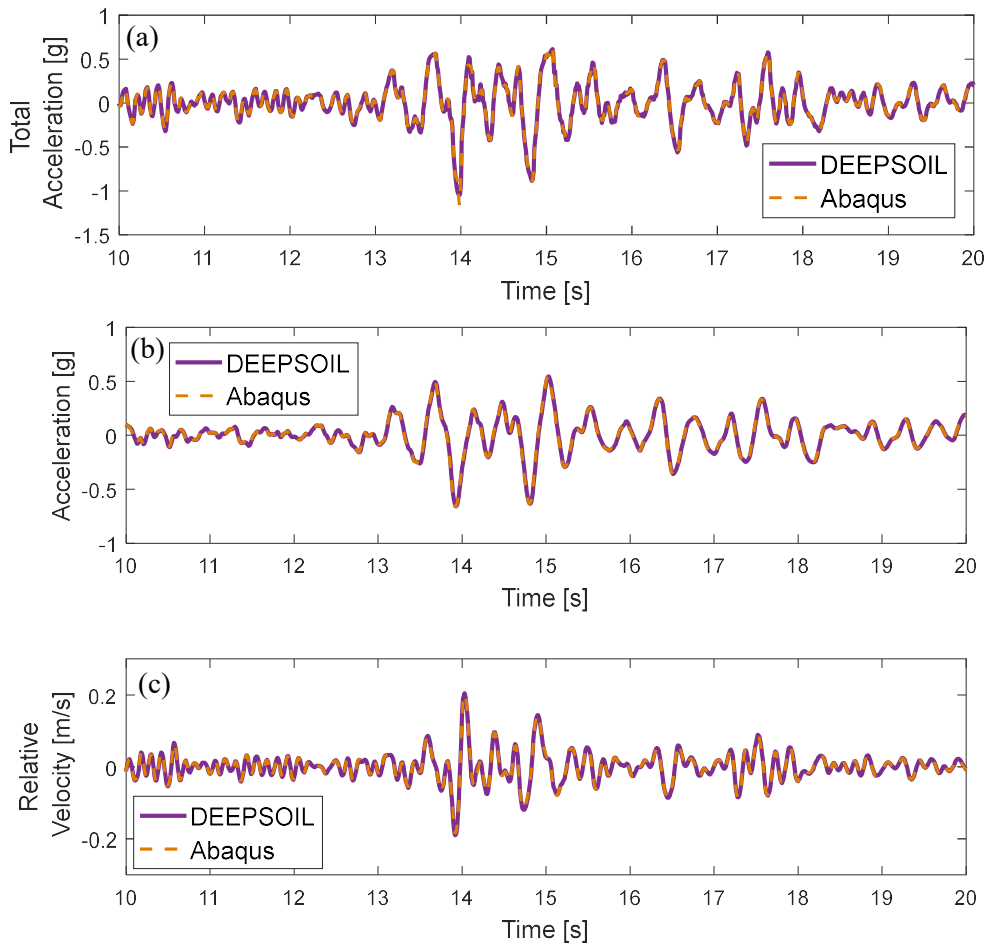


Figure 3: (a) Total acceleration at the soil surface, (b) total acceleration at the rock surface, (c) relative velocity at the soil surface.

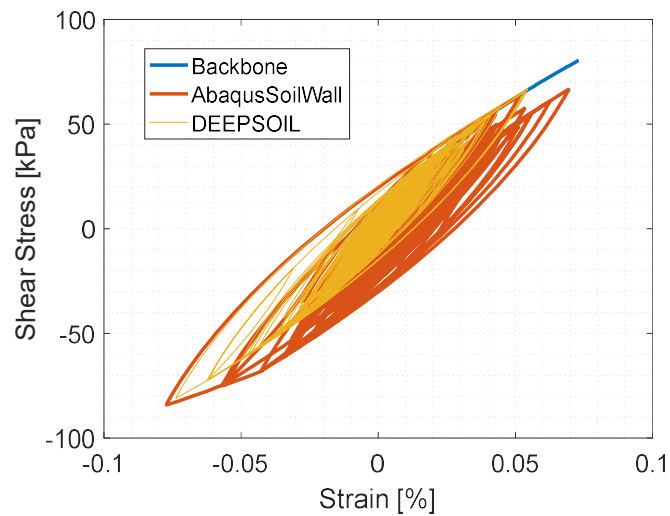


Figure 4: Example of shear Stress vs shear strain for an element between rock and soil.

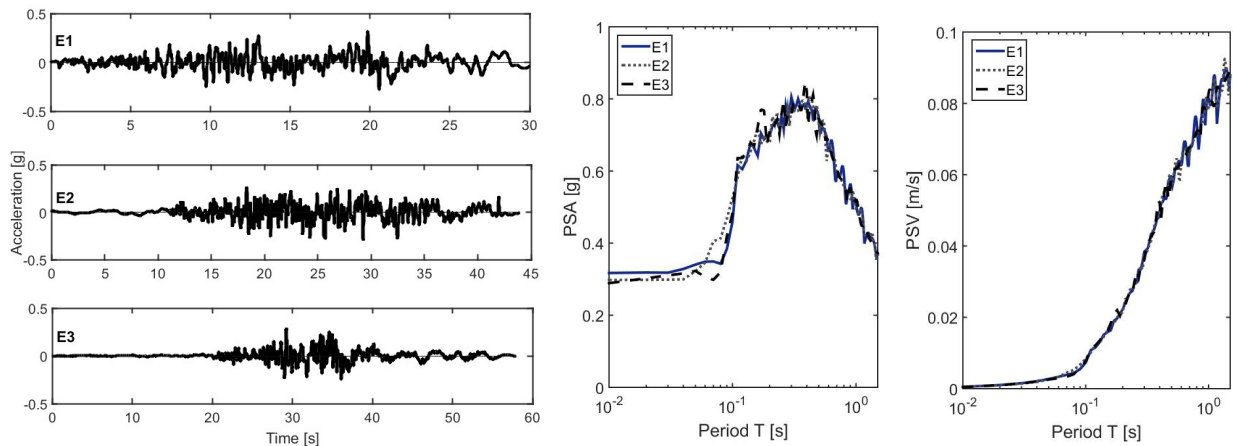


Figure 5: Acceleration time histories and pseudo acceleration and velocity response spectrums.

FINITE ELEMENT ANALYSIS RESULTS

This section presents the results obtained from the finite element models of the soil-wall system developed in Abaqus for different friction contact conditions, different modulus of elasticity (original-flexible and rigid) and three heights (10m, 20m and 30m). The average normalized seismic soil pressures obtained from the three earthquake records are shown in Figures 6-8. These figures show the normalized pressures that were obtained by dividing pressures by the unit weight of the soil (γ) and height (H) of the wall. On the vertical graph axis, the distances are normalized with respect to the wall's height. The pressures are considered positive when they induce compression on the wall. These figures presented the results obtained using five different contact conditions (bonded and with friction coefficients 0, 0.25, 0.50, 0.75). The rigid case considered the wall with a large modulus of elasticity. The flexible case is the wall with the original modulus of elasticity. The seismic soil pressures developed in the wall shown in these figures were obtained when the maximum base shear occurs in the wall.

The distribution of the average seismic pressures varied considerably when the wall is rigid or flexible. As the height of the wall increases, the change in pressure distribution is more noticeable. Psarropoulos et al. (2005) studied the seismic pressures distributions in rigid and flexible walls noticing these changes in pressure distributions. They observed that for relatively rigid systems there is a sinusoidal-like increase of the pressures from the base to the top of the wall. They noticed that for more flexible systems, the maximum pressures occur closer to the base. Wagner and Sitar (2016) also showed that the flexibility of the retaining structures plays a very important role in the magnitude of the predicted seismic loads and pressures and that their magnitude significantly decreases with increased wall flexibility considering a perfectly bonded condition. Similar, Luna et. al (2018) identified that the magnitude of the pressures varies depending on the stiffness of the wall. However, the effect of different contact conditions was not included in any of these investigations.

Figures 9-10 present the comparison of the normalized seismic soil pressures obtained for the different friction case scenarios as function of the normalized wall height for flexible and rigid wall cases, respectively. Nevertheless, the change in the friction coefficient between the soil and the wall has less effect in seismic pressure distributions than the flexibility condition. For the flexible wall with 30 m, there are mayor changes in seismic pressure distributions when the contact condition based on the friction coefficient is varied. In general, the seismic pressures are similar for friction coefficients 0.5 and 0.75. This range is within typical friction coefficients used in soil-wall interaction analyses. A friction coefficient of 0.7

corresponds to a 35-degree friction angle which is reasonable for typical soil used as backfills (Xu et al., 2006). According to these results, seems that the variability in seismic soil pressures in embedded walls is increased by wall flexibility and friction contact conditions.

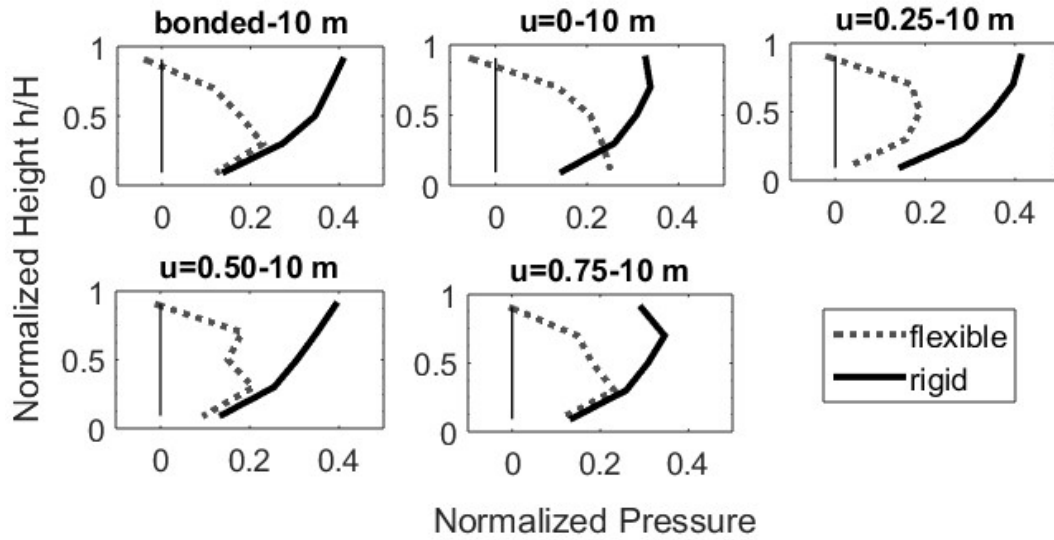


Figure 6: Normalized seismic pressures for rigid vs. flexible walls with height of 10 m.

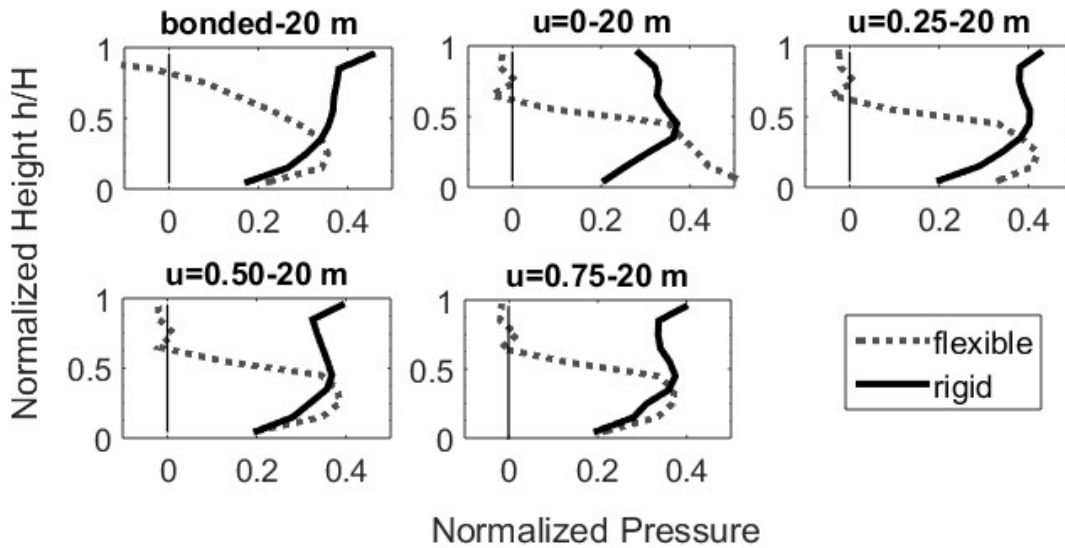


Figure 7: Normalized seismic pressures for rigid vs. flexible walls with height of 20 m.

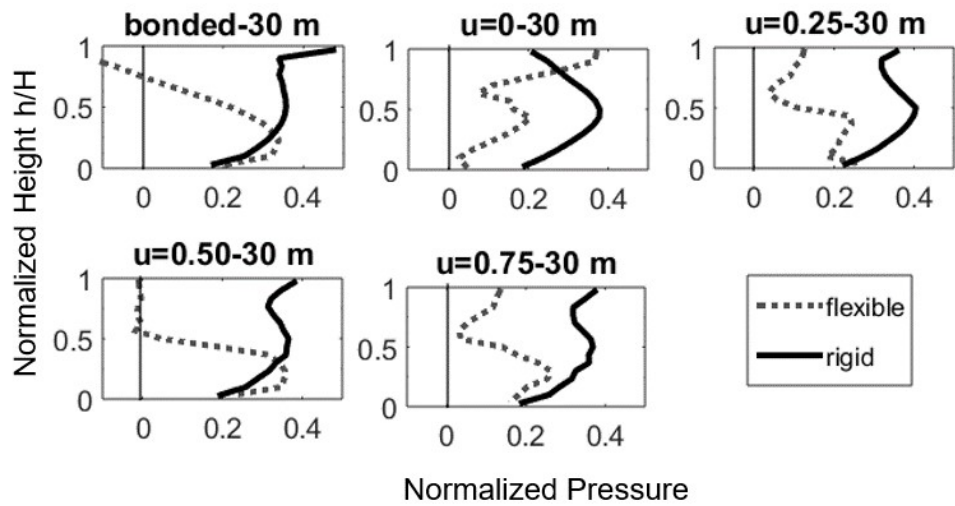


Figure 8: Normalized seismic pressures for rigid vs. flexible walls with height of 30 m.

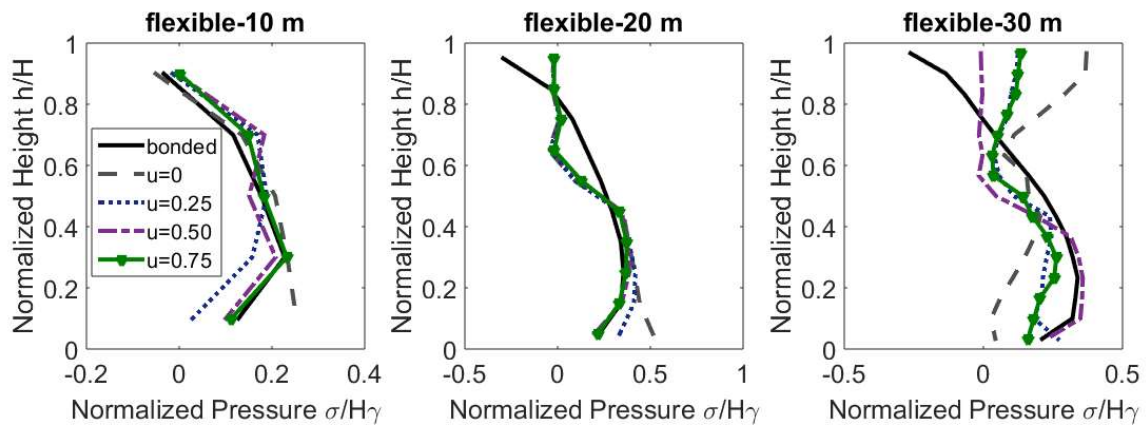


Figure 9: Normalized seismic pressures for flexible walls (original E).

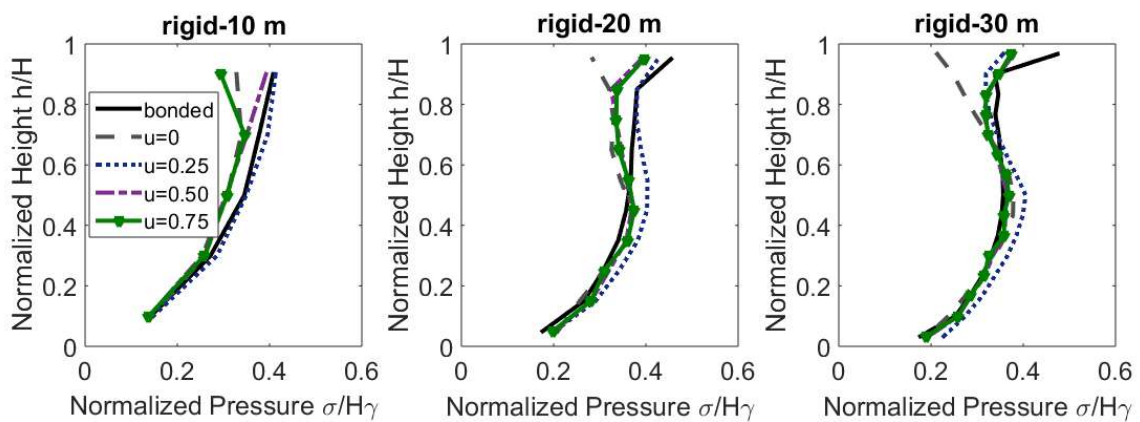


Figure 10: Normalized seismic pressures for rigid walls (1000*E).

CONCLUSIONS

This study focused on the analysis of the seismic soil pressures developed on rigid and flexible embedded retaining walls when subjected to non-pulse seismic excitations with different contact friction conditions. A finite element model of a wall and surrounding soil was developed using Abaqus. The bonded condition was compared with models including friction between the soil and wall to assess the impact in the seismic soil pressures when different contact conditions are integrated. From the results, it was noticed that the distribution of the average seismic pressures is greatly affected by the wall flexibility. As the height of the wall increases, the change in pressure distribution is more noticeable. Changes in friction coefficients or bonded condition have in general mayor effects as the flexibility of the wall increases. These results indicate the importance of parameters like the wall flexibility and contact conditions in modelling the seismic response of these systems. If accurate representation of seismic pressures is the goal, these parameters cannot be overlooked. The conclusions of this study are limited by the assumptions and simplifications in the numerical model used. Further studies will include more earthquake records with different moment magnitudes to identify factors that are responsible for the result variability. Several wall heights will also be included to extend these analyses.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was performed under award NRC-HQ-60-17-G-0033 from the US Nuclear Regulatory Commission. The statements, findings, conclusions, and recommendations are those of the authors and do not necessarily reflect the view of the US Nuclear Regulatory Commission.

REFERENCES

- Abaqus. (2016). Unified FEA. Dassault Systèmes.
- Ancheta T.D., Darragh R.B., Stewart J.P., Seyhan E., Silva W.J., Chiou B.S.J., Wooddell K.E., Graves R.W., Kottke A.R., Boore D.M., Kishida T. (2013). “PEER NGA-West2 Database, PEER Report 013/03”, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Bolisetti C. and Whittaker A.S. (2015). “Site Response, Soil-Structure Interaction and Structure-Soil-Structure Interaction for Performance Assessment of Buildings and Nuclear Structures”. MCEER-15-0002, June 1015, 388 pp.
- Datta D., Coleman J., and Varma A.H. (2018). “Comparative analyses of contact algorithms for interface modelling in non-linear soil structure interaction”, Proceedings of the Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
- Hashash YMA, Musgrove MI, Harmon JA, Groholski DR, Phillips CA, Park D. (2016). DEEPSOIL 6.1 - User Manual. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kondner, R. L., and J. S. Zelasko. (1963). “A hyperbolic stress–strain formulation of sands”, Proceedings of the 2nd Pan-American. conference on soil mechanics and foundation engineering, Brazilian Association of Soil Mechanics, Silo Paulo, Brazil,289–324.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Keyword User’s Manual, May 2014.
- Luna-Tezna R., Spears R., and Montejo L.A. (2018). “Time domain finite element modelling of seismic pressures on rigid retaining walls”. Proceedings of the Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering.
- Lysmer J. and Kuhlemeyer A.M. (1969). “Finite dynamic model for infinite media”, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE; Vol. 95, pp. 859-877.
- Matasovic N. (1993). “Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits”, Ph.D. Dissertation, University of California, Los Angeles.
- Psarropoulos, P. N., Klonaris, G., and Gazetas, G. (2005). “Seismic earth pressures on rigid and flexible retaining walls”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 25, No. 7-10, pp. 795-809.

- Roman-Velez X., and Montejo L.A. (2020). "Generation of seed-based spectrum-compatible pulse-like time-Series". *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 1161-86.
- Wagner N. and Sitar N. (2016). "Seismic earth pressures on deep stiff walls", *Geotechnical and Structural Engineering Congress*.
- World Nuclear Association. (2021). "World Nuclear Performance Report 2021".
- Xu J., Miller C., Costantino C., Hofmayer C., and Graves H.L. (2006). "Assessment of seismic analysis methodologies for deeply embedded nuclear power plant structures". U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-6896/BNL-NUREG-754 10-2006.

AUTHORS BIOSKETCH



A. Cruz-Chamorro

A Ph.D. Candidate in the Civil Engineering and Surveying Department of the University of Puerto Rico at Mayagüez (UPRM). Cruz-Chamorro completed a master's degree in civil engineering with a specialty in structures, and two bachelor's degrees, one in Civil Engineering and the other in Surveying and Topography from the UPRM. Cruz-Chamorro is part of "The University of Puerto Rico Fellowship Program in Earthquake Engineering for Nuclear Facilities" sponsored by the US Nuclear Regulatory Commission. Cruz-Chamorro is a member of the College of Engineers and Surveyors of Puerto Rico (CIAPR), and a member of the Earthquake Commission. Her research interests include earthquake engineering, soil-structure interaction, and nonlinear seismic analysis of nuclear power plant building components.



A. Vidot-Vega

*P*rofessor at the Department of Engineering Sciences and Materials of the University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Vidot-Vega received her PhD in Structural Engineering from North Carolina State University (NCSU), MSCE and BSCE from the University of Puerto Rico at Mayagüez. Vidot-Vega is a member of the College of Engineers and Surveyors of Puerto Rico (CIAPR). Her research interests include performance-based seismic design and assessment, nonlinear seismic analyses of reinforced concrete structures, and soil-structure interaction.

STATE OF PRACTICE IN NATURE-BASED/INSPIRED SOLUTIONS FOR COASTAL EROSION¹

Suhey Ortiz-Rosa², Ismael Pagán-Trinidad³

ABSTRACT: Nature-based Solutions (NbS) are imperative now, in view of the resulting effects of climate change and man-made alterations in coastal areas. The perspective to address coastal solutions may not be possible to be limited exclusively to ecological solutions. This article, based on a literature review, focuses on hybrid solutions for coastal erosion control. The review highlights examples from around the World that can be applied to islands, having Puerto Rico (PR) as a typical scenario. It presents a summary of how gray infrastructure commonly applied in the past decades can be re-designed and adapted to integrate natural solutions. This article provides significant facts about the merits of structural, ecological, and economical aspects that should be considered on NbS projects. This article helps understand the state of practice and possible solutions that can be implemented, especially, in tropical and sub-tropical regions.

Keywords: coastal erosion, nature-based solutions (NbS)

ESTADO DE LA PRÁCTICA EN SOLUCIONES BASADAS/INSPIRADAS EN LA NATURALEZA PARA EROSIÓN COSTERA

RESUMEN: Las soluciones basadas o inspiradas en la naturaleza (NbS) son imperativas en estos momentos, considerando los efectos del cambio climático y las alteraciones hechas por el ser humano en áreas costeras. Las perspectivas para utilizar NbS es posible que no puedan ser limitadas exclusivamente a soluciones ecológicas. Este artículo, en base a una revisión de la literatura, enfoca soluciones híbridas para el control de erosión costera. La revisión utiliza ejemplos de distintas partes del Mundo que pueden ser aplicados en islas, como ejemplos de escenarios típicos. Se presenta un resumen de cómo la infraestructura gris comúnmente utilizadas en las pasadas décadas puede ser re-diseñada y adaptada para integrar soluciones basadas en la naturaleza. La literatura provee los hechos relevantes sobre aspectos estructurales, ecológicos y económicos que pueden ser considerados en proyectos NbS. Este artículo ayuda a entender el estado de la práctica y posibles soluciones que pueden ser implementadas, especialmente, en áreas tropicales y sub-tropicales.

Palabras claves: erosión costera, soluciones basadas en la naturaleza

INTRODUCTION

Nature-based Solutions (NbS) are responsive actions that promote sustainable management of ecosystems using nature to provide societal benefits (IUCN, 2016). These solutions include the restoration, modification, adaptability, and integration of natural ecosystems to address an ecological problem. This concept has been applied globally following trackable standards adopted by non-government organizations, the federal government, and the scientific community (IUCN, 2020). This article focuses on NbS concept applied to coastal erosion problems which can be defined as the loss of sediments or a substrate in coastal areas. Erosion is highly associated with climate changes (e.g., precipitation patterns, sea level rise (SLR), wave action) affecting directly coastal areas, causing loss and modifications of the natural and built infrastructure (Department of Defense (DoD), 2021). The expected SLR is considered a high priority for studying causes of coastal erosion.

¹ Article received on April 15, 2023 and accepted for publication on April 26, 2023.

² PhD Candidate, Department of Marine Science, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus, P.O. Box 9000 Mayagüez, Puerto Rico 00681. Email: suhey.ortiz@upr.edu

³ Professor and Chair, Department of Civil Engineering and Surveying, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus. Email: ismael.pagan@upr.edu

The expected sea-level rise, considering an intermediate scenario, for 2050 in the Caribbean region is 0.28 meters with the associated expected social and economic impacts and implications (Sweet et al., 2022). The SLR trends for San Juan, Puerto Rico (PR) are currently 2.10 mm/yr and it is expected to increment up to 3.10 m by the year 2100 (Puerto Rico Climate Change Council (PRCCC), 2022). Hurricanes Irma and María (2017) over the Caribbean exacerbated extreme coastal erosion calling the attention of coastal communities and corresponding authorities dealing with coastal hazards for the urgent need to implementing NbS.

Islands are highly exposed and vulnerable to coastal erosion. Sediment loss and instability are frequently affecting coastal communities' economy and wellbeing. Puerto Rico (PR) State of Climate Change (2022) states that “*Future investments in infrastructure must consider adaptation to climate change in design, but also in operation and maintenance*” (Puerto Rico Climate Change Council (PRCCC), 2022). Most of the critical infrastructure in PR is located at coastal zones facing coastal erosion problems and other hazards (Barreto et al., 2021). PR has been mentioned in journals as one of the most affected countries by climate change (Cruz-Mejías, 2021; Martyr-Konaller et al., 2021). As an effort to mitigate the problem, new actions are in progress by diverse professional and scientific sectors.

The nature beneficial impacts in terms of economic and societal impacts have already been published, and the NbS practices implemented by the non-government organizations (NGO's), have established a base for immediate actions. One step ahead has been the fund allocation on NbS by government agencies. For example, the Federal Emergency Management Agency (FEMA) has allocated significant funds to coral reef restoration (TNC, 2021). Also, the USA Department of Defense (DoD) invests in natural and hybrid infrastructure at their installations (Bridges et al., 2014; DARPA, Reefense, 2021; DoD, 2021). The Nature Conservancy (TNC) created a guidebook on the opportunities of FEMA funding on NbS through Hazard Mitigation Assistant (HMA) grants (TNC, 2021). Coalitions between public and private sectors are more frequent nowadays, to assure that hydraulic infrastructure is designed with societal and environmental benefits (Slinger and Vreugdenhil, 2020). Traditional infrastructure has altered the natural ecosystem services in the past century (Slinger and Vreugdenhil, 2020), then, a need for new or re-designed approaches to address coastal erosion problems is urgent. An optimum strategy to protect communities and the environment from coastal hazards is a great challenge (Maiolo et al., 2020).

APPROACH

This article focuses on identifying and compiling current published solutions for coastal erosion problems applying nature-based practices. It is a review of actions relative to different ecological units (e.g., mangroves, wetland, coral reefs). It will provide a starting point to evaluate effective erosion control practices related to reducing wave action, promoting sediments retention, and enhancing vegetation growth. A search of peer reviewed NbS with two primary mechanisms are implemented, namely, (1) identifying solutions in prior literature reviews and compiling referenced materials, and (2) searching standard bibliographic resources (i.e., Google Scholar) with relevant keyword searches such as “nature solutions + erosion”, “mimic nature + coastal erosion”, and “coastal erosion + ecosystems approach”. This literature evaluation contributes to identifying the best standard of practices in NbS, simultaneously with other techniques that can be implemented in the Caribbean region.

FINDINGS

Man-made structures like seawalls or rocks addition have been considered an erosion control solution for decades (Barreto et al., 2021; Salgado K. and Martínez M.L, 2017), although some solutions may cause geomorphological changes (Barreto et al., 2021). Dikes, for example, are hard engineering structures

without integrated ecological concepts (Scheres B. and Schüttrumpf H., 2019). But the integration of new approaches attracts the allocation of funds in retrofitted structures. An example is DoD funded resilience studies including structural, non-structural, and natural approaches (DoD, 2021). A summary of strategies has been compiled demonstrating the capabilities to adapt gray infrastructure into NbS (EWN, 2022). This reference effectively addressed the hybrid and habitat restoration approaches for coastal erosion issues. A summary of some selected best practices is presented in the following.

Hybrid approaches

Hybrid solutions can be defined as Nb techniques combined with gray infrastructure (TNC, 2021). Diverse terms are in use for hybrid solutions, for example, working with nature, ecological engineering, engineering with nature, among others (Slinger and Vreugdenhil, 2020). NbS have been categorized by Scheres and Schüttrumpf (2019) in four groups: “fully natural solutions”, “managed natural solutions”, “hybrid solutions that combine structural engineering with natural features”, and “environment-friendly structural engineering”.

Scheres and Schüttrumpf (2019) discussed the dike slope effect on materials and nature emphasizing the opportunity to reduce slopes creating a “green” pavement effect. They demonstrated the influence of vegetation cover on dikes efficiency, including grass or wood vegetation. In some cases, trees are considered a starting point for controlling erosion. Others consider root systems as a soil stabilizer. Alternative methods and their limitations for dikes are presented in Table 1 which is adopted here from Scheres and Schüttrumpf (2019). Hybrid structures, such as a dike with a foreshore natural barrier (coral reef, mangrove or sand dune), can reduce the flooding risks and increase the stability of the structure. These options depend on the structure location, whether it is in front of the water or backward (in a position behind the structure). Also interlocked vegetation can be considered as an alternative. Rivillas-Ospina and collaborators (2020) point out that man-made infrastructures like groins, dikes, and rock armors are a major factor influencing coastal erosion. As alternatives, they proposed coral reefs construction, transform rock armors into living dikes, restore mangroves, plant dunes vegetation, and create sediments traps (Rivillas-Ospina et al., 2020). For example, living dikes can be considered as a hybrid solution helping to reduce the reflection wave coefficient. Also, the authors suggested a combination of dunes in front of a rock-dike to protect coastal infrastructure.

Table 1: Methods for ecological enhancement of dikes and their limits/challenges.
Adopted from Scheres and Schüttrumpf (2019)

Dike component	Common Design	Ecological Enhancement	Limitations/Challenges
Foreshore	Not directly integrated in dike design	Ecosystem engineering (e.g., marshes, reefs, etc.) or NbS (artificial reefs)	Litter experience concerning establishment and management. Uncertainties concerning (constant) coastal protection function
Slope Inclination	Slope design as compromise between dike stability and material consumption/ footprint	Milder seaward slopes for positive effects on nature, recreation and coastal processes	Increased dike footprint, additional habitat loss/alteration

Dike Roads	Asphalt roads	Alternative vegetated fortified paths (e.g., vegetated geocellular containment systems)	Litter experience, mainly pilot projects. Assurance of stability and functionality
Revetment	Gray revetment (riprap, placed blocks, etc.)	Vegetated or colonized revetments	Litter experience, mainly pilot projects. Assurance of stability and functionality
Vegetated Dike Cover	Dense grass covers, no woody vegetation	Adaptation of seedling mixtures towards more ecologically valuable vegetation	Assurance of consistent erosion resistance

Within the same concept, Oderiz et al. (2020) study looked for a viable way to reduce erosion by a dual approach. They tested a reinforced vegetated and unvegetated sand dune by an inner rocky structure. They covered dunes with *Ipomoea pescaprae* plants and tested the two approaches under storm conditions. Plants turned out to be highly effective at the initial stage of surges. Depending on the position of the plants, for example, if they are located at the leeside, it minimized and slowed down the impact of the over-wash. However, an inner rock structure prevented dune damage at the final surge stage. Oderiz et al. (2020) included hydrodynamic, morpho-dynamic, wave run-up, over-wash and reflected wave energy analyses in their study. They suggested a hybrid solution after weighed the economics and ecological costs of a project in Mexico.

On the other hand, *Reefense* (DARPA, 2021), a program sponsored by the DoD, integrates ecological concepts and mimic-nature solutions using man-made structures. This hybrid approach includes a seawall but mimicking nature relief. Rigid structures are part of the hazards built in the last decades (Maiolo et al., 2020; Rangel-Buitrago et al., 2017) and can be discussed from different points of view. It can be evaluated from an ecological perspective, leading to the creation of novel ecosystems with modified services and functions in the short term. The ecosystem changes can be explained by correlations between ecological complexity and ecosystem services optimization; where new and novel ecosystems turn to a high level of ecosystem transformation, but a lower optimization of ecological services is developed (IUCN, 2020). In the long run, NbS seek the lower possible transformation reaching the natural services provided by the complexity of the ecosystem. It optimizes services such as sediments traps, waves dissipation, and coastal erosion reduction.

Hybrid solutions can be interpreted as NbS. For example, the next project can be presented as a hybrid solution. Maiolo and collaborators (2020) mentions five common strategies to address coastal erosion problems, namely, doing nothing, management realignment, holding the line, move seawards, and limited interventions. The latter been the most popular when time to mitigate the hazard is limited (Rangel-Buitrago et al., 2017). The authors summarized the coastal defense measurements and their main effect using gray infrastructure and nourishment, promoting the last one as a soft defense (as NbS). This beach restoration has been implemented at the Mediterranean Sea coast (Calabaia Beach) after applying bathymetry, granulometric survey, wave climate, and hydrodynamic studies (Maiolo et al., 2020). The approach included several interventions moving groins and submerged breakwaters before nourishment. After the use of infrastructure, sea meadows of *Posidonia oceanica* were planted at different depths with the purpose of reducing waves and current effects and extending the infrastructure durability. The success of this Italian project uses a hybrid approach before implementing a NbS.

Another interesting example is a case implemented in San Diego, California which is considered a living shoreline (TNC, 2021). There they created a sand dune over gray infrastructure, using pre-existent riprap and revetment and planting native vegetation for stabilization. It can be a typical scenario in Puerto Rico to stabilize and mitigate coastal erosion as an example to be considered for future applications, where it may apply. Rock revetment and concrete dikes are commonly used to reduce surge waves, especially at industrial ports. Verhagen (2019) analyzed an alternative sea dike with a mangrove belt in front of it to reduce infrastructure costs. In Verhagen study, hydraulic and wave calculations were modeled using Simulating Waves Nearshore software (SWAN model and SWANONE, a SWAN interphase) (The SWAN Team, 2023), including the presence of mangroves scenario. Some of the data included in the models are average total height of the trees in the forest, mangroves density (taller > 1 meter), and the forest canopy cover. It resulted in a transmission and reduction coefficient and the wave height for the different scenarios. The cost of the dike construction with and without mangroves were calculated demonstrating the financial benefits of using mangroves. Verhagen concluded that adding mangroves reduces costs by at least 25 percent, even not considering the ecological benefits of mangrove systems.

After a brief look at hybrid solutions, the following presents the benefits of natural ecosystems and their restoration. As a summary, Narayan and collaborators (2016) presented the percentage of wave height reductions by different ecosystems (31% for mangroves, 36% for seagrasses, 70% for coral reefs and 72 % for saltmarshes) demonstrating the restoration value.

Habitat Restoration

Sun and Carson (2020) showed the economic value of wetlands protection after analyzing 88 storm events in the south and east coasts of the USA. Their results demonstrated that protective effect represents \$1.8 million USD/Km²/per year with a median value of \$91K USD/Km². They estimated that hurricane Irma property loss in Florida would have been reduced by \$430 million USD if 500 Km² of wetlands still existed (by 2010). The researchers presented the marginal value of coastal wetlands for storm protection, per county for the east and south coast of the USA (Sun Fanglin and Carson Richard T, 2020).

Following the economic aspect, software based on economic analysis can be applied for evaluating the impact analyses and planning as suggested in the literature (Edwards et al., 2013). The researchers applied 'Impact Analysis for Planning' (IMPLAN) software to estimate the economic impact of habitat restoration in the Great Lakes area (IMPLAN® model, 2013 in Edwards et al., 2013). While Murti and Buyck (2014) stated that every dollar invested in coastal habitats in Barbados could reduce \$20 USD in hurricane loss which can be translated to other Caribbean Islands. They applied the Economics of Climate Adaptation methodology, was created by an international partnership in 2009, as a quantitative strategy for nature values (Mueller and Bresch, 2014). Another study summarizing the costs of NbS vs. engineering structures was published in 2016 by Narayan and collaborators (Narayan et al., 2016).

Wetland's restoration and rehabilitation must meet FEMA criteria, namely, risk reduction/resiliency effectiveness, future conditions, and population impacted. A mangrove swamp, saltwater/freshwater marshes and seagrasses are considered different types of wetlands. This practice results in coastal flooding reduction and sediments traps to mitigate coastal erosion problems. Doa et al. (2020) explored the use of bamboo brush-fences in shallow waters at the Mekong Delta. They applied fences and mangroves as a current dissipator and sediments traps avoiding erosion. They proved a drag coefficient and turbulent friction coefficient relationship with this approach. In this case, they tested the hydraulic gradient using brushwood fences of bamboo as the main material. The fence's porosity and their configuration influence

the Reynolds numbers and bulk drag coefficient. This approach could be tested at estuarine areas where mangroves restoration is being implemented. The addition of renewable material (e.g., bamboo) can be considered as an option for mangrove establishment as a technique to reduce mangrove mortality at the initial stage of restoration projects. Mangroves and salt marshes are up to five times cheaper than breakwaters (Narayan et al., 2016). In the same way, the USA Department of Defense (DoD), implemented the living shoreline concept at MCAS Cherry Point North Carolina facilities (Defense Visual Information Distribution Service, 2021). They created a living shoreline with salt marshes and oyster reefs to promote seagrass and reefs growth. Also, they expand the living shoreline to riverine areas. In salt marshes, the wave reduction that can be related to erosion processes and its effect is highest with vegetation close to the water level (Narayan et al., 2016).

Coral reefs and salt marshes have the highest potential to reduce coastal flooding and erosion (Narayan et al., 2016). Efforts in coral reef restoration are ongoing around the World, recovering fragments from storms and grounding events and growing fragments inland and *in-situ*. In PR the NOAA Coral Restoration Center, the Institute of Socio-Ecological Research, HJR Reefscaping and “Sociedad Ambiente Marino” are leading the coral reefs restoration projects (Puerto Rico Climate Change Council (PRCCC), (2022). Narayan (2016) summarized coral reefs parameters for wave reduction and established that “the most effective reefs are at least twice as wide as the wavelength and located at depths that are at most half the incoming wave height”. They estimated the median cost of \$115.62 USD per m² on coral reef restoration based on 19 projects. Storlazzi et al. (2021) and collaborators estimated the risk reduction of re-building “restore” coral reefs in PR and Florida state in \$272.9 million USD in economic activity (). This study focused on flooding risk during storms, but it can be applied to erosion problems caused by wave impacts. In 2021, the Puerto Rico Department of Environment and Natural Resources (DNER) requested proposals to apply FEMA Cost Analysis Tool for San Juan coastal areas to enhance the barrier reef as an alternative for coastal mitigation hazard projects (DRNA, 2021).

Reguero et al. (2018) studied the linkage between reef conditions and coastal protection in Granada Island. They applied the shoreline equilibrium model setting coral reefs as a wave refractory and diffraction obstacle like a breakwater or gray infrastructure. The authors used the wave energy flux integrated into a coastal modeling software (described in González et al., 2007) and retrieved the diffraction patterns from satellite imagery. The sediment transport component, beach profile, bathymetry and currents were considered in the study. They proposed the design of an artificial coral reef to mitigate coastal erosion and proved how engineering approaches can be implemented in natural systems. Likewise, the Engineering with Nature (EWN) group from the Engineer Research and Development Center (ERDC) of the US Army Corp of Engineers worked on three alternative designs of what they called the Reefmaker Ecosystem Wave Attenuator (Bryant and Provost, 2022). The project evaluated three configurations of size/shape and height at different depths and wave conditions. They showed that structure’s porosity improved the attenuation, and the system configuration can reduce the wave height. These prototypes were tested at the Engineering Research and Development Center (ERDC) Coastal and Hydraulics Laboratory using scale-model testing at the 5 ft flume facility simulating estuarine conditions.

The algorithms and concepts applied to the design and construction of an artificial reef could be similarly adapted and applied to mangrove and other nature base solutions analysis. (Bryant et al., 2022) studied wave energy and the key factors influencing hydrodynamics in mangroves (*Rizophora mangle*) areas. They modeled the system in a closed flume under 72 different conditions. The main components included drag coefficient, Manning’s roughness and damping coefficient. Although the objective was focused on flooding, it could be expanded to coastal erosion problems. The elements evaluated into hydraulic drag included tree density and spacing, bending stiffness, and root structure (primary roots, root height above the ground, root length and diameter) among other ecological parameters. The study evaluated water surface elevation, velocity measurements, hydrodynamic conditions, linear dispersion relation and

drag coefficient analysis. In terms of the wave height attenuation, it presented a big range from 13 % to 77 %, depending on hydrodynamic parameters. The US Army Corps of Engineers designed a mangrove reefs wall tested in Florida (USA) for mimicking mangroves root (Bridges et al., 2021). These walls are created with urban and human disturbed areas in mind. Their construction is based on concrete mixed with oyster, silica flume and microfiber making them ecofriendly (Bridges et al., 2021). Similarly, to Bryant work with Reefmaker project, (Dao et al., 2020) stated that an increase in porosity (which is related to the structure arrangement), promotes a decrease on drag coefficient. This coefficient implies the resistance of a cylinder mimicking vegetation. Similarly, hydraulic modeling can be applied to help understand sand dunes restoration needs in projects that are in progress.

With the support of the National Fish and Wildlife Foundation (NFWF), “Vida Marina” team leads a dune restoration effort on the north coast of Puerto Rico (Dobson et al., 2020). This effort is managed by the University of Puerto Rico-Aguadilla to work at 21 sites, covering 10 acres of land. The project included wooden boardwalks for beach access, educational activities and boards, wooden fences and re-vegetation with native plants (*Canavalia rosea*, *Coccoloba uvifera*, *Calotropis gigantea*, *Conocarpus erectus*, *Ipomea pes-caprae*) promoting sand deposition and mitigating erosion (Dobson et al., 2020). The area is considered part of the coastal resilient hubs in the Island, and it is monitored by drones. In this case, the organization (“Vida Marina”) received the support of a USACE for their sediments flow analyses (Mayer et al., 2018). In term of the costs, the project requires minimal maintenance and repairs and can be supported by several organizations or agencies (e.g., FEMA Hazard Mitigation Grant Fund, USFWS Coastal Program, National Fish and Wildlife Foundation, USACE, Department of Interior, National Oceanographic and Atmospheric Administration). Multiple sectors from the community can benefit from dune restoration. The authors suggested combining coral reefs, seagrasses and dune restoration efforts to minimize the wave action and promote dune stabilization.

In summary, the main goal of applying NbS alternatives to control coastal erosion is to mimic nature ecosystems. In tropical islands around the Caribbean, these principal components of the ecosystems are mangroves, coral reefs, seagrasses, and sand dunes, among others. On the other hand, common practices based on grey infrastructure are dikes, groins, ripraps, breakwaters, seawalls and others are practices that have been widely implemented. Table 2 shows the degree of efficacy and functionality of gray infrastructure applied in various ecosystems. In general, a high level of efficacy may rely on the functionality and lifespan of the alternative, while lower levels of efficiency mean a short lifespan which is affected by the wave impact and a low effect on sediments retention. For example, ripraps are highly affected by waves action, SLR, showing the effects on scoring and erosion. NbS act as wave breakers reducing erosion and promoting accretion.

Table 2. Common NbS for island nations to address coastal erosion problems.

Ecosystem (NbS)	Common Engineering Practice	Degree of efficacy (gray infrastructure)	Functionality
Mangroves/saltmarshes	Dikes, channels & water pumps	Medium	Sediment’s retention, wave reduction
Coral reefs	Groins, riprap, breakwaters	Low	Provides sediments, wave breakers/reduction
Seagrasses	Breakwaters	Low/medium	Sediment’s retention, wave reduction
Sand dunes	Seawalls, groins	Medium	Sediment’s retention, wave reduction

FROM POLICY AND SCIENCE TO PRACTICE

Based on FEMA definition NbS is “the sustainable planning, design and environmental management and engineering practices that wave natural features or processes into built environment to build more resilient communities” (FEMA, 2020). The Nature Conservancy (TNC, 2021) summarized FEMA agency’s grants and supporting information. It provides three types of grants, two Pre-disaster (identified as Building Resilient Infrastructure and Communities, and the Flood Mitigation Assistance), and one post disaster (identifies as Hazard Mitigation Grant Program). In terms of the coastal flooding that also help mitigating erosion; FEMA can support culverts upgrades, waterfront parks, tidal circulation, living shorelines, channels restoration, beaches and dunes planting (not nourishment or re-nourishment), coral reefs, marshes and mangroves restoration, shellfish reef restoration and land conservation (TNC, 2021). The application of NbS requires to apply hydrodynamic models to simulate coastal processes. Some recommended models for coastal engineering are ADCIRC, STWAVE, XBEACH, MIKE21 (2D) and DELFT3D (3D) (TNC, 2021). Also, NbS projects can be supported by desktop analyses (e.g., tools like ArcGIS, Google Earth, FEMA flooding maps), economic models (FEMA-BCA Tool, HAZUS, BEACH-Fx, HEC-FDA) and environmental models (EDYS, HGM Approach, SLAMM) (TNC, 2021). Chapter 4 (in TNC, 2021) summarized qualitative and quantitative benefits of NbS projects in coastal areas not only preventing or mitigating erosion but also reducing risks on lifelines.

The design criteria for NbS included (1) economical, society and ecological interactions, (2) interventions across sectors, (3) and the risk identification and management (IUCN, 2020). Following the statement of the Coastal Resilience Evaluation for Puerto Rico (around 99% of the PR’s coast) but, most specifically the east coast of the Island shows a high potential for NbS project development (Dobson et al., 2020). This region presents spots with a high index of community exposure to storms, erosion, flooding, loss of habitat and multiple stressors.

In a wide context, not all Latin American and Caribbean countries (LAC) have laws that regulates Coastal Zone Management (Barragán Muñoz, J. M., 2019). Puerto Rico is considered “in transition” for some topics related to the Integrated Coastal Zone Management and “in developing” in most of them, comparable with Belize and Brazil. This fact is positioning Puerto Rico at the top of the list for the LAC region having an advanced system for coastal management. However, we are still facing coastal erosion problems with a limited perspective towards NbS and implementing them effectively.

Coastal protection is an expensive activity as an initial investment. However, the return value increases in the long run through NbS approaches designed for long term goals considering SLR and accelerated projected coastal erosion scenarios. EWN provides the tools to integrate research and implement ecological concepts on hybrid solutions. Some of these concepts motivate to focus our attention back on earth and environmental sciences.

The archipelago of Puerto Rico and other tropical islands, cannot rely on adopting strategies from areas with extensive tide amplitude environments. Scientists must think about productive coastal ecosystems that support society wellbeing, food chain, and economic development (e.g., touristic activities) (PRCCC, 2022; Hernández-Delgado et al., 2018a, 2018b). The presence of seagrasses and coral reefs right in the shoreline limits the possibilities to extend a beach by nourishments. But at the same time, it creates the opportunities to increase living systems and use nature as a coalition. It must be seriously considered moving back from the shoreline and preparing the coastline for a sea-level rise adopting retreat strategies. Hybrid solutions represents an opportunity to work with coastal erosion problems and enhance ecosystems services. Moreover, when the Caribbean countries and other countries do not have the political organization and structure or mechanisms to face the challenges of coastal zone hazards.

CONCLUDING REFLECTIONS

The following are concluding reflections the reader should keep in mind:

1. In the long term, coastal restoration efforts increase the positive perception and recreational uses by the community, enhance the natural biodiversity, and improve the coastal protection which promote the green and blue economic development at the region.
2. Coastal erosion is one of the most important aspects influencing coastal activities (e.g., tourism activities around the Caribbean) due to the loss of sand beaches and increasing costs to keep the waterfronts, hotels, and critical infrastructure. This issue can be mitigated by using nature-based solutions and implementing hybrid approaches to stabilize the coastal environment, improve the development of natural ecosystem, and enhance safe economic and touristic activities which will safely promote economic development within a blue-green economy framework.
3. Hybrid solutions have been proven to be effective around the world providing opportunities to improve impacted ecosystems. These should be evaluated on a case-by-case basis to promote the recovery of deteriorated natural ecosystem services and the creation of new/novel ecosystems.
4. The feasibility of applying engineering practices to protect coastal environments must require the application of appropriate coastal engineering hydrodynamic modeling to determine the coastal hydraulics and sediments transport dynamics before NbS implementation to optimize the expected benefits of the alternatives implemented.
5. Coastal zone policies and regulations should be aligned with NbS concepts, strategies, and benefits promoting NbS simultaneously with the application of gray/hard engineering approaches.

REFERENCES

- Barragán Muñoz, Juan M. (2019). "Progress of coastal management in Latin America and the Caribbean", *Ocean and Coastal Management* Volume 184, 1 February 2020, 105009 [Hi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105009](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105009)
- Barreto M, Méndez Tejada R, Cabrera N, Bonano V, Díaz E, Pérez K, & Castro A. (2021). "The state of coastal erosion in Puerto Rico after Hurricane María", *Revista Geográfica De Chile Terra Australis* 2021; 1(1), 29–40. doi.org/10.23854/07199562.2021571esp.Barreto29
- Bridges TS, Bourne EM, Suedel BC, Moynihan EB and King JK. (2021). "Engineering With Nature: An atlas", 2021 Volume 2. ERDC SR-21-2. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. doi.org/10.21079/11681/40124
- Bridges TS, Wagner PW, Burks-Copes KA, Bates ME, Collier Z, Fischenich C, Gailani JZ, et al. (2014). "Use of natural and nature-based features (NNBF) for coastal resilience", ERDC SR-15-1. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Bryant, Mary Anderson; Bryant, Duncan B.; Provost, Leigh A.; Hurst, Nia; McHugh, Maya; Wargula, Anna and Tomiczek, Tori. (2022). "Engineering with Nature and USACE Flood and Coastal Systems R&D Program Wave Attenuation of Coastal Mangroves at a Near-Prototype Scale", September 2022. Technical Report (Engineer Research and Development Center (U.S.)); no. ERDC TR-22-17. Available from: <https://hdl.handle.net/11681/45565>, <http://dx.doi.org/10.21079/11681/45565>
- Bryant Duncan B and Provost Leigh A. Walter. (2022). "Marine and Atlantic Reefmaker Wave Attenuator, Wave Transmission Testing Results", Technical Report (Engineer Research and Development Center (U.S.)); 2022; no. ERDC TR-22-3 www.erd.usace.army.mil

- Cruz-Mejías, Coraly. (2021). “La erosión amenaza a las comunidades costeras de la región”, Senior Reporter. *Global Press Journal*. May 29, 2021. Available from: <https://globalpressjournal.com/americas/puerto-rico/hurricane-season-approaches-erosion-threatens-coastal-communities/es/>
- Dao, Hoang Tung, Bas Hofland, Marcel JF Stive, and Tri Mai. (2020). “Experimental Assessment of the Flow Resistance of Coastal Wooden Fences”, *Water* 2020; 12, no. 7: 1910. doi.org/10.3390/w12071910
- DARPA, Reefense. (2021). “Reefense Project”, Department of Defense Advanced Research Projects Agency, Washington, DC.
- Defense Visual Information Distribution Service. (2021). “The Living Shoreline at MCAS Cherry Point NC, UNITED STATES” 04.30.2021. Courtesy Story Marine Corps Installations Command Available from: <https://www.dvidshub.net/news/396194/living-shoreline-mcas-cherry-point>
- Dobson JG, Johnson IP, Rhodes KA, Lussier BC y Byler KA. (2020). “Evaluación de Resiliencia Costera de Puerto Rico”, Centro Nacional de Modelado y Análisis Ambiental de la Universidad de Carolina del Norte en Asheville. 2020. Preparado para la Fundación Nacional de Pesca y Vida Silvestre. Available from: <https://www.nfwf.org/programs/national-coastal-resilience-fund/regional-coastal-resilience-assessment>.
- Department of Defense (DoD), United States of America. (2021). “Department of Defense Climate Adaptation Plan”, To National Climate Task Force and Federal Chief Sustainability Officer. September 1, 2021. Accessed August 8, 2022. Available from: <https://media.defense.gov/2021/Oct/07/2002869699/-1/-1/0/DEPARTMENT-OF-DEFENSE-CLIMATE-ADAPTATION-PLAN-2.PDF>
- DRNA (2021). “Request for proposal (rfp): FEMA benefit-cost analysis tool for San Juan metro barrier reef hazard mitigation grant program project”, Available from: <https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2021/03/RFP-San-Juan-Coral-FEMA-BCA.pdf> Accessed on November 1, 2022.
- Edwards PET, Sutton-Grier AE and Coyle GE. (2013). “Investing in nature: Restoring coastal habitat blue infrastructure and green job creation”, *Marine Policy* 2013; 38, 65–71. doi.org/10.1016/j.marpol.2012.05.020
- Engineering with Nature (EWN). (2022). “Engineering with Nature Projects” Available from: <https://ewn.erd.c.dren.mil>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2020). “Building Community Resilience with Nature-Based Solutions: A Guide for Local Communities”, 2020. Available from: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_riskmap_nature-based-solutions-guide_2020.pdf
- González M, Medina R, González-Ondina J, Osorio A, Méndez FJ, García E. (2007). “An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC” *Computers & Geosciences* 33 (2007), pp. 916-931, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.12.005>
- Hernández-Delgado EA, Mercado-Molina AE, Suleimán-Ramos SE. (2018a). “Multi-disciplinary Lessons Learned from Low-Tech Coral Farming and Reef Rehabilitation: I. Best Management Practices” In *Corals in a Changing World*, InTech, Chapter 10, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73151>
- Hernández-Delgado EA, Mercado-Molina AE, Suleimán-Ramos SE and Lucking MA. (2018b). “Multi-disciplinary Lessons Learned from Low-Tech Coral Farming and Reef Rehabilitation: II. Coral Demography and Social-Ecological Benefits”, In *Corals in a Changing World*, InTech, Chapter 11, doi: 10.5772/intechopen.74283
- IMPLAN® model. (2013). Data, using inputs provided by the user and IMPLAN Group LLC, IMPLAN System (data and software), 16905 Northcross Dr., Suite 120, Huntersville, NC 28078 www.IMPLAN.com
- IUCN. (2016). “Defining Nature-based Solutions”, WCC-2016-Res-069-EN, Accessed February 21, 2022, Available from: https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/wcc2016res_069en.pdf

- IUCN. (2020). *Global Standard for Nature-based Solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS*, First edition. Gland, Switzerland: IUCN. Available from: doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.
- Maiolo Mario, Alvise Mel Riccardo and Sinopoli Salvatore. (2020). “A Stepwise Approach to Beach Restoration at Calabaia Beach” *Water* 2020; 12, 2677. doi:10.3390/w12102677
- Martyr-Koller Rosanne, Thomas Adelle, Schleussner, Carl-Friedrich, Nauels, Alexander and Lissner, Tabea. (2021). “Loss and damage implications of sea-level rise on small islands”, Current Opinion in *Environmental Sustainability* 2021; 50:245–259
- Mayer RJ, Soto-Calvente EJ, Martir-Vargas H, Rodríguez-Sosa AG, Bonet- Muñiz SM, Cabañas-Ramos N, Mayer RB. (2018). “Reduce Coastal Erosion and Provide Disaster Protection Through Beaches and Dunes. Proposal, Coastal Dune and Erosion Assessment of the North Coast of Puerto Rico”, (NCR_17) Final Report DOI-FEMA Natural and Cultural Resources, Recovery Support Function (NCR RSF) Universidad de Puerto Rico en Aguadilla, Vida Marina: Centro de Conservación y Restauración Ecológica Costera. Available from: https://www.drna.pr.gov/wp-content/uploads/2018/10/NCR_17_CoA_description.pdf
- Mueller L and Bresch D. (2014). “Economics of climate adaptation in Barbados – Facts for decision making”, In: R. Murti and C. Buyk (eds.), *Safe Havens: Protected Areas for Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation*, pp .15-21. Gland, Switzerland: IUCN. <https://portals.iucn.org/library/node/44887>
- Murti R and Buyck C. (ed.) (2014). *Safe Havens: Protected Areas for Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaptation* Gland, Switzerland: IUCN. xii + 168 pp.
- Narayan S, Beck MW, Reguero BG, Losada IJ, van Wesenbeeck B, Pontee N, et al. (2016). “The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature-Based Defences” *PLoS ONE* 2016; 11(5): e0154735. doi: 10.1371/journal.pone.0154735
- Odériz I, Knöchelmann N, Silva R, Feagin RA, Martínez ML, & Mendoza E. (2020). “Reinforcement of vegetated and unvegetated dunes by a rocky core: A viable alternative for dissipating waves and providing protection?” *Coastal Engineering* 2020; 158, 103675. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103675
- Puerto Rico Climate Change Council (PRCCC). (2022). “Puerto Rico’s State of the Climate 2014-2021: Assessing Puerto Rico’s Social-Ecological Vulnerabilities in a Changing Climate”, Puerto Rico Coastal Zone Management Program, Department of Natural and Environmental Resources, NOAA Office of Ocean and Coastal Resource Management. San Juan, PR. 2022.
- Rangel-Buitrago N, et al. (2017). “Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls” *Ocean & Coastal Management* 2017. doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.04.006
- Reguero BG, Beck MW, Agostini VN, Kramer P, Hancock B. (2018). “Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada” *Journal of Environmental Management* 2018; 210, 146e161. doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.024
- Rivillas-Ospina G, Maza-Chamorro MA, Restrepo S, Lithgow D, Silva R, Sisa A, Vargas A, et al. (2020). “Alternatives for Recovering the Ecosystem Services and Resilience of the Salamanca Island Natural Park, Colombia”, *Water* 2020; 12(5):1513. doi.org/10.3390/w12051513
- Salgado K and Martínez ML. (2017). “Is ecosystem-based coastal defense a realistic alternative? Exploring the evidence” *Journal of Coastal Conservation* 2017; Vol. 21, No. 6 (December 2017), pp. 837-848. doi:10.1007/s11 852-017-0545-1 Accessed: 16-08-2022
- Scheres B. and Schüttrumpf H. (2019). “Enhancing the Ecological Value of Sea Dikes.” Review. *Water* 2019; 11, 1617. doi:10.3390/w11081617
- Slinger Jill H. and Vreugdenhil Heleen S.I. (2020). “Coastal Engineers Embrace Nature: Characterizing the Metamorphosis in Hydraulic Engineering in Terms of Four Continua” *Water* 2020; 12, 2504. doi:10.3390/w12092504

- Storlazzi CD, Reguero BG, Cumming KA, Cole AD, Shope JA, Gaido LC, Viehman TS, Nickel BA, and Beck MW. (2021). “Rigorously valuing the coastal hazard risks reduction provided by potential coral reef restoration in Florida and Puerto Rico”, U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1054, 35 p. doi.org/10.3133/ofr20211054
- Sun, Fanglin and Carson Richard T. (2020). “Coastal wetlands reduce property damage during tropical cyclones” *PNAS, Environmental Sciences* 2020; Vol 117, Num 11, 5719-5725. doi/10.1073/pnas.1915169117
- Sweet WV, Hamlington BD, Kopp RE, Weaver CP, Barnard PL, Bekaert D, et al. (2022). “Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States: Updated Mean Projections and Extreme Water Level Probabilities Along U.S. Coastlines”, NOAA Technical Report NOS 01. 2022. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 111 pp. Available from: <https://oceanservice.noaa.gov/hazards/sealevelrise/noaa-nostechrpt01-global-regional-SLR-scenarios-US.pdf>
- The SWAN Team. (2023). SWAN User Manual. SWAN Cycle III Version 41.45. Delft University of Technology, Delft, 143 p. <https://swanmodel.sourceforge.io> Accessed April 2023, http://swanmodel.sourceforge.net/online_doc/swanuse/swanuse.html
- The Nature Conservancy (TNC) & AECOM. (2021). “Promoting-Nature-Based-Hazard-Mitigation-Through-FEMA-Mitigation-Grants-05-10-2021-LR.pdf”
- Verhagen Henk Jan. (2019). “Financial Benefits of Mangroves for Surge Prone High-Value Areas” *Water* 2019; 11, 2374. doi:10.3390/w11112374

RESEÑA DE AUTORES



S. Ortiz-Rosa

*M*arine Scientist interested in environmental, ecological, and biogeochemical aspects of marine and coastal ecosystems. Ortiz-Rosa extends her professional activities into the GIS/Remote Sensing analysis and environmental education fields. Her studies include topics on coastal erosion, water quality analysis from field and satellite imagery, ecological restoration, NGO's proposals development, riverine macrophytes modeling, and watershed and sedimentation processes. Ortiz-Rosa is a Ph.D. student in the Bio-optical Oceanography Laboratory at the University of Puerto Rico in Mayagüez where she had the opportunity to work as a graduate research intern for the Environmental Laboratory (EL) at the Engineering Research and Development Center (ERDC) in Vicksburg, Mississippi during the Summer of 2021. At ERDC, Ortiz-Rosa contributed to assessing the state of the art and practice gaps and the availability of parameters for the future development of riverine macrophytes growth models. Ortiz-Rosa is currently a field ecologist/instrumentation technician at the National Ecological Observatory Network (NEON) program.



I. Pagán-Trinidad

*P*rofessor and Chair of the Department of Civil Engineering and Surveying at the University of Puerto Rico at Mayagüez (UPRM). His main professional interests focus on teaching and research initiatives to enhance engineering education for Hispanics to create pathways to advanced degrees and professional careers in STEM which can help develop outstanding professionals and entrepreneurs in the nation's workforce. His main educational and research interests, presentations and publications for the past 45 years have focused in Engineering Education, Resilience of Civil Infrastructure, Tropical Climate, Natural Multi-hazards, Urban Drainage, Hydrology, and Hydraulics. Pagán-Trinidad is the Principal Investigator of the project *Education for Improving Resilience of Coastal Infrastructure* sponsored by the Department of Homeland Security - Coastal Resilience Center of Excellence (CRC) and the *UPRM-ERDC Educational and Research Internship Program*, a pipeline to research and workforce development capacity building for undergraduate students and graduate students of diverse disciplines. Pagán-Trinidad is a member of the Advisory Committee for the NSF Directorate of Engineering (ENG) and the Editorial Board of the International Journal on Natural Disasters, Accidents and Civil Infrastructure (RIDNAIC).

PEDESTRIAN PERFORMANCE ON MID-BLOCK CROSSINGS USING A ROAD INFORMATION ASSISTANCE SYSTEM IN A VIRTUAL REALITY EXPERIMENT¹

Alberto M. Figueroa-Medina², Didier M. Valdés-Díaz³, Natacha N. Cardona-Rodríguez⁴,
Andrés D. Chamorro-Parejo⁵

ABSTRACT: The increase in crash-related pedestrian fatalities, primarily in urban streets, has promoted the development of technological innovations to mitigate this global problem. This article presents the results of an experiment that used virtual reality technology to study the performance of pedestrians at mid-block crossings of urban streets and the impact of a Road Information Assistance System [RIAS]. The RIAS was simulated as a handheld device that displays warning symbols or a combination of symbols and real-time information about the vehicles approaching the crosswalk to assist pedestrians in making the crossing decision. The experiment simulated a connected urban environment that can receive and transmit data from sensors in the infrastructure, vehicles, and pedestrians [via the RIAS]. The study evaluated the walking speeds, the vehicle gaps selected to cross the street, and the number of successful crossing events with no collisions. Three groups of twelve subjects [no RIAS, simple RIAS, and complex RIAS] were selected. The age and gender of the subjects, as well as the RIAS type used to cross the street, had significant effects on the average walking speed. The distributions of the average gap accepted by each of the three groups, based on the RIAS type, were statistically different. The group that used the RIAS device displaying symbols only had the worst performance and the highest average gap accepted when crossing the street.

Keywords: gap acceptance, mid-block crossings, pedestrian safety, virtual reality, walking speed

DESEMPEÑO DE LOS PEATONES EN CRUCES A MEDIA CUADRA AL USAR UN SISTEMA DE ASISTENCIA CON INFORMACIÓN VIAL EN UN EXPERIMENTO DE REALIDAD VIRTUAL

RESUMEN: El aumento en muertes de peatones, principalmente en calles urbanas, ha motivado el desarrollo de innovaciones tecnológicas para mitigar este problema global. Este artículo presenta los resultados de un experimento que usó la tecnología de realidad virtual para estudiar el desempeño de peatones en cruces a media cuadra en calles urbanas y el impacto de un Sistema de Asistencia con Información Vial [SAIV]. El SAIV se simuló como un dispositivo portátil que muestra símbolos de advertencia o una combinación de símbolos con información en tiempo real de los vehículos que se acercan al cruce para ayudar a los peatones a tomar la decisión de cruzar. El experimento simuló un entorno urbano conectado que puede recibir y transmitir datos de sensores en la infraestructura, los vehículos y los peatones [a través del SAIV]. El estudio evaluó las velocidades de caminata, las brechas entre vehículos seleccionadas para cruzar la calle y la cantidad de cruces exitosos sin colisiones. Tres grupos de doce participantes [no SAIV, SAIV sencillo y SAIV complejo] fueron seleccionados. La edad y el género de los participantes, así como el tipo de SAIV usado para cruzar, tuvieron efectos significativos en el promedio de la velocidad de caminata. Las distribuciones de la brecha promedio aceptada por cada uno de los tres grupos, según el tratamiento de SAIV, fueron estadísticamente diferentes. El grupo que usó el SAIV sencillo, mostrando solo símbolos, tuvo el peor desempeño y el promedio más alto de la brecha aceptada para cruzar la calle.

Palabras clave: aceptación de brecha, cruces a media cuadra, seguridad peatonal, realidad virtual, velocidad de caminata

¹ Article received on April 5, 2023 and accepted for publication on April 26, 2023.

² Professor, Department of Civil Engineering and Surveying, University of Puerto Rico at Mayagüez, Call Box 9000, Mayagüez, Puerto Rico 00682. E-mail: alberto.figueroa3@upr.edu

³ Professor, Department of Civil Engineering and Surveying, University of Puerto Rico at Mayagüez. E-mail: didier.valdes@upr.edu

⁴ MSCE Student, University of Puerto Rico at Mayagüez. E-mail: natacha.cardona@upr.edu

⁵ PhD Candidate, University of Puerto Rico at Mayagüez. E-mail: andres.chamorro@upr.edu

INTRODUCTION

There were 38,824 road-related fatalities in the United States [U.S.] in 2020, of which 17% were pedestrians. Pedestrian safety studies that can identify crash-related factors and mitigation strategies have become more relevant as an increase of 46% in pedestrian fatalities has occurred in the U.S. since 2011 (NCSA, 2022). The safety of vulnerable road users [VRU] is a top priority of the strategic highway safety plan in Puerto Rico, as 33.5% of the 1,491 roadway fatalities during the 2014-2018 period involved a pedestrian (PRHTA, 2021). Non-intersection locations were related to 74% of the pedestrian fatalities in Puerto Rico, indicating that one of the safety concerns is associated with pedestrians performing mid-block crossings or searching for shorter routes when walking along a roadway (NCSA, 2020). Contributory factors related to crashes at uncontrolled crossings include crossing conflicts, excessive vehicle speeds, inadequate visibility, drivers not yielding to pedestrians, and insufficient separation from traffic.

The Federal Highway Administration [FHWA] established the Safe Transportation for Every Pedestrian [STEP] initiative, as part of the Every Day Counts [EDC] program to encourage the systemic utilization of roadway enhancements to improve pedestrian safety. A STEP emphasis area is the implementation of technological advances to improve the safety of pedestrians on uncontrolled crossings. The proper development and future implementation of connected technology, such as vehicle-to-pedestrian [V2P] and pedestrian-to-infrastructure [P2I], have a high potential for improving road safety. These technologies could be used to inform and alert VRU of existing street and traffic conditions, available transportation services, and unexpected events through the transportation network. The usage of handheld electronic devices has increased exponentially, with over 420 million devices in the U.S. alone, or approximately 1.3 devices for each person (CTIA, 2019). VRUs, such as seniors, persons with limited mobility, and other non-motorized users, could benefit from real-time street and traffic-related data by receiving information and warnings in a connected handheld device that can assist them in making proper decisions on the street network. In evaluating the effectiveness of new technologies, it is vital to analyze if using these electronic devices while performing street crossing maneuvers could lead to unsafe distractions.

This article presents the results of a Virtual Reality [VR] experiment that studied the impact of a potential RIAS device on the ability of a pedestrian to perform a mid-block crossing maneuver in an urban street. The walking speed, the vehicle gap selected to cross the street, and the number of successful crossing events [no collisions] were analyzed using VR scenarios of one-lane and two-lane urban streets. The analysis evaluated the impact on the performance of pedestrians due to the presence and complexity of the information provided by the RIAS device.

LITERATURE REVIEW

Walking Speeds

The skills for crossing a street vary from person to person based on their physical and health conditions. Therefore, a unique average speed might not accurately represent the performance of all population groups and should not be applied indiscriminately for all conditions. An average walking speed of 4.0 ft/s is suggested in the MUTCD (2009) as a typical value to determine the pedestrian clearance time at a signalized intersection. However, Gates et al. (2006) suggested using that walking speed value only for locations with a low number of older pedestrians and disabled persons. Guidance for pedestrian signals suggests using a walking speed of 3.5 ft/s under ordinary circumstances and lower walking speeds to estimate the pedestrian clearance time when slower pedestrians or people on wheelchairs are expected (FHWA, 2012). A VR study by Shuchisnigdha et al. (2017) found an average walking speed of 3.51 ft/s, but 10.8% of the subjects were hit by a vehicle during the simulation. Another VR study found that females have a 4.0 ft/s average walking speed, while males have a range between 3.5 to 5 ft/s. A VR study with vehicles moving at 25 mph found a larger range of walking speeds for females between 2.5 and 8.5 ft/s (Figuerola et al., 2023).

Studies have focused on the street-crossing performance of adults over 65 years who are directly affected by their age, as their capacity for individual mobility becomes limited, and their walking speeds typically get slower than the average pedestrian. Street crossings by elderly adults are more difficult to complete, as their average walking speed is estimated as 2.8 ft/s (FHWA, 2006). Gates et al. (2006) found similarities in walking speeds between persons older than 65 years old and persons with a physical disability and children assisted by an adult. Researchers have found that pedestrians between 21 and 30 years old have faster walking speeds (Tarawneh, 2001), and the speed of approaching vehicles is a significant risk factor for elderly pedestrians (Lobjois and Cavallo, 2007; Lobjois and Cavallo 2009).

Gap Acceptance

The vehicle-pedestrian interaction at a street crossing is affected by the driver's arrival time when the pedestrian arrives at the curb (Várhelyi, 1998). Pedestrians tend to perform riskier crossing decisions and accept smaller gaps at higher vehicle speeds. The use of a rolling gap maneuver is more apparent for pedestrians when crossing more than one traffic lane simultaneously, and there is no safe gap available (Boroujerdian and Nemati, 2016). Researchers noted that the gap accepted by a pedestrian usually depends on the longitudinal distance from the vehicle to the pedestrian, the pedestrian's gender, the vehicle length, and the presence of illegally parked vehicles (Yannis, 2010). Elderly pedestrians have attenuated risk perception, prolonged waiting times and tend to accept a significantly larger gap than their younger counterparts (Hamed, 2001; Holland and Hill, 2007).

Male pedestrians tend to show a low perception of danger while crossing a street; therefore, it is generally accepted that they are more inclined to make riskier crossing decisions and be more willing to unfollow traffic laws than their female counterparts (Holland and Hill, 2007). Males tend to wait shorter amounts of time before crossing a street and exhibit faster walking speeds than females (Tarawneh, 2001; Ferencsik, 2016). Researchers have also observed that women who spoke on mobile phones crossed traffic at a slower speed and less frequently while waiting than those who did not use mobile phones. In the case of male pedestrians, those who spoke on their mobile phones crossed more slowly on non-signalized intersections (Hatfield and Murphy, 2007). A VR study by Figueroa et al. (2023) found that males selected an average gap between vehicles of 4.49 s to cross, whereas females had a higher gap acceptance of 4.80 s when confronted with vehicle speeds of 15 mph. The Figueroa et al. study also found that senior males waited a significant time to find safe gaps in traffic, with an average of 133 gaps observed with traffic generated with a constant gap of 3 s and a 25-mph speed.

Road Information Assistance Systems [RIAS]

Advanced Driver Assistance Systems [ADAS] technologies have been developed recently as an essential aid for drivers by providing warning messages, assistance, and even taking control of the vehicle under some circumstances. In the context of pedestrian crossings, ADAS can assist drivers by warning about the presence of pedestrians and helping maneuver the vehicle for the prevention of a crash (Leon and Gavrilescu, 2021). The alarms include auditory, visual, vibrotactile, and haptic warnings that provide the driver with audible and visual stimuli. Road Information Assistance Systems [RIAS] is a term that can be used for technological assistance devices that are not focused exclusively on drivers.

Current ADAS warns the driver, but the collision cannot be avoided in some situations because most systems react only when the pedestrian is in front of the vehicle. Pedestrians have a higher dynamic range than vehicles, making it challenging to detect and predict a trajectory. A pedestrian follows a particular path, crosses a road, walks along the pavement, or turns at an intersection. Trajectory and tracking prediction methods define a pedestrian's position at any point in time (Leon and Gavrilescu, 2021). A significant research topic is devising ways to improve the effects of advanced assistance devices and technologies on the safety of pedestrians when crossing a street. On the other hand, mobile devices could

impair pedestrians' and drivers' attention, contributing as a factor to vehicle-pedestrian crashes (Schwebel et al., 2012). Pedestrians exhibit more dangerous behavior when using an electronic device on the street (Byington and Schwebel, 2013). Rahimian et al. (2018) found that pedestrians using mobile phones crossed a street more slowly; consequently, being more exposed to traffic.

Virtual Reality Simulation

VR simulation can provide the user with a role-playing circumstance with almost total sensory immersion in controlled surroundings. The system features include immersion and enable the user to experience activities from an internal perspective (Kearney et al., 2007). Simulation technologies have become a valuable tool for conducting transportation safety research to study human factors and observe the behavior and performance of road users, evaluate roadway safety issues, and assess the effects of new road design strategies or new traffic control devices. VR allows the reproduction of standardized scenarios and the management of the parameters under investigation (de Winter et al., 2017). The user observes the simulated 3-dimensional environment with lightweight head-mounted glasses with a screen, and the technology provides the alternative of adding hand controls for a more reliable experience. The fidelity of VR devices refers to the precision with which accurate sensory cues are reproduced (Kearney et al., 2007). The first senses activated during a simulation run using VR are sight and hearing, allowing the user to encounter roadway situations that, in real life, could be dangerous or even fatal.

METHOD AND EXPERIMENTAL DESIGN

This study used a VR simulation of an urban street to evaluate the gap acceptance decision and the walking speed selected by pedestrians when performing a mid-block crossing maneuver. The basic scene consisted of a straight street segment with one or two lanes in an urban downtown context. The width of the traffic lanes was set at 10 feet, and 6-foot wide sidewalks were located on each side of the street, as shown in Figure 1. Traffic was programmed in the simulation to travel in one direction, from left to right of the display. Vehicles were generated at constant speeds of either 15 mph (low speed) or 25 mph (high speed). The gap between the vehicles in the simulation varied randomly, using a range from 3 to 8 seconds, indistinctly from the lane. The subject started the simulation located on one sidewalk and was instructed to analyze the traffic in the street [after the first vehicle passed the crosswalk] to decide when there was a safe gap to cross the street and reach the sidewalk on the far side. The subjects were instructed that traffic in the simulation would not react to their presence when crossing.



Figure 1: Two-lane urban roadway crossing setting.

The scenario included a billboard display visible to the pedestrian on the street's far side indicating the number of completed simulation runs the subject had completed. The billboard also showed instant information to the pedestrian if he/she was hit by a vehicle when performing the crossing maneuver. The billboard showed in Spanish the message in blinking red letters "*FUE ATROPELLADO*" [YOU WERE HIT]. This information provided direct feedback to the subject that the crossing maneuver was unsuccessful and that the decision to cross, the gap accepted, the walking speed selected, or a combination of these factors were not safe for the existing conditions.

Thirty-six subjects were recruited for the study, equally divided into men and women and into three age categories 18-25, 26-45, or 46-70 years old. Table 1 shows the combinations of VR scenarios created for the experiment. Every subject completed twelve crossing maneuvers, six for each street size. The experiment collected 418 street crossing maneuvers. Three crossing maneuvers were removed from the database due to recorded gaps higher than the specified value in the experiment design.

Table 1: VR simulation scenarios.

Configuration	Scenario	Vehicle speed (mph)	Number of lanes
A: No RIAS	1	15	One
B: Simple RIAS	2	25	One
C: Complex RIAS	3	15	Two
	4	25	Two

Description of RIAS devices

The VR experiment studied the effect on the crossing performance of subjects when using the RIAS device to cross the street. The simulated RIAS provided real-time information about the closest vehicles approaching the mid-block crossing. Twelve subjects were assigned to each one of the three configurations in the experiment. Group A included subjects that crossed the street without the assistance of the RIAS. Group B had subjects crossing the street using the simple RIAS, and Group C included subjects crossing with the assistance of the complex RIAS. Figure 2 shows the device displays created for the simple RIAS and the complex RIAS for the two-lane scenarios. The RIAS display for the two-lane street showed information for each lane. The RIAS display for the one-lane street showed one set of information. The subjects were informed about the meaning of the symbols and messages shown in the RIAS prior to the experiment.

The simple RIAS showed the crossing assistance information in the form of the WALK and DO NOT WALK symbols that are used for pedestrian signal indications at intersections, as specified in the MUTCD. The “walking person” symbol meant that the conditions were safe to cross the road. The “upright hand” symbol meant that the conditions were not safe to cross the road. For the complex RIAS, the WALK and DO NOT WALK symbols were accompanied by real-time information about the speed, the time, and the distance for the nearest vehicles to the crosswalk. The hypothesis for the complex RIAS was that by showing more information, the subject would require more time to process and recognize the level of risk imposed by the traffic conditions. Two potential issues could also arise with the RIAS; to become a distraction affecting the ability to safely cross the street, or that subjects would not understand the information provided by the device and would not be comfortable using it.



Figure 2: Simulated displays of RIAS device used for the two-lane street.

The symbols and the information were programmed to change in the RIAS display in real time based on the proximity of the vehicles to the crossing and the average walking speed that was calibrated for each subject. The calibration was performed at the beginning of the experiment to calculate the average walking speed of each subject. The subject crossed the street four times with no traffic present to get the estimate. A virtual sensor for the RIAS device was then located on the scenarios with active traffic using the subject's average walking speed obtained from the calibration. When a vehicle passed over the road sensor in the simulation, the pedestrian symbols would change from the WALK to the DO NOT WALK message, meaning that the proximity and speed of the vehicle were not safe for the subject to complete the crossing at the average “normal” walking speed without getting hit by the vehicle. In this way, the RIAS device was customized for each subject in the simulation.

PEDESTRIAN PERFORMANCE RESULTS

This section discusses the results for the walking speeds selected by the subjects during the calibration process and the simulation experiment. Also, the results of the gaps selected by the subjects to cross the street and the crossing success rate are discussed with their implications.

Calibration of Sensor Location

The data obtained to calculate the location of the RIAS sensor from the calibration stage were analyzed to observe the performance of pedestrians without the presence of vehicles on the road. Figure 3 shows the distributions of the walking speed for the calibration scenarios for the one-lane and two-lane streets. A Shapiro-Wilk test without group discrimination showed that the average pedestrian speeds did not follow a normal distribution at a 95% confidence level. The non-parametric Kruskal-Wallis test was then used to confirm that the two speed distributions are statistically similar, with a p-value of 0.969. The average walking speed for the one-lane street was 3.35 ft/s with a standard deviation of 0.50 ft/s, while the average speed was 3.36 ft/s for the two-lane street with a standard deviation of 0.56 ft/s.

Crossing Success Rates

A total of 415 crossing maneuvers were collected from the experiment, with only seven crossing maneuvers [1.7%] resulting in a crash with a motor vehicle. The crossing maneuvers resulting in a crash were considered only to calculate the crossing success rates. The analysis of the gap accepted [or selected] and the walking speed used by the subjects to cross only considered the maneuvers that were successful without getting hit by a vehicle.

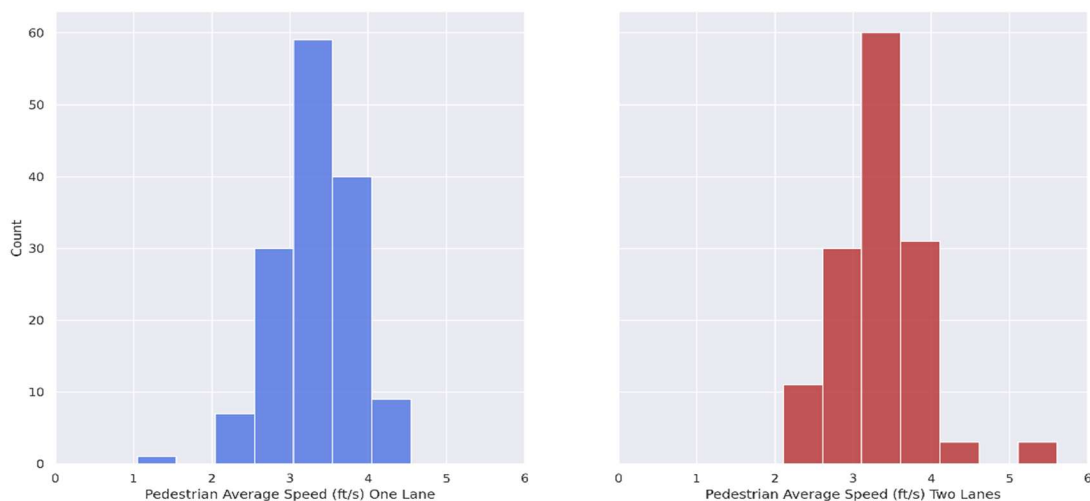


Figure 3: Distribution of the average walking speed per number of lanes.

The crossing success rate was computed for each subject in the experiment to find any pattern of hits by a vehicle when crossing the roadway for the subject groups. Table 2 shows the crossing success rates based on the RIAS configuration, in combination with the respective average walking speed and average gap accepted. Subjects with the Simple RIAS had the lowest crossing success rate of 95.8% in the experiment. The subjects that crossed the street without the assistance of the RIAS resulted in an almost perfect crossing success rate of 99.3%. These results might show that users had difficulty using or understanding the RIAS device when crossing the road.

Table 2: Walking speed, gap accepted and crossing success rate by RIAS configuration.

Device	Average Walking Speed (ft/s)	Average Gap Accepted (s)	Crossing Success Rate
No RIAS	4.192	6.593	0.993
Simple RIAS	4.124	6.784	0.958
Complex RIAS	4.140	6.397	0.986

Gap Accepted to Cross

Figure 4 shows the distribution of the gap accepted to cross for each RIAS configuration. The highest average gap accepted was observed for the subjects using the Simple RIAS. This average gap value was almost 0.4 seconds larger than the minimum average gap accepted for the subject group that used the Complex RIAS to cross the road. Interestingly, the group with no RIAS resulted in an average gap value higher than for the Complex RIAS group, showing that the information obtained from the Complex RIAS supplied some advantage. A Kruskal-Wallis test confirmed that the distributions were not statistically the same, with a p-value of 0.014.

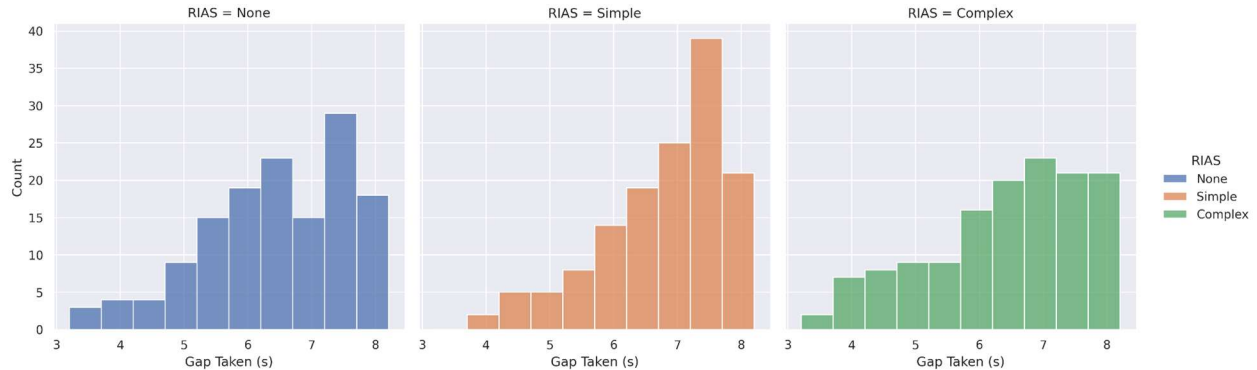


Figure 4: Distribution of the gap accepted by RIAS configuration.

Walking Speeds

Figure 5 shows the average walking speeds for the calibration phase and the experimental phase. The goal was to verify if the walking speeds selected by subjects without and with the presence of traffic in the simulation were similar. A non-parametric Kruskal-Wallis test confirmed the two speed distributions are statistically different. The sample in the calibration phase had an average speed of 3.36 ft/s, while the average speed in the experimental phase was significantly higher at 4.16 ft/s, for a percent difference of 21.3%. The standard deviation of the speed in the experimental phase was also higher than in the calibration phase, with a difference of 43.4%. The higher average speeds and standard deviation values in the experimental phase are inferred to be related to the presence of vehicles and the increased stress imposed on the subjects to perform a safe crossing without getting hit by a vehicle.

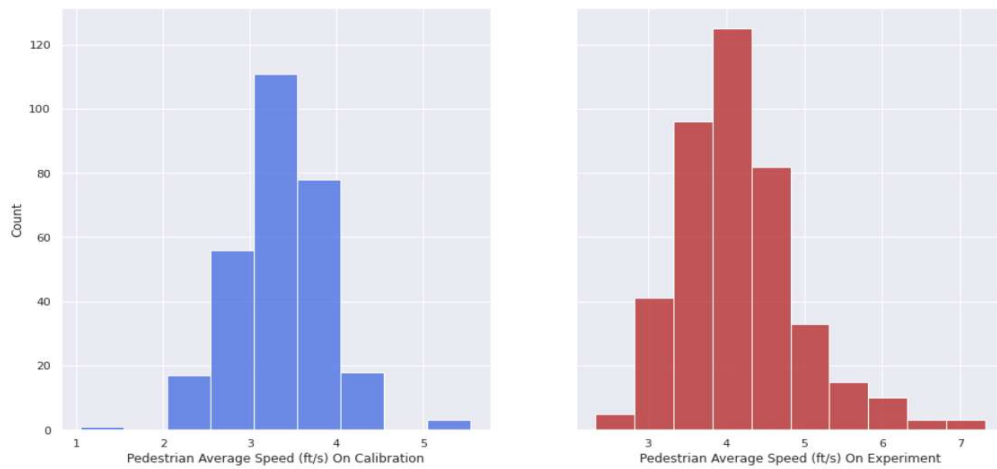


Figure 5: Distributions of walking speeds for the calibration and experimental phases.

The distributions for the average walking speed were analyzed to identify differences based on the number of lanes [1-lane vs. 2-lanes] or the vehicle speeds [15 vs. 25 mph]. A Kruskal-Wallis test showed there was no significant difference between the two speed distributions based on the number of lanes with a p-value of 0.401. The average walking speed for crossing the one-lane street was 4.13 ft/s, while the average speed for the two-lane street was 4.18 ft/s. The standard deviations were 0.76 and 0.75 ft/s for the one-lane street and the two-lane street, respectively. Similarly, a Kruskal-Wallis test showed there was no significant difference between the two distributions based on the two vehicle speeds.

Figure 6 shows the distribution of the average walking speeds by RIAS configuration. As noted in Table 2, the difference in walking speeds based on the RIAS configuration is minimal. A major speed difference of 1.6% was observed between the no RIAS and the Simple RIAS configurations. As expected, a Kruskal-Wallis test confirmed that the speed distributions were statistically similar, with a p-value of 0.05. It can then be inferred that the use of the RIAS itself did not influence the walking speeds selected by the subjects.

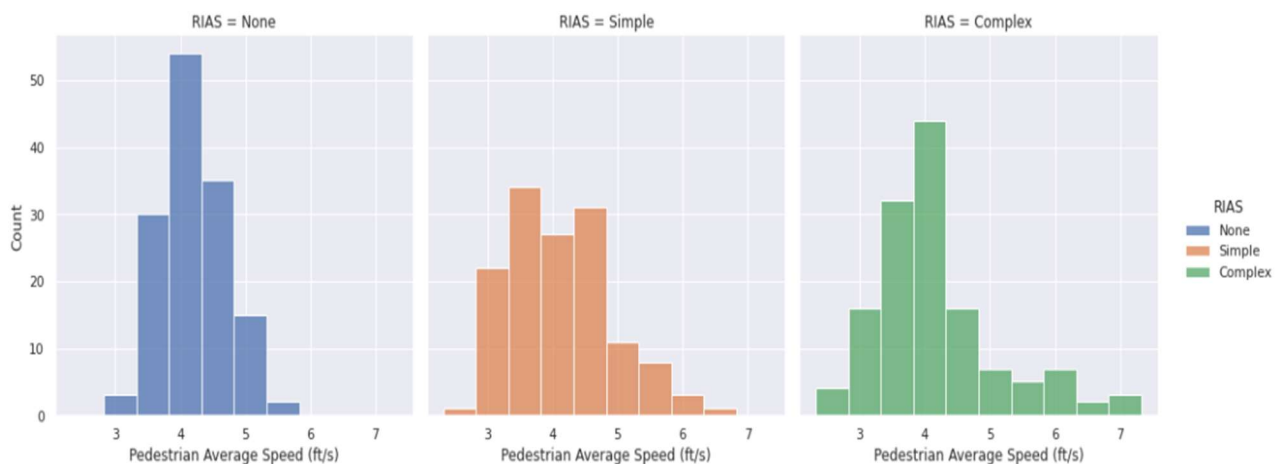


Figure 6: Comparison between walking speeds based on the RIAS configuration.

Table 3 shows the results from a Kruskal-Wallis test, a non-parametric approach to the one-way ANOVA, used to identify the effects in the walking speed of the independent factors, age, and gender, the number of lanes, vehicle speeds, and the RIAS configuration. The AGE variable had three levels, taking a value of zero for the 18-25-year-old group, one for the 26-45-year-old group, and two for the 46-70-year-old group. The GENDER was defined as a binary variable taking a value of zero for females, and one,

otherwise. The RIAS variable was defined with three levels, taking a value of zero for the NO RIAS condition, a value of one for the SIMPLE RIAS, and a value of 2 for the COMPLEX RIAS. The LANES variable took a value of zero for the one-lane street and a value of one for the two-lane street. The VEHICLE SPEED variable was assigned a value of zero for the 15-mph speed and a value of one for the 25-mph speed.

Table 3: Kruskal-Wallis test results on the average walking speed.

Parameter	DF	h-value	p-value
AGE	2	5.77	0.056*
GENDER	1	4.09	0.043*
RIAS	2	5.91	0.052*
LANES	1	0.56	0.455
VEHICLE SPEED	1	0.04	0.837

Note: * Indicates the parameter has a significant effect on the response variable.

The h-value statistic for the Kruskal-Wallis test is used to calculate the p-value of the parameter. A level of significance of 0.10 was selected as the threshold value to indicate that there is a statistically significant difference between the median values of the walking speed. The results show that the AGE, GENDER, and RIAS have a significant effect on the average walking speed. The LANES and VEHICLE SPEED variables were found not to influence the median values of the walking speed.

A walking speed regression model was calibrated to identify factors that could explain the variability observed in the experiment. A logarithmic transformation of the response variable was made to stabilize the normality and variance of the residuals of the model. Table 4 shows the results of three OLS regression models with the coefficients of the model parameters and the p-values in parentheses.

Table 4: OLS model coefficients with the logarithmic transformation of the walking speed.

Parameters	Levels	Base Model	Full Model w/o Interaction	Model only AGE-RIAS	Full Model - All Interactions
Constant	-	0.603 (0.000)	0.611 (0.000)	0.635 (0.000)	0.628 (0.000)
AGE	1	0.025 (0.005)	0.024 (0.006)	0.010 (0.479)	0.010 (0.540)
	2	0.027 (0.003)	0.027 (0.003)	-0.031 (0.039)	-0.008 (0.612)
GENDER	1	-0.019 (0.006)	-0.019 (0.007)	-0.019 (0.004)	-0.003 (0.795)
	2	--	-0.0126 (0.231)	-0.020 (0.181)	-0.021 (0.154)
RIAS	1	--	-0.011 (0.237)	-0.071 (0.000)	-0.072 (0.000)
	2	--	--	-0.040 (0.049)	-0.038 (0.058)
AGE-RIAS	1-1	--	--	0.081 (0.000)	0.083 (0.000)
	1-2	--	--	0.068 (0.001)	0.068 (0.001)
AGE-GENDER	2-1	--	--	0.102 (0.000)	0.103 (0.000)
	2-2	--	--	--	-0.003 (0.832)
R^2	1-1	--	--	--	-0.046 (0.006)
	2-1	--	--	--	--
R^2		4.15%	4.58%	16.99%	18.86%
Adjusted R^2		3.46%	3.44%	15.18%	16.69%
Lack-of-Fit		0.016	0.000	0.303	0.534

Note: p-values are shown in parenthesis. Bold values show significant parameters.

The first model was calibrated by adding one explanatory variable at a time. The best specification of the OLS regression model [BASE model] found only the AGE and GENDER variables to be statistically significant. The BASE model indicates that older subjects and females have higher walking speeds than their counterparts in the experiment. A subsequent calibration of the OLS regression [FULL model] included the RIAS variable, but this resulted to be non-significant. Both models, without considering interactions between variables, only explain 4.6% of the variability in the response variable.

When adding the effects of interactions between explanatory variables in the regression model, it was found that the interaction of the RIAS variable with the AGE and GENDER variables is significant, which indicates that the levels of RIAS could be significant in the model if the interactions with these variables are considered. Therefore, a model AGE-RIAS was calibrated with the variables AGE, GENDER, RIAS, and the interaction between RIAS and AGE. This regression model resulted in better goodness-of-fit and adjusted R^2 values with the significance of all variables and meeting the assumptions of normality and constant variance in the residuals of the model.

A “full” model with all the significant interactions was calibrated using the backward elimination technique. The best fit of all possible linear models was obtained with an adjusted R^2 value of 16.7%, which was an improvement over the model without interactions and the model that only considers the AGE-RIAS interactions. The results indicate the interaction between the COMPLEX RIAS treatment and the older age group provides the greatest absolute positive impact on the average walking speed. The age group over 45 years old using the COMPLEX RIAS increased their speed up to 1.26 ft/s more than their counterparts.

Perceptions regarding the RIAS Device and the VR Simulation

Subjects were asked after ending the experiment about their perceptions of the difficulty of factors in the street crossing simulation, the use of the RIAS device, and their level of comfort when immersed in the VR environment. When asked about the factors in the simulation generating difficulty in cross the street, 55% of subjects identified the gap [or distance] between the vehicles, and 39% of subjects identified the vehicle speeds. On the contrary, the road width [83%] and the number of vehicles [77%] were the factors that most participants identified to have provided them with lesser difficulty in crossing the simulated street. When analyzing the responses based on the RIAS used, the vehicle speed and the gap between vehicles showed the highest increase in the number of subjects that perceived less difficulty when using the RIAS to cross the street. The COMPLEX RIAS, which shows in real-time the speed, distance, and time from the closest vehicles to the crosswalk, appeared to enhance the comprehension of subjects of these two factors in their decision to cross the street.

Subjects that used the RIAS were asked about their perception of the usefulness of the device and their willingness to use such a device in the future if available. These questions aimed to establish a point of view on the use of a RIAS device in a future connected environment, even though participants were not trained about smart cities in the experiment. The Complex RIAS was perceived to be very useful by 83% of the participants, compared to 67% of participants from the Simple RIAS group. Similarly, more participants [58%] that used the Complex RIAS stated to be willing to use the device in real life, compared to just 25% in the Simple RIAS group. Participants were also asked about the usefulness of the four elements of the information displayed in the Complex RIAS. The time for the vehicle to reach the crosswalk was selected by all participants as very helpful information for crossing the street. The speed of the vehicles had the second highest preference by the subjects, 92% on the one-lane street and 100% on the two-lane street. The pedestrian symbols, the only assistive information displayed in the Simple RIAS, had the lowest preference by the subjects.

The level of comfort with the VR simulation was also inquired. Overall, 72% of the subjects stated they felt comfortable in the VR simulation. More subjects [83%] felt comfortable in the VR simulation when analyzing only the No-RIAS group. The Simple RIAS group had both the lowest percentage [58%] of subjects with a “comfortable” opinion and the highest percentage [25%] with an “uncomfortable” opinion. This perception could be linked to a misunderstanding of the meaning of the pedestrian symbols used in

the SIMPLE RIAS or even about the general use of the device. The use of the Complex RIAS had a much higher percentage of subjects [75%] with a “comfortable” opinion than the Simple RIAS. This result implies that the Complex RIAS, even though it had more information to process than just the two symbols in the Simple RIAS, the subjects felt more comfortable using that device.

CONCLUSIONS

This article discussed the results from a VR simulation experiment that evaluated the use of a RIAS device in helping pedestrians make a crossing maneuver in an urban street. The design of the experiment included the effects on the crossing performance of pedestrians from traffic generated at either 15-mph or 25-mph speeds with random gaps between 3 s and 8 s, on a one-lane or two-lane street, and the use of a RIAS device displaying only symbols or adding real-time information. The main conclusions from this VR experiment are:

- The presence of active traffic in the simulated street increased the walking speed used by the participants due to the increased pressure to cross the street successfully when facing the traffic.
- The people that used the RIAS device displaying only the pedestrian symbols had the worst crossing performance in the study. Those people also selected the highest average gap to cross the street.
- The use of the two RIAS devices affected the average gap accepted and the walking speed used by the people to cross the street.
- The age and gender and the level of RIAS have a significant effect on the average walking speed of the participants. Males selected slower walking speeds when crossing the street than females.
- The implication of age on the average walking speed varies with the presence of interactions with other explanatory variables. The middle-age group exhibited higher walking speeds than their younger counterparts. When the interaction between age and RIAS is present, the oldest age group exhibited lower speeds than their younger counterparts, although the interaction effect for this group with the complex RIAS has the highest positive impact on walking speeds.
- The complex RIAS device [with real-time information] resulted in a better crossing performance than the simple RIAS device. The perception of the subjects in favor of the complex RIAS is clear, even though this device was assumed at first to require more concentration on the part of the person to analyze the information and to use it properly.
- The pedestrian symbols most likely do not supply enough relevant information to the pedestrians about the traffic conditions, there was no understanding of the meaning of the symbols outside of a signalized intersection, or simply the participants did not understand the explanation about the change in the pedestrian symbols really meant in the RIAS device.

RECOMMENDATIONS FOR FUTURE RESEARCH

The results from this VR simulation experiment could be useful to assist the community of transportation professionals in formulating new policies for crossing safety. VR technology can be used to identify potential safety treatments for pedestrians in urban settings and strategies targeted to different age groups and gender.

The promise of future RIAS devices, such as those simulated in this study, requires further study that assesses the understanding of users of the meaning of the information provided and a validation study to identify the best human interface. Future research could also consider the effect on walking speeds and crossing performance at road geometry configurations of higher complexity, such as curved alignment, intersections, and roundabouts.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article is based upon work supported by the Safety Research Using Simulation (SAFER-SIM) University Transportation Center and funded by the U.S. Department of Transportation Office of the Assistant Secretary for Research and Technology under Grant No.69A3551747131. Any opinions, findings, or conclusions expressed in this article are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the U.S. Department of Transportation.

The authors express their appreciation to the Puerto Rico Transportation Technology Transfer Center (PR LTAP-T²) for lending the VR equipment used for conducting the experiment and to the staff of the UPRM Civil Infrastructure Research Center for the support provided.

REFERENCES

- Boroujerdian, A. M., & Nemati, M. (2016). Pedestrian Gap Acceptance Logit Model in Unsignalized Crosswalks Conflict Zone. *International Journal of Transportation Engineering*, 4(2), 87-96. doi: 10.22119/ijte.2016.40534.
- Byington, K. W., & Schwebel, D. C. (2013). Effects of Mobile Internet Use on College Student Pedestrian Injury Risk. *Accident Analysis & Prevention*, 51, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.11.001>.
- CTIA. (2019, June). 2019 Annual Survey Highlights. [Attps://www.ctia.org/news/2019-annual-survey-highlights](https://www.ctia.org/news/2019-annual-survey-highlights).
- de Winter, J., van Leeuwen, P. & Happee, R. (2012). Advantages and Disadvantages of Driving Simulators: A Discussion. *Proceedings of the Measuring Behavior Conference*, 47–50.
- FHWA. (2012). Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways. 2009 Edition with Revisions 1 and 2. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- FHWA. (2006). University Course on Bicycle and Pedestrian Transportation. Lesson 8: Pedestrian Characteristics. Federal Highway Administration, Washington, D.C. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/pedbike/05085/pdf/lesson8lo.pdf>.
- Ferrenchak, N. (2016). Pedestrian Age and Gender in Relation to Crossing Behavior at Midblock Crossings in India. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(4), 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.12.001>.
- Figueroa, A., Valdés, D., Colucci, B., Cardona, N. & A. Chamorro. (2023). Analysis of Walking Speeds and Success Rates on Mid-block Crossings Using Virtual Reality Simulation. *Accident Analysis & Prevention*, Volume 183, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.106987>.
- Gates, T. J., Noyce, D. A., Bill, A. R., & Van Ee, N. (2006). Recommended Walking Speeds for Timing of Pedestrian Clearance Intervals Based on Characteristics of the Pedestrian Population. *Transportation Research Record*, 1982(1), 38-47.
- Hamed, M. (2001). Analysis of Pedestrians' Behavior at Pedestrian Crossings. *Safety Science*, 38, 63-82.
- Hatfield, J. & Murphy, S. (2007). The Effects of Mobile Phone Use on Pedestrian Crossing Behaviour at Signalised and Unsignalised Intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 39(1), 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.07.001>.
- Holland, C. & Hill, R. (2007). The Effect of Age, Gender and Driver Status on Pedestrians' Intentions to Cross the Road in Risky Situations. *Accident Analysis and Prevention*. 39. 224-7.
- Kearney, J., Rizzo, M. & J. Severson. (2007). Virtual Reality and Neuroergonomics, *Chapter 17 in Neuroergonomics: The Brain at Work*. R. Parasuraman and M. Rizzo. Oxford University Press.
- Leon, F. & Gavrilesu, M. (2021). A Review of Tracking and Trajectory Prediction Methods for Autonomous Driving. *Mathematics*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/math9060660>.

- Lobjois R. & Cavallo V. (2007). Age-related Differences in Street-crossing Decisions: The Effects of Vehicle Speed and Time Constraints on Gap Selection in an Estimation Task. *Accident and Analysis Prevention*. 39(5), 934-43.
- Lobjois R. & Cavallo V. (2009). The Effects of Aging on Street-crossing Behavior: From Estimation to Actual Crossing. *Accident Analysis and Prevention*. 41(2), 259-67.
- NCSA (2022, May). Pedestrians: 2020 Data. Traffic Safety Facts. Report No. DOT HS 813 210. National Center for Statistics and Analysis. National Highway Traffic Safety Administration.
- NCSA. (2020, December). Overview of Motor Vehicle Crashes in 2019. Traffic Safety Facts. Report No. DOT HS 813 060. National Center for Statistics and Analysis. National Highway Traffic Safety Administration.
- PRHTA. (2021, March). Strategic Highway Safety Plan: Pedestrians. Puerto Rico Highways and Transportation Authority. <https://www.carreterasegurapr.com/pedestrians>.
- Rahimian, P., O'Neal, E., Zhou, S., Plumert, J. & Kearney, J. (2018). Harnessing Vehicle-to-Pedestrian (V2P) Communication Technology: Sending Traffic Warnings to Texting Pedestrians. *Human Factors*, 60(6), 833–843.
- Schwebel, D., Stavrinou, D., Byington, K., Davis, T., O'Neal, E. & de Jong, D. (2012). Distraction and Pedestrian Safety: How Talking on the Phone, Texting, and Listening to Music Impact Crossing the Street. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 266–271.
- Shuchisnigdha, D., Carruth, D., Sween, R., Strawderman, L. & T. Garrison. (2017). Efficacy of Virtual Reality in Pedestrian Safety Research. *Applied Ergonomics*. Volume 65, pp. 449-460.
- Tarawneh, S. (2001). Evaluation of Pedestrian Speed in Jordan with Investigation of Some Contributing Factors. *Journal of Safety Research*. 32. 229-236.
- Várhelyi, A. (1998). Drivers' Speed Behaviour at a zebra crossing: A case study. *Accident Analysis and Prevention*, 30(6), 731–743.
- Yannis, G. (2010). Mid-Block Street Crossing. 12th World Conference for Transportation Research, 1–11.

AUTHORS BIOSKETCH



A. Figueroa-Medina

*P*rofessor and Associate Director of Graduate Studies and Research of the Department of Civil Engineering and Surveying from the University of Puerto Rico at Mayagüez (UPRM). Director of the Civil Infrastructure Research Center (CIRC) and UPRM Associate Director for the National Institute for Congestion Reduction (NICR), a National University Transportation Center supported by the US Department of Transportation. Has a BS and a MS in Civil Engineering from UPRM, and a Ph.D. in Civil Engineering with Specialization in Transportation and Infrastructure Systems from Purdue University. Research interests include highway geometric design and road safety modeling, the analysis of road user behavior and performance using driving simulation and virtual reality simulation tools, and the evaluation of the performance of transportation systems, including quality of service, safety, resilience, and sustainability.



D. Valdés-Díaz

*P*rofessor of the Department of Civil Engineering and Surveying of the University of Puerto Rico at Mayagüez. Obtained his doctoral degree from the University of Texas at Austin. Has more than 25 years of national and international experience working in education activities, research and community service at UPRM and other international institutions of higher education. Dr. Valdés-Díaz has interests in issues related to transportation systems and infrastructure and has conducted research sponsored by multiple local and national level organizations and has worked in high-level administrative positions at UPRM. He is currently the principal investigator in several large-scale projects sponsored with external funds. He is recognized for his dedication to education and research in civil engineering, as well as the promotion of new generations of engineering professionals.



N. Cardona-Rodríguez

*M*aster of Science Candidate in Civil Engineering with specialization in Transportation from the University of Puerto Rico at Mayagüez. Has a BS degree in Civil Engineering from the UPRM. Her research has been primarily focused on pedestrian behavior and safety. Cardona-Rodríguez was a recipient of the Dwight David Eisenhower Transportation Fellowship Program of the University & Grants Program of the Federal Highway Administration (FHWA) of the USDOT.



A. Chamorro-Parejo

*D*octor of Philosophy (PhD) Candidate in Computers and Information Science and Engineering from the University of Puerto Rico at Mayagüez. Obtained a BA degree in Mathematics from the Universidad del Atlántico in Barranquilla, Colombia, and a MSc degree in Mathematics from the UPRM. In addition to his research work related to pedestrian safety, behavior, and education, Chamorro-Parejo is also interested in bioinformatics.



CONGRESOS Y SEMINARIOS

International Conference on Transportation & Development 2023. El Instituto de Transportación y Desarrollo (T&DI) de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) junto al Departamento de Transportación de Texas anuncia la Conferencia Internacional de Transportación y Desarrollo (ICTD) 2023 y la Conferencia Internacional de Pavimentos de Carreteras y Aeródromos que se llevará a cabo del 14 al 17 de junio de 2023 en Austin, Texas. Esta colaboración de conferencia internacional brindará una oportunidad exclusiva para establecer contactos, interactuar e intercambiar información con líderes mundiales en los campos de transporte y desarrollo y pavimentos de carreteras y aeródromos. Reunirá a profesionales e investigadores de sistemas de transporte e infraestructura, gerentes de operaciones, gerentes de proyectos/construcción, académicos y profesionales, consultores y contratistas de transporte y desarrollo de todo el mundo. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://www.asce-ictd.org/>.

ITS Canada Annual Conference. Esta conferencia es el centro de tecnologías de movilidad de la industria y el sistema de transportación canadiense. La conferencia se celebrará del 14 al 16 de junio de 2023 en St. Clair College Centre for the Arts, Windsor, Ontario, Canadá. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://www.itscanada2023.ca>

6th European Climate Change Adaptation Conference 2023. La Iniciativa del Programa Conjunto “*Connecting Climate Knowledge for Europe*” (JPI Climate) junto con el proyecto MAGICA, apoyado por la Comisión Europea, organizan la Sexta Conferencia Europea de Adaptación al Cambio Climático que se llevará a cabo del 19 al 21 de junio de 2023 en Dublín, Irlanda. La audiencia estará compuesta por investigadores y profesionales, autoridades locales, el sector privado con enfoque en las empresas que toman medidas sobre el riesgo climático, inversores, organizaciones de ciudadanos y juveniles y todas las personas interesadas. Los participantes podrán escuchar principales investigadores climáticos de Europa que están utilizando datos confiables para desarrollar herramientas de acción climática de vanguardia para adaptarse a los desafíos climáticos. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://www.ecca2023.eu/>.

IX Congreso Internacional de la Construcción con Acero. Este Congreso organizado por el Instituto Colombiano de la Construcción con Acero (ICCA) se llevará a cabo del 28 al 30 de junio de 2023 en el Centro Empresarial El Cubo, Bogotá, Colombia. Este evento tiene el propósito de reunir la industria, la academia y la comunidad para fortalecer el sector de la construcción con acero en Colombia. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace www.icca.com.co/congresoacero2023/.

XXVII Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos. Este Congreso se celebrará en del 10 al 13 de julio de 2023 en Donostia – San Sebastián, España, con un formato mixto. Los días 10 y 11 serán en línea y los días 12 y 13 serán presenciales. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://congresos.aepro.com/>

21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology. El Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Instituciones de Ingeniería (LACCEI) junto a otras organizaciones anuncian su Vigésima Primera Conferencia a llevarse a cabo del 19 al 21 de julio de 2023 presencial en Buenos Aires, Argentina y virtualmente a través de *Agora Meetings Platform*. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://laccei.org/laccei2023/>



CONGRESOS Y SEMINARIOS

Geo-Risk 2023: Advances in Theory and Innovations in Practice. *Geo-Risk 2023 será la tercera conferencia ofrecida por el Comité de Evaluación y Gestión de Riesgos del Instituto-Geo (G-I) de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). Geo-Risk 2023 exhibirá las últimas investigaciones e innovaciones interdisciplinarias en evaluación y gestión de riesgos para atender la interrupción en la práctica geotécnica e involucrar a los asistentes en la visión más amplia y la importancia social de la ingeniería geotécnica para abordar el riesgo y cuestiones de resiliencia de la infraestructura civil. Este evento se llevará a cabo los días 23-26 de julio de 2023 en Arlington, Virginia. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://www.geo-risk.org/>.*

XXII Pan American Congress on Transport and Logistics (PANAM 2023). La Sociedad Panamericana de Investigación en Transporte y Logística anuncia su Vigésimo Segundo Congreso más importante de Iberoamérica en Logística y Transporte a llevarse a cabo los días 2, 3 y 4 de agosto de 2023 en Guayaquil, Ecuador. Este evento será el punto de encuentro para académicos y profesionales interesados en promover el conocimiento en las áreas de Logística, Tránsito y Transporte. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://www.panamstr.org/inicio>.

2023 UESI Pipelines Conference. Esta conferencia es parte del Instituto de Ingeniería y Topografía de Servicios Públicos (UESI) de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE). La conferencia proporcionará un lugar dinámico e inspirador para que los participantes compartan y adquieran conocimientos valiosos relacionados con la planificación, el diseño, la construcción, la renovación, la operación, la gestión y el mantenimiento de activos de tuberías. Este evento se llevará a cabo del 12 al 16 de agosto de 2023 en San Antonio, Texas. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://www.pipelinesconference.org/>.

2023 ITE Annual Meeting and Exhibition. El Instituto de Ingenieros en Transportación (ITE) anuncia su reunión anual con el tema “*Connecting People and Communities*” a realizarse del 13 al 16 de agosto de 2023 en el *Oregon Convention Center* en Portland, OR, USA. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace: <https://www.iteannualmeeting.org/>

2nd International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Constructed Infrastructure Facilities. La Sociedad Internacional para el Mantenimiento y Rehabilitación de Infraestructuras de Transporte (iSMARTI) junto a otras organizaciones internacionales auspician la 2^{da} Conferencia Internacional de Mantenimiento y Rehabilitación de Instalaciones de Infraestructura Construidas (MAIREINFRA) 2023 que se llevará a cabo los días 16 al 19 de agosto de 2023 en Honolulu, Hawaii. La conferencia estará compuesta de tres temas en particular asociados a mantenimiento y rehabilitación de pavimentos, automatización/innovaciones en puentes/construcción de edificios y seguridad y resiliencia ante desastres y sostenibilidad. Está dirigida para ingenieros de infraestructura sostenible, diseñadores de ciudades inteligentes, profesionales de resiliencia ante desastres, gerentes de construcción, entre otros. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <http://www.icsc2019.org/conference-overview/>.

3rd Global Congress on Climate Change (GCCC) 2023. La organización internacional *Innovinc* anuncia el 3^{er} Congreso Global sobre Cambio Climático (GCCC-2023) que tendrá lugar el 13 y 14 de septiembre de 2023 en Barcelona, España. GCCC-2023 tiene como objetivo reunir a profesionales del cambio climático, académicos y expertos de la industria y crear una plataforma única para mostrar y discutir los desafíos y las últimas tecnologías para abordar el cambio climático. Esto incluye conferencias magistrales interactivas, sesiones orales y de carteles, y paneles de discusión sobre innovaciones y logros recientes en un campo temático específico. Para más información y registro favor dirigirse al siguiente enlace <https://global-climatechange.com/>.

NORMAS PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS TÉCNICOS



Las siguientes son las normas básicas a las que se deben ajustar los autores al enviar sus artículos en la revisión final:

1. Los artículos deben estar escritos en español, inglés o portugués.
2. Los artículos deben ser escritos en letra Times New Roman, tamaño 11.
3. El título del artículo debe proveerse en español (o portugués) y en inglés.
4. El artículo debe tener un resumen de no más de 250 palabras, el cual debe estar escrito en español (o portugués) y en inglés.
5. Se debe adjuntar un máximo de cinco Palabras *claves*, las cuales deben estar escritas en español (o portugués) e inglés, en orden alfabético en cada idioma, y en minúsculas.
6. Las diferentes secciones y subsecciones del artículo no deben estar enumeradas.
7. El nombre de las secciones debe ir todo mayúscula, en negrilla y tamaño 11.
8. El nombre de las subsecciones debe ir en mayúscula y minúsculas, en negrilla y tamaño 11.
9. La indentación de la primera línea de párrafos debe ir a 0.2”.
10. Las figuras y fotografías no deben presentarse en colores claros.
11. El nombre de las tablas debe estar ubicado en la parte superior, en negrilla y escrito de la siguiente manera: **Tabla #: Nombre de la tabla**. Sólo la primera letra de la primera palabra va en mayúscula.
12. El nombre de las figuras debe estar ubicado en la parte inferior, en negrilla y escrito de la siguiente manera: **Figura #: Nombre de la figura**. Sólo la primera letra de la primera palabra va en mayúscula.
13. Las tablas deben estar hechas con Word.
14. En el texto, al referirse a una figura o a una tabla, la primera letra debe ser escrita en mayúscula: la Figura, la Tabla.
15. Las ecuaciones deben ser escritas con el editor de ecuaciones de Word, o con *MathType*. Deben ser escritas en letra Times New Roman y en un tamaño de *Font* 10. Las ecuaciones deben estar numeradas entre paréntesis y justificadas a la derecha.
16. En el texto, al hacer referencia a una ecuación, el número debe estar en paréntesis y debe escribirse la palabra completa en minúscula: ecuación (#).
17. Las palabras o frases en inglés deben escribirse entre comillas dobles (por ejemplo, ensayo “down-hole”).
18. Las referencias deben ser indentadas 0.5 pulgadas (12.7 mm) a partir de la segunda línea y escritas de la siguiente manera:
 - En el caso de un libro, el nombre debe estar en *itálica*:
Chopra, A. K. (2006). *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 3rd edition, Prentice Hall, New Jersey.
 - Publicación en una revista técnica (“journal”). Se debe incluir el volumen, número y las páginas del artículo. El título debe estar entre comillas y el nombre de la revista en *itálica*. Solo la primera letra del título debe estar en mayúscula. La forma correcta de escribir este tipo de referencia es:
Liang, R.Y. y Choy, F. (1992). “Theoretical study of crack – induced eigen frequency changes on beam structures”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 2, pp. 384-396.
 - Para los reportes técnicos, tesis o disertaciones se debe adoptar el siguiente formato:
Schultz, A. (1986). “An experimental and analytical study of the earthquake response of R/C frames with yielding columns”, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.
Bergman, D.M. y Goel, S.C. (1987). “Evaluation of Cyclic Testing of Steel-Plate Devices for Added Damping Dissipators”, Report UMCE 87-10, Civil Engineering Department, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

NORMAS PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS TÉCNICOS (CONT.)



19. Todas las referencias en la lista deben citarse al menos una vez en el texto principal del artículo.
20. Incluir la dirección postal completa y la dirección electrónica, al menos del autor que servirá de contacto.
21. Al referirse en el texto a un trabajo en la lista de referencia, debe citarse el mismo como: (Apellido, año), (Apellido 1 y Apellido 2, año), o (Apellido *et al.*, año), dependiendo si hay uno, dos o más autores.
22. En el caso de que dos o más referencias vayan seguidas deben colocarse en el mismo paréntesis separadas por punto y coma: (Apellido, año; Apellido 1 y Apellido 2, año).
23. No se deben usar abreviaturas en las referencias.

Aquellos autores interesados en recibir un archivo electrónico con un artículo típico preparado en el formato de la Revista deben escribir a ridnaic.editor@uprm.edu.

INFORMACIÓN PARA SUBSCRIPTORES

La Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil es una publicación científica y técnica que comenzó a publicarse a partir de mediados del año 2001, bajo el auspicio del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura del Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico. Inicialmente se están publicando dos números de la revista por año y se espera que el número de volúmenes por año aumente en los próximos años. La revista está disponible en la Internet en: <https://www.scipedia.com/sj/ridnaic>; <https://www.uprm.edu/ridnaic/publications/>.

Dirección Postal de la revista:

Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, UPR-Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, PR 00681-9000.
Teléfono: (1-787) 832-4040, Exts.3815, 3393.

Dirección de correo electrónico: ridnaic.editor@uprm.edu

ALCANCE TEMÁTICO

El alcance de esta publicación comprende los sistemas de ingeniería que dan apoyo y sirven para el diseño de la infraestructura civil, y a los desastres naturales y accidentes de origen humano que pueden afectar esa infraestructura. La revista publica contribuciones que se refieran a la conjunción de más de una de las áreas temáticas definidas en el título, o a una de ellas. El término infraestructura civil se usa aquí para designar al conjunto de instalaciones físicas que permiten movilizar o almacenar bienes, materias primas, agua, residuos, energía, información o personas. En general, se incluyen aquí puentes, puertos, canales, aeropuertos, ferrocarriles, sistemas de tránsito urbano, carreteras, líneas de comunicación y energía, tuberías, represas, plantas de tratamiento de aguas, tanques, silos, etc. El énfasis en desastres naturales está en el estudio de acciones de huracanes, tornados, terremotos, inundaciones, sequías, fuego, deslizamientos, maremotos. Asimismo, la revista publica temas relacionados con accidentes y eventos producidos por causas humanas, incluyendo fallas por diseño o construcción, colisiones, explosiones, entre otras.

INFORMACIÓN PARA AUTORES

La revista está abierta a contribuciones de profesionales e investigadores de cualquier nacionalidad y lugar de trabajo. Los idiomas de preferencia para la publicación de artículos son español, inglés o portugués. Para mantener la calidad de las contribuciones que publique la revista, los artículos se someten a un proceso de revisión por pares. Los manuscritos deben someterse utilizando MS Word, en letra tipo Times New Roman. No se admitirán contribuciones que utilicen otros procesadores de texto. Si bien la transferencia al formato oficial de la revista es responsabilidad de los Editores, el esfuerzo de los autores para enviar su trabajo siguiendo el formato de la revista es apreciado, en especial en lo que respecta a las Referencias y a su cita. Las instrucciones para los autores son muy similares a las que se utilizan en las publicaciones periódicas de la “*American Society of Civil Engineers*” (ASCE), con la diferencia que la revista usa el formato de una columna. Aquellos autores interesados en consultar un ejemplar anterior disponible deben escribir a ridnaic.editor@uprm.edu.



La Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil (RIDNAIC) es publicada por el Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura del Recinto Universitario de Mayagüez de la Universidad de Puerto Rico.

Las opiniones, hallazgos o recomendaciones vertidos en esta edición de RIDNAIC son las del Editor y la Comisión Editorial, no necesariamente reflejan las de la Universidad de Puerto Rico y el Recinto de Mayagüez.

Arte diseñado por Irmali