



Actas de la Primera  
Jornada de  
Doctorandos  
de la  
Facultad Regional  
Concordia

Actas de la Primera  
Jornada de  
Doctorandos de la  
Facultad Regional  
Concordia

UTN

2019

Actas de las Primeras Jornadas de Doctorandos de la FR Concordia / Alberto José Palacio ... [et al.] ; compilado por Carlos María Chezzi ; Natalia Tesón. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2019.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-987-4998-23-1

1. Hormigón. 2. Modelo de Simulación. 3. Acero. I. Palacio, Alberto José II. Chezzi, Carlos María, comp. III. Tesón, Natalia, comp.  
CDD 690

Diseño de logo: Exequiel Hernán Nicolás Cáseres

Diseño de interior y tapa: Fernando Cejas, Carlos Busqued



**Universidad Tecnológica Nacional – República Argentina Rector:**  
Ing. Hector Eduardo **Aiassa**  
**Vicerrector:** Ing. Haroldo **Avetta**  
**Secretaria Académica:** Ing. Liliana Raquel **Cuenca Pletsch**



**Facultad Regional Concordia**  
**Decano:** Ing. José Jorge **PENCO**  
**Vicedecano:** Ing. Fabián Andrés **AVID**  
**Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado:** Dra. Natalia **Tesón**



**edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional**  
**Coordinador General a cargo:** Fernando H. **Cejas**  
**Área de edición y publicación:** Carlos **Busqued**  
**Director Colección Energías Renovables, Uso Racional de Energía, Ambiente:** Dr. Jaime **Moragues.**

<http://www.edutecne.utn.edu.ar> [edutecne@utn.edu.ar](mailto:edutecne@utn.edu.ar)

Queda hecho el depósito que marca la Ley Nº 11.723

© **edUTecNe, 2019**

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ) Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina

ISBN 978-987-4998-23-1



9 789874 998231

*Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.*

## Índice

Hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero. Análisis como material de refuerzo en vigas \_\_\_\_\_ 4

Modelo numérico para el hormigón reforzado con fibras híbridas: Aplicación a un caso de estudio \_\_\_\_ 16

Modelos Numéricos en GPGPU para el Tratamiento de Fondos Móviles Erosionables \_\_\_\_\_ 26

Modelo de Distribución Resistivo del Subsuelo y sus Aplicaciones en Ingeniería Geológica, Cuenca del Arroyo Palmar, Entre Ríos \_\_\_\_\_ 37

Desarrollo de modelos de recursos renovables para la planificación óptima en proyectos de inversión en micro redes \_\_\_\_\_ 47



# **Hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero. Análisis como material de refuerzo en vigas**

**Doctorando: Ing. Alberto José Palacio**

Centro de Inv. Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad  
(CINTEMAC), UTN F.R.Córdoba;

Grupo de Inv. de Ingeniería Civil Materiales y Ambiente (GIICMA),  
UTN F.R.Con., Salta 277

C.P.: 3200, Concordia, Entre Ríos, Argentina  
apalacio@frcon.utn.edu.ar

**Director: Dra. Ing. Bárbara Belén Raggiotti, UTN- FRC.**

**Codirector: Dra. Ing. Viviana Rougier, UTN- FRCU.**

**RESUMEN:** Frecuentemente resulta necesario reforzar elementos estructurales de un edificio existente. Es posible emplear como solución diferentes técnicas de refuerzo, entre ellas, el hormigón reforzado con fibras, debido a sus buenas propiedades de resistencia trabajando a flexión. Con el fin de aprovechar las ventajas que posee este material, adicionando una fácil ejecución con un mínimo agregado de peso propio y la ausencia de vibraciones en la estructura, se desarrolla el hormigón liviano de alta resistencia autocompactado y reforzado con fibras de acero (HLAARFA). Este proyecto tiene por objeto evaluar, la efectividad del HLAARFA como material de refuerzo de elementos sometidas a flexión, empleando materiales y sistemas de fabricación de nuestra región. Desde el punto de vista experimental, se estudiará el comportamiento a nivel material del HLAARFA, y luego se ensayarán modelos a escala de elementos



estructurales de tipo vigas. Además, se espera simular el comportamiento de vigas reforzadas con este material mediante el diseño de un modelo numérico simplificado que permita calcular el momento flector resistente. La simulación se realizará mediante la implementación de un software de análisis por elementos finitos empleando la teoría para mezclas modificada. Se considerarán las diferentes fuentes de incertidumbres en los parámetros del modelo y se realizarán luego, estadísticas de los resultados obtenidos, los cuales serán contrastados con los datos experimentales.

**Palabras clave:** hormigón alivianado, fibras de acero, refuerzo de vigas, análisis por elementos finitos.

## I. INTRODUCCIÓN

La reparación o refuerzo de elementos estructurales de hormigón en estructuras existentes es muy importante para extender su vida útil, de otro modo la estructura tendría que ser demolida y reconstruida. En general, el refuerzo y / o la reparación de estructuras es más económico comparado con su demolición y reconstrucción (Nishino, M., & Aoki, T., 2006). Además existen construcciones que por su valor histórico-cultural merecen ser conservadas.

Entre los distintos materiales que se pueden usar para refuerzo a flexión, el hormigón re-forzado con fibras de acero presenta propiedades mecánicas y de durabilidad que lo hacen atractivo para estas actividades. La adición de fibras mejora la resistencia a tracción y flexión, la ductilidad y la tenacidad (Conforti, A., Zerbino, R., & Plizzari, G. A., 2019).

Al reforzar los elementos estructurales de hormigón armado, el propósito es aumentar su capacidad resistente con un mínimo agregado de peso propio y evitando vibraciones en la estructura, lo cual puede ser no deseado para la estructura existente y las que la rodean. Por lo tanto, un hormigón liviano de alta resistencia autocompactado y reforzado con fibras de acero – HLAARFA (Steel fiber



reinforced high strength lightweight self compacting concrete – SHLSCC), podría ser utilizado para reforzar vigas de hormigón armado a los efectos de mejorar su resistencia a flexión (Holschemacher, K., Iqbal, S., Ali, A., & Bier, T. A., 2015).

El hormigón autocompactado (self-compacting concrete – SCC) es altamente fluido, sin producir segregación. Tiene la propiedad de llenar los moldes y encapsular las armaduras de refuerzo sin consolidación mecánica. No requiere de vibración y compactación y puede fluir en amplios espacios sin excesiva exudación ni segregación, lo que resulta en un ahorro de mano de obra y una economía en el hormigonado.

Para el comité de la American Concrete Institute (ACI), el hormigón estructural liviano es el hormigón que tiene a los 28 días una resistencia a la compresión de 17 MPa y densidad de 1120-1920 kg/m<sup>3</sup>, constituido total o parcialmente por agregados livianos, mientras que los hormigones livianos de alta resistencia tienen a los 28 días una resistencia a la compresión de más de 40 MPa (ACI 237R-07, 2007).

El uso de compuestos de polímeros reforzados con fibras (PRF) posee ventajas como refuerzo de elementos sometidos a flexión en cuanto a la relación resistencia/peso, resistencia a la corrosión, fácil y rápida colocación y mínimo cambio en la geometría de los miembros reforzados (Iqbal, Ali, Holschemacher, Bier & Shah, 2016). Sin embargo, existen algunas desventajas importantes en el uso de PRF tales como el costo del “pegamento” epoxy, la no posibilidad de colocación en superficies húmedas y a bajas temperaturas, la falta de permeabilidad que puede ser dañina para la estructura de hormigón y la dificultad para realizar evaluación de posibles daños en los elementos de hormigón ocultos bajo una lámina de PFR. Para afrontar estos problemas, pueden ser utilizados morteros cementicios (Elsanadedy, Almusallam, Alsayed & Al-Salloum, 2013).

Shah y Ribakov (2011) demostraron que las propiedades mecánicas del hormigón de alta resistencia son mejoradas con el agregado de fibras en él. Las fibras son cortas para evitar problemas de trabajabilidad y una inadecuada distribución. El agregado de fibras de acero de alta resistencia al hormigón resulta en una mejor ductilidad y mayor capacidad de carga resistente, comparado con el



hormigón con fibras de acero de resistencia normal en ausencia de armadura principal de refuerzo (Holschemacher, Müller & Kieslich, 2014). El uso de una relación óptima resistencia/peso produce elementos con alta performance a flexión con un comportamiento elasto-plástico similar a los hormigones armados convencionales (Iskhakov, Ribakov, Holschemacher & Müller, 2014). De manera similar, el agregado de fibras a los hormigones livianos aumenta la capacidad de carga resistente y el control de fisuración (Mohammadi, Singh & Kaushik, 2008).

También las fibras aumentan la resistencia del hormigón a cargas dinámicas y de impacto, reducen el ancho de fisuración y aumentan la resistencia del hormigón en tracción. Sin embargo, el agregado de fibras influye negativamente sobre la trabajabilidad del hormigón (Ding, S. Liu, Zhang & Thomas, 2008). Akcay y Tasdemir (2012) usaron fibras de acero de resistencia normal y alta con 6 mm y 30 mm de longitud para estudiar el comportamiento de SCC reforzado con fibras. Concluyeron que el agregado de fibras influye en la trabajabilidad y que esta influencia depende más de la geometría de las mismas más que de su resistencia. Ha sido comprobado que el agregado de fibras de 20 mm de longitud al SCC reduce su trabajabilidad haciendo difícil el paso a través de la armadura tradicional (Khaloo, Raisi, Hosseini & Tahsiri, 2014). Liao, Chao, Park y Naaman (2013) usaron fibras de acero de extremos en gancho para producir hormigón autocompactado reforzado con fibras de alta performance con 600 mm de extensión de flujo (slump flow), rango de resistencia a la compresión entre 35-65 MPa y rango de tensión de tracción de 3.5-6.5 MPa.

Ma, Cui, Li y Hu (2013) reportaron un 19-42% de mejora en la resistencia a compresión de diferentes hormigones con el agregado de 0-2% de fibras cortas de 13 mm de longitud y relación de aspecto o esbeltez ( $l/d$ ) de 65. Resultados de estudios usando fibras de acero con longitudes en el rango de 22-44 mm indican que, la resistencia a la compresión no se ve afectada por el agregado de fibras, sin embargo el modo de fallo a compresión cambia de frágil a dúctil con los especímenes manteniendo su integridad hasta el final del ensayo (Olivito & Zuccarello, 2010). Algunos estudios recientes también informan una disminución en la resistencia a compresión del hormigón con el agregado de fibras. Khaloo et al.



(2014) obtuvieron un 18.6% y 7.5% de disminución en la resistencia a compresión de resistencias media y alta respectivamente con el agregado de 2% en fracción de volumen de fibras de acero. Una investigación llevada a cabo con el fin de estudiar las propiedades de hormigones de muy alta resistencia reforzados con fibras de polipropileno resistentes y micro fibras polivinílicas indicó una clara reducción de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad (Abu-Lebdeh, Fini & Lumpkin, 2012).

De acuerdo a una investigación realizada con SCC reforzado con fibras (Pajak & Ponikiewski, 2013) usando fibras de acero rectas 12.5 mm y de 30 mm con extremos conformados en gancho, se observó que el SCC se comporta en una forma similar que el hormigón convencional vibrado y muestra un incremento en la resistencia a la flexión con el aumento en el contenido de fibras. Olivitto y Zuccarello (2010) concluyeron que el agregado de fibras cortas produce un comportamiento de ablandamiento (softening), donde las deformaciones se localizan en una única fisura, mientras que con fibras largas, el hormigón exhibe un comportamiento de endurecimiento (hardening), dando lugar a un incremento de carga con fisuración múltiple. Hay un aumento en la resistencia a flexión del hormigón con aumento del contenido de fibras de acero con el máximo valor correspondiente a un contenido de 3.5% en volumen. Más allá de ese valor, un aumento en el contenido de fibras disminuye la resistencia a flexión (Vinayak & Mangulkar, 2013).

A los efectos de optimizar el uso de este nuevo material y su aplicación como material de refuerzo, resulta de fundamental importancia conocer y poder determinar las propiedades mecánicas que caracterizan al HLAARFA. Por otra parte, para aplicaciones prácticas, más estudios deberían llevarse a cabo para investigar el comportamiento mecánico de los elementos estructurales reforzados con este tipo de hormigones.

La tesis se enmarca en un proyecto de investigación que pretende investigar el uso estructural de este hormigón especial, con el empleo de materiales y sistemas de fabricación utilizados en nuestra región como una opción técnica y económicamente posible. Comprendiendo estudios a nivel material, el estudio de



dosificaciones de HLAARFA y caracterización del mismo; ensayos experimentales de modelos a escala y simulación numérica mediante análisis por elementos finitos. El trabajo numérico-experimental y las conclusiones desarrolladas pasarán a enriquecer la literatura existente en el tema en el ámbito científico. Así mismo la presente investigación abrirá nuevas alternativas tecnológicas en lo que hace al diseño de una técnica eficiente de evaluación, refuerzo y/o reparación de elementos estructurales requerida por diferentes causas.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de esta tesis será necesario un estudio teórico, experimental y numérico computacional.

En primer lugar se realizará una búsqueda bibliográfica para la recopilación de antecedentes sobre:

- Hormigones livianos de alta resistencia autocompactados reforzados con fibras de acero (HLAARFA).
- Comportamiento mecánico de HLAARFA como material de refuerzo en elementos estructurales.
- Modelos numéricos computacionales para evaluación de comportamiento de elementos estructurales sometidos a flexión.

Por otro lado, el desarrollo experimental comprende el estudio de materiales y la dosificación del hormigón, como también la dosificación óptima de fibras de acero y sus efectos en la resistencia a compresión, tracción, flexión, y comportamiento post-fisuración. Se trabajará con materiales locales y la realización de probetas se llevará a cabo en el Laboratorio de Tecnología del Hormigón (FRCon) y en el Laboratorio del CINTEMAC (FRC).

Las propiedades en estado fresco del hormigón de refuerzo que se estudiarán son la trabajabilidad (Ensayo de extendido o Slump Flow Test), determinación del peso de la unidad de volumen (IRAM 1562) y el contenido de aire (IRAM 1602). Mientras que los parámetros resistentes y de deformación estudiadas en estado endurecido serán resistencia a la compresión a 7, 28 y 56 días (IRAM 1546), la



resistencia a tracción por compresión diametral a 7 y 28 días (IRAM 1658), determinación del módulo de elasticidad estático (ASTM C 469-94) y resistencia flexional. Todos los ensayos se realizarán de acuerdo al Reglamento CIR-SOC 201-2005.

Para establecer las características estructurales debido al empleo de las fibras de acero se empleará el fib Model Code 2010 (MC2010), el cual propone un método de diseño que se basa en resistencias residuales post-fisura. En particular se consideran  $fR_1$  y  $fR_3$  parámetros de rendimiento, obtenidos en pruebas de flexión de tres puntos en prismas de dimensiones 150 mm x 150 mm x 600 mm, con entalla central y cargados al centro (EN 14651, 2005). Las vigas serán instrumentadas midiendo la flecha con relación al eje de la viga y en la parte inferior midiendo la apertura de fisura.

Complementariamente se desarrollarán ensayos de caracterización de las fibras de acero, determinación de orientación y cantidad (UNE-EN 14721:2006+A1) y extracción de las mismas (ensayos de "Pull Out"), cuyos resultados serán utilizados en las aplicaciones numéricas.

A partir de los resultados experimentales se elaborará una base de datos con valores de resistencias a compresión y tracción y resistencias residuales a tracción de los hormigones reforzados con fibras utilizados en la región, que amplíen el campo de conocimiento del comportamiento de este material.

En una etapa siguiente, para analizar la efectividad del refuerzo con HLAARFA se ensayarán series de 15 vigas de dimensiones de 150 mm x 175 mm x 1500 mm de hormigón convencional y armadura tradicional de barras longitudinales y estribos.

De cada serie de vigas, se tomarán tres de ellas como "vigas de referencia" y serán ensayadas a flexión en cuatro puntos simplemente apoyadas, sin refuerzos, con el fin de comprobar la forma de falla de las mismas. De las otras doce vigas, seis serán dañadas (prefisuradas) mediante el ensayo de flexión hasta alcanzar un ancho máximo de fisuración de 0.5 mm y luego descargadas. Luego serán aplicadas las capas de refuerzo de hormigón liviano autocompactado de alta resistencia



reforzado con fibras de acero en capas inferiores de 30 mm, 40 mm y 50 mm en cada serie respectivamente. Las otras 6 vigas serán reforzadas sin ser prefisuradas.

Posteriormente las 12 vigas reforzadas serán ensayadas a flexión. Se repetirá el procedimiento para la cuarta serie aunque en este caso el refuerzo será aplicado en forma de U en una capa de 30 mm. Para una mejor adherencia entre el hormigón de las vigas y el de refuerzo se realizará un cincelado manual sobre la superficie de las vigas, antes de la aplicación de las capas de refuerzo.

Con el fin de registrar curvas de carga-flecha en cada ensayo, se colocarán instrumentos de medición en cada lado de la viga para registrar las deflexiones verticales una vez aplicada la carga.

La simulación numérica, se realizará mediante la implementación computacional en un software de análisis por elementos finitos. Para modelar el hormigón reforzado con fibras se usará la teoría de mezcla modificada. Se considerará al material formado por una matriz de hormigón con fibras en tres direcciones ortogonales. Para el hormigón se utilizará un modelo de daño plástico modificado y para las fibras un modelo elastoplástico ortótropo con funciones de fluencia y endurecimiento que representan adecuadamente el comportamiento de las fibras cuando son arrancadas de la matriz. A los fines de obtener una mejor representación del ensayo real se realizarán simulaciones Monte Carlo considerando diferentes fuentes de incertidumbres en los parámetros (propiedades mecánicas del HLAARFA) y hacer luego estadísticas de los resultados obtenidos.

### **III. RESULTADOS**

Los resultados y/o avances alcanzados en la investigación son escasos debido a que durante el año 2018 se desarrolló la primera etapa que consistió en la revisión bibliográfica y la actualización del estado del arte respecto al empleo estructural de hormigones especiales. Así como el análisis de la normativa internacional y nacional vigente.



Actualmente se comenzó con la selección, estudio y ensayo de materiales locales, analizando disponibilidades y sus aptitudes para realizar las primeras pruebas de elaboración y caracterización del HLAARFA.

#### **IV. CONCLUSIONES**

En base a la temática del trabajo se espera lograr una contribución en los siguientes aspectos:

- Análisis de la efectividad del hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero como refuerzo en vigas sometidas a flexión, de forma tal de lograr bases para una mejor aplicación de las ventajas que ofrece este material compuesto recientemente desarrollado. Evaluación de su aplicación con el empleo de materiales y sistemas de fabricación utilizados en nuestra región como una opción técnica y económicamente posible.
- Realizar ensayos que muestren la eficiencia del sistema de refuerzo en lo que respecta al aumento o recuperación de la capacidad portante en vigas de hormigón. Describir y calibrar los modelos constitutivos para una simulación numérica y su correspondiente comparación con estos resultados experimentales.
- Obtener conclusiones que enriquezcan la bibliografía existente relacionada a la eficiencia de este sistema como técnica de reparación y refuerzo de vigas de hormigón armado convencional sometidas a flexión y desarrollar recomendaciones útiles para su diseño en nuestra región.
- Proponer herramientas y criterios de diseño que contribuyan al desarrollo de una normativa sobre el tema, planteando alternativas tecnológicas en el diseño de una técnica eficiente de evaluación, refuerzo y/o reparación de elementos estructurales.

#### **V. REFERENCIAS**

Abu-Lebdeh, T.M., Fini, E., Lumpkin, M. (2012). Flexural and tensile characteristics of micro fiber-reinforced very high strength concrete thin panels. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 5(2), 184–197.



ACI 237R-07. (2007). Self-Consolidating Concrete, American Concrete Institute 440R-07. Norms (p. 348).

Akçay, B., & Tasdemir, M. A. (2012). Mechanical behavior and fiber dispersion of hybrid steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28, 287–293.

Conforti, A., Zerbino, R., & Plizzari, G. A. (2019). Influence of steel, glass and polymer fibers on the cracking behavior of reinforced concrete beams under flexure. *Structural Concrete*, 20(1), 133–143.

Ding, Y., Liu, S., Zhang, Y., & Thomas, A. (2008). The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1462–1470.

Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A. (2013). Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar - Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40–55.

Holschemacher, K., Müller, T., Kieslich, H. (2014) Flexural behavior of high-strength concrete with combined steel fiber and bar reinforcement. *Proceedings of the International Seminar on Advanced Concrete Technology and its Applications*, 45–51.

Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., & Bier, T. A. (2015). Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC). *Construction and Building Materials*, 98, 325–333.

Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., Bier, T. A., & Shah, A. A. (2016). Strengthening of RC beams using steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC) and their strength predictions. *Materials and Design*, 100, 37–46.



Iskhakov, I., Ribakov, Y., Holschemacher, K., Müller, T. (2014) Experimental investigation of full scale two-layer reinforced concrete beams. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 21, 273–283.

Khaloo, A., Raisi, E. M., Hosseini, P., & Tahsiri, H. (2014). Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 51, 179–186.

Liao, W.C., Chao, S.H., Park, S.Y., Naaman, A.E. (2013) Self-consolidating high performance fiber reinforced concrete: SCHPFRC. Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5) 293–302.

Ma, H. L., Cui, C., Li, X., & Hu, S. L. (2013). Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell-aggregate concrete. *Materials and Design*, 52, 565–571.

Mohammadi, Y., Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2008). Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials*, 22(5), 956–965.

Nishino, M., & Aoki, T. (2006). Nonlinear analysis and damage monitoring of a one-sided patch repair with delamination. *Composite Structures*, 73(4), 423–431.

Olivito, R. S., & Zuccarello, F. A. (2010). An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 41(3), 246–255.

Pająk, M., & Ponikiewski, T. (2013). Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials* 47, 397–408.

Shah, A.A., Ribakov, Y. (2011). Recent trends in steel fibered high-strength concrete. *Materials and Design*. 32, 4122–4151.



Vinayak, B.J., Mangulkar, M.N. (2013) Flexural behavior of self-compacting high strength fiber reinforced concrete (SCHSFRC). *Int. J. Eng. Res. Appl. (IJERA)* 3 (4), 2503–2505.



# Modelo numérico para el hormigón reforzado con fibras híbridas: Aplicación a un caso de estudio

**Doctorando:** *Miqueas Ceferino Denardi*  
GIMCE (UTN – FRCU) – GEHE (UTN – FRCO)

**Director:** *Dr. Mario Raúl Escalante*

**Codirector:** *Dra. Viviana Carolina Rougier*

**RESUMEN:** El estudio de nuevos materiales para uso estructural con propiedades significativamente superiores a los materiales tradicionales ha sido desde siempre objeto de investigaciones científicas. Es así que materiales tradicionales han sido reemplazados por otros tales como los compuestos, inteligentes y biodegradables. En este contexto, este trabajo presenta un aporte al estudio del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) aplicado a vigas de gran altura (VGA). Investigaciones en las últimas décadas han mostrado que el uso de hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) e híbridas (HRFH) en dichos elementos estructurales ayuda a un mayor control de fisuración, mejora la tenacidad y el comportamiento a tracción. Si bien existen numerosas publicaciones dedicadas al estudio del comportamiento de este elemento estructural, son escasas las investigaciones donde se evalúa el comportamiento de vigas de VGA de HRFA y HRFH. En relación a esto último, la información existente es limitada y en general está basada en trabajos experimentales. En este trabajo se presenta un estudio numérico de la capacidad resistente de vigas de gran altura de HRF en el que se evaluó la contribución en resistencia y ductilidad de las fibras en comportamiento a corte. Para ello se implementó un modelo numérico del ensayo a flexión en 3 puntos de VGA en un software de análisis por elementos finitos en el cual el HRF se



modeló como un material compuesto homogéneo. Finalmente, se muestran y comparan los resultados numéricos y experimentales en términos de cargas últimas a través de tablas.

**Palabras clave:** Hormigón reforzado con fibras, vigas de gran altura, comportamiento a corte.

## I. INTRODUCCIÓN

Las vigas de gran altura (VGA) tienen numerosas aplicaciones en edificios y otras estructuras. En aquellas VGA con carga puntual en el centro de la luz, debido a la pequeña relación entre la luz de corte (distancia desde el punto de aplicación de la carga al centro del apoyo, en elementos simplemente apoyados) y la altura útil, una gran proporción de la carga que soporta este tipo de vigas es transmitida directamente a los apoyos. Por ello, la falla es causada generalmente por corte. En la zona entre los apoyos y el punto de aplicación de la carga puede ocurrir la falla del hormigón por compresión (Ahmad, Shah, Zaman, & Salimullah, 2011). La incorporación de fibras de acero o mezcla de éstas y fibras de polipropileno (híbridas), según Caggiano et al. (2016), mejora el comportamiento a tracción del hormigón. De este modo, el uso de dichas fibras, en reemplazo total o parcial de la armadura convencional de estribos, resulta de gran interés particularmente en el caso de VGA, donde suelen existir grandes congestionamientos de armaduras. Smarzewski, (2018), Naik & Kute, (2017), Sahoo, Flores, & Chao, (2012) y Moradi & Reza Esfahani, (2017), demostraron que el uso de hormigón reforzado con fibras de acero e híbridas mejoró significativamente el comportamiento de VGA con aberturas, proporcionando un incremento en la capacidad de carga y la ductilidad.

Si bien los datos experimentales son valiosos, los ensayos resultan costosos e insumen mucho tiempo. Por ello, para el diseño de las VGA de HRFA y HRFH, se necesitan también soluciones numéricas y analíticas que permitan obtener una mejor comprensión y predicción del comportamiento y mecanismos de fallas. Para VGA de hormigón armado existe una metodología de análisis denominada “método puntal-tensor”, adoptada por diferentes códigos (CIRSOC 201-05, ACI 318) que permite representar su comportamiento con un aceptable grado de aproximación.



El método puntal- tensor, idealiza los campos tensionales (isostáticas de compresión y tracción), mediante un conjunto de bielas comprimidas de hormigón y tirantes traccionados de acero (Orler & Donini, 2008). El método es rápido y económico, pero requiere experiencia previa para la adopción del modelo gráfico del reticulado. Una herramienta alternativa de mayor exactitud es el método de elementos finitos (MEF) que permite predecir la respuesta de estructuras de hormigón armado, de HRFA y HRFH.

En este trabajo se presenta un estudio numérico de la capacidad de carga de VGA de HRFA, mediante la simulación del ensayo a flexión de 3 puntos que es implementado en un software de análisis por elementos finitos y en el cual el material HRFA se considera como material homogéneo equivalente.

Los resultados hallados se muestran a través de tablas y se comparan con otros obtenidos experimentalmente.

## II. MODELO NUMÉRICO

A fin de predecir numéricamente la carga última de VGA de HA y HRFA se simula el ensayo de flexión de la VGA mediante un modelo tridimensional de la VGA en el que se evaluó su comportamiento mecánico. Dicho modelo es computacionalmente implementado en un software de análisis por elementos finitos ABAQUS<sup>®</sup>. En la sección siguiente se describe el modelo constitutivo adoptado para el hormigón.

### *A.a. Modelo constitutivo del hormigón.*

En este trabajo tanto el hormigón simple como el HRFA se modelaron como material homogéneo. Se adoptó el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) para representar el comportamiento del hormigón. Este modelo supone que los principales mecanismos de falla del hormigón son fisuración por tracción y aplastamiento por compresión. Así, el modelo considera diferentes comportamientos bajo estas dos sollicitaciones. Bajo tracción uniaxial la respuesta tensión-deformación es lineal elástica hasta que se alcanza el valor de tensión de falla. Más allá de la tensión de falla la formación de micro-fisuras es representada



macroscópicamente con una curva de ablandamiento tensión-deformación. Por otro lado, bajo compresión uniaxial la respuesta es lineal hasta el valor de fluencia inicial. En el régimen plástico, la respuesta es típicamente caracterizada por el endurecimiento seguido por un ablandamiento de deformaciones más allá de la tensión última. Las Fig. 6 y 7 muestran respectivamente la respuesta típica del hormigón bajo tracción y compresión uniaxiales de acuerdo al modelo CDP.

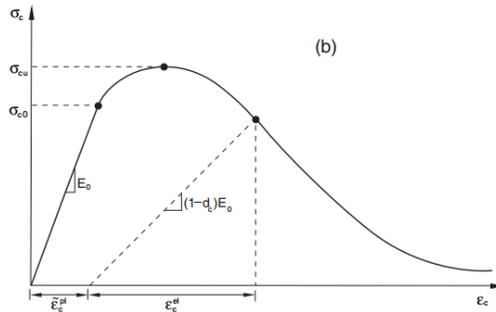


Fig. 6: Esquema respuesta a compresión uniaxial.

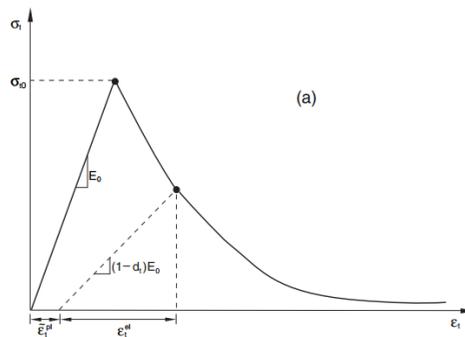


Fig. 7: Esquema respuesta a tracción uniaxial.

Esta representación captura las principales características de la respuesta mecánica del hormigón. El modelo requiere los siguientes parámetros de plasticidad: ángulo de dilatación:  $36.31^\circ$ , viscosidad: 0, excentricidad: 0.1,  $\sigma_{c0}/\sigma_{b0}$ : 1.16,  $K_c$ : 0.67.



### A.b. Comportamiento uniaxial a compresión y tracción

Para representar el comportamiento uniaxial a compresión del hormigón simple, se define su comportamiento pre y post pico de tensión, usando el modelo para hormigón no confinado del código modelo CEB-FIB 2010. El comportamiento a compresión uniaxial en el modelo CDP de ABAQUS<sup>®</sup> se definió a través de la relación tensión versus deformación inelástica que se muestra en la Fig. 8.

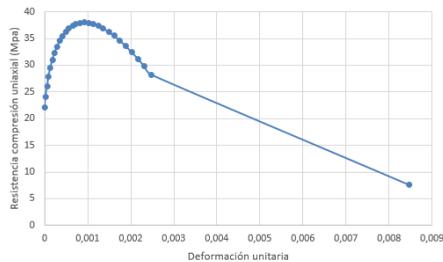


Fig. 8: Curva tensión de compresión uniaxial vs. deformación utilizada en modelo CDP para hormigón simple.

El comportamiento a tracción del hormigón simple se reprodujo de acuerdo al CEB-FIB 2010. En la Fig. 9 se muestra la curva tensión-apertura de fisura utilizada.

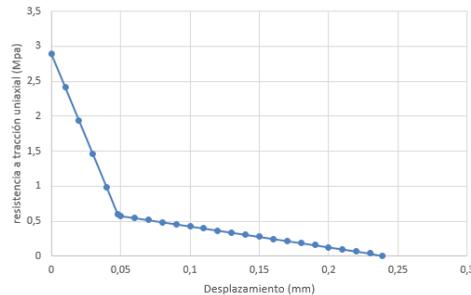


Fig. 9: Curva tensión-apertura de fisura del hormigón simple.

Con respecto al HRFA, para definir su comportamiento a compresión, se utilizó un modelo propuesto por Barros & Figueiras (1999). La Fig. 10 muestra las curvas tensión-deformación utilizadas en el modelo CDP.

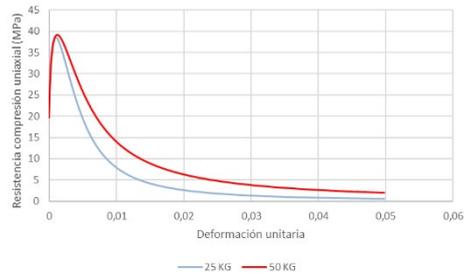


Fig. 10: Curvas tensión-deformación a compresión del HFRA.

Para modelar el comportamiento a tracción del HRFA se adoptó una metodología desarrollada por Amin, Foster, & Muttoni, (2015). En la Fig. 11 se muestran las curvas tensión-deformación a tracción utilizadas en el modelo de HRFA.

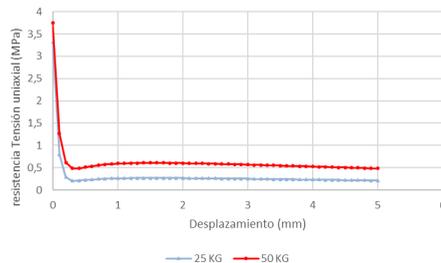


Fig. 11: Curvas tensión-deformación a tracción del HRFA.

### B. Ensayo de flexión

El modelo de ensayo a flexión consiste en una placa de carga de acero superior, dos placas de apoyo inferiores de acero y la VGA. (Ver Fig. 12)

Teniendo en cuenta la concentración de tensiones que se produce en el soporte y en el punto de carga, se adhirieron al modelo de elementos finitos placas de acero. La carga es aplicada como un desplazamiento vertical controlado en la placa superior. Los soportes son considerados como fijo y móvil respectivamente, como



en el ensayo, la VGA se encuentra simplemente apoyada. La interacción entre la VGA, la placa de carga y los apoyos se modeló como "standard general contact".

En relación a la malla de elementos finitos, se adoptó el elemento brick lineal de 8 nodos para el hormigón y placas de acero (C3D8R). Además, para las barras de refuerzo de acero se utilizaron elementos truss lineal de 2 nodos (T3D2). La armadura de acero se considera totalmente embebida en el hormigón teniendo en cuenta la interacción entre estos dos materiales. En la Fig. 12 se muestra un esquema de la malla de elementos finitos utilizada.

Las densidades del hormigón y del acero también fueron definidas ya que el problema se resolvió a través de un análisis dinámico (cuasistático). Se aplicó la carga en un período de 600 segundos. Además, se adoptó un número máximo de 400 incrementos y un tamaño mínimo de incremento de 0.003.

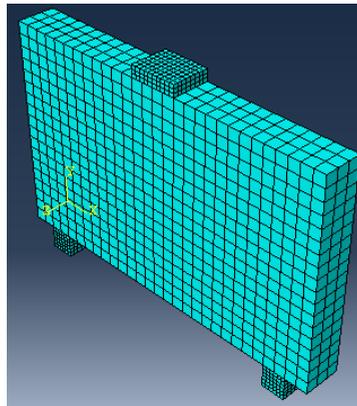


Fig. 12: Malla de elementos finitos.

### III. RESULTADOS

Se simuló el ensayo a flexión de VGA prismáticas con una sección rectangular de 450 mm de alto y 8 mm de ancho, con 730 mm de longitud total y 480 mm de luz libre entre apoyos.

Se analizaron tres casos: (a) VGA de hormigón simple (HA) con armadura a flexión (V1), (b) VGA de hormigón simple (HA) con armadura a flexión y corte (V2); y (c) VGA de HRFA con armadura a flexión. Los detalles geométricos y de armaduras se muestran en las Fig. 13 y 14.

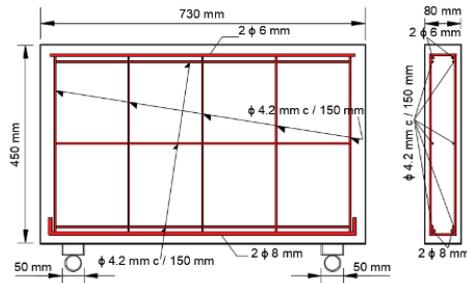


Fig. 13: Dimensiones geométricas y detalle de armadura de VGA de hormigón simple.

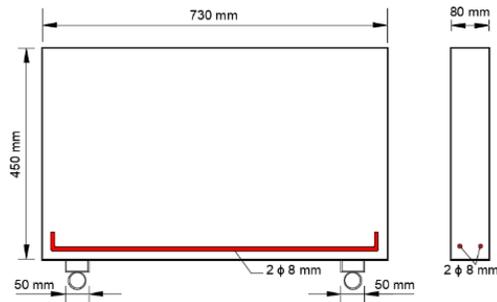


Fig. 14: Dimensiones geométricas y detalle de armadura a flexión de VGA de HA y HRFA.

En la tabla 1 se muestran los valores de carga máxima obtenidos para los distintos especímenes simulados, conjuntamente con los valores experimentales promedio y el error relativo a los efectos de validación del modelo. Se observa que los resultados numéricos aproximan razonablemente los valores de  $P_{max}$  obtenidos experimentalmente.



TABLA 1: VALORES EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS DE CARGA ÚLTIMA ( $P_{MAX}$ )

<b>Viga</b>	<b><math>P_{max}Experim. (kN)</math></b>	<b><math>P_{max}Num.(kN)</math></b>	<b>Error Rel.(%)</b>
V1	124	151.1	18
V2	222	214.4	3.5
V325 y V525	178.46	198	11
V450 y V650	209.49	212.7	1.6

#### IV. CONCLUSIONES

Se presentó un estudio numérico de la capacidad resistente de VGA de HA y HRFA, mediante la simulación numérica del ensayo a flexión de 3 puntos, mediante un modelo 3D implementado en un software de elementos finitos, en el cual el hormigón simple y HRFA se consideró homogéneo. El modelo con material homogéneo tiene como desventaja, entre otras, la incapacidad de considerar el fenómeno de pull-out de las fibras y el efecto de la orientación y distribución de las mismas en la masa de hormigón.

Las VGA de HRFA tuvieron un comportamiento satisfactorio, en cuanto a ductilidad y resistencia, en comparación con el espécimen de hormigón armado con armadura de estribos convencional. Dependiendo del volumen de fibras de acero incorporado al hormigón, alcanzaron valores de carga máxima entre 38% y 69% mayores al valor obtenido para el caso de VGA sin armadura de estribos (V1).

El análisis de elementos finitos no lineal pudo predecir razonablemente el valor de carga máxima de todas las VGA de HRFA, con diferencias de entre el 1.6 % y el 18 %.

Actualmente, se está implementando un modelo no homogéneo que considera el hormigón por un lado y las fibras por otro. Además, se está desarrollando una campaña experimental que permita validar los resultados numéricos que se obtengan.



## V. REFERENCIAS

Ahmad, S., Shah, A., Zaman, N., & Salimullah, K., (2011). Design and evaluation of the shear strength of deep beams by strut and tie model (stm). *Transactions of Civil and Environmental Engineering*, vol. 35, pp. 1–13.

Caggiano, A., Gambarelli, S., Martinelli, E., Nistico, N., & Pepe, M., (2016). Experimental characterization of the post-cracking response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*.

Smarzewski, P., (2018). Analysis of failure mechanics in hybrid fibre-reinforced high-performance concrete deep beams with and without openings. *Materials*.

Naik, U. & Kute, S., (2017). Use of steel fibers as shear reinforcement for deep beams in shear- an experimental study. *International Journal of Engineering Science and Computing*, pp. 13748–13750.

Sahoo, D., Flores, C., & Chao, S., (2012). Behavior of steel fiber-reinforced concrete Deep beams with large opening. *ACI Struct. J.*, vol. 109, pp. 193–204.

Moradi, M. and Reza Esfahani, M., (2017). Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams. *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 423–437

Orler, R. & Donini, H., (2008). *DISEÑO BÁSICO DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL (Según CIRSOC 201/05)*. Editorial Científica Universitaria.

CEB-FIB (2010), The fib Model Code for Concrete Structures 2010. *CH-1015 Lausanne, Switzerland*.

Barros, J. & Figuerias, J., (1999). Flexural behavior of sfrc: Testing and modeling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 331–339.

Amin A. Foster S. & Muttoni, A., (2015). Derivation of the  $\sigma - w$  relationship for sfrc from prism bending tests. *Structural Concrete*.



# Modelos Numéricos en GPGPU para el Tratamiento de Fondos Móviles Erosionables

**Doctorando:** *Lucas C. Bessone Martínez*

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia, Argentina  
(lbessone@frcon.utn.edu.ar)

**Director:** *Mario Storti*

Centro de Investigación de Métodos Computacionales, Predio CONICET, Santa Fe,  
Argentina (mario.storti@gmail.com)

**Codirector:** *Pablo Gamazo*

Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República, Uruguay  
(gamazo@unorte.edu.uy)

**RESUMEN:** En este trabajo se emplean algoritmos y simulaciones numéricas de flujos fluidos tridimensionales acoplados con el transporte de sedimentos para reproducir los procesos de transporte de sedimentos actuales. Se implementa un resolutor para las ecuaciones de NS (Navier Stokes) en dominios con fondos móviles. Se utiliza el algoritmo SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) para resolver el acoplamiento presión-velocidad en el fluido incompresible. El cambio en la morfología del lecho de sedimentos se modela usando la ecuación de Exner, la cual se discretiza y acopla con el modelo discreto del fluido. Para el transporte de sedimentos se considera las modalidades de gasto sólido de fondo y el gasto sólido en suspensión. La implementación se realiza usando técnicas de cálculo en paralelo en unidades de procesamiento gráfico para propósitos generales (GPGPU).

**Palabras clave:** GPGPU, Flujos Incompresibles, Volúmenes Finitos, Navier Stokes.



## I. INTRODUCCIÓN

La descripción matemática del modo en cómo se transportan las partículas sólidas en una corriente líquida es sumamente compleja. El transporte sólido en los ríos es de difícil determinación porque se tiene gran variabilidad en los fenómenos tanto en el espacio como en el tiempo, un elevado número de variables intervinientes y dificultad de comprobar en la naturaleza los resultados que se obtienen. Entre los problemas vinculados al transporte de sedimentos para la navegación fluvial. Los daños vinculados a estos casos, se pueden reducir en la medida que se pueda predecir el transporte sólido. Debido al complejo carácter tridimensional del fenómeno de erosión localizada y las formas en el fono del lecho del río, es necesario el uso de modelos de flujo que sean tridimensionales.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el paso de los años los cambios en hardware han permitido el desarrollo de modelos con mayor resolución y complejidad. En la última década las GPUs han surgido como una alternativa para computación de propósito general y su uso para cálculo científico ha ido aumentando (Che et al, 2008; Ujaldón, 2016). Las arquitecturas GPU se caracterizan por la abundante capacidad de cómputo en relación al ancho de banda de memoria (Loppi et al, 2018). Esto las hace muy buenas para resolver discretizaciones temporalmente explícitas y espacialmente compactas. Por otro lado, se deben tener en cuenta los aspectos del modelo de programación CUDA (Computed Unified Device Architecture) (Lindholm et al., 2008), en los métodos utilizados para resolver las ecuaciones discretizadas.

### A. Estudio de solvers para flujos incompresibles en GPGPU

Comenzando con la ecuación de Advección-Difusión lineal, se implementa un resolvidor en GPU del tipo temporal explícito y otro implícito, usando FVM en grillas cartesianas uniformes guardando las variables en forma colocada. Se utilizan diferencias centradas para el término difusivo y un esquema upwind para la advección, Para evaluar el desempeño en GPU para resolver sistemas no lineales (como es el caso de NS), se resuelve una ecuación de difusión no lineal, usando esquemas temporales explícitos e implícitos. Finalmente se implementa la solución



para el sistema NS buscando que el código sea principalmente basado en GPU, evitando la copia de datos desde la CPU. Para la solución de los sistemas lineales que surgen de los esquemas implícitos, se utilizarán los métodos de Gradientes Conjugados (CG) para los sistemas simétricos y Gradientes Biconjugados Estabilizado (BICGSTAB) para los sistemas no simétricos.

#### *B. Estudio del tratamiento de obstáculos sólidos usando enfoques del tipo IBM*

Para mantenerse alineado con el modelo de programación CUDA se deben usar grillas eulerianas estructuradas con el fin de evitar las lecturas de una tabla de conectividades. Por tal motivo se implementa un método tipo IBM (Immersed Boundary Method) siguiendo un enfoque de forzamiento directo, que permite lograr una precisión de segundo orden en un esquema relativamente compacto (Fadlun et al., 2000; Mittal y Iaccarino, 2005; Costarelli et al., 2016).

#### *C. Revisión de los modelos de esfuerzo de corte y modelos de transporte sólido mediante carga de fondo y suspensión.*

Se implementa un modelo para el transporte de sedimentos por carga de fondo y el modelo de advección difusión para el transporte en suspensión. Adicionalmente debe tenerse en cuenta el intercambio entre la carga de fondo con la carga en suspensión, para esto debe agregarse un término fuente y sumidero en la ecuación de Exner y en la ecuación de advección difusión que contemple el sedimento del fondo que pasa a carga en suspensión y el que deposita haciendo cambiar el nivel de fondo y que eventualmente formara parte del transporte por carga de fondo.

#### *D. Tratamiento de la evolución de la superficie del lecho, métodos tipo level set combinados con IBM, solución de la ecuación e Exner.*

La evolución de la frontera inferior del dominio se determinará a partir de la solución de la ecuación de Exner (Exner, 1925), agregando los términos fuente y sumidero que permiten conectar la evolución de la superficie del lecho con lo que se transporta como carga en suspensión (Felippa et al., 2001; Khosronejad et al., 2011). La estrategia que se seguirá es la de mantener una malla fija del dominio total, la función altura del lecho  $\beta(x,y)$  identifica los puntos  $(x,y,\beta)$ , lo que permite calcular una función curva de nivel (LS, Level Set) como la distancia entre los puntos



del dominio y los ubicados en la superficie. Se busca implementar una paralelización eficiente para lo cual se aproxima la función LS a partir de una estimación inicial dada por  $\beta$ . Luego se puede aplicar correctamente la condición de borde en el fondo usando el enfoque tipo IBM.

### III. RESULTADOS

#### A. Ecuación de advección difusión

Se resolvió la ecuación de advección difusión lineal, ecuación (1), donde se observó que el mejor desempeño se obtiene al usar un algoritmo explícito. En la figura 1 se muestra el resultado de la simulación para el transporte de un pulso de concentración y en la figura 2 se muestra el tiempo de cómputo versus el error comparando con una solución analítica, puede verse que el algoritmo explícito es más eficiente en una relación de 10:1 con el algoritmo implícito.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla \phi) - \nabla(v \phi) \quad (1)$$

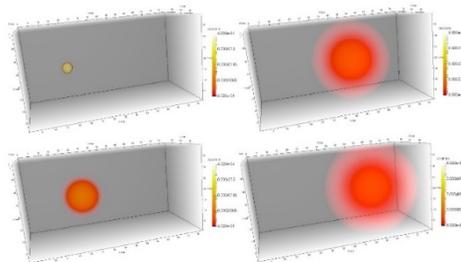


Fig. 1: Solución numérica de la ecuación de advección difusión lineal.

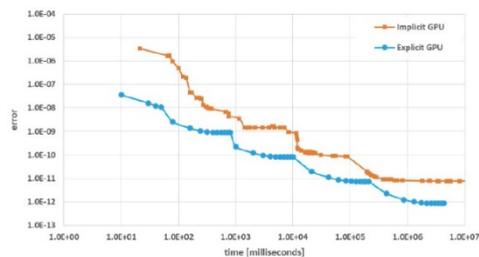


Fig. 2: Tiempo de simulación versus error para un algoritmo explícito y uno implícito.

### B. Ecuación de difusión no lineal

Se modeló una ecuación de difusión no lineal en GPU, donde el coeficiente de difusión depende de la propia variable transportada:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D(\phi)\nabla\phi) + f \quad (2)$$

Se comparó el desempeño considerando el rendimiento alcanzable para cada algoritmo (explícito e implícito) en términos del ancho de banda máximo de la memoria de la GPU y el pico de rendimiento en coma flotante. Se pudo resolver el problema en dominios computacionales de hasta 724 millones y 514 millones de celdas para el método explícito e implícito respectivamente. En la figura 3 se muestra la solución numérica para la ecuación (2). En la figura 4 y 5 puede observarse que a pesar del alto rendimiento obtenido en el caso explícito, debido a la no linealidad del problema los tiempos computacionales fueron mejor para el algoritmo implícito alcanzando una relación de 1 a 10 en la medición de tiempos para las mallas más finas

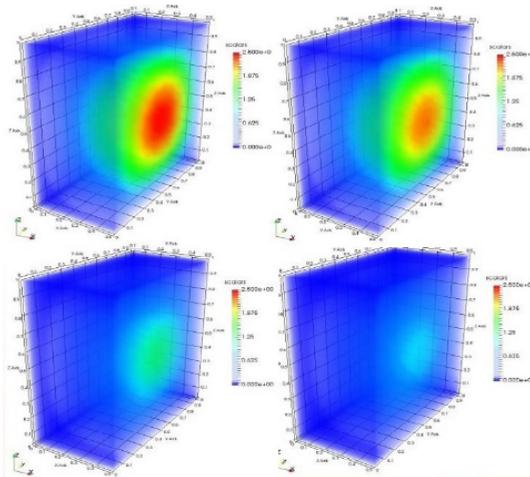


Fig. 3: Solución numérica de la ecuación de difusión no lineal.

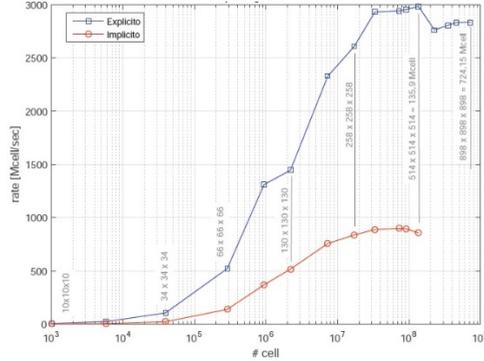


Fig. 4: Eficiencia de los dos algoritmos en base a la tasa de procesamiento.

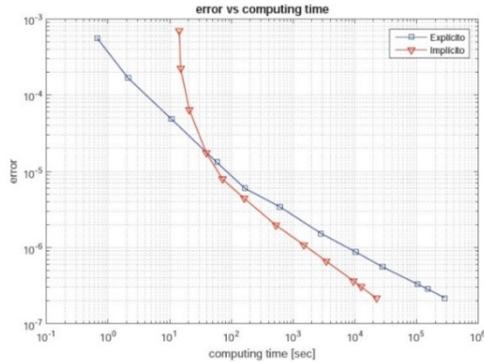


Fig. 5: Comparación del error obtenido para diferentes tiempos de cálculo en el método explícito e implícito.

### C. Ecuaciones de Navier Stokes, métodos IBM

Se resolvieron las ecuaciones de Navier Stokes en 2D en estado utilizando el algoritmo SIMPLE:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + f \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

Al tratarse de un método segregado permitió obtener una muy buena performance en este sistema no lineal, similar a lo que sucede con la ecuación de difusión no lineal. Por otra parte, el método de fronteras embebidas (IBM) consiste



en imponer las condiciones de contorno para la velocidad en las fronteras complejas incorporando una fuerza de cuerpo aplicada en los nodos del borde del sólido, como los indicados en la figura 6. Esto evita la compleja tarea de construir una nueva malla al incorporar geometrías complejas en el dominio así como facilitar el tratamiento para casos de fronteras móviles.

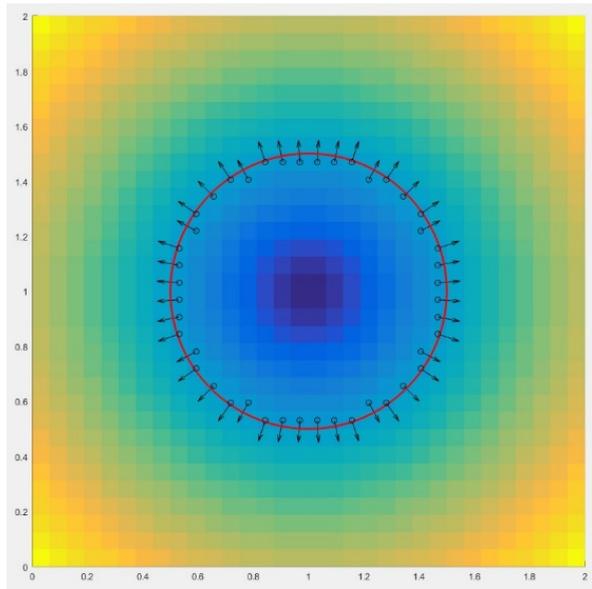


Fig. 6: Nodos donde se aplican fuerzas de cuerpo en el método IBM.

El algoritmo IBM de forzamiento directo es adecuado para el cómputo en GPU debido a que mantiene un stencil compacto, al tiempo que permite el uso de mallas cartesianas fijas. En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos para el caso de flujo alrededor de un cilindro.

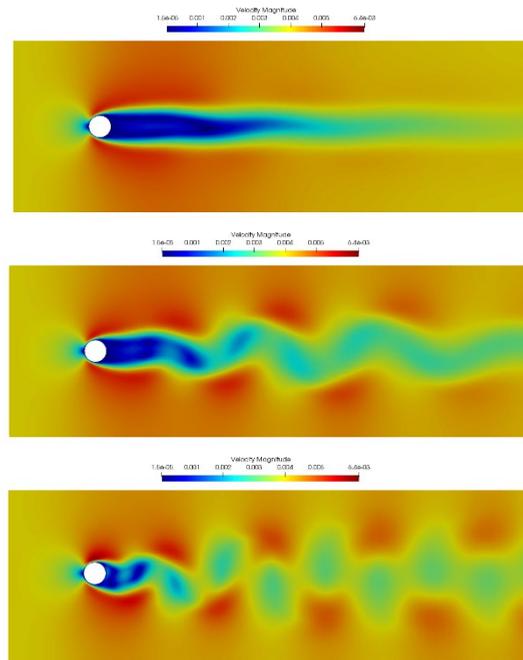


Fig. 7: Campo de velocidades para el flujo alrededor de un cilindro.

#### D. Ecuación de Exner

La ecuación de Exner describe la evolución temporal de la frontera inferior del dominio:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\nabla \cdot q_s(\tau(\mathbf{u})) + Q_b - S_b \quad (5)$$

La ecuación diferencial describe el transporte del escalar  $h(x,y)$  a partir del cual puede determinarse la frontera donde aplicar la condición de borde usando métodos del tipo IBM.

El gasto sólido  $q_s$  se determina a partir de fórmulas estándar empíricas para la carga de sedimentos en el fondo que son función del esfuerzo de corte en el lecho (Meyer-Peter y Muller, 1948; Wong y Parker, 2006). De manera acoplada, debe resolverse una ecuación de advección-difusión que permite conocer la concentración de sedimento que se encuentra en suspensión:



$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c + w_g \frac{\partial c}{\partial y} = k \nabla^2 c \quad (6)$$

A partir de la concentración en suspensión se determina el término fuente  $Q_b$  y a partir del esfuerzo de corte se calcula el término sumidero  $S_b$ :

$$S_b = 2.2 \times 10^{-3} (\tau - \tau_c) \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_f) g d} \quad (7)$$

$$Q_b = \max (c(x, t) - c_{ref}, 0) \quad (8)$$

Ambos términos permiten simular el intercambio entre la carga de sedimento de fondo y el que está en suspensión.

#### IV. CONCLUSIONES

Se implementaron algoritmos eficientes en GPU para resolver diferentes ecuaciones diferenciales en dominios bi y tridimensionales de acuerdo a las características específicas del hardware. Los resultados muestran que los algoritmos pueden explotar al máximo las capacidades de la GPU, logrando simular problemas con muy alta resolución. Los resultados obtenidos hasta el momento hacen ver que los solvers implementados pueden resolver los problemas de hidráulica fluvial propuestos. Cabe mencionar que se resuelven los problemas en una sola unidad GPU en mucho menos tiempo del que lleva el cómputo en un clúster, lo que redundaría en un ahorro en el tiempo de respuesta para problemas de ingeniería y la economía si comparamos los costos de una placa GPU con un clúster de cómputo.

#### AGRADECIMIENTOS

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia (“Becas de formación de doctores para fortalecer las áreas de I+D+i”, Res. 1460/15)

Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República.



## V. REFERENCIAS

Che S., Boyer M., Meng J., Tarjan D., Sheaffer J. W., y Skadron K. *A performance study of general purpose applications on graphics processors using cuda*. *Journal of parallel and distributed computing*, 68(10):1370-1380,2008.

Costarelli S. D., Garelli L., Cruchaga M.A., Storti M.A., Ausensi R., y idelson S.R. An embedded strategy for the analysis of fluid structure interaction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 300:106-128,2016.

Exner F. M. Uber die wechselwirkung zwischen wasser und geschiebe in flussen. *Akad. Wiss. Wien Math. Naturwiss. Klasse*, 134(2<sup>a</sup>):165-204,1925.

Fadlun E., Verizcco R., Orlandi P., y Mohd-Yusof J. Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations. *Journal of computational physics*, 161(1):35-60, 2000.

Felippa C.A., Park K., y Farhat C. Partitioned analysis of coupled mechanical systems. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190(24-25):3247-3270,2001.

Khosronejad A., Kang S., Borazjani I., y Sotiropoulos F. Curvilinear immersed boundary method for simulating coupled flow and bed morphodynamic interactions due to sediment transport phenomena. *Advances in wáter resources*, 34(7):829-843, 2011.

Lindholm E., Nickolls J., Oberman S., y Montrym J. Nvidia tesla: A unified graphics and computing architecture. *IEEE Micro*, 28(2):39-55,2008. ISSN 0272-1732.

Loppi N., Withereden F., Jameson A., y Vincent P. A high-order cross-platform incompressible Navier-Stokes solver via artificial compressibility with application to a turbulent jet. *Computer Physics Communications*, 233:193-205,2018. ISSN 0010-4655.

Meyer-Peter E. y Muller R. Formulas for bed-load transport. En *IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2*. IAHR, 1948.

Mittal R. y Iaccarino G. Immersed boundary methods. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 37:239-261, 2005.

Ujaldón M. Cuda achievements and gpu challenges ahead. En *International Conference on Articulated Motion and Deformable Objects*, páginas 207-217. Springer, 2016.



Wong M. y Parker G. Reanalysis and correction of bed-load relation of meyer-peter and muller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11):1159-1168, 2006.



# Modelo de Distribución Resistivo del Subsuelo y sus Aplicaciones en Ingeniería Geológica, Cuenca del Arroyo Palmar, Entre Ríos

**Doctorando:** *Mario Rafael Hernán Chury*  
*Universidad Tecnológica Nacional Regional Concordia (FRCON), Entre Ríos.*  
*mrhchury@frcon.utn.edu.ar*

**Director:** *Ángel Adrián Silva Busso*

**Codirector:** *Gerardo A. Riccardi*

**RESUMEN:** Este estudio es una primera aproximación de la relación entre la resistividad del subsuelo y sus características geomecánicas. En principio, se busca correlacionar el número de golpes y la humedad con la resistividad. En coincidencia con otros autores, se entiende que la medición de la resistividad de subsuelo es un método accesible para ser empleado con este fin y generar un modelo de correlación entre las propiedades geoelectricas del subsuelo y sus características geomecánicas. Para llevarlo a cabo, considerando que la comparación de resultados puede resultar compleja en principio, se ha elegido una unidad geológica en particular la denominada F. Ubajay, para tener características más homogéneas para realizar el estudio. Se encontraron correlaciones locales muy favorables entre el número de golpes y la resistividad ( $r^2 = 0.66 - 0.98$ ) a partir de curvas de regresión sencillas. Sin embargo, de forma regional los valores de correlación son bajos ( $r^2 = 0.11 - 0.17$ ) y la dispersión es grande. De forma que no se ha encontrado un mecanismo de correlación aplicable a todos en su conjunto, pero si en cada sondeo en particular, aspecto no mencionado en la escasa bibliografía disponible.

**Palabras clave:** Resistividad eléctrica; Geoelectrica; Geomecánica; Correlación.



## I. INTRODUCCIÓN

La realización de importantes obras de estructuras en ingeniería civil, requieren esencialmente la determinación precisa de las propiedades mecánicas del suelo para su correcta fundación. Por ello los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como su origen geológico, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga y otras. Estos estudios requieren que se lleven a cabo ensayos tanto in situ como en laboratorio a través de muestras extraídas del lugar.

Debido a que las propiedades del suelo están sujetas a una variación espacial y temporal; por medio de los métodos convencionales, la cantidad de puntos evaluados están limitados. Estos métodos además son invasivos, costosos y consumen un tiempo considerable.

Por ello determinar la relación entre una propiedad indirecta del subsuelo y relacionarla con el dato que se necesita conocer puede proporcionar un método económico, no invasivo y rápido que, debidamente parametrizado, ofrece ventajas sobre los métodos tradicionales. El problema surge en que la medición sobre el subsuelo de la resistividad con el fin de obtener algunos de sus parámetros geomecánicos es un campo de investigación poco estudiado y la bibliografía aporta pocos trabajos al respecto entre ellos los de Cosenza *et al.* (2006), Fahad *et al.* (2012) y Kowalczyk *et al.* (2014) y Filho *et al.*, (2017). Este estudio no trata sobre la aplicación convencional de los métodos geoelectrónicos en el sentido de interpretar capas resistivas correlacionables con la geología o hidrogeología local, sino que su objetivo principal es comenzar a estudiar las relaciones entre la resistividad del subsuelo y los parámetros geomecánicos de los mismos, aprovechando la experiencia lograda por los otros autores mencionados (op.cit.).

Una observación crítica de los estudios mencionados es la falta de datos sobre la geología, o al menos la litología, en las determinaciones realizadas. Además, algunos de ellos fueron hechos en laboratorio con material seleccionado que no responde a las condiciones naturales de ningún terreno en particular. Por lo tanto, se procedió en principio, a establecer un conjunto de premisas que especificaran



mejor el objeto de estudio. Las mismas pueden resumirse según; (1) Definir claramente el contexto geológico la formación, facie o unidad geológica que se considerará en el estudio y tomarlo como heterogéneo; (2) Usar datos de la litología a partir de las muestras de perforación proveniente de los SPT (Standard Penetration Test); (3) Realizar sondeos eléctricos verticales 1D (SEV) con mediciones in situ y no en condiciones de laboratorio; (4) Hacer los SEV de forma paramétrica, es decir en el mismo sitio en que se tomaron las muestras; (5) Interpretar las capas resistivas en clara coincidencia con los cambios litológicos en las perforaciones y (6) Tener presente que la medida de resistividad verdadera no es una media directa sino que es un dato resultante de una interpretación que se corresponde a un modelo conceptual.

Considerando estas premisas se eligió la Fm. Ubajay como objeto de estudio, en parte por sus características litológicas y en parte porque suele ser el sustrato fundacional de las obras civiles viales en el área de estudio.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Área de estudio

Este trabajo comprende una región ubicada en la zona oriental de la provincia de Entre Ríos, de norte a sur entre las localidades de Ayuí-Concordia-Puerto Yerúá y de este a oeste entre el margen occidental del río Uruguay y la ruta Nacional 14, en el Departamento de Concordia, Provincia de Entre Ríos, Argentina (Figura 1). La zona se encuentra en un área de transición entre el clima subtropical y templado sin estación seca durante el año. Las temperaturas medias son de 26°C en verano y 13°C en periodo de invierno, siendo la temperatura media anual de 20-21°C.

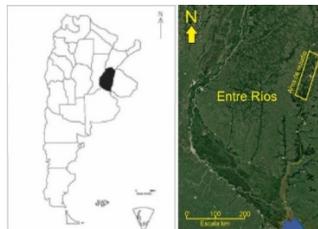


Fig 1: Localización del área de estudio.



### B. Mediciones de resistividades

Inicialmente se realizaron 13 SEV paramétricos en las mismas posiciones donde se realizaron otros 13 SPT.

La elección de los puntos no fue arbitraria, se seleccionaron aquellos SPT realizados sobre la F. Ubajay exclusivamente y se buscó la mejor distribución posible dentro del área de estudio. Esto determinó que de un conjunto de 32 SPT se eligieran 13 para el estudio paramétrico.

Para realizar estas mediciones se desarrolló un tomógrafo eléctrico resistivo con características innovadoras con respecto a lo disponible comercialmente (Figura 2).



Fig 2. Tomógrafo eléctrico resistivo.

Además, para comprender mejor e individualizar la influencia de cada aspecto litológico, se realizaron una primera serie de experimentos sobre arenas de granulometría conocida en laboratorio.

Para realizar esta tarea fue necesario, diseñar y desarrollar un equipo de medición de resistividad a medida. Este equipo fue validado utilizando soluciones de cloruro de sodio de concentraciones diferentes (Figura 3).

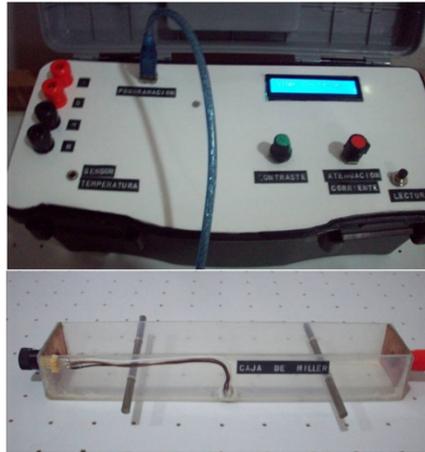


Fig 3. Equipo de resistividad de laboratorio.

### III. RESULTADOS PRELIMINARES

De la primera etapa de mediciones se presentan en las figuras 4 y 5 la correlaciones entre el número de golpes y la resistividad eléctrica obtenida por medio de los SEV paramétricos realizados en el área de estudio. La figura 4 corresponde a un total de 4 SPT en la zona de Ayuí tomada aquí como caso típico. Como puede observarse se obtiene un coeficiente de correlación aceptable ( $r^2 = 0.70$ ). En la Figura 5 se observa la misma relación anterior, pero esta vez con 13 SPT que son el total disponible a la fecha en toda el área de estudio mencionada. En esta figura los valores de correlación son bajos ( $r^2 = 0.17$ ) y la dispersión es grande. En síntesis, las correlaciones locales pueden ser adecuadas pero los intentos de regionalización de los resultados no parecen dar resultados favorables. Esta situación se repite en todos los casos donde se observan buenas correlaciones locales en contraste con las bajas correlaciones del conjunto de datos.

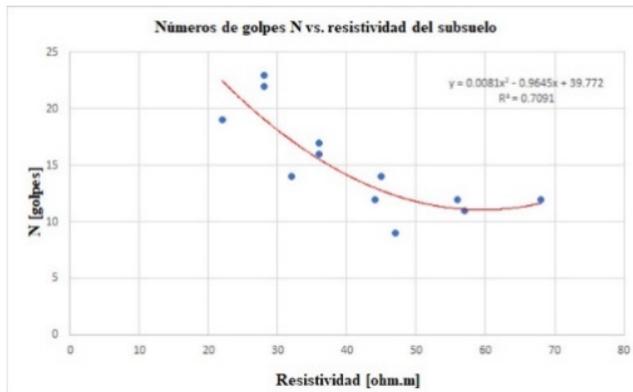


Fig 4. Correlación de 4 SPT en zona de Ayuí

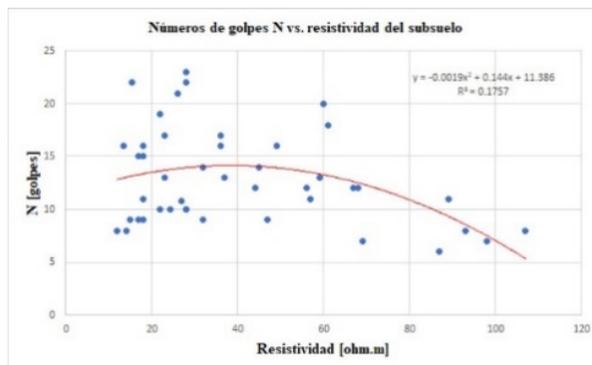


Fig 5. Correlación de los 13 SPT disponibles.

En una segunda etapa se realizaron tres experimentos de mediciones de resistividades en laboratorio, donde uno de ellos se utilizó para estudiar la variación de la resistividad eléctrica de una muestra de arena graduada con respecto a la variación de su contenido de sales (Figura 6).

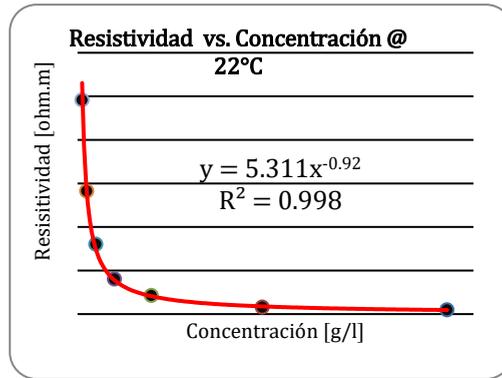


Fig 6. Variación de la resistividad con la concentración.

El segundo experimento consistió en determinar la variación de la resistividad de la misma arena graduada con la variación tanto del contenido de agua, como también de su salinidad (Figura 7).

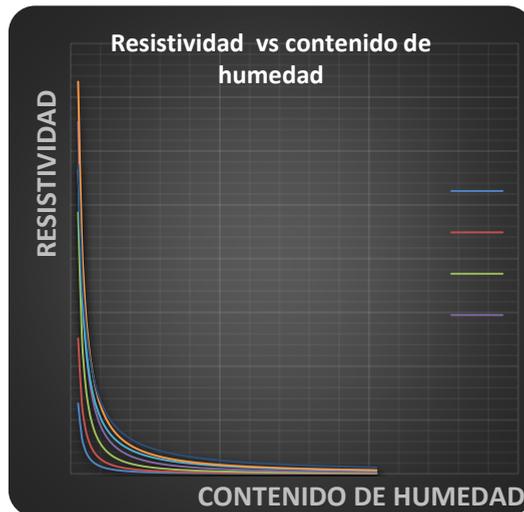


Fig 7. Variación de la resistividad con el contenido de humedad



Y por último se observó el comportamiento de la resistividad con la variación de la temperatura de la muestra de suelo (Figura 8).

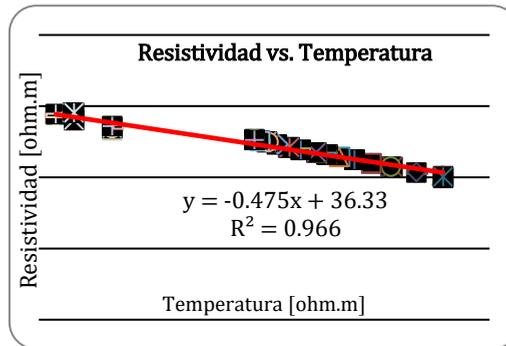


Fig 8. Variación de la resistividad con la temperatura.

#### IV. CONCLUSIONES

Es indudable que este estudio muestra una posibilidad de investigación novedosa en la búsqueda de encontrar indicadores indirectos de los parámetros geomecánicos de los suelos, sus variaciones y su aplicación. Las correlaciones significativas halladas en un primer momento a partir de los datos de los SPT dejan claro que es posible encontrar relaciones entre los valores de resistividad eléctrica y los parámetros geomecánicos pudiendo ser aplicable localmente en estudios geotécnicos, pero también muestra que es necesario un trabajo detallado de laboratorio para comprender mejor e individualizar la influencia de cada aspecto litológico.

Si bien se han encontrado correlaciones locales favorables aún no se ha encontrado un mecanismo de correlación aplicable a todos los puntos de medición en su conjunto. Esto puede deberse a la heterogeneidad litológica regional de la F. Ubajay, principalmente a lo que respecta a la presencia de arcillas. Estas arcillas presentan una cargabilidad eléctrica que depende de la corriente que circule o haya circulado por el terreno, haciendo que la medición de su resistividad presente variaciones en su valor.



Como próximo paso, se deberá desarrollar una metodología con apoyo de los análisis en laboratorio y principalmente de mediciones de polarización inducida en el terreno, que permita discernir si la resistividad obtenida mediante un sondeo eléctrico vertical, se corresponde con arenas o arcillas, con el propósito de obtener resultados predictivos favorables.

Por ello se diseñó y se encuentra en fase de construcción un equipo de medición de polarización inducida.

Todos los resultados parciales obtenidos fueron totalmente publicados en diferentes jornadas, congresos y revistas.

El desarrollo del tomógrafo fue presentado en las Jornadas de Geofísica del Uruguay en el año 2017.

Los primeros datos de correlaciones entre resistividad y números de golpes del ensayo SPT se publicaron en el I Congreso Argentino de Geología Aplicada a la Ingeniería 2018.

Y una versión más detallada de este estudio se presentó en la revista ASAGAI 2019.

## V. REFERENCIAS

Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y. J., Tabbagh, A., Charlery, Y. (2006). Correlations between geotechnical and electrical data: A case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics*, 60, 165-178.

Fahad, I. S., Syed, B. A. (2012). Integrating geoelectrical and geotechnical data for soil characterization. *International journal of applied physics and mathematics*, 2(2).

Filho A., Oliveira M., Pires, T., Alves, A., Calixto, A., Narciso, M. (2017). Correlation method of physical characteristics with electrical properties of soil. *Transactions on environment and electrical engineering*, 2(2), 16-24.



Kowalczyk, S., Maslakowski, M., Tucholka, P. (2014). Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compactation. *Journal of applied geophysics*, 110, 43-50.



# **Desarrollo de modelos de recursos renovables para la planificación óptima en proyectos de inversión en micro redes**

**Doctorando: *Bruno Enrico Bignotti***

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia  
Universidad Nacional de Río Cuarto, Facultad de Ingeniería  
e-mail: brunobig2004@hotmail.com

**Director: *Juan Manuel Alemany***

**Codirector: *Fernando Horacio Magnago – Carlos María Chezzi***

**RESUMEN:** El presente proyecto de tesis se aboca al problema de ingeniería del diseño óptimo de micro redes para proyectos de inversión. Se pretende como objetivo de conocimiento lograr el entendimiento del estado del arte de los sistemas y variables que componen una micro red, como así también los modelos más adecuados para representarlos. Para esto se hará una revisión bibliográfica de publicaciones científicas relacionadas y relevo de datos atmosféricos y sobre la demanda. Como resultado final se pretende la implementación de una herramienta informática que permita la evaluación de las diferentes combinaciones de sistemas de generación para el diseño óptimo de una micro red.

**Palabras clave:** Microgrid Planning, Distributed Energy Resources, Demand Forecast, Reliability Analysis, Linear Programming.



## I. INTRODUCCIÓN

El mundo de la energía se está transformando. En el corazón de la transformación energética se encuentran la demanda, la seguridad energética y un futuro sostenible. En los últimos 40 años, la población mundial creció de 4000 millones a 7000 millones de personas. Durante el mismo período, la generación de electricidad creció en más del 250% (International Renewable Energy Agency, Renewable Energy Statistics, 2018). Este crecimiento continuará, en 2030 habrá más de 8000 millones de personas, con 5000 millones en conglomerados urbanos. Se prevé que la generación mundial de electricidad crezca un 70%, en el orden de los 37000 TWh en 2030 (IRENA, Renewable Energy Statistics, 2018). Mientras tanto, 1300 millones de personas actualmente carecen de acceso a la electricidad (IRENA, 'Off-grid renewable energy solutions: Global and regional status and trends', 2018), muchas de ellas en áreas remotas sin acceso a los sistemas de potencia interconectados de gran escala. Además, 2600 millones de personas dependen de la biomasa tradicional para cocina y calefacción (IRENA, 'Off-grid renewable energy solutions: Global and regional status and trends', 2018).

La energía hidroeléctrica, geotérmica y de biomasa han sido competitivas durante mucho tiempo, pero durante años la energía eólica y solar lucharon por competir con el carbón, el petróleo y el gas natural. En la última década, esa imagen ha cambiado drásticamente. Las tecnologías de energía renovable se han vuelto más robustas y eficientes, y cada vez son más capaces de generar energía incluso en condiciones sub-óptimas; por ejemplo con bajas velocidades de viento o baja irradiación solar (IRENA, Rethinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation, 2017).

Los precios de la energía solar fotovoltaica han caído en un 80% desde 2008 y se espera que sigan disminuyendo (IRENA, RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES, Volume 1: Power Sector Issue 4/5, Solar Photovoltaics, 2012). En 2013, la energía solar alcanzó la paridad de red en Italia, Alemania y España, y lo hará pronto en México y Francia. Cada vez más, la energía solar fotovoltaica puede competir sin subsidios. El costo de la electricidad eólica On-shore ha caído un 18% desde 2009, con los costos de las turbinas cayendo casi un 30% desde 2008 (IRENA,



RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES, Volume 1: Power Sector Issue 5/5, Wind Power, 2012), lo que la convierte en la fuente más barata de nueva electricidad en una amplia y creciente gama de mercados. Más de 100 países ahora usan energía eólica.

En todo el mundo, la capacidad de energía renovable ha crecido un 85% en la última década y constituyen hoy el 30% de toda la capacidad de potencia instalada (IRENA, Renewable Energy Statistics, 2018). El desafío ha pasado de la cuestión de si la energía renovable puede impulsar estilos de vida modernos a un costo razonable -que ahora sabemos que puede- a la mejor manera de financiar y acelerar su despliegue.

Las energías renovables son buenas para la economía de un país. Por ejemplo, el uso de energías renovables en España evitó USD 2800 millones en importaciones de combustibles fósiles en 2010, mientras que Alemania ahorró USD 13.500 millones en 2012 (IRENA, REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation, 2017). Para los países exportadores de combustibles fósiles, el despliegue de fuentes renovables hace que haya más recursos disponibles para la venta en el extranjero.

Los beneficios se sienten a través de la cadena de valor ya que la energía renovable estimula las actividades económicas domésticas y crea empleo. En 2013, financió 6,5 millones de empleos directos e indirectos, incluidos 2,6 millones en China (IRENA, REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation, 2017).

A medida que crece la participación de la energía renovable, la producción de la misma está experimentando cambios. Un sector alguna vez dominado por grandes empresas de servicios públicos se está volviendo más descentralizado, diverso y distribuido. En Alemania, casi la mitad de toda la energía renovable está ahora en manos de los hogares y los agricultores, y solo el 12% de los activos renovables son propiedad directa de los servicios públicos (IRENA, Renewable Energy in Cities, 2016).

Una micro red (microgrid) es un sistema de energía eléctrica que tiene al menos un recurso de energía distribuida (distributed energy resource) y que puede operar



de forma autónoma o en conexión con el servicio público de energía (A. Khodaei y M. Shahidehpour, 2019)

Las redes de servicios públicos representan una oportunidad excelente para la energía renovable. Debido a la falta de economía de escala, estas redes generalmente dependen de la electricidad suministrada por el sistema de transmisión. En el mejor escenario, solo poseen equipos de generación de respaldo, comúnmente basados en Diesel (N. Mendis, K. M. Muttaqi, S. Perera and M. N. Uddin, 2015).

Las soluciones de Microgrid ayudan a los clientes de servicios públicos, comercios e industrias al proporcionar energía con recursos renovables y tecnología de almacenamiento de energía (C. Yuan, M. A. Haj-ahmed and M. S. Illindala, 2015). Los beneficios económicos y operativos incluyen energía confiable y asequible, con bajo impacto ambiental y un menor costo de electricidad con una tasa interna de retorno atractiva para las inversiones (T. Adefarati and R. C. Bansal, 2016).

Si bien muchas empresas consideran que la inminente integración de recursos renovables y almacenamiento de energía son una realidad, e identifican a estas tecnologías como una oportunidad para agregar valor a la red y sus modelos de negocios; la pregunta importante que surge natural en los directorios, es cómo dimensionar y aprovechar al maximizo estos recursos para constituir el mejor sistema de electricidad del futuro, al menor costo y para servir a los clientes y a la sociedad (P. Toma, P. Dorin, E. Radu and M. Daniel, 2014).

Existen en la actualidad escasas opciones comerciales a nivel mundial como herramienta de cálculo de proyectos técnico-económicos aplicados a Microgrid (T. Lambert, P. Gilman and P. Lilienthal, 2006).

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta informática que permita la evaluación de proyectos de inversión en micro redes enfatizando la confiabilidad y diseño óptimo. Para esto se hará uso de modelos determinísticos y estocásticos para la simulación.



## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Modelos

Varios componentes, sistemas y recursos deben ser modelados adecuadamente. En las siguientes subsecciones se proveen detalles sobre el enfoque que se da a cada uno.

La micro red consiste de una demanda concentrada, varios recursos de energía distribuidos y convencionales, recursos de almacenamiento, un sistema de control y un circuito eléctrico que interconecta los componentes.

El objetivo del modelo del sistema la micro red es determinar la combinación más adecuada de sus distintos componentes. Para eso se utilizarán técnicas de programación lineal entera mixta.

Los recursos de energía distribuida fundamentales seleccionados para el desarrollo del trabajo son los paneles fotovoltaicos y las turbinas eólicas. Existen distintas tecnologías y a su vez, las características de los productos comerciales de una misma tecnología tienen distintos parámetros: precio, superficie ocupada, curva de irradiación-tensión, curva de tensión-corriente, velocidad de viento mínima y máxima, etc.

La irradiación solar y la velocidad del viento tienen una naturaleza aleatoria. Se dispone de los datos de sus magnitudes en múltiples ubicaciones de la provincia de Córdoba a través del sitio del Ministerio de Agricultura y Ganadería de dicha provincia. Con esta información se estimarán sus magnitudes futuras para la óptima selección de los equipos.

Dada la naturaleza aleatoria de las fuentes de energía renovable y la demanda, es necesario el almacenamiento transitorio de la energía. Existen diferentes tecnologías de almacenamiento de energía: bombeo de agua, bombeo de calor, aire comprimido, producción de hidrógeno, baterías, capacitores, volantes inerciales. En el presente trabajo se opta por las baterías, los bancos de capacitores y los volantes inerciales como tecnología de almacenamiento. Dependiendo de la naturaleza de la demanda será necesario incluir uno o más recursos de almacenamiento distintos para asegurar la calidad de la energía. Existen distintas



tecnologías de baterías y distintos parámetros a modelar: Carga máxima, carga mínima, ciclos de carga-descarga máximos, velocidad de carga, velocidad de descarga, resistencia interna, tensión nominal, tamaño, precio.

Un sistema de energía eléctrica debe ser capaz de operar independientemente de las variables climáticas. Para asegurar la disponibilidad del recurso eléctrico se incluye en la micro red recursos de generación convencionales que operan a base de combustibles fósiles. Para dicho fin se utilizarán generadores diesel. Los parámetros a ser modelados son: precio, superficie ocupada, eficiencia de combustible, precio del combustible, potencia nominal, curva de carga.

Se considera modelar recursos de energía alternativos. En este grupo incluimos las celdas de combustible, los generadores de biomasa, generadores a biodiesel y generación micro-hidráulica.

## B. Metodología

Se realizará una revisión sobre los modelos comerciales más relevantes de recursos de energía distribuidos, recursos de almacenamiento de energía, recursos de energía alternativos y equipos inversores-rectificadores y se recolectarán las características físicas necesarias para la elaboración de los modelos. A su vez se realizará una revisión bibliográfica para determinar cuáles son los mejores modelos matemáticos para su representación y posterior evaluación técnica-económica.

Para la realización de los modelos prototípicos se utilizará el software Octave y el lenguaje de programación GAMS. En la instancia post-prototipo se utilizará el lenguaje de programación Python.

### III. RESULTADOS

Se implementó un modelo de panel solar y de turbina eólica basado en tres estados: generador apagado, generador disminuido (derated, al 50%) y generador encendido (al 100%).

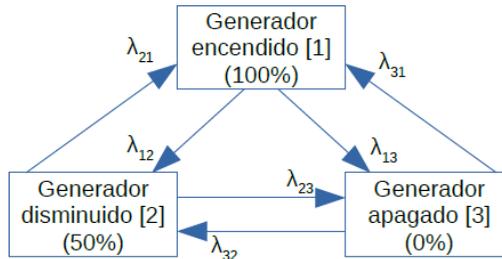


Fig. 2: Modelo de tres estados del generador

Para conocer el tiempo que el generador está en un determinado estado se evalúa:

$$T_{up} = \min(t_{up1}, t_{up2}) \quad (1)$$

Siendo

$$\begin{aligned} T_{up1} &= \frac{1}{\lambda_{12}} \cdot \ln(U_1) \\ T_{up2} &= \frac{1}{\lambda_{13}} \cdot \ln(U_2) \end{aligned} \quad (2)$$

$\lambda_{ij}$  es el parámetro de la distribución exponencial.  $U$  es un número aleatorio con distribución uniforme entre cero y uno.

Este modelo permite una evaluación de índices de confiabilidad aplicando el método Monte Carlo.



Se extrajeron datos del sitio del Ministerio de Agricultura y Ganadería sobre irradiación solar ( $W/m^2$ ) y velocidad del viento (km/h):

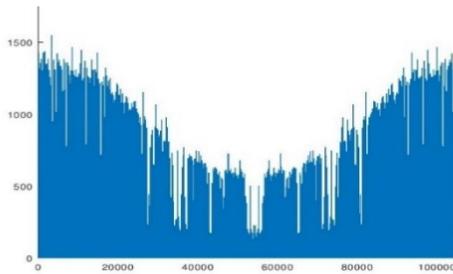


Fig. 3: Irradiación solar anual en Río Cuarto

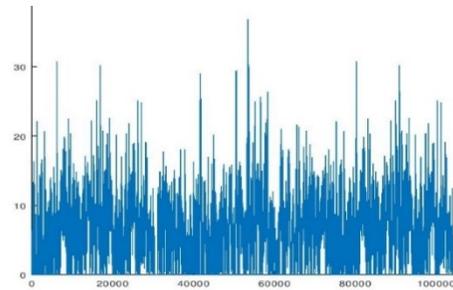


Fig. 4: Velocidad del viento anual en Río Cuarto

Usando un medidor inteligente se recolectaron datos sobre la potencia demandada de un hogar (W).

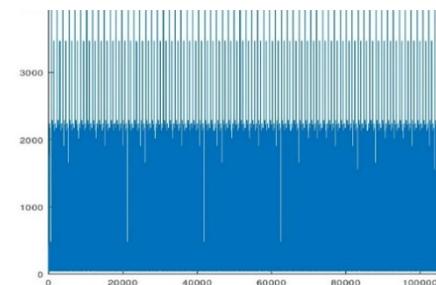


Fig. 5: Demanda de una residencia normal



Usando como parámetro de diseño que un determinado porcentaje de la demanda sea cubierta por los recursos de energía distribuidos. También se pudo evaluar cuál sería el índice de energía no suministrada dada una potencia.

#### **IV. CONCLUSIONES**

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta informática que para el diseño óptimo de proyectos de inversión en micro redes. Se realizará una revisión bibliográfica y relevamiento de productos comerciales para obtener los modelos y datos que mejor representen a los sistemas. Se desarrollaron modelos que permiten aplicando el método Monte Carlo evaluar el índice de energía no suministrada y determinar la potencia necesaria de los equipos para cubrir un determinado porcentaje de la demanda.

#### **V. REFERENCIAS**

A. Khodaei and M. Shahidehpour, "Microgrid-Based Co-Optimization of Generation and Transmission Planning in Power Systems," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1582-1590, May 2013.

C. Yuan, M. A. Haj-ahmed and M. S. Illindala, "Protection Strategies for Medium-Voltage Direct-Current Microgrid at a Remote Area Mine Site," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 4, pp. 2846-2853, July-Aug. 2015.

IRENA (2012), RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES, Volume 1: Power Sector Issue 4/5, Solar Photovoltaics.

IRENA (2012), RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES, Volume 1: Power Sector Issue 5/5, Wind Power.

IRENA (2016), Renewable Energy in Cities, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.

IRENA (2017), REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2018), 'Off-grid renewable energy solutions: Global and regional status and trends'. IRENA, Abu Dhabi.



IRENA (2018), Renewable Energy Statistics 2018, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

N. Mendis, K. M. Muttaqi, S. Perera and M. N. Uddin, "Remote Area Power Supply System: An Integrated Control Approach Based on Active Power Balance," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 21, no. 2, pp. 63-76, March-April 2015.

P. Toma, P. Dorin, E. Radu and M. Daniel, "Sizing photovoltaic-wind smart microgrid with battery storage and grid connection," 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj-Napoca, 2014, pp. 1-5.

T. Adefarati and R. C. Bansal, "Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review," in IET Renewable Power Generation, vol. 10, no. 7, pp. 873-884, 7 2016.

T. Lambert, P. Gilman and P. Lilienthal, "Micropower System Modeling with HOMER. Integration of Alternative Sources of Energy", Second ed. USA: Wiley-IEEE Press, 2006.



**Modelos numéricos en GPGPU para el tratamiento de fondos móviles erosionables. Ing. Lucas C. Bessone Martínez. Doctorando de Ingeniería, mención Mecánica. Facultad de Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral**



**Modelo numérico para el hormigón reforzado con fibras híbridas: Aplicación a un caso de estudio. Ing. Miqueas C. Denardi. Doctorando de Ingeniería, mención Materiales. Facultad Regional Concepción del Uruguay. Universidad Tecnológica Nacional.**



**Modelo de Distribución Resistivo del Subsuelo y sus Aplicaciones en Ingeniería Geológica, Cuenca del Arroyo Palmar, Entre Ríos. Ing. Mario R. Chury. Doctorando de Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.**



**Hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero. Análisis como material de refuerzo en vigas. Ing. Alberto Palacio. Doctorando de Ingeniería, mención Materiales. Facultad Regional Córdoba. Universidad Tecnológica Nacional.**



**Desarrollo de modelos de recursos renovables para la planificación óptima en proyectos de inversión con microgrids. Ing. Bruno Bignotti. Doctorando de Ciencias de la Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto.**

