

ISSN: 1668-9178

# caet

N°46  
AÑO XXXIII  
Junio de 2024

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología  
Universidad Nacional de Tucumán



## HOMENAJE DR. RODOLFO FRANCISCO DANESI

Estaba convencido de que el prestigio académico y profesional es una herramienta poderosa para servir a la sociedad que requiere no sólo conocimientos y prácticas, sino también el desarrollo de virtudes humanas y otras habilidades que permiten resolver los problemas de manera más eficaz.



UNIVERSIDAD  
NACIONAL ✦  
DE TUCUMÁN



ISSN 1668-9178

Dirección Científica: Dr. Ing. Nicolás Nieva  
Dirección Ejecutiva: Dr. Ing. Nicolás Nieva  
Diagramación y producción: Lic. Álvaro Astudillo  
Revisión: P. Fanny Díaz



**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN**

Rector Ing. Sergio José Pagani  
Vicerrectora Dra. Mercedes Leal

**AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA**

Decano Dr. Ing. Miguel Ángel Cabrera  
Vicedecano Mg. Ing. Eduardo Martel

---

**cet Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería**

Comisión Asesora: Dra. Paula Araujo, Dra. Georgina Elías, Dra. Cecilia Zapata.

**Comité Editorial:**

Dra. Liliana del Valle Abascal  
Mg. Carlos Albaca Paraván  
Dr. Carlos Albarracín  
Dra. Paula Araujo  
Dr. Adolfo María Ávila  
Dra. Georgina Elías  
Mg. María Isabel Giannini  
Dra. Mariela González  
Ing. Gustavo Eduardo Juárez

Ing. Nicolás Majorel Padilla  
Dr. Eduardo Manzano  
Dr. Oscar Alonso Marín Ramírez  
Ing. Nora Perotti  
Dr. Antonio Orlando  
Ing. José Antonio Palacios  
Dra. Sonia Vrech  
Dra. Cecilia Zapata

---

Esta publicación figura en el **Directorio de Latindex**

Clasificación Decimal Universal (CDU): 501- 62

Director: Tel. +54-381-4364093 - Int. 7719

E-mail: revista@herrera.unt.edu.ar

El contenido de los trabajos firmados no representa necesariamente la opinión del editor, siendo de exclusiva responsabilidad de los autores.

Registro de Propiedad Intelectual: N° 303943 – ISSN 1668-9178

Este número cerró en Junio de 2024.

## EDITORIAL

- Homenaje al DR. RODOLFO FRANCISCO DANESI 4  
*Escrito por Gustavo PEREZ*

## INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN

- Nuevos desarrollos en sistemas de control de vibraciones 5  
*Escrito por Daniel AMBROSINI, Martín DOMIZIO, Andrés CAMPI, Facundo CUERVO, Pablo BARLEK y Bibiana LUCCIONI*
- Diseño basado en desempeño para el refuerzo de edificios escolares 15  
*Escrito por por Gustavo Luis PALAZZO*
- Aspectos dinámicos en la obra de João Filgueiras (Lelê): El caso de las pasarelas peatonales 22  
*Escrito por Thiago Gonçalves MOREIRA, Graciela N. DOZ*
- Vientos descendentes extremos en el análisis y diseño de estructuras 31  
*Escrito por Jorge D. RIERA*
- Estudio CFD aplicado al diseño de una microválvula intravesical para tratar afecciones de la vía urinaria 44  
*Escrito por Martín REARTE, Joaquín BOLÍVAR*

## INFORME TÉCNICO

- Una reseña de (casi) 30 años de investigación sobre el comportamiento y falla de tanques de almacenamiento de petróleo 54  
*Escrito por Luis A. GODOY*

## NOTAS, ARTE Y OPINIÓN

- Breve CV del Dr. Rodolfo Francisco Danesi 60  
*Escrito por Bibiana María LUCCIONI*

## HOMENAJE

- Recuerdos del Dr. Rodolfo DANESI 64  
*Escrito por Bibiana María LUCCIONI*

## PARA AUTORES

- Instrucciones para autores 67

## Revista en Homenaje al Dr. Rodolfo Francisco Danesi

Gustavo A. PÉREZ



Con motivo de cumplirse un año de su fallecimiento, ocurrido el 20 de febrero de 2023, los integrantes del Instituto de Estructuras organizaron un homenaje en reconocimiento a su protagonismo en el desarrollo de la investigación, docencia de posgrado y transferencia.

El homenaje comprendió dos jornadas. En la primera de ellas, el 22 de febrero de 2024, se realizó un ciclo de charlas técnicas. En una de estas charlas se expuso un trabajo inédito realizado por el Profesor Dr. Ing. Jorge Riera, destacado colega y amigo del Dr. Danesi, quien desde hace varias décadas reside en Brasil. Otra de las exposiciones estuvo a cargo del hijo del homenajeado, el Mg. Ing. Rodolfo Danesi (h), mientras que las restantes la realizaron doce egresados de la Maestría en Ingeniería Estructural y del Doctorado en Ingeniería, carreras de posgrado que fueron creadas y continuamente promovidas por el Dr. Danesi. Los

trabajos que se incluyen en este número especial de la revista fueron seleccionados entre los expuestos aquél día.

Adicionalmente, el 23 de febrero de 2024 se realizó un Acto en Homenaje al que asistió la familia del Dr. Danesi, el Rector de la Universidad Nacional de Tucumán, Ing. Sergio Pagani, el Decano de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Dr. Miguel Ángel Cabrera, el Director del Instituto de Estructuras, Dr. Gustavo Pérez y la Directora Académica de las carreras de posgrado Maestría en Ingeniería Estructural y Doctorado en Ingeniería, Dra. Bibiana Luccioni, entre otras autoridades, además de docentes y alumnos de grado y posgrado de la Facultad, técnicos de Laboratorio, personal de apoyo administrativo y amigos. Durante el mismo, expusieron el Director del Instituto, la Directora Académica de las carreras de posgrado, el Decano de la FACET y el Rector de la UNT resaltando la semblanza del Dr. Danesi, su actuación académica y su decisiva participación en la creación y desarrollo de las carreras de posgrado. Luego, el Rector, Ing. Sergio Pagani le hizo entrega a su familia del Título de Dr. Honoris Causa de la Universidad Nacional de Tucumán que le había sido concedido, pero no llegó a recibir en vida el Dr. Danesi.

A continuación, se descubrió una placa en homenaje al Dr. Rodolfo Danesi colocada a la entrada del aula principal del Instituto de Estructuras.

Sus discípulos lo recordaremos siempre por su ejemplo de esfuerzo, perseverancia, entusiasmo en el trabajo, calidez humana y por su significativa contribución a la comunidad científica a través de sus publicaciones y de la creación de las carreras de posgrado mencionadas.

**Dr. Gustavo A. PÉREZ**

Director del Instituto de Estructuras  
Marzo de 2024

# Nuevos desarrollos en sistemas de control de vibraciones

AMBROSINI, Daniel<sup>a,b</sup>; DOMIZIO Martín<sup>a,b</sup>; CAMPI Andrés<sup>a,b</sup>; CUERVO Facundo<sup>a,b</sup>; BARLEK Pablo<sup>c</sup>; LUCCIONI Bibiana<sup>d,b</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo

<sup>b</sup>CONICET

<sup>c</sup>INPRES

<sup>d</sup>Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán

## Resumen

En los últimos años se ha registrado una importante actividad en las áreas de control de vibraciones y aislamiento sísmico de estructuras civiles e industriales, que han contribuido a mejorar el comportamiento estructural. Sin embargo, existen todavía puntos que se encuentran no resueltos y son motivo de investigación. En particular, estructuras de viviendas, nuevas o ya construidas, de baja altura y alta frecuencia fundamental registran pocas soluciones disponibles para el mejoramiento de la seguridad estructural. Por otra parte, el desarrollo de nuevos sistemas de control de vibraciones es un área permanentemente abierta a la investigación y desarrollo.

En este trabajo se presentan tres nuevos desarrollos en el área de control de vibraciones de estructuras sometidas a acciones sísmicas: a) Amortiguadores de líquido sintonizados de alta frecuencia, b) Paneles de fricción generalizada y c) Aislamiento sísmico de bajo costo para viviendas urbanas.

Se detalla el funcionamiento de estos sistemas, priorizando la descripción de los principios físicos que los definen y se resaltan sus ventajas e inconvenientes.

**Palabras clave:** Control de vibraciones, Amortiguadores de líquido sintonizados, Disipación de energía, Aislamiento geotécnico

## *New developments in vibration control systems*

### **Abstract**

*In recent years there has been significant activity in the areas of vibration control and seismic isolation of civil and industrial structures, which have contributed to improving structural behaviour. However, there are still unresolved issues that are the subject of research. In particular, new and existing low-rise, high-frequency fundamental housing structures have few solutions available for the improvement of structural safety. On the other hand, the development of new vibration control systems is an area of ongoing research and development.*

*This paper presents three new developments in the area of vibration control of structures subjected to seismic actions: a) High frequency tuned liquid dampers, b) Generalised friction panels and c) Low-cost seismic isolation for urban dwellings.*

*The performance of these systems is detailed, prioritising the description of the physical principles that define them and highlighting their advantages and disadvantages.*

**Keywords:** *Vibration control, Tuned liquid dampers, Energy dissipation, Geotechnical isolation*

## Introducción

Es de importancia destacar que, de la superficie continental total de Argentina (cerca a 2.800.000 Km<sup>2</sup>), aproximadamente un tercio de la misma está comprendido dentro de las zonas de peligrosidad sísmicas de moderada, elevada y muy elevada. Si bien la mayor parte de la actividad sísmica se concentra en las regiones central y norte del oeste de Argentina, el problema del diseño y construcción sismorresistente abarca la totalidad del territorio nacional, como se verifica en el diseño de centrales nucleares ubicadas en la Provincia de Buenos Aires.

Uno de los principales y actuales desafíos en la Ingeniería, es el desarrollo de conceptos innovadores de diseño para construir estructuras más seguras o bien recuperar y/o aumentar los niveles de seguridad de estructuras existentes. La concepción y posterior realización de prototipos de sistemas de control de vibraciones, aislamiento sísmico, y disipación de energía de bajo costo, factibles de ser construidos por la industria nacional con la potencial exportación de dichos dispositivos a otros países con problemática ante cargas sísmicas, representan un considerable impacto en el desarrollo tecnológico y económico de nuestro país. Considerando el beneficio económico que se logra debido a la mejora en el desempeño y seguridad de las estructuras provistas de estos dispositivos y sistemas, como también el crecimiento económico en la región donde se desarrolle esta tecnología, resulta de importancia el desarrollo de sistemas que mitiguen las consecuencias de esta acción dinámica.

En este trabajo se presentan tres nuevos desarrollos en el área de control de vibraciones de estructuras sometidas a acciones sísmicas: a) Amortiguadores de líquido sintonizados de alta frecuencia, b) Paneles sismorresistentes de fricción generalizada y c) Aislamiento sísmico de bajo costo para viviendas urbanas.

## Amortiguadores de líquido sintonizados de alta frecuencia. ALS-AF.

Domizio M., Ambrosini D., Campi A.

Los dispositivos de control de vibraciones pasivos desarrollan fuerzas en respuesta al movimiento de la estructura, sin necesidad de una fuente de energía externa. Se produce de este modo una transferencia o disipación concentrada de energía, con la consecuente reducción de la demanda estructural. Su empleo es capaz de modificar las características de la estructura en cuanto a rigidez, resistencia y amortiguamiento equivalente. El uso de dispositivos pasivos para estructuras civiles tiene una historia de poco menos de medio siglo y se encuentra en constante crecimiento. En dicho período numerosos dispositivos fueron instalados, especialmente en Japón, México y Estados Unidos, en estructuras existentes y nuevas, con el objeto de mejorar su desempeño ante cargas de viento y sismo. En la actualidad, también están en desarrollo dispositivos activos e híbridos, aunque esta alternativa no se considera la ideal para nuestra región debido a sus costos, demanda de energía y mantenimiento. En particular, resultan de interés los amortiguadores de masa sintonizados (AMS) y amortiguadores de líquido sintonizados (ALS). Yang et al. (2022) que presentan un completo estado del arte de sistemas de control de vibraciones a través de amortiguadores de masa sintonizados.

En relación a la aplicabilidad de ALS para acciones sísmicas, existen evidencias preliminares de su conveniencia en Abd-Elhamed y Tolan (2022) y Tang et al. (2022). También para este caso hay propuestas recientes para su uso en la disminución de efectos torsionales (Pandey y Mishra, 2018). A pesar de la importante producción científica en este campo, y si bien los AMS y ALS tienen también un tiempo prolongado de utilización, prácticamente no existen desarrollos de este tipo para

viviendas urbanas de 1 o 2 pisos debido a que las altas frecuencias de esas estructuras (4-8 Hz) hacen muy difícil su implementación. Solamente hay algunos desarrollos para edificios de 5 a 6 pisos (Salvi et al. 2018). Por ello, resulta de gran importancia para la zona de Cuyo desarrollar este tipo de dispositivos de alta frecuencia.

La idea original, presentada en Domizio et al. (2024), consiste en aumentar la frecuencia de vibración del líquido del ALS a través de una tapa y resortes de acero. El esquema del dispositivo desarrollado se presenta en Fig. 1 y en Fig. 2 una fotografía del mismo, colocado encima de un modelo a escala.

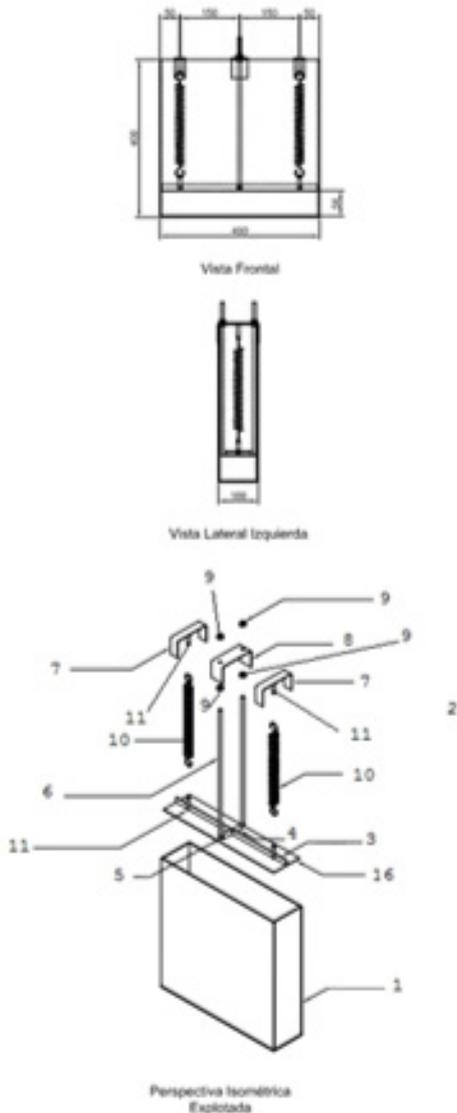


Fig. 1. Esquema de ALS-AF

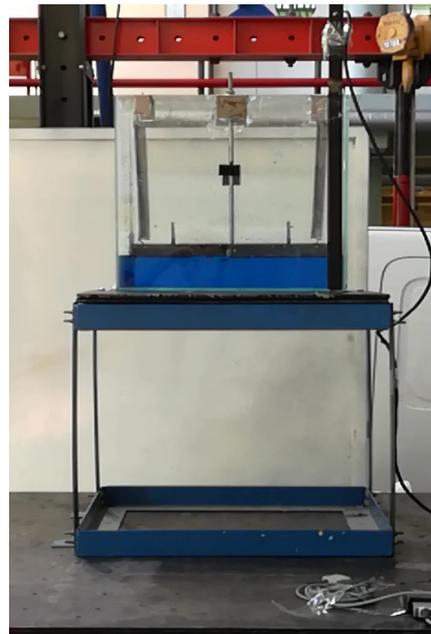


Fig. 2. ALS-AF sobre modelo a escala

Se comprobó experimentalmente el desempeño del ALS-AF. Para ello se construyó un modelo a escala de una estructura de 1 piso, con frecuencia fundamental de 3 Hz. El modelo se ensayó en una mesa vibratoria, sin sistema de control, con ALS clásico y con ALS-AF. El esquema de ensayo se presenta en Fig. 3.

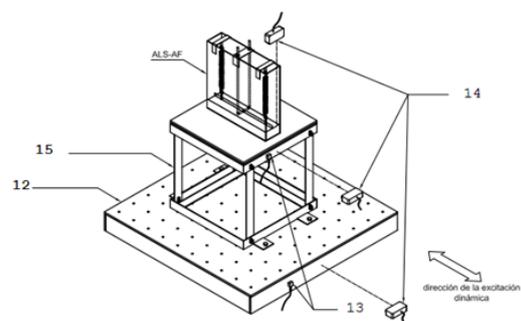


Fig. 3. Esquema de ensayo

El modelo fue sometido a los terremotos de Landers 1992, Mendoza 1985 y Northridge 1994, los cuales tienen contenidos de frecuencias cercanos a los 3 Hz. Además, se sometió al modelo un barrido en frecuencia en torno a los 3 Hz.

En todos los casos se midieron los desplazamientos relativos y las aceleraciones absolutas en el borde libre de la estructura. En Fig. 4 se presenta

la respuesta en frecuencia para el caso de barrido en frecuencia y en Fig. 5 la historia en el tiempo para los 3 acelerogramas utilizados.

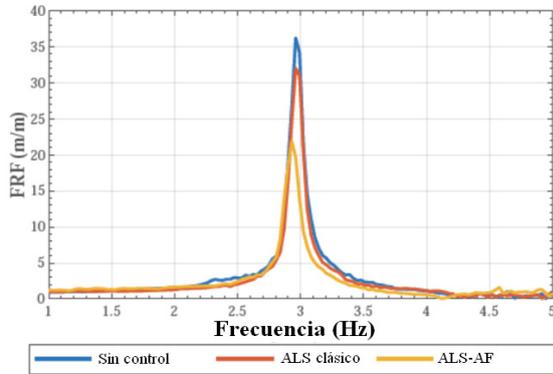


Fig. 4. Respuesta en frecuencia

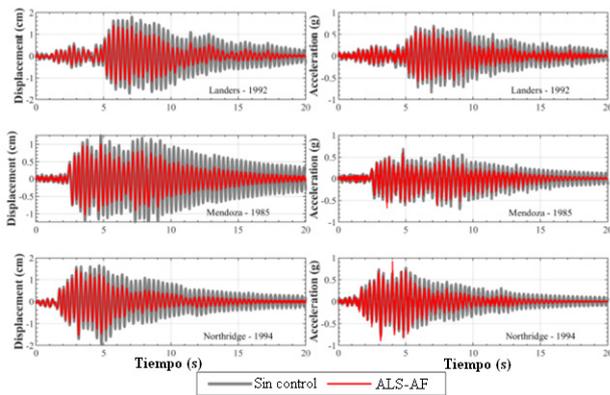


Fig. 5. Historia en el tiempo de la respuesta. Izquierda desplazamientos y derecha aceleraciones

Para una relación de masas del dispositivo del 5% se obtuvo una reducción promedio en valores RMS de desplazamientos y aceleraciones del 30%, una reducción promedio del 20% de los valores máximos de desplazamientos relativos y una reducción del 9% de los valores máximos de las aceleraciones absolutas.

## Paneles sismorresistentes de fricción generalizada. PSFG

Barlek P., Ambrosini D., Luccioni B.

Inicialmente, debe mencionarse que es muy incipiente el desarrollo de paneles pasivos de disipación de energía. En primer lugar, deben mencionarse los paneles de mampostería semi-enclavados (SIM, por su sigla en inglés) que disipan energía por fricción. Se trata de paneles de mampostería

hechos de unidades semi-enclavadas, unidas en seco, capaces de deslizamiento relativo en el plano de la pared y entrelazados para evitar el deslizamiento relativo fuera del plano de la pared (Totoev 2015, Lin et al. 2015). Un desarrollo más reciente son los paneles de placas de acero con revestimientos de fibrocemento y yeso, aumentando su capacidad de disipación por medio de los revestimientos (Mohebbi et al. 2016). También se han desarrollado: sistema de placas de acero corrugado y agujereadas (Bahrebar et al. 2016), sistemas innovadores de paneles tipo sándwich compuestos de dos placas de hormigón separados por una capa aislante de poliestireno y con dos mallas de acero en cada extremo (Palermo y Trombetti 2016) y panel compuesto por perfiles conformados en frío rellenos de hormigón (Zhang et al. 2016). Existen también desarrollos de sistemas híbridos, como el presentado en Dimakogianni et al. (2015) en el cual el sistema está formado por dos columnas de acero unidas por fusibles de tipo viga o patas circulares de acero. En este trabajo se propone una nueva alternativa de paneles de disipación de energía pasivos, basados fundamentalmente en la disipación por fricción, combinada con la transferencia de energía a través de la sintonización con la estructura principal.

En este caso, la idea original del Panel Sismorresistente de Fricción Generalizada (PSFG) es presentada en Barlek et al. (2023), y consiste en un pórtico metálico (aluminio, acero, etc.) constituido por perfiles U, colocados en forma de canaleta, en los que se les incorporan bloques de plomo simplemente apoyados sobre los canales. Al iniciarse el movimiento, los bloques de plomo deslizan en los canales, disipando energía por fricción entre las superficies. Se testearon distintas superficies de contacto, en orden a optimizar el coeficiente de fricción. El PSFG se coloca en los vanos de una estructura aporticada, reemplazando otro tipo de relleno, como pueden ser los muros de mampostería. Además, se puede ajustar la masa y rigidez del PSFG de modo de que esté sintonizado con la frecuencia fundamental de la estructura principal y por lo tanto también trabaje como Amortiguador de Masa Sintonizado.

En Fig. 6 se presenta un esquema del PSFG, colocado en el interior de un pórtico de hormigón armado.

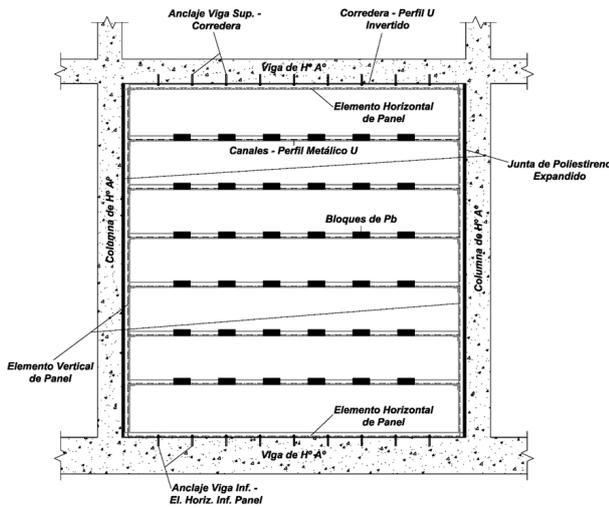


Fig. 6. Esquema de PSFG

En Fig. 7 se presenta un esquema de la sección canal con el bloque de plomo incorporado en el mismo.



Fig. 7. Esquema del perfil U con bloque de plomo incorporado

Se construyó un PSFG con perfiles de aluminio y con los respectivos bloques de plomo y se lo ensayó en mesa vibratoria ante diferentes sismos. Esto permitió calibrar los modelos numéricos y ensayar varias superficies de contacto, sobre todo de teflón. En Fig. 8 se presenta el prototipo ensayado.



Fig. 8. Prototipo de PSFG ensayado.

Se desarrolló un modelo numérico del panel utilizando el software ANSYS Mechanical, el cual fue calibrado con los resultados experimentales. Se presenta un esquema del modelo en Fig. 9.

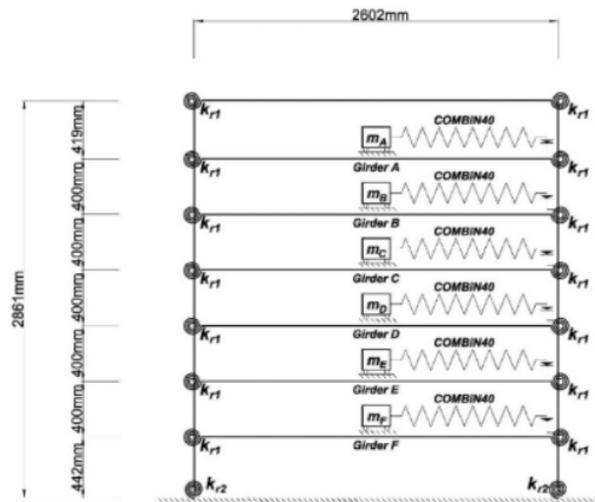


Fig. 9. Modelo numérico del PSFG

Para comprobar la eficiencia del PSFG se realizaron modelos numéricos de edificios típicos a los que se les incorporó el modelo numérico desarrollado del PSFG. Se presentan resultados para un edificio de 10 pisos cuyo modelo se grafica en Fig. 10.

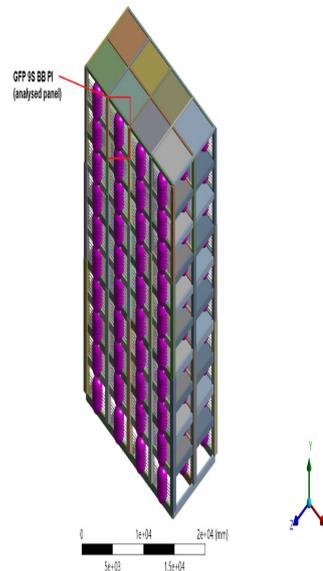


Fig. 10. Modelo numérico de edificio de 10 pisos con PSFG.

Se sometió el modelo a diferentes registros sísmicos. Se presentan en Fig. 11 los resultados para el sismo de Kocaeli con una masa de paneles de

10% y un coeficiente de fricción de 0.5. En Fig. 12 se presenta la disminución de esfuerzos internos para el mismo sismo.

Se concluyó que los paneles PSFG tenían una muy buena eficiencia en la reducción de esfuerzos en el caso de edificios altos y sismos de larga duración.

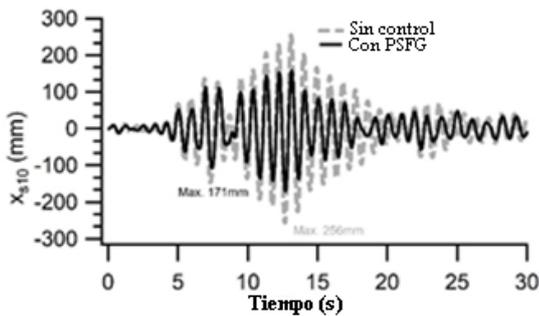


Fig. 11. Respuesta de edificio de 10 pisos sin y con PSFG. Sismo Kocaeli

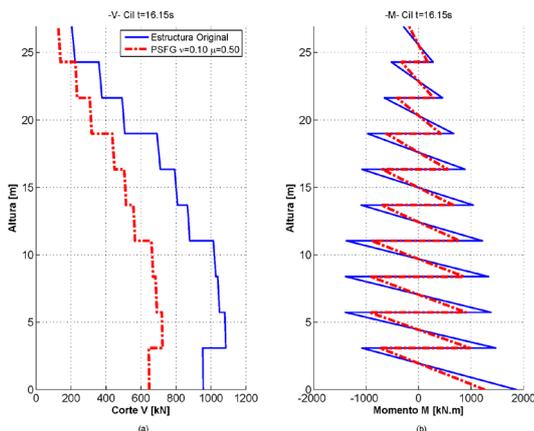


Fig. 12. Respuesta de edificio de 10 pisos sin y con PSFG. Sismo Kocaeli

## Aislamiento sísmico de bajo costo para viviendas urbanas

Cuervo F., Ambrosini D., Domizio M.

Si bien el aislamiento sísmico se está utilizando hace varias décadas en países de Europa, Estados Unidos, Japón, etc. (Ahmad et al. 2022; Clemente and Martelli 2019; Nakamura and Okada 2019), su aplicación en países de Latinoamérica como Argentina y Chile es

incipiente. En particular, en la provincia de Mendoza existen sólo 2 edificios aislados, pertenecientes a Universidades. En prácticamente la totalidad de los casos, se trata de desarrollos aplicables a edificios en altura o estructuras de importancia tales como centrales nucleares, museos, edificios históricos etc., en los cuales el costo de los aisladores es pequeño comparado con el costo total de la obra. Son prácticamente inexistentes en la literatura desarrollos aplicables a estructuras de vivienda, de uno o dos pisos, las cuales son las más comunes en la zona de Cuyo. Por ejemplo, Habieb et al. (2018) alertan sobre esta vacancia y proponen un tipo de aisladores elastoméricos de bajo costo y Tsiavos et al. (2019) estudian un estrato granular de arena y goma como estrategia de aislación sísmica de bajo costo. Recientemente, Giuseppe et al. (2023) proponen un sistema híbrido de aislación y refuerzo y Zhang et al. (2023) proponen una capa de arena marina para aislación ante sismos generados por explosiones. Teniendo en cuenta que, en las provincias de más alto riesgo sísmico de Argentina, Mendoza y San Juan, predominan las viviendas de mampostería de baja altura y, además, que los sismos de la zona tienen rango de frecuencias coincidentes con la frecuencia fundamental de dichas viviendas, surge claramente la necesidad e importancia de desarrollar soluciones de bajo costo aplicables a esta tipología estructural.

En este trabajo se propone el desarrollo de nuevos sistemas de aislación continuos, a ser aplicados precisamente debajo de zapatas continuas bajo muros. Teniendo en cuenta que en la Argentina se desechan 150.000 neumáticos usados por año y que cada neumático tarda 600 años en degradarse, esto constituye un claro problema ambiental. Por ello, se decidió utilizar la goma triturada de neumáticos usados como material para construir el aislamiento sísmico.

Inicialmente, se eligió una vivienda tipo del Instituto Provincial de la Vivienda de Mendoza para estudiar el aislamiento propuesto. Se presenta en Fig.13 la planta típica de la vivienda seleccionada y en Fig. 14 el modelo numérico desarrollado, incluyendo el suelo.



Fig. 13. Planta típica de la vivienda seleccionada

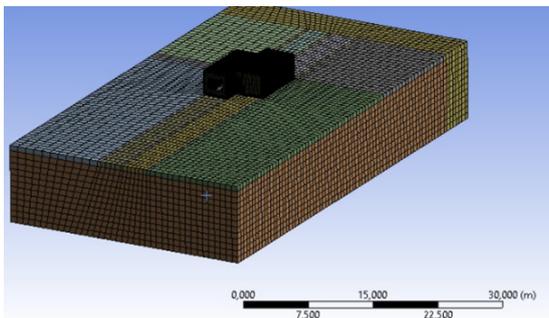


Fig. 14. Modelo numérico de vivienda y suelo

Se eligió un perfil de suelos típico de la ciudad de Mendoza. El modelo de vivienda con suelo tiene una frecuencia de 7 Hz. Se modeló el aislamiento sobre la fundación de la vivienda y la frecuencia obtenida fue de 2.4 Hz. Las propiedades de la goma triturada fueron obtenidas usando el procedimiento desarrollado en Cuervo et al. (2023). En base a estos datos, se construyó un modelo experimental, que se presenta en Fig. 15.

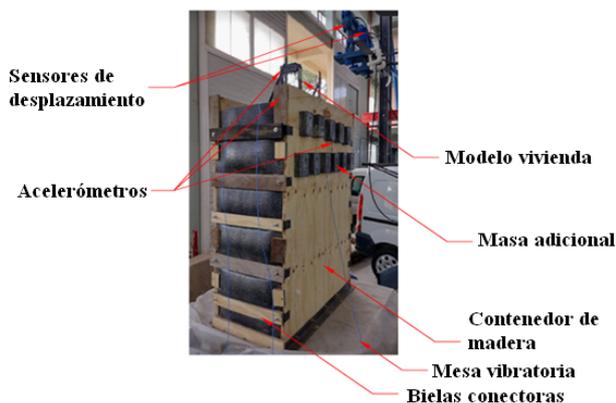


Fig. 15. Modelo experimental

Se representó a través de un sistema de 1 grado de libertad a la vivienda elegida, la cual se la fijó a una base rígida. Posteriormente se llenó el contenedor de suelo natural, obteniendo

experimentalmente la frecuencia buscada de 7 Hz. Finalmente, se llenó el contenedor con goma triturada y se agregaron masas para obtener la frecuencia de 2.4 Hz.

Se sometió el sistema, a través de una mesa vibratoria, a 5 terremotos seleccionados y se obtuvo una reducción de los desplazamientos relativos máximos del 56% y una reducción de aceleraciones absolutas máximas del 20%.

## Conclusiones

Se presentan tres nuevos desarrollos en el área de control de vibraciones de estructuras sometidas a acciones sísmicas: a) Amortiguadores de líquido sintonizados de alta frecuencia, b) Paneles sismorresistentes de fricción generalizada y c) Aislamiento sísmico de bajo costo para viviendas urbanas.

Se realizaron ensayos experimentales y modelos numéricos de los sistemas desarrollados, comprobando su eficiencia para la reducción de la respuesta de estructuras sometidas a terremotos.

Los sistemas (a) y (c) son especialmente adecuados para el caso de estructuras bajas de alta frecuencia, para las cuales hay muy pocas soluciones en la literatura.

## Agradecimientos

Ambrosini D.

La gratitud es una virtud que pertenece o es parte de la virtud de la justicia y tiene 3 grados: 1) Reconocer que se ha recibido un beneficio para el que no teníamos ningún derecho; 2) Alabar y dar las gracias al bienhechor y 3) Recompensar de algún modo al bienhechor según las posibilidades. Corresponde ahora dar cumplimiento a los dos primeros grados de gratitud con el **Dr. Rodolfo Danesi**. A través del encuentro, organizado en el Instituto de Estructuras, de algún modo, también se concreta el tercer grado de gratitud, por intermedio de su esposa e hijos. Como fue reconocido en el año 2009, cuando se le otorgara el Doctorado Honoris Causa de la Universidad Nacional de Cuyo, el Dr. Danesi tuvo una trayectoria científica

y académica impar, con enormes frutos. Por ello, resulta conveniente distinguir el agradecimiento en dos planos: En el plano institucional y académico y en el plano personal.

**En el plano institucional y académico,** teniendo en cuenta que en el año 1985 se había creado por el gobierno nacional de entonces el Sistema Interuniversitario de Cuarto Nivel, el Dr. Danesi, cumpliendo un viejo anhelo e intuyendo que estaban las condiciones dadas, crea en 1986 la carrera de postgrado “Magister en Ingeniería Estructural”, poniendo a la Universidad Nacional de Tucumán a la cabeza de dicho plan. Para responder a la pregunta de porqué debemos agradecer este enorme hito en la educación universitaria argentina nos centraremos en dos aspectos: En primer lugar, los 10 jóvenes profesionales que comenzamos dicha carrera, no es que tuviéramos un “derecho” a que la misma existiera, sino que fue una oportunidad “gratuita” (no en el sentido económico) que tuvimos de realizar un postgrado en Ingeniería en Argentina. En segundo lugar, hay que situarse en la época que transitábamos. Los postgrados en Ingeniería en Argentina directamente no existían y los pocos máster y doctores o PhDs en Ingeniería que habían en el país habían realizado sus estudios en el exterior. Hoy en día es muy común encontrar Doctores en Ingeniería y eso es gracias a la semilla que, con enorme esfuerzo y dedicación, plantó el Dr. Danesi. Podría agregarse mucho más en este plano académico, sobre todo por los enormes frutos que dio aquella iniciativa. Dichos frutos, hoy derraman todo lo

recibido en distintas Universidades del país y del mundo, en Institutos de Investigación, empresas, CONICET, etc. En orden a la brevedad, solamente diremos que es un acto de profunda justicia reconocer y agradecer esta obra.

**En el plano personal,** si bien a lo largo de los años el Dr. Danesi supo honrarnos con su amistad, siempre fue para nosotros “el Dr. Danesi” más que “Rodolfo” reservado para sus amigos más cercanos. Eso es un pequeño ejemplo del enorme respeto que supo ganarse en nuestros corazones. Como “extranjero” llegado de Cuyo, me sorprendía la gran amabilidad, simpatía y don de gente de los tucumanos, pero lo del Dr. Danesi superaba mi imaginación. Para mencionar unos pocos ejemplos: Desde conseguirnos a varios estudiantes de otras provincias casas para vivir en Horco Molle; conseguir entradas para el concierto de Bruno Gelber hasta convencer a la distinguida Profesora Elba Castría para que nos diera clases de gimnasia jazz ¡en las mismas instalaciones del laboratorio de materiales! Por supuesto que estuvo también presente en algunos muy malos momentos personales que nos tocó pasar. Tan es así que con mi familia realmente sentíamos que el Dr. Danesi, Emma, Emmaría, Paulina y Rodolfito, como le decíamos entonces, eran nuestra familia en Tucumán. También nos tuvo bastante paciencia con algunos planteos “gremiales” que hacíamos de vez en cuando. Aquí también tendría cientos de cosas para decir, pero prefiero terminar solamente diciendo: Muchas gracias querido Dr Danesi.

## Referencias

**Abd-Elhamed A, Tolan M (2022).** Tuned liquid damper for vibration mitigation of seismic-excited structures on soft soil. *Alexandria Engineering Journal*, 61(12), 9583-9599.

**Ahmad S., K. Moin, R. Khan. (2022).** State-of-Art-Review: Latest Advancements in Seismic Isolation of Structures. *Civil Engineering and Architecture* 10(2): 567-583

**Bahrebar M., Kabir M., Zirakian T., Hajsadeghi M., Lim J. (2016).** Structural performance assessment of trapezoidally-corrugated and centrally-perforated steel plate shear walls. *Journal of Construct Steel Res*, 122, 584–594

**Barlek P, D. Ambrosini, B. Luccioni (2023).** Generalized friction panel: An innovative passive energy dissipation device for structures subjected to seismic loading”, *Engineering Structures*, Vol. 283, 15 May 2023, 115898

- Clemente P., Martelli A.** (2019). Seismically isolated buildings in Italy: State-of-the-art review and applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 471–487.
- Cuervo F., M. Domizio, D. Ambrosini** (2023). Dynamic Calibration of the Transverse Elastic Modulus of Shredded Rubber for Use in Seismic Isolation”. *Structural Engineering International*. Published online: 19 Dec 2023.
- Dimakogianni D, Dougka G., Vayas I.** (2015). Seismic behavior of frames with innovative energy dissipation systems (FUSEIS1-2). *Engineering Structures*, 90 83–95
- Domizio, M., Ambrosini, D., Campi, A** (2024). A novel tuned liquid damper for vibration control in high-frequency structures”,., *Engineering Structures*, Vol. 301, Feb. 2024, 117350.
- Giuseppe B., L. Guidi, G. Camarda, P. Sorrentino, A. De Luca.** (2023). Hybrid strategy for the seismic retrofitting of existing buildings through Base Isolation System. *Procedia Structural Integrity*. 44; 1292–1299
- Habieb A., G. Milani, T. Tavio.** (2018), Two-step advanced numerical approach for the design of low-cost unbonded fiber reinforced elastomeric seismic isolation systems in new masonry buildings, *Engineering Failure Analysis*, 90, 380–396.
- Lin K., Totoev Y., Liu H., Guo T.** (2015). In-Plane Behaviour of a Reinforcement Concrete Frame with a Dry Stack Masonry Panel. *Materials*, 9, 108, 1-17
- Mohebbi S., Mirghaderi S., Farahbod F., Sabbagh A., Torabian S.** (2016). Experiments on seismic behaviour of steel sheathed cold-formed steel shear walls clad by gypsum and fiber cement boards. *Thin-Walled Struct*, 104, 238–247
- Nakamura Y., K. Okada.** (2019). Review on seismic isolation and response control methods of buildings in Japan. *Geoenvironmental Disasters*. 6:7
- Palermo M., Trombetti T.** (2016). Experimentally-validated modelling of thin RC sandwich walls subjected to seismic loads. *Engineering Structures*, 119 95–109.
- Pandey D, Mishra S** (2018). Moving orifice circular liquid column damper for controlling torsionally coupled vibration, *Journal of Fluids and Structures*, 82, 357-374.
- Salvi J., F. Pioldi, E. Rizzi.** (2018). Optimum Tuned Mass Dampers under seismic Soil-Structure Interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 576-597
- Tang Z, Dong Y, Liu H, Li Z** (2022). Frequency domain analysis method of tuned liquid damper controlled multi-degree of freedoms system subject to earthquake excitation. *Journal of Building Engineering*. 48, 103910
- Totoev Y.** (2015). Design Procedure for Semi Interlocking Masonry. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9, 517-525
- Tsiavos A., N. Alexander, A. Diambra, E. Ibraim, P. Vardanega, A. Gonzalez-Buelga, A. Sextos** (2019), A sand-rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy in developing countries: Experimental investigation. *Soil Dyn. and Earthq. Engrn.*, 125, 1–13.
- Yang F, Sedaghati R, Esmailzadeh. E** (2022). Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review. *J. of Vibration and Control*, 28(7-8), 812-836.
- Zhang X., Qin Y., Chen Z.** (2016). Experimental seismic behavior of innovative composite shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 116 218–232.

Zhang H., C. Song, M. Wang, Y. Cheng, S. Yue, C. Wu. (2023). A geotechnical seismic isolation system based on marine sand cushion for attenuating ground shock effect: Experimental investigation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 168; 107854.

## AUTORES

AMBROSINI, Daniel ID  ORCID 0000-0002-9984-825X

DOMIZIO, Martín ID  ORCID 0000-0003-2877-2750

CAMPI, Andrés

CUERVO, Facundo

BARLEK, Pablo ID  ORCID 0000-0002-5077-064X

LUCCIONI, Bibiana ID  ORCID 0000-0003-2860-8117



REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

# Diseño basado en desempeño para el refuerzo de edificios escolares

PALAZZO, Gustavo Luis

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza  
Departamento de Ingeniería Civil - CeReDeReC  
[gpalazzo@frm.utn.edu.ar](mailto:gpalazzo@frm.utn.edu.ar)

## Resumen

Instituciones internacionales promueven en el sector educativo la resiliencia y una reducción de riesgos de desastres. En lo referente al riesgo sísmico la mayoría de los reglamentos mantienen su filosofía de diseño. Se conserva el objetivo de seguridad de vida para el terremoto de diseño, que implica daños importantes en la construcción, siendo posiblemente necesario su refuerzo o demolición. Si bien para edificios escolares se fija una demanda sísmica mayor (a efectos de esperar menores daños ante el sismo de diseño), no se establecen prescripciones para estimar de manera racional el daño probable en el edificio. Por ello, se propone en este trabajo analizar la situación internacional y nacional en relación con la infraestructura escolar, y proponer el diseño basado en desempeño para lograr edificios existentes más seguros. Luego del análisis mencionado, donde se destacan los inconvenientes de la filosofía de diseño actual, y la visión que se establece a nivel internacional, y nacional en relación con la respuesta de las escuelas frente a terremotos, se plantea sintéticamente el diseño basado en desempeño a efectos de promover escuelas seguras. En las conclusiones se destaca el análisis realizado, y se resalta el método de diseño propuesto como desarrollo factible.

**Palabras claves:** escuelas seguras, riesgo sísmico, diseño sísmico basado en desempeño.

## *Performance-based design for school building retrofit*

### **Abstract:**

*International institutions promote resilience and a reduction of disaster risks in the education sector. Regarding seismic risk, most regulations maintain their design philosophy. The objective of life safety for the design earthquake, which implies significant damage to the building, is retained, possibly requiring reinforcement or demolition. Although a higher seismic demand is set for school buildings (to expect lower damage in the design earthquake), no provisions are established to rationally estimate the probable damage in the building. Therefore, this work proposes to analyze the international and national situation regarding school infrastructure and propose performance-based design to achieve safer existing buildings. After the mentioned analysis, which highlights the drawbacks of the current design philosophy, and the international and national vision regarding schools' response to earthquakes, performance-based design is synthetically proposed to promote safe schools. The conclusions emphasize the analysis conducted and highlight the proposed design method as a feasible development.*

**Keywords:** safe schools, seismic risk, performance-based seismic design

## Introducción

En la comunidad internacional, los edificios escolares tienen una consideración especial. Se busca lograr que la infraestructura escolar (nueva o existente) alcance la condición de “escuela segura” frente a los diversos riesgos que pueden enfrentar estas comunidades educativas.

En lo que respecta al riesgo sísmico, el reglamento argentino respectivo también hace una consideración especial para las construcciones escolares. La incluye en un grupo donde la demanda sísmica se mayor en un 30% respecto de la demanda para edificaciones de uso común. Se espera con ello que, ante la ocurrencia del denominado sismo de diseño, estas construcciones especiales presenten un menor daño.

En este trabajo se analiza la situación antes planteada, mostrando deficiencias en el procedimiento de evaluación y diseño del reglamento argentino. Además, se propone el diseño basado en desempeño como un procedimiento más racional para asegurar determinados niveles de daño en una construcción, según diversos niveles de demanda sísmica.

Para fundamentar la hipótesis anterior, en las secciones siguientes se analiza: (i) el nivel de desempeño que para el sismo de diseño está previsto en el reglamento argentino; (ii) la visión internacional sobre la reducción de riesgo y el desarrollo de la resiliencia en el ámbito de la educación, (iii) la visión general de Argentina en relación con la reducción de riesgo, y la consideración en particular que se hizo en el país para los edificios escolares (según el plan 2024 – 2030); (iv) la caracterización de los edificios escolares en una zona del país con la mayor peligrosidad sísmica, y algunas estrategias de refuerzo que se han implementado; y (v) la metodología de diseño basado en desempeño que podría implementarse para lograr el objetivo de respuesta propuesto en el país para los edificios escolares.

## Nivel de desempeño previsto en el reglamento argentino

El Reglamento INPRES – CIRSOC 103 (2018) indica en sus objetivos que sus prescripciones se establecen con el propósito principal de evitar el

colapso total o parcial de la construcción, y evitar pérdidas de vida. No se establece como objetivo limitar los daños ni mantener las funciones de las construcciones luego de la ocurrencia de un terremoto.

Se destaca también en los comentarios que está admitido en el Reglamento la posibilidad de daños para el sismo de diseño, que es el que queda definido por los espectros establecidos en el Capítulo 3 del mismo. Así, se pueden esperar daños estructurales y no estructurales para el sismo de diseño, porque el Reglamento admite comportamiento inelástico de las estructuras, y acepta deformaciones que pueden ocasionar también daños en componentes no estructurales.

Para sismos más intensos que el de diseño, se agrega en los comentarios, se pretende que la probabilidad de colapso de las construcciones sea baja, aunque puedan quedar gravemente dañadas. Se enfatiza que aún para sismos relativamente frecuentes, en muchas construcciones es imposible evitar los daños o garantizar la ausencia de los mismos. Así es que el Reglamento pretende dar un alto grado de protección a la vida, aunque con daños estructurales o no estructurales. El objetivo del reglamento es entonces establecer los requisitos mínimos para proporcionar razonable y prudente seguridad de vida.

Por otra parte, se considera necesario que ciertas construcciones soporten sismos intensos con menos daños que otras; son aquellas que, por su ocupación o función son instalaciones esenciales para la comunidad. Es por eso que las construcciones se clasifican por su destino, y se les asigna un sismo de diseño de intensidad variable según el mismo.

En el caso de los edificios considerados en este trabajo el Reglamento los incluye en el grupo A, que son las construcciones o instalaciones cuyo colapso tiene gran repercusión debido a la ocupación o el uso; o construcciones cuyo contenido es de gran valor o de gran importancia pública; o construcciones de uso público de más de 300 m<sup>2</sup> y que permitan la presencia de más de 100 personas. Para estos edificios se asigna un factor de riesgo de 1,3; mientras que para construcciones del grupo B ese factor de riesgo es igual a 1,0 (construcciones destinadas a vivienda unifamiliar o multifamiliar; hoteles, comercios e industrias no incluidos en el grupo A). Por lo tanto, el sismo de

diseño para edificios escolares tendrá ordenadas espectrales un 30 % mayor que el sismo de diseño para edificaciones del grupo B.

No queda cuantificado en el Reglamento el menor daño que se produciría en las construcciones del grupo A, respecto a las construcciones del grupo B si ocurriera el sismo de diseño previsto para estas últimas. Tampoco se indica cómo se verifica que la probabilidad de colapso de los edificios será baja para sismos mayores al de diseño.

Es importante resaltar que la mayor parte del Reglamento está referido a construcciones nuevas. Solo se tiene un capítulo, el 11, que en 8 páginas establece requisitos para las construcciones existentes. En este capítulo se clasificada a las construcciones según la importancia de la obra actual, la calidad sismorresistente de la obra primitiva y la capacidad sismorresistente de la misma, para luego establecer las exigencias y comprobaciones que deben realizarse, así como las excepciones al reglamento que pueden aceptarse. Este capítulo del Reglamento mantiene las especificaciones del Código de Construcciones Sismorresistente de la Provincia de Mendoza (1987). Se destaca la falta de actualización del mismo, y las limitaciones en sus especificaciones, si se lo compara con la norma americana para construcciones existentes ASCE / SEI 41 (2023), recientemente actualizado, y con más de 300 páginas.

### Nivel de desempeño previsto para edificios escolares a nivel internacional

Importantes organizaciones como UNESCO, UNICEF, Naciones Unidas y el Banco Mundial, han formado la Alianza Global para la Reducción de Riesgos de Desastres y la Resiliencia en el Sector Educativo - GADRRRES. Su visión y plan de acción lo han concretado en el recientemente actualizado Marco Integral de Seguridad Escolar 2022-2030 (2022). En este documento se consideran todos los riesgos asociados a la vida escolar, vinculando a los responsables de la gestión escolar, a la comunidad educativa y a los responsables de los edificios escolares. En lo referente a las instalaciones escolares existentes, se establece que deben hacerse sistemáticamente más seguras. Así, las escuelas existentes inseguras deben ser identificadas, y luego mejoradas o reemplazadas

(incluyendo todas las instalaciones que poseen). Las autoridades educativas deben promover el mantenimiento rutinario y la mitigación no estructural, a efectos de aumentar la seguridad y protección de los ocupantes de estos edificios, y de evitar pérdidas económicas.

### Nivel de desempeño previsto para edificios escolares en Argentina para el período 2024 – 2030.

Por ley Ley 27.287/2016 se creó en Argentina el Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil – SINAGIR. Este organismo tuvo la tarea de coordinación y supervisión del diseño del Plan Nacional para la Reducción del Riesgos de Desastre 2024-2030 y su posterior implementación (plan que continua al anterior con desarrollo 2018 – 2023). Este plan establece la planificación de políticas públicas en materia de gestión integral del riesgo, y debería ser una herramienta fundamental para la reducción de riesgos, el manejo de la crisis y la recuperación pos-desastre. Se han definido en él cinco prioridades, así como los resultados esperados hacia 2030 para cada una de ellas. Estas prioridades son: comprender el riesgo de desastres; fortalecer la gobernanza de la gestión del riesgo de desastres; invertir en la reducción de riesgo de desastres para la resiliencia; aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz; y “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción. Además, establece veintiocho objetivos nacionales estratégicos, e incluye una matriz con cincuenta y cuatro objetivos nacionales específicos, que se operativiza en ciento nueve indicadores de cumplimiento. Los terremotos son uno de los diecinueve ejes temáticos y transversales. En este plan se define un objetivo general por cada eje y un total de ciento dieciséis objetivos específicos.

El desafío hacia 2030 que se propone este plan es forjar una cultura de la prevención de riesgos de desastres, que permita llevar a cabo las medidas necesarias para lograr reducir y mitigar los riesgos.

Como objetivo general para la amenaza relativa a terremotos, el plan se propone mejorar la reunión, transmisión y procesamiento de información sísmica, y promover la construcción de estructuras

y viviendas resilientes. Entre los objetivos específicos, y en relación con este trabajo, se busca concientizar a las personas tomadoras de decisión a fin de promover las políticas públicas en prevención sísmica efectiva. Y entre las propuestas federales se establece: elaborar un plan provincial de prevención sísmica y mantenerlo actualizado; identificar las zonas vulnerables ante este tipo de amenaza ponderando el grado de afectación específica; y contar con un plan de mantenimiento de estructuras vitales que deben permanecer operativas durante un sismo (hospitales, escuelas, cuarteles de policía, etc.).

En este último párrafo el plan establece el nivel de desempeño que se espera para los edificios escolares, que es el de ocupación inmediata luego de un sismo, aunque no se especifica el nivel de demanda para este nivel de respuesta.

### Características generales de los edificios escolares en zonas argentinas de alta peligrosidad sísmica

El oeste argentino presenta las zonas del país con mayor peligrosidad sísmica. En el caso particular de la provincia de Mendoza, se tienen aproximadamente 1.400 edificios escolares, de los cuales unos 900 han sido diseñados y construidos con reglamentos antiguos o sin ellos. Cabe aclarar que el primer código con prescripciones sísmicas en esta provincia es de 1970, y el código siguiente con una filosofía de diseño moderno es de 1987. Por lo tanto, muchos de los edificios en consideración podrían ser vulnerables ante terremotos.

En general las construcciones para escuelas tienen uno o dos niveles, con estructura de pórticos de hormigón armado y muros de mampostería encadenada; con fundaciones superficiales.

No se ha realizado en la provincia la evaluación de deficiencias y patologías de todas estas construcciones, a efectos de determinar las principales vulnerabilidades.

En los últimos años, varias escuelas han sido reforzadas. Se ha intervenido en esos edificios porque el nivel de deterioro era visible, o por el insistente reclamo de los integrantes de la comunidad educativa. En cada caso se ha contratado a

distintos estudios de ingeniería, que han propuesto diversas estrategias de refuerzo. En la Figura 1 se muestran escuelas reforzadas con diversas estrategias. Se tienen también construcciones iguales, pero intervenidas en años diferentes y con profesionales y propuestas distintos.



**Figura 1 (a):** Algunas estrategias de refuerzo sísmico en es escuelas de Mendoza (columnas confinadas con polímeros reforzados con fibras- FRP).



**Figura 1 (b):** Algunas estrategias de refuerzo sísmico en es escuelas de Mendoza (columnas cortas confinadas con FRP).



**Figura 1 (c):** Algunas estrategias de refuerzo sísmico en es escuelas de Mendoza (transformación de muros de mampostería encadenada en muros reforzados con armadura distribuida)



**Figura 1 (d):** Algunas estrategias de refuerzo sísmico en es escuelas de Mendoza (riostros metálicas en planos de pórticos)

Los refuerzos desarrollados han sido mayoritariamente diseñados y ejecutados con el Reglamento INPRES – CIRSOC antes mencionado. Entonces, en caso de un sismo de diseño, los edificios mejorados por el refuerzo igual podrían tener daños importantes, impidiendo que se continúe con la función educativa.

### El diseño basado en desempeño

El diseño basado en desempeño consiste en especificar distintos niveles de daño admisible para la estructura y los elementos no estructurales, según diversos niveles de demandas sísmicas. Esto puede hacerse con una matriz como la que se muestra en la Figura 2.

Por ejemplo, según el Reglamento INPRES – CIRSOC 103 – Parte I (2018), para construcciones del grupo B correspondería el nivel identificado con “k” en la Figura 2. Es decir, un nivel de seguridad de vida (daño moderado) para el sismo de diseño. Para las construcciones del grupo A, como son las escuelas, el daño debería ser menor, pero no está cuantificado en el Reglamento.

A efectos de lograr el nivel de desempeño estimado en el Plan Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres de la República Argentina, se podría proponer para estas construcciones un nivel de desempeño de ocupación inmediata para el sismo de diseño – daño leve – (identificado con “j” en la Figura 2), y un nivel de desempeño de seguridad de vida para el máximo terremoto considerado – daño moderado – (identificado con “o” en la Figura 2).

		Niveles de daño			
		Despreciable	Leve	Moderado	Severo
Niveles de Sismo	Ocasional (43 años)	a	b	c	d
	Servicio (72 años)	e ←	f	g	h
	Diseño (475 años)	i	j ←	k	l
	Máximo Considerado (970 años)	m	n	o ←	p
		Operacional (O)	Ocupación Inmediata (OI)	Seguridad de Vida (LS)	Prevención de Colapso (CP)

**Figura 2:** Matriz para definir niveles de desempeño sísmico (fuente: Código Modelo Sísmico para América Latina y el Caribe, 2022).

Por supuesto, cada nivel de desempeño implica conocer distintos niveles de demanda (en el reglamento actual solo se especifica el sismo de diseño), y cuáles son las magnitudes de control (y sus límites) para asegurar el nivel de daño que se estima para determinado nivel de desempeño.

Es necesario entonces contar con prescripciones reglamentarias para este procedimiento. Podría seguirse la norma americana antes

mencionada ASCE /SEI 41 (2023), que está desarrollada con esta filosofía. También podría aplicarse esta metodología con las especificaciones del Código Modelo Sísmico para América Latina y el Caribe (2022).

Una descripción detallada de esta metodología y su evolución se encuentra en Fardis (2010) y en Vielma et al. (2023).

Se destaca también que ya en la práctica profesional de la región este procedimiento es aplicado, como por ejemplo lo hace SISMOTECH, que es una empresa mexicana de diseño, fabricación, transporte y montaje de estructuras resilientes de acero (<https://sismotech.com.mx/>).

## Conclusiones

El Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes establece para el sismo de diseño un nivel de seguridad de vida, y una probabilidad de colapso baja para sismos mayores. Sin embargo, en la aplicación de sus prescripciones estos niveles de desempeño no se cuantifican para verificar su cumplimiento.

Para edificios escolares se establece un sismo de diseño un 30 % mayor que el sismo de diseño para edificaciones comunes, pero tampoco se cuantifica el menor daño que se produciría en las escuelas respecto a esas construcciones. Por otra parte, limitadas indicaciones son dadas en el Reglamento para construcciones existentes, las cuales además no se actualizan por más de 25 años.

A nivel internacional, importantes entidades vinculadas a través de la alianza GADRRRES han desarrollado un plan general para la reducción del riesgo de desastres y la resiliencia en el ámbito educativo. Este plan implica la consideración del riesgo en forma sistémica, y su reducción con la participación de los distintos actores que se relacionan con el ámbito escolar. Se han propuesto acciones específicas para lograr edificios escolares existentes más seguros.

Argentina tiene un organismo para la gestión integral del riesgo (SINAGIR), que ha

formulado un plan nacional a desarrollar en esta temática en el período 2024 a 2030. Para la amenaza sísmica se han fijado objetivos relacionados con la prevención y con la identificación de zonas vulnerables. En particular, para los edificios escolares se busca que permanezcan operativos frente a una determinada demanda sísmica (que no se especifica en el documento).

Hasta el presente no se ha realizado en el país una evaluación sísmica general de la infraestructura escolar, especialmente en el oeste de Argentina (donde se encuentran las zonas de mayor peligrosidad sísmica). Por lo tanto, no se conocen las vulnerabilidades que presentan estas construcciones, ni tampoco se han podido priorizar las mismas, a efectos de establecer un plan de reducción en el tiempo.

Si se han reforzado sísmicamente varios edificios de escuelas (por lo menos en la provincia de Mendoza), pero sin una planificación global del problema, que permita aplicar estrategias previamente definidas como óptimas para un mismo tipo de deficiencia o patología. Además, por aplicación del diseño del refuerzo con la filosofía del Reglamento actual, el edificio reforzado podría presentar daños ante la ocurrencia del terremoto de diseño.

Para lograr un nivel de daño en escuelas según la previsión de Plan Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (ocupación inmediata para el sismo de diseño) es necesario aplicar la metodología de diseño basado en desempeño.

Deberá la comunidad con anterioridad definir cuáles son los niveles de desempeño que se consideran aceptables para los edificios escolares del país. Luego, y tomando construcciones clasificadas como más vulnerables del universo de escuelas evaluadas, habrá que determinar las estrategias específicas de refuerzo para esos edificios, analizando los costos que implican esas intervenciones.

En base a lo discutido en este trabajo, se estima que la aplicación del Reglamento actual no es suficiente para asegurar el desempeño que se ha previsto en el plan argentino mencionado.

## Bibliografía

**ASCE** (2023). ASCE – SEI 41 – Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings.

**Fardis, M.** (2010). Advances in Performance-Based Earthquake Engineering. Springer.

**GADRRRES** (2022). Marco Integral de Seguridad Escolar 2022-2030.

**INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN – CHILE** (2022). Código Modelo Sísmico para América Latina y el Caribe.

**INTI** (2018). INPRES – CIRSOC 103 – Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes, Parte 1: Construcciones en general.

**SINAGIR** (2023). Plan Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres de la República Argentina 2024 a 2030.

**Vielma Quintero, J. C.; Vielma, J. C. y Carvalho Walbaum, J. F.** (2023). Evaluación de la respuesta sísmica de un edificio con base en el diseño por desempeño. Monografías de Ingeniería Sísmica. Monografía CIMNE IS-80 2023. Editor A.H. Barbat.

## AUTOR

**PALAZZO**, Gustavo Luis ID  ORCID 0009-0006-6327-967X

Ingeniero en Construcciones de la Universidad Tecnológica Nacional. Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad Nacional de Cuyo. Magister en Ingeniería Estructural de la Universidad Nacional de Tucumán. Doctor en Ingeniería de la Universidad Tecnológica Nacional. Profesor de la Universidad Tecnológica Nacional. Investigador CeReDeReC. Integrante del estudio SOLIDUS – Ingenieros Consultores.

E-mail: [gpalazzo@frm.utn.edu.ar](mailto:gpalazzo@frm.utn.edu.ar)



REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

# Aspectos dinámicos en la obra de João Filgueiras (Lelê): El caso de las pasarelas peatonales

Thiago Gonçalves MOREIRA<sup>1</sup>, Graciela N. DOZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental  
graciela@unb.br

## Resumen

La obra del arquitecto brasileño João Filgueiras Lima se destaca por sus soluciones imaginativas diseñadas para satisfacer las necesidades de los futuros usuarios, la máxima eficiencia lumínica y el cuidado del confort térmico, centrándose en técnicas innovadoras que conducen a bajos costes. Con una fuerte preocupación social, sus obras abarcan desde hospitales, escuelas, universidades, hasta pasarelas peatonales. Con relación a las pasarelas, es importante mencionar la necesidad de abordar los aspectos dinámicos de las mismas, para que no estén sometidas a fuertes vibraciones al ser atravesadas por peatones. Así, el objetivo de este trabajo es analizar una de las pasarelas que diseñó, ubicada en la ciudad de Salvador y que tiene características comunes a otras. Los resultados obtenidos numéricamente en términos de aceleraciones generadas por los individuos que cruzan la pasarela se analizan cuidadosamente a la luz de diversos códigos nacionales e internacionales. Este estudio complementa otros realizados en una pasarela ubicada en la ciudad de Brasília, diseñada por el mismo arquitecto, que indicó la posibilidad de vibraciones excesivas en la misma.

**Palabras clave:** Pasarelas, Vibraciones, Cargas generadas por personas.

## ***Dynamic Aspects in the Work of João Filgueiras (Lelê): The Case of Pedestrian Footbridges***

### ***Abstract***

*The work of Brazilian architect João Filgueiras Lima stands out for its imaginative solutions designed to satisfy the needs of future users, maximum lighting efficiency and care for thermal comfort, while focusing on innovative techniques that lead to low costs. With a strong social concern, his architectural projects range from hospitals, schools, universities, to footbridges. Focusing on footbridges, it is important to mention the need to pay attention on dynamic aspects of them to avoid strong vibrations when crossed by pedestrians. Thus, the focus of this work is the analysis of one of the footbridges he projected, located in the city of Salvador and which has similar characteristics of others. The results numerically obtained in terms of accelerations generated by people crossing the walkway are carefully analyzed taking account of different national and international standards. This study complements others carried out on a footbridge located in the city of Brasília, designed by the same architect, which indicated the possibility of excessive vibrations in it.*

**Keywords:** Footbridges, Vibrations, Loads generated by people

## Introducción

João da Gama Filgueiras Lima, también llamado Lelé, fue un arquitecto brasileño conocido por los proyectos arquitectónicos que desarrolló que combinaban arte y tecnología. La mayoría de sus obras se concentran en los estados de la región Nordeste y en Brasilia y se destacan por las técnicas innovadoras utilizadas y el cuidado estético.

Las obras arquitectónicas de Lelé se caracterizan especialmente por la búsqueda de la racionalización e industrialización de la arquitectura. Durante su carrera propuso métodos y procesos de prefabricación de elementos constructivos nunca vistos ni utilizados en el país. La forma en que se utilizaba la **argamasa armada** (técnica que se caracteriza por la disposición de armaduras de malla de acero sobre elementos finos realizados con mortero), en particular, y el acero en sus obras era un hecho que preocupaba a los ingenieros. El uso de la **argamasa armada** de mínimo espesor para las piezas prefabricadas del suelo y del techo, que además de ser abovedada, era colorida, y el diseño extremadamente elegante de los pilares de hormigón en forma de hongo se combinaron para crear un ambiente rejuvenecedor, sugerente y optimista. Entre las innumerables obras de Lelé, que incluyen hospitales, escuelas universidades y diversos edificios públicos, se destacan los puentes peatonales.

Estas pasarelas, presentes en el Distrito Federal y en el estado de Bahía, se caracterizan por módulos de fácil construcción para ser utilizados en diversas pasarelas del país. Se puede observar que los distintos vanos están sostenidos por columnas en formas de hongos de hormigón. Esas pasarelas se caracterizan por el uso de módulos metálicos, que son de fácil construcción y permiten un rápido montaje.

La primera pasarela diseñada por Lelé fue en la región de Salvador, ubicada en la Avenida Paralela, cerca de Imbuí, en junio de 1987. La ligereza de la pasarela definitivamente conquistó a los habitantes de Salvador. Otra pasarela destacada diseñada por João Filgueiras es la ubicada en la ciudad de Brasilia, sobre el tramo EPIA, Cruzeiro Novo/CEASA, en la carretera BR 040, que cuenta con cuatro vanos inclinados (rampas de acceso) y cuatro vanos horizontales, apoyados en columnas en forma de hongos de hormigón.

Un aspecto importante en relación a las pasarelas es que al ser estructuras ligeras y muy flexibles, se caracterizan, desde el punto de vista dinámico, por bajas frecuencias. Este dato es especialmente importante si se observa que estarán sometidos principalmente a cargas dinámicas, generadas por personas que caminan o corren. Aunque no hay consenso entre los investigadores sobre cómo modelar esta carga, todas las propuestas trabajan con funciones periódicas y reconocen que estas cargas también se caracterizan por tener bajas frecuencias. Por lo tanto, la posibilidad de observar vibraciones excesivas es alta y existen varios reportes de problemas de este tipo en la literatura, Živanović (2005).

Por otro lado, la falta de normas brasileñas que aborden el tema agrava el problema en Brasil. Así, considerando el interés que despierta la obra del reconocido arquitecto, este trabajo analiza, desde un punto de vista dinámico, una de las pasarelas que diseñó y que tiene características comunes a otras presentes en varias ciudades de Brasil. Los resultados obtenidos numéricamente en términos de aceleraciones generadas por los individuos que cruzan la pasarela se analizan cuidadosamente a la luz de diversas normas nacionales e internacionales. Este estudio complementa otros realizados en una pasarela ubicada en la ciudad de Brasilia, diseñada por el mismo arquitecto, que indicó la posibilidad de vibraciones excesivas en la misma, Gomes, Ávila y Doz (2007), Gomes, Ávila y Doz (2008) y Silva et al. (2008).

## Formulación del problema

Con el aumento de la resistencia media de los materiales utilizados en la construcción de las pasarelas, los elementos estructurales se volvieron más leves y esbeltos. Sin embargo, es común observar problemas de vibraciones excesivas en estas estructuras, provocando problemas de confort e incluso colapso estructural.

Cuando la frecuencia de una carga (en este caso, provocada por la actividad humana) coincide con la frecuencia de un sistema estructural, se produce un aumento significativo de las vibraciones estructurales y el sistema entra en resonancia. Tanto en sistemas amortiguados como no

amortiguados, el aumento de las oscilaciones es tal que lleva al colapso de la estructura, fenómeno que siempre debe evitarse.

El caso más emblemático que ilustra los problemas de vibraciones excesivas en las pasarelas se refiere a la pasarela Millennium de Londres, que cruza el río Támesis.

Inaugurada en junio de 2000, presentaba fuertes oscilaciones, principalmente laterales, cuando una multitud caminaba sobre él. El movimiento observado, llamado *lock in*, es producto de la sincronización de los pasos que dan las personas. Como resultado, tuvo que permanecer cerrado durante dos años mientras se estudiaba un sistema de control estructural adecuado que absorbiera estas oscilaciones. La solución encontrada consistió en un sistema de amortiguadores pasivos, con 37 amortiguadores visco-fluidos y 29 pares de amortiguadores de masa sintonizados con la función de controlar el movimiento lateral, torsional y vertical. Después de la instalación de los dispositivos, no hubo más episodios de vibraciones excesivas, Venuti y Reggio (2018), Acito *et al* (2021).

Situaciones similares se observaron en otras pasarelas, lo que hizo necesario un estudio en profundidad sobre el tema. Incluso una conferencia internacional sobre el tema, Footbridges, comenzó en París en 2002 y se repite cada tres años, reuniendo a investigadores de todo el mundo.

**Tabla 1** - Valores medios de frecuencia de paso.

Movimiento	Frequência (Hz)			
	Wheeler (1982)	Bachmann e Ammann (1987)	J. Strásky (2005)	Gonilha et al. (2013)
Caminada lenta		~ 1,70		
Caminada normal		~ 2,00		
Caminada rápida		~ 2,30		
Corrida lenta		~ 2,50		
Corrida normal		-		
Corrida rápida		> 3,20		

En relación con las cargas que caracterizan la acción humana, como caminar, saltar, brincar, etc. Existe consenso en que se trata de una acción de carácter periódico caracterizada por bajas frecuencias como las observadas en la Tabla 1 organizada por Pereira (2017).

Según Živanović *et al* (2005), durante una caminata, un peatón produce una fuerza dinámica variable en el tiempo con componentes en tres direcciones principales: vertical, lateral horizontal y longitudinal horizontal. La fuerza vertical se considera la más importante de las tres ya que tiene la mayor magnitud. Sin embargo, este enfoque de modelo matemático simplificado ha sido discutido en los últimos años, dando paso a nuevos modelos que son más precisos y que describen mejor las características temporales, además de tener en cuenta la estructura humana y la interacción persona-humana Živanović (2015), Muhammad ZO, *et al.*(2018), Wang y Chen (2017). En esta presentación, se adoptó una formulación de carga simplificada ya que la discusión sobre su modelado no es el foco de este trabajo.

Para completar este ítem es necesario abordar la cuestión de las normas vigentes en Brasil y otras normas internacionales que tratan el tema. En general, abordan el tema a través de recomendaciones sobre frecuencias características mínimas o, las más avanzadas, estableciendo límites para aceleraciones máximas que buscan garantizar el confort del usuario.

Según la norma NBR 7188 (2013), que trata sobre carga móvil vial y peatonal en puentes, viaductos, pasarelas y otras estructuras, la carga a utilizar en las pasarelas debe estar uniformemente distribuida, de valor  $p=5,0 \text{ kN/m}^2$ , aplicada al piso y elementos de protección lateral en la posición más desfavorable. La misma norma también establece que se debe considerar, como medida para mitigar posibles impactos, una carga puntual horizontal de 100 kN, aplicada en el punto más desfavorable de la estructura de la pasarela. Finalmente, se recomienda que cuando se trabaje con pasarelas esbeltas y leves, sometidas a la acción del viento y a la acción dinámica de los peatones, principalmente en estructuras metálicas, mixtas, suspendidas o atirantadas, se verifique la estabilidad global mediante modelos dinámicos y que consideren el fenómeno de fatiga, sin especificar criterios más objetivos al respecto.

La NBR 8800 (2008) es una guía para el diseño de estructuras de acero y mixtas y aborda el problema de las vibraciones, especificando que en ningún caso la frecuencia natural de la estructura del piso puede ser inferior a 3 Hz. La norma establece que en pisos donde personas caminan habitualmente, como en casas y oficinas, la frecuencia natural más baja no puede ser inferior a 4 Hz. Según la misma norma, esta condición se cumple si el desplazamiento vertical total del suelo provocado por acciones permanentes, excluyendo la parte que depende del tiempo y acciones variables, no supera los 20 mm considerando vigas biapoyadas.

La NBR 6118 (2014), que trata de estructuras de hormigón, establece que la frecuencia crítica de las vías peatonales o de ciclistas es de 4,5 Hz y que la construcción debe tener una frecuencia vertical distante en 20% de este valor.

Aunque en este trabajo se comparan los resultados de las aceleraciones con las especificadas en códigos internacionales (AASTHO, 2009; BS 5400 (2006); EUROCODE 1: 2003, ISO 10137: 2007; SÉTRA/AFGC: 2006) no se abordará aquí su descripción detallada por limitaciones de espacio.

## Pasarela estudiada

El paseo peatonal analizado en este trabajo es el paseo 03 ubicado en la vía rápida de acceso al puerto de Salvador, en el Km 2,3, mostrado en la Figura 1. El paseo tiene una longitud total de 217 metros, con dos rampas de acceso inclinadas, y dos centrales, vanos horizontales, que descansan sobre 3 columnas metálicas recubiertas con una capa de argamasa armada y reforzado en forma de hongo.



**Figura 1:** Pasarela 03, Km 2,3 – Salvador, Bahia, Brasil.

Con base en los resultados obtenidos anteriormente en el análisis de la pasarela de Brasilia, en el que se optó por centrar la atención en el tramo inclinado, el más flexible y el que presentaba las vibraciones más significativas, se decidió trabajar ahora en uno de los tramos horizontales. Así, la sección estudiada corresponde a uno de los vanos centrales, horizontales, considerado apoyado en dos columnas que consta de dos retículas de 14 módulos separadas 2,20 m. Cada uno de los módulos está compuesto por dos barras transversales inferiores, una transversal superior, cuatro diagonales, dos cordones superiores, dos cordones inferiores y el piso de concreto. Las barras superiores e inferiores de las retículas, de sección metálica rectangular, tienen una longitud de 2,84 m. Las barras diagonales son de sección hexagonal y las barras transversales de sección rectangular. El ancho útil de la pasarela es de 2,20 m, siendo el ancho total de 2,60 m con el aporte de las barras inferiores. La pasarela tiene 2,3 m de altura y la cobertura tiene forma semicircular. El piso de hormigón armado tiene un espesor de 4 cm. En cuanto a las propiedades de los materiales, la Tabla 2 presenta los materiales utilizados para la modelación numérica del tramo de la pasarela 03, a 2,3 km de Salvador, así como los módulos de elasticidad y los respectivos pesos específicos de los materiales.

**Tabla 2–** Propiedades de los materiales utilizados en el modelo numérico de la pasarela

Material	Módulo de elasticidad (Pa)	Peso específico (Kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de Poisson
Acero ASTM A242		7900	0,29
Hormigón Armado		2548,42	0,2
Argamasa Armada		2242,61	0,2

La sección de la pasarela modelada y analizada en Ansys Workbench, contiene 16.715 nodos y 13.634 elementos. Para modelar los perfiles metálicos se utilizó el elemento BEAM188, para el suelo se utilizó el elemento SHELL181, y tanto la baranda como las ménsulas se consideraron como masa adicional mediante el elemento MASS21.

La opción de considerar los elementos no estructurales como una masa concentrada adicional se sustenta en el trabajo de Santos (2009) y Silva *et al* (2008).

## Resultados y discusión

Inicialmente se realiza el análisis modal y las primeras 4 frecuencias naturales, junto con las formas modales, se describen en la Tabla 3.

Las frecuencias obtenidas en este estudio son cercanas a las encontradas experimental y numéricamente en una pasarela de características similares ubicada en la ciudad de Brasilia estudiada por Gomes, Ávila y Doz (2007), Gomes, Ávila y Doz (2008) y Silva et al (2008). En esa pasarela, el tramo horizontal tenía una frecuencia fundamental de 2,58 Hz (flexión lateral con torsión), corroborado por estudios experimentales, mientras que el tramo inclinado, más flexible, indicó 2 Hz (flexión lateral con torsión), 2,89 Hz (flexión lateral) y 2,99 Hz (flexión vertical). Esta información permite que se considere válido el modelo aquí presentado y avanzar con análisis numéricos basados en él.

El análisis comparativo con normas indica que la primera frecuencia presenta valores inferiores a los establecidos por la NBR 6118 (2014).

Según AASHTO (2009) – Especificaciones guía para el diseño de puentes peatonales, la frecuencia fundamental vertical debe ser mayor a 3 Hz y

la frecuencia horizontal debe ser mayor a 1,3 Hz. Ambas especificaciones son cumplidas por la estructura en estudio. Un análisis similar se especifica en el EUROCODE (2003) – Acciones en estructuras – Parte 2: Cargas de tráfico en puentes en relación con la frecuencia fundamental vertical de la pasarela, mientras que la frecuencia fundamental horizontal debe ser superior a 1,4 Hz, ambas directrices se cumplieron.

ISO 10137 (2007) – Bases para el diseño de estructuras – Capacidad de servicio de edificios y pasarelas contra vibraciones da ejemplos de parámetros de diseño para frecuencias relacionadas con actividades humanas. Las actividades realizadas por personas en movimiento, como caminar y correr, tienen un rango de frecuencia de 1,8 Hz hasta aproximadamente 5 Hz considerando los dos primeros armónicos de la función periódica que la representa. Por lo tanto, los resultados encontrados en este estudio se encuentran dentro de este rango e indican la necesidad de estudios más profundos.

El guía SÉTRA/AFGC (2006) indica que la acción de caminar se caracteriza por frecuencias que oscilan entre 1,6 Hz y 2,4 Hz, mientras que la actividad de correr por frecuencias en el rango de

**Tabla 3 – Modos y frecuencias del trecho horizontal de la pasarela.**

Modo de Vibración	Frecuencia (Hz)	Descripción del modo de vibración	Vista en frente y en planta de la forma modal
1	2,4333	1º modo de flexión lateral con torsión	
2	3,6377	1º modo de flexión vertical	
3	4,1312	2º modo de flexión lateral	
4	4,9232	3º modo de flexión lateral	

2 Hz a 3,5 Hz. Considerando estas premisas, la primera forma modal podría ser excitada con la pasarela sometida a ambas actividades.

La norma BS5400 (2006) recomienda una frecuencia fundamental vertical superior a 5 Hz, recomendación que no se cumple, por lo que es necesario realizar un análisis dinámico utilizando una carga concentrada  $F$  que se desplaza por el vano principal con una velocidad constante, como se describe en las ecuaciones (1) y (2):

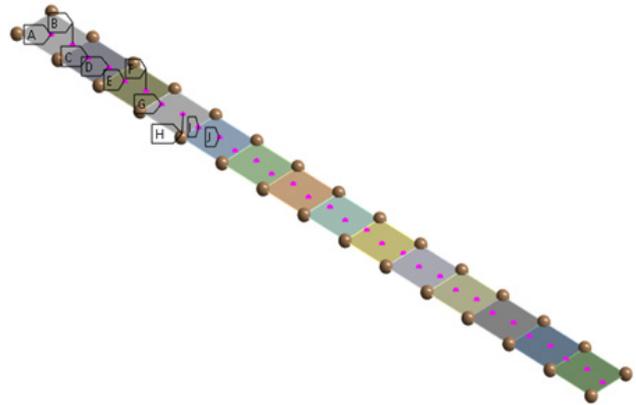
$$F = 180 \sin(2\pi f_0 T), \text{ resultado en N} \quad (1)$$

Con  $T$ , tiempo, en segundos y  $f_0$ , frecuencia fundamental de la estructura, en Hz.

$$v_t = 0,9 f_0, \text{ resultado en m/s} \quad (2)$$

Estas especificaciones se utilizaron para realizar el estudio considerando cargas externas, el cual se presenta a continuación. Nótese que la carga correspondiente a un peatón caminando o corriendo se distribuye temporal y espacialmente.

Inicialmente se consideraron las cargas inducidas sobre la estructura por una persona corriendo, situación que es bastante probable que ocurra. Estas cargas se distribuyen entre los dos pies, situados a 20 cm entre sí, y cambian de posición (puntos de color rosa en la Figura 2) y, a su vez, se transfieren a los nudos de las retículas metálicas. El tiempo de análisis fue de 15 segundos.



**Figura 2:** Distribución de la carga a lo largo de la pasarela.

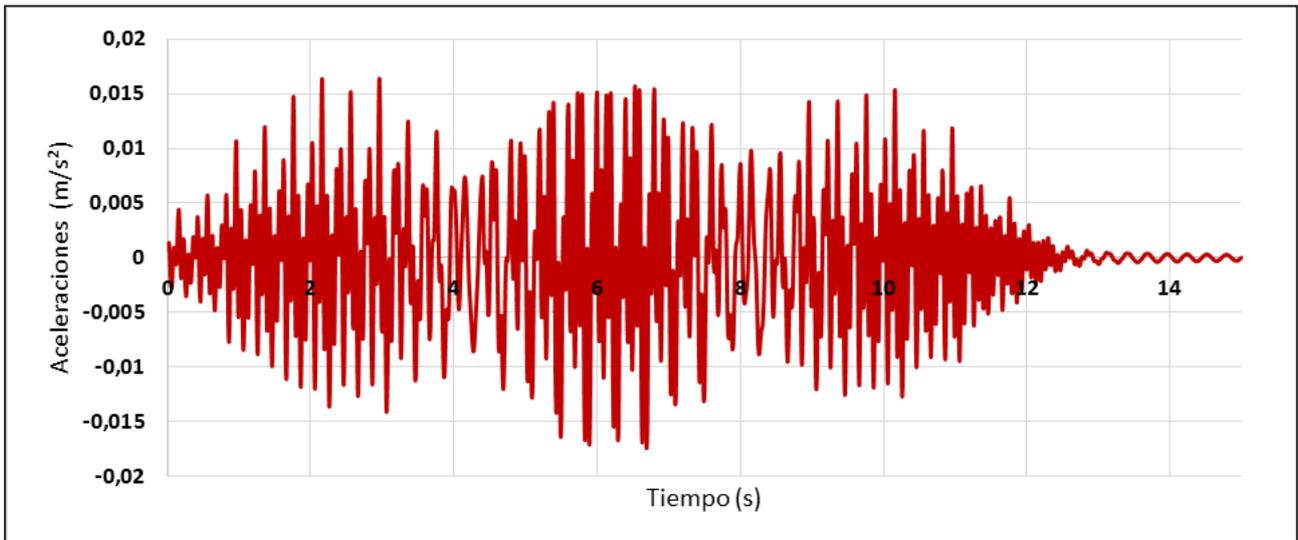
Las aceleraciones observadas en el nodo central de la pasarela resultantes de la aplicación de la carga se representan en la Figura 3.

Al analizar la Figura 3, se puede observar que la aceleración máxima fue de  $0,017 \text{ m/s}^2$ , resultado que cumple con los criterios BS5400.

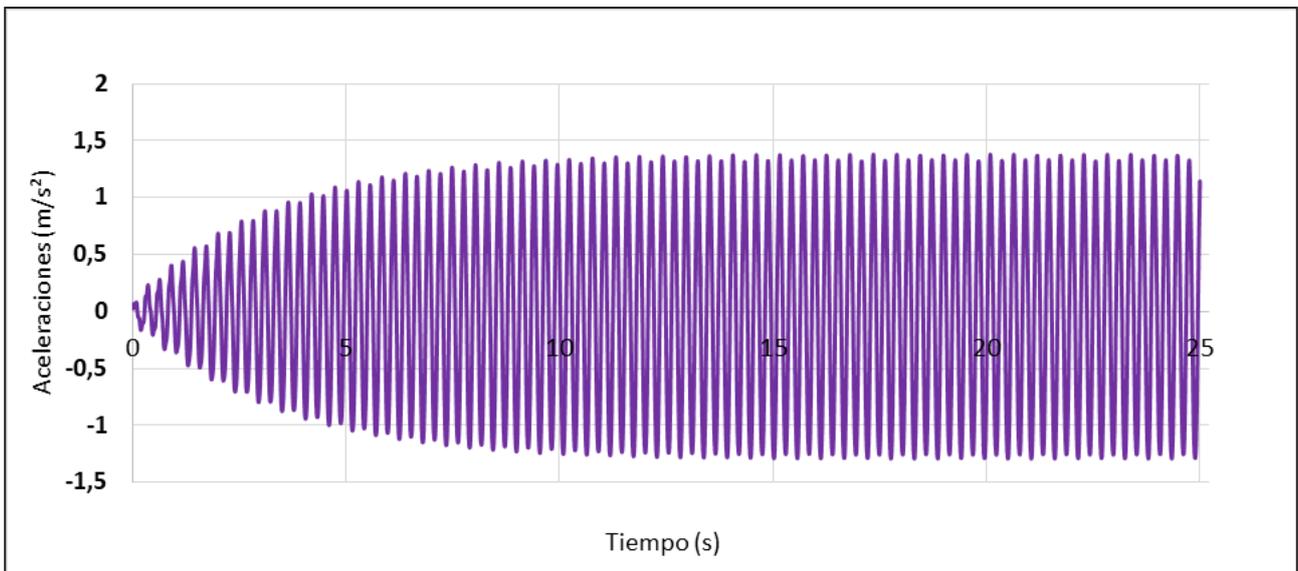
También se realizó una simulación con una persona saltando sobre el nodo central de la pasarela, lo que podría representar personas jugando o incluso un acto de vandalismo, lo cual es menos probable que ocurra. En este caso, la carga se aplica a un único punto, el central, utilizado también para registrar aceleraciones, y presenta sólo una variación temporal. Los resultados en términos de aceleraciones verticales se representan en la Figura 4. Se puede observar que la aceleración máxima fue de

**Tabla 4 –** Resumen de los análisis realizados a la luz de las normas nacionales e internacionales.

Norma	Situación	Comentarios
NBR 6118	No atiende a los requisitos	Frecuencia fundamental inferior a la estipulada
NBR 7188	No se aplica	No están previstas verificaciones acerca del confort de los usuarios
NBR 8800	Atiende a los requisitos	Frecuencia fundamental superior a la mínima exigida
AASHTO	Atiende a los requisitos	Frecuencias verticales y horizontales ok.
BS5400	Atiende a los requisitos	No atiende límites definidos de frecuencia. Atiende límites de aceleraciones
EUROCODE 1	Atiende a los requisitos	Frecuencias verticales y horizontales ok.
SÉTRA/AFGC	Atiende a los requisitos	Sin necesidad de análisis



**Figura 3:** Aceleraciones verticales en el punto central de la pasarela para una persona corriendo



**Figura 4:** Aceleraciones verticales registradas en el punto central de la pasarela

1,38 m/s<sup>2</sup>, superior a los valores máximos que cumplirían con las especificaciones de confort según BS5400 (2006).

De acuerdo con los resultados obtenidos, la Tabla 4 resume la situación general de la pasarela a la luz de las normas nacionales e internacionales.

Se puede observar que la pasarela en estudio sólo cumplió con los requisitos de la NBR 8800 respecto a las normas vigentes en Brasil, en cambio todas las normas internacionales aplicables tuvieron sus condiciones cumplidas.

Dado que las aceleraciones verticales encontradas en las simulaciones fueron inferiores a las encontradas en el estudio del tramo inclinado de la pasarela de la ciudad de Brasilia, no se consideró necesario abordar situaciones más desfavorables, como las resultantes del andar sincrónico o asincrónico de grupos de peatones por la estructura. En dicha estructura, luego de analizar diferentes configuraciones de carga y verificar que los niveles de aceleración superaban los máximos indicados por las normas, se estudió una propuesta de un sistema de

control de vibraciones mediante amortiguadores de masas múltiples sintonizados, propuesta que podría aplicarse a la sección inclinada de la pasarela presentada aquí.

## Conclusiones

Este trabajo abordó el estudio dinámico de una de las obras del arquitecto brasileño João Filgueiras, Lelê. La estructura elegida fue una pasarela ubicada en la ciudad de Salvador y el objetivo de este estudio fue complementar investigaciones anteriores ya realizadas en una pasarela similar en la ciudad de Brasilia.

El modelo numérico adoptado, que simula elementos no estructurales como masas adicionales, fue validado mediante los resultados del análisis modal. Las primeras frecuencias, considerando el intervalo crítico correspondiente y las respectivas formas modales obtenidas, fueron comparadas con resultados numéricos y experimentales obtenidos previamente en la pasarela de Brasilia. La similitud entre ellos permitió continuar trabajando con el modelo numérico de forma segura.

Las frecuencias obtenidas, en comparación con las normas vigentes en Brasil, podrían llevar a un sobredimensionamiento innecesario

de la pasarela para satisfacer la demanda de frecuencias naturales más altas, lo que a su vez podría hacer que el proyecto sea antieconómico en algunos casos.

Considerando los códigos internacionales, se puede observar que la pasarela presentó, en general, frecuencias que indican seguridad para los usuarios que desean transitarla.

En la evaluación de aceleraciones máximas se consideraron dos casos, el de una persona que corre considerando la variación temporal y espacial de las cargas inducidas, y el de una persona que salta. Los resultados obtenidos están dentro de los límites establecidos por las normas, en general. Sin embargo, cabe destacar que en el caso de personas corriendo se podrían percibir vibraciones elevadas dependiendo de la frecuencia de la actividad y del número de personas involucradas.

Estos resultados, sumados a otros obtenidos previamente en una pasarela ubicada en Brasilia, corroboran que las pasarelas diseñadas por João Filgueira tienen bajos niveles de vibración cuando son atravesadas por una persona. Los tramos más vulnerables son las rampas de acceso, que podrían vibrar significativamente al tratarse de grupos de peatones.

## Referencias

**AASHTO** (2009). LRFD Guide Specification for the Design of Pedestrian Bridges. [S.I.].

American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.

**Acito, M; Mastrangelo, R.; Magrinelli, E.; Simoncelli, M.** (2021) "Design strategies of vibration mitigation systems for an existing suspended footbridge". *Engineering Structures*, v.249.

**Associação Brasileira De Normas Técnicas.** (2008). Nbr 8800: Projetos De Estruturas De Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2013). ABNT NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.

**Associação Brasileira de Normas Técnicas** (2014). ABNT NBR 6118: Projetos de Estruturas de Concreto - Procedimentos.

**British Standards Association** (2006). BS 5400: Steel, concrete and composite bridges – Part 2: Specification for loads.

**EUROCODE** (2003). Basis of structural design. [S.I.]. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

**ISO 10137** (2007). Bases for design of structures—Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Geneva, Switzerland.

- Gomes, D. H. M., Avila, S. M., Doz, G. N.** (2007). “Estudo do Comportamento Dinâmico de uma Passarela de Pedestres da Cidade de Brasília”. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, v. 4/2, p. 39-56.
- Gomes, D. H. M., Avila, S. M., Doz, G. N.** (2008). Multiple tuned mass damper controlling vibrations of a footbridge. In: *Footbridge 2008*.
- Muhammad ZO., Reynolds P, Avci O, et al.** (2018) “Review of pedestrian load models for vibration serviceability assessment of floor structures”. *Vibration* 2(1):1–24.
- Pereira, S. P** (2017). “Desempenho dinâmico de sistemas estruturais de passarelas.” Dissertação de Mestrado, Publicação MTARH.DM-17A/17, p. 130, 2017. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Santos, I. C** (2009). “Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais.” Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM-010A/09, p. 136, 2009. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Silva, A. B., Doz, G. N., Brito, J. L., Pimentel, R. L.** (2008). Role of non-metallic components on the dynamic behavior of composite footbridges. In: *Footbridge 2008*, Porto.
- SÉTRA** (2006). *Footbridges – Assesment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Practical Guidelines*. [S.l.], 2006. Technical Department for Transport, Roads and Bridges Engineering and Road Safety, França.
- Venuti F., Reggio A** (2018) “Mitigation of human-induced vertical vibrations of footbridges through crowd flow control”. *Structural Control and Health Monitoring* 25(12).
- Wang J., Chen J** (2017) “A comparative study on different walking load models”. *Structural Engineering and Mechanics* 63(6): 847–856.
- Živanović S** (2015) Modelling human actions on lightweight structures: experimental and numerical developments. In: *MATEC web of conference: EVACES’15, 6th international conference on experimental vibration analysis for civil engineering*, vol. 24, Dübendorf, 19–21 October, p. 01005. Les Ulis: EDP Sciences
- Živanović, S., Pavic, A., Reynolds, P.** (2005). “Vibration serviceability of footbridge under human-induced excitation: A literature review.” In: *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74.

## AUTOR

MOREIRA, Thiago Gonçalves ID  0009-0000-2201-0144DOZ, Graciela N. ID  0000-0001-6428-4012

# Vientos descendentes extremos en el análisis y diseño de estructuras

RIERA, Jorge D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Profesor Invitado, PPGEC, Universidad Federal de Río Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. [jorge.riera@ufrgs.br](mailto:jorge.riera@ufrgs.br)

## RESUMEN

Debido a su menor frecuencia de ocurrencia, los vientos ocasionados por corrientes descendentes, también denominadas tormentas eléctricas, han recibido tradicionalmente una atención marginal en la literatura técnica, en comparación con los vientos causados por sistemas sinópticos. Esta situación es sorprendente, pues en los Estados Unidos de América, por ejemplo, las tormentas eléctricas son las responsables de la mayor parte del daño económico anual atribuido a causas naturales. La relevancia económica de dichos eventos es posiblemente mayor en países como Brasil, cuyos territorios son caracterizados por moderado o bajo riesgo sísmico. Este artículo describe la evolución del conocimiento, en la Ingeniería Estructural, de la relevancia y las correspondientes frecuencias de ocurrencia de fenómenos meteorológicos que causan vientos intensos en las capas inferiores de la atmósfera, incluyendo una propuesta para la determinación de la frecuencia de ocurrencia, así como las cargas inducidas en las estructuras por las corrientes descendentes.

**Palabras Claves:** Viento, Frecuencia de ocurrencia, Tormentas eléctricas, Cargas extremas.

## *Extreme downburst winds in structural engineering analysis and design*

### **Abstract**

*On account of their lower frequency of occurrence, downburst winds have traditionally received marginal attention in Engineering analysis and design, in comparison to winds caused by synoptic storms. This is rather surprising since in the USA, for instance, thunderstorms account for most of the annual economic damage attributed to natural causes. This unbalance is possibly more pronounced in countries like Brazil, that are characterized by low or moderate seismic risk. The paper discusses the evolution of engineering knowledge, relevance and corresponding frequencies of occurrence of different meteorological phenomena that cause extreme winds in the lower atmosphere, including a proposal to evaluate the frequency of occurrence as well as the loads resulting from downbursts, for purposes of structural analysis and design.*

**Keywords:** Wind effects, Frequency of Occurrence, Downbursts, Extreme Loads.

## Introducción

Con excepción de los tornados, que se consideran por separado, la carga de viento para el diseño estructural de edificios y otras estructuras generalmente se escala a la componente horizontal del vector de velocidad a 10 m de altura sobre el terreno abierto, definida como la velocidad del viento de referencia, independientemente del tipo de fenómeno meteorológico que origine el evento. Esta simplificación, aceptada a principios del siglo XX por todos los primeros códigos de viento de Europa, es válida sólo cuando el viento es el resultado de tormentas a escala sinóptica, comúnmente designadas por los meteorólogos como Sistemas de Presión Extendida (EPS). Los vientos fuertes, sin embargo, a menudo son causados por eventos no sinópticos, como ráfagas descendentes (tormentas eléctricas o vientos TS), que en las regiones templadas suelen constituir la causa más importante de velocidades extremas de vientos. **Riera y Nanni** (1989) y posteriormente **Riera et al** (1989) demostraron que las series anuales de vientos intensos EPS y TS registradas en estaciones meteorológicas brasileñas seleccionadas se caracterizan por tener diferentes distribuciones de probabilidades. Se encontró que las distribuciones de Tipo I presentan el mejor ajuste para la mayoría de las series anuales de vientos brasileños EPS y TS disponibles en ese momento, mientras que una distribución de Tipo II (Frechet) se ajusta mejor a las series mixtas (series combinadas). Esto se ilustra en las Figuras 1 y 2, que muestran los datos de las velocidades extremas anuales mixtas de viento registradas en dos estaciones aeroportuarias de Porto Alegre (Brasil), trazadas en papel probabilístico de Tipo I. La relación no es lineal en todo el campo de variación de X. Sin embargo, las ecuaciones lineales son válidas para valores pequeños y grandes de X, con un límite  $\xi_c$  entre ambos rangos que difiere ligeramente para las estaciones meteorológicas situadas en diferentes regiones. La transición puede ser modelada por la función logística  $f[\ln(X)]$ . Estableciendo  $\xi = \ln(X)$ , las ecuaciones resultantes son:

$$\text{Log } N(\xi) = (a_1 - b_1 \xi) f(\xi) + (a_2 + b_2 \xi) [1 - f(\xi)] \quad (1)$$

$$f(\xi) = \exp[-(\xi - \xi_c)/0.025] / \{1 + \exp[-(\xi - \xi_c)/0.025]\} \quad (2)$$

Adoptando por prueba y error un parámetro de ubicación  $\xi_c = 0,3$  para la función logística, conduce para Estación 1 y Estación 2 a los coeficientes  $a_1 = 46,802$  (42,569),  $b_1 = 2,907$  (2,486),  $a_2 = 43,934$  (34,440) y  $b_2 = 17,297$  (25,395).

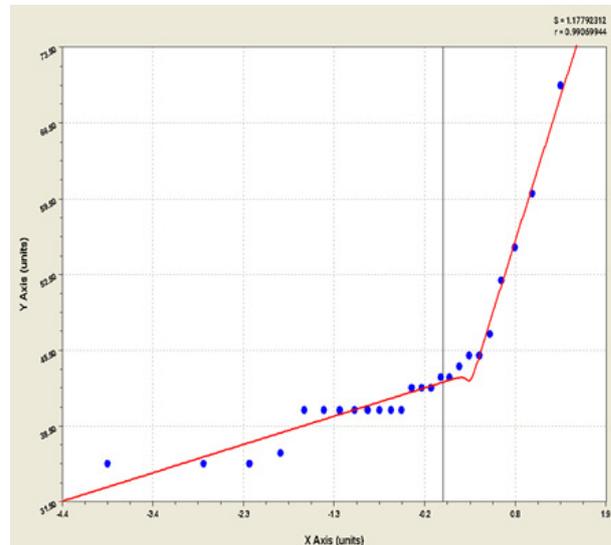


Figura 1. Velocidad de viento en estación 1.

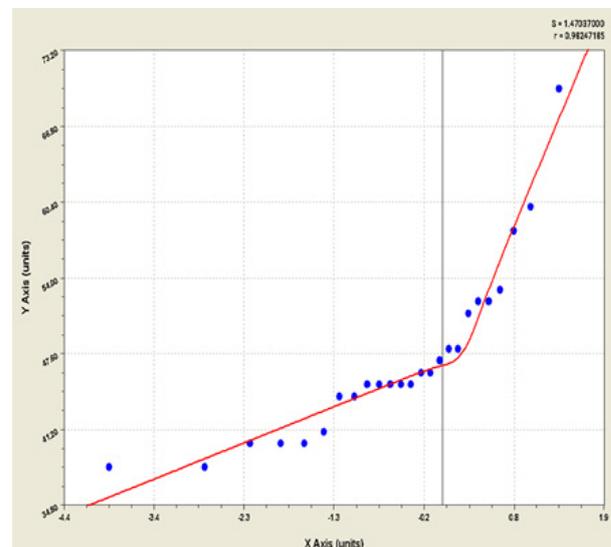
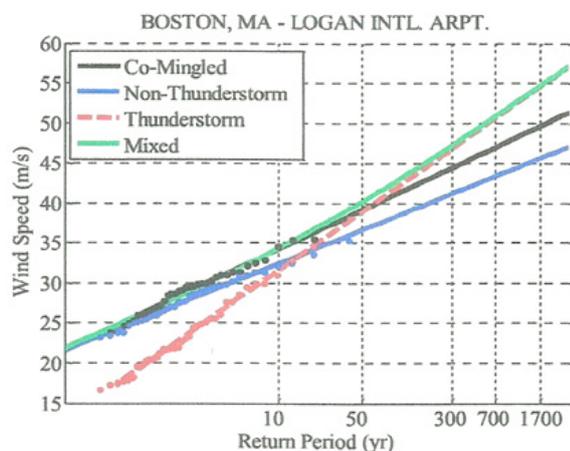


Figura 2. Velocidad de viento en estación 2

Los resultados de ambas estaciones, distantes a menos de un kilómetro entre sí, confirman que los vientos EPS y TS pueden modelarse mediante distribuciones de Tipo I. Las líneas rectas de la izquierda en ambos gráficos corresponden a eventos EPS, mientras que las líneas rectas de la derecha corresponden a

eventos TS seguramente transportados por tormentas EPS en las llamadas líneas de inestabilidad (squall lines).



**Figura 3.** Vientos “mixtos” (Boston, MA)

En el mapa de velocidades del viento del Código ASCE 7 2016, así como en la Norma AS / NZS 1170.2-2011 de Australia/Nueva Zelanda, observaciones similares llevaron a que consideraran los vientos TS por separado de los vientos EPS. La Figura 3 muestra un gráfico de las series de vientos EPS y TS registradas en el Aeropuerto Internacional Logan (Boston, MA), que también están modeladas satisfactoriamente por distribuciones de Tipo I, en las que la distribución TS tiene una pendiente más pronunciada y, por lo tanto, gobierna la velocidad del viento para fines de diseño en la región de baja probabilidad (**Letchford y Lombardo 2015**). **Vallis et al (2018)** y **Vallis (2019)** llegaron a conclusiones idénticas, quienes concluyen que los vientos extremos asociados a ráfagas descendentes se describen típicamente mediante distribuciones de Tipo I en las siete regiones geográficas propuestas para la revisión del Código de Vientos NBR 6123 de 1988.

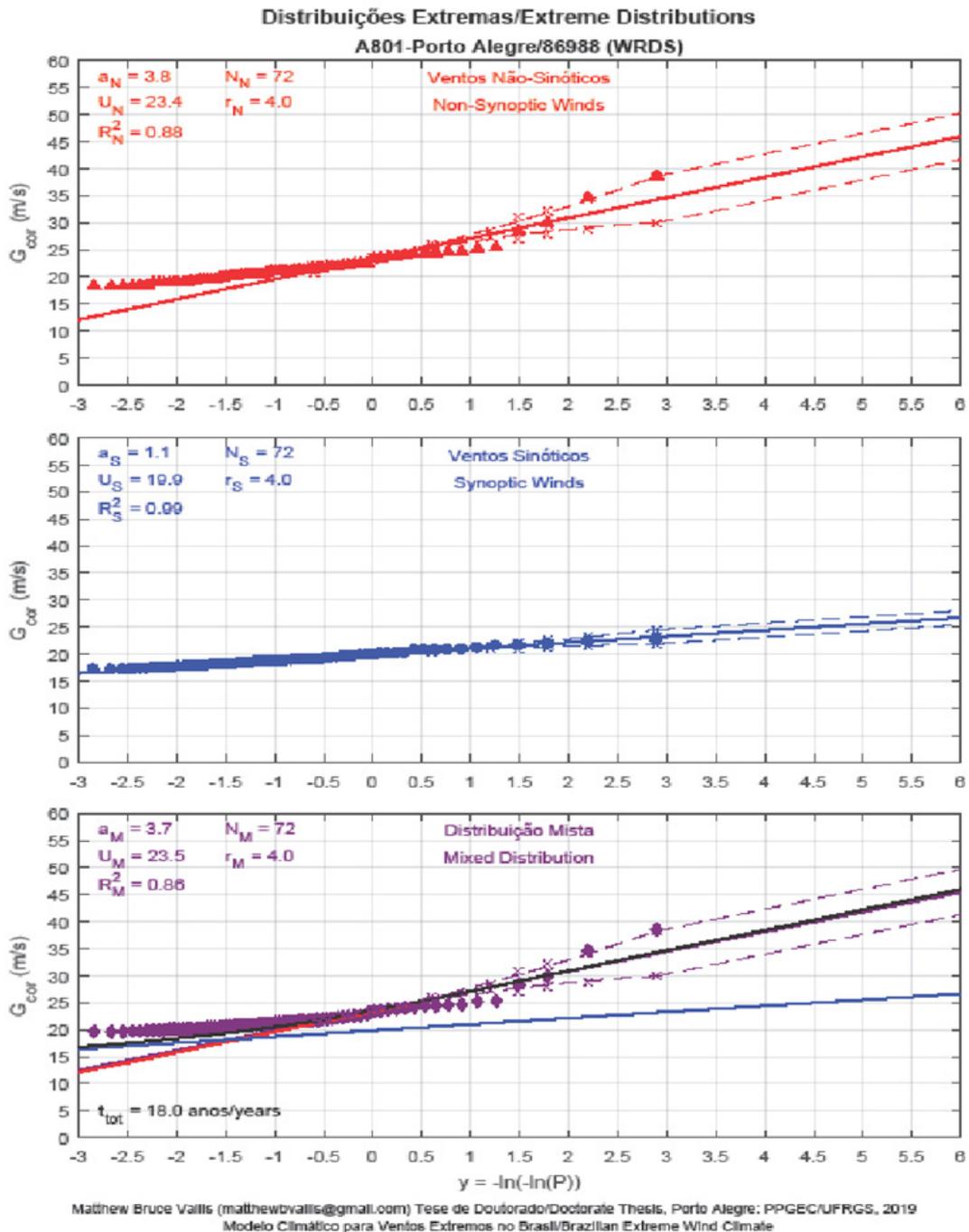
Sin embargo, la Figura 4, que se considera representativa de las estaciones meteorológicas con más de 30 años de registros ininterrumpidos, muestra claramente que, en la estación de registro, a diferencia de los vientos EPS, los vientos TS no se caracterizan por una distribución de Tipo I en toda la gama de frecuencias, sino por dos distribuciones de tipo I (o por una distribución de Tipo II). La segunda distribución de Tipo I,

probablemente correspondiente a eventos dentro de las líneas de inestabilidad, se identifica en la figura con una línea azul recta. La evidencia de tal desviación de una sola distribución de Tipo I se puede encontrar en aproximadamente el 20% de la base de datos recopilada por Vallis (2019), que involucra un grupo de estaciones caracterizadas por más de 30 años de operación continua. En cualquiera de los casos, las distribuciones presentadas en las Figuras 1 a 4 son características de las regiones templadas y llevan a la conclusión de que la carga máxima de viento en esos lugares debe estar asociada a eventos TS, al menos para construcciones de baja o media altura. Esto constituye una dificultad bastante seria porque los procedimientos para la determinación de los efectos causados por los vientos TS aún están en desarrollo y/o requieren una evaluación experimental. De hecho, en la mayoría de los códigos de viento modernos se especifican procedimientos apropiados para determinar la respuesta de estructuras sometidas a vientos sinópticos, para lo cual la excitación dinámica inducida por la acción del viento se basa en la suposición, introducida por **Davenport (1957)** y **Vickery y Watkins (1962)**, de que este último puede definirse como un proceso aleatorio estacionario. Por lo tanto, los vientos extremos debidos a eventos sinópticos se predicen típicamente en base a series de velocidades máximas anuales. Estos pueden consistir en series suficientemente largas de velocidades de ráfagas, medias de 10 minutos o medias horarias, lo que debería conducir a predicciones similares. Por otra parte, para predecir la probabilidad de ocurrencia de las velocidades del viento TS, se requieren series de velocidades máximas anuales de ráfagas que, como se ha comentado anteriormente, no pueden modelarse correctamente mediante una única distribución de valores extremos de Tipo I y, además, no puede suponerse que la carga de viento dependiente del tiempo en el diseño estructural sea un proceso aleatorio estacionario. Una discusión del problema desde un punto de vista conjunto de ingeniería y meteorología fue presentada recientemente por **Loredo-Souza et al (2022)**.

Como se mencionó anteriormente, mientras que para los vientos sinópticos la especificación de una velocidad de diseño, generalmente la componente horizontal del vector de

velocidad media a la altura de referencia de 10 m en terreno llano y abierto, define completamente la intensidad de la excitación, la velocidad horizontal de diseño a la altura de referencia en caso de ráfagas descendentes, es decir, durante eventos TS, requiere información

adicional para permitir evaluar la evolución de la velocidad del viento con la altura sobre el nivel del suelo. Esta cuestión se abordará después de la breve discusión subsiguiente del campo de velocidad durante un evento de ráfaga descendente estacionaria.



**Figura 4.** Velocidades de vientos EPS, TS y combinados vs. Período de retorno para una estación meteorológica en Brasil constituidas por distribuciones Tipo I (Vallis et al. 2018; Vallis 2019)

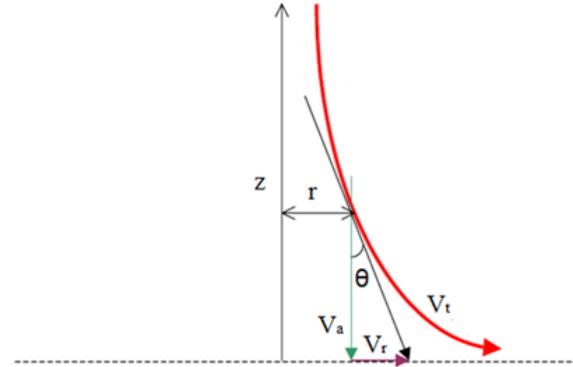
## Viento inducido por ráfagas descendentes estacionarias

**Gheno et al** (2015) ampliaron el modelo del campo de viento en una ráfaga descendente empleado anteriormente por **Ponte** (2005), **Ponte y Riera** (2007, 2010) y **Fadel Miguel y Riera** (2013) para determinar las cargas de viento convectivo en las líneas de transmisión (**Riera**, 2018). El modelo original se basa en una representación semi-empírica de un patrón de flujo axialmente simétrico que describe un campo estacionario, que está modelado por una función de tiempo empírica que da cuenta de la evolución de la velocidad del viento con el tiempo. **Gheno et al** (2015) introdujeron simplificaciones adicionales del campo de viento, asumiendo las condiciones atmosféricas habituales durante la ocurrencia de eventos TS y una geometría simplificada de la nube cumulonimbos causante. El campo de viento generado es axial-simétrico y depende de la caída de presión, la altura desde el nivel del suelo hasta el centro del yunque de la nube y la relación de la corriente descendente en la base, que aquí se consideran variables aleatorias. Se supone que la corriente descendente se produce en una gran superficie horizontal, bajo una atmósfera estable. Las variables meteorológicas de esta atmósfera estable se ven alteradas debido a las condiciones meteorológicas cambiantes, lo que da lugar a la formación de una nube *cumulonimbus*, caracterizada por los parámetros que se enumeran a continuación: (1) la base de la nube se encuentra a una altura  $h$  sobre el suelo, estimada como  $h = 0,1 H_c$ ; (2)  $H_c$  es la altura desde el suelo hasta el centro del yunque; (3) la base de la nube es circular, de radio  $R_o$ ; (4) Hay una caída de presión en relación con la atmósfera estable, que varía linealmente a lo largo de  $H_c$  y que provoca un flujo de aire descendente. Las líneas de corriente dentro de la ráfaga descendente tienen una forma aproximada por la ecuación (3), en la que  $k$  y  $\alpha$  son constantes, mientras que  $r$  denota la distancia al eje vertical de la ráfaga descendente.

$$z(r) = k / r^\alpha \quad (3)$$

Se espera que el coeficiente  $\alpha$  sea cercano a la unidad. La velocidad tangencial de cada línea de corriente puede descomponerse como se muestra en la Figura 5. Una línea de corriente específica, que pase a través del punto  $(r_n, z_n)$  estaría

definida por la ecuación (4). La Ec. (5) presenta la derivada  $z'(r)$  de  $z$  con respecto a  $r$ , que entra en las ecuaciones (6) y (7), permitiendo la descomposición de la velocidad tangencial  $V_t$  en sus componentes radial y axial,  $V_r$  and  $V_a$ , respectivamente.



**Figura 5.** Representación de una línea de corriente genérica

$$z(r) = \frac{z_h \cdot r_h^{1,2}}{r^{1,2}} \quad (4)$$

$$z'(r) = -\frac{1,2 \cdot r_h^{1,2} \cdot z_h}{r^{2,2}} \quad (5)$$

$$\sin(\theta) = \frac{1}{\sqrt{1 + (z'(r))^2}} \quad (6)$$

$$\cos(\theta) = \frac{(z'(r))^2}{\sqrt{1 + (z'(r))^2}} \quad (7)$$

$$V_r = V_t \cdot \sin(\theta) \quad (8)$$

$$V_a = V_t \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

Las componentes cartesianas de velocidad,  $V_x$  (10),  $V_y$  (11) y  $V_z$  (12), representadas en la Figura 6, son:

$$V_x = V_t \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\beta) = V_r \cdot \cos(\beta) \quad (10)$$

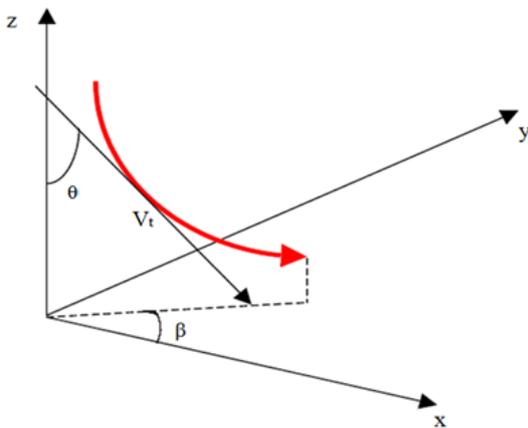
$$V_y = V_t \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\beta) = V_r \cdot \sin(\beta) \quad (11)$$

$$V_z = V_t \cdot \cos(\theta) = V_a \quad (12)$$

Considere un plano  $x = a$ , donde  $a$  denota una distancia de al menos un 50% mayor que el radio de la corriente descendente.

Admitiendo que la ecuación (3) con  $\alpha = 1$  describe la forma de una línea de corriente en el límite de la corriente descendente, el campo de viento causado por esta última estaría entonces limitado por la ecuación:

$$z = k (a^2 + y^2)^{-1/2} \quad (13)$$



**Figura 6.** Ángulos y ejes coordenados

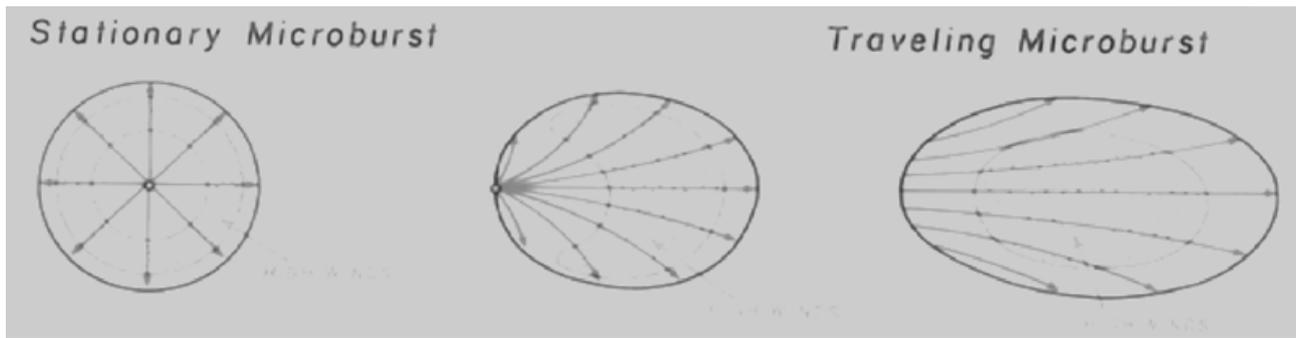
Obsérvese también que la velocidad del viento en la dirección  $x$ , dada por la ecuación (10), es máxima para  $y = 0$ , y que disminuye a medida que aumenta la distancia  $y$  al eje  $x$ . Cuando la nube *cumulonimbus* causante es transportada por una tormenta sinóptica que causa una velocidad media del viento orientada en la dirección  $x$ , a la altura de referencia, superior a unos 10 m/s, se produce un campo de viento compuesto, que se asemeja al campo de un gran túnel de viento con su eje coincidente con el eje  $x$ .

### Efectos del viento causado por ráfagas descendentes

Para los vientos sinópticos, la ráfaga de 3 segundos, la media de 10 minutos o la media horaria, que pueden convertirse fácilmente de una escala a otra, puede adoptarse como velocidad de diseño. Sin embargo, la situación no es la misma

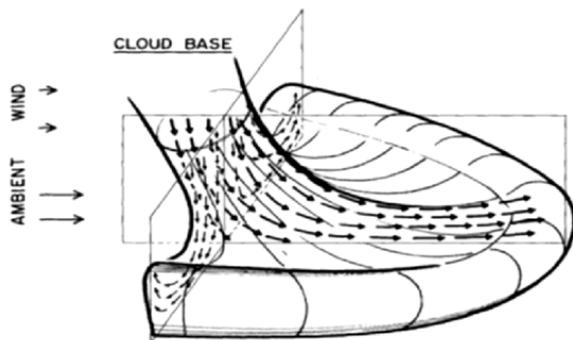
en el caso del viento inducido por corrientes descendentes, en el que el campo de velocidad del viento sólo puede describirse como un proceso tridimensional no estacionario. Cuando la nube cumulonimbus causante es transportada por un viento sinóptico, antes de la llegada de la ráfaga descendente al nivel del suelo, la gráfica de velocidad horizontal del viento frente al tiempo aún se puede modelar como un proceso aleatorio estacionario. La orientación media de la componente de velocidad horizontal a la altura estándar de 10 m permanece constante dentro de un área grande. Luego, cuando la corriente descendente impacta contra el suelo, produce un flujo predominantemente radial que se expande alejándose del eje vertical de la corriente descendente. La orientación media del viento en cualquier lugar, que resulta de la combinación de los componentes sinóptico y de ráfaga descendente, puede experimentar un cambio repentino, que obviamente aumenta con la distancia desde el plano que contiene el eje vertical de ráfaga descendente hasta el punto de observación (es decir, hasta la ubicación de la estación meteorológica). En este contexto, Burlando (2019) recuerda que los conceptos de ráfagas descendentes espacialmente estacionarias o móviles fueron introducidos por Byers y Braham (1949), quienes explican que, cuando una tormenta se mueve lentamente, el flujo de salida de la corriente descendente es aproximadamente radial, mientras que en las tormentas de movimiento rápido el flujo de salida no es simétrico y el flujo aguas abajo es sustancialmente mayor que en el lado aguas arriba. De manera similar, Fujita (1985) distinguió más tarde entre el flujo tipo “estallido estelar” axial simétrico con un anillo anular de fuertes vientos producidos por microrráfagas estacionarias que ocurre en ausencia de flujo ambiental y la forma elíptica del flujo con velocidades de viento más altas en la parte frontal cuando la microrráfaga está viajando. La Figura 7, extraída de Fujita (1985), muestra las vistas en planta de las líneas de flujo cerca de la superficie del suelo.

Byers y Braham (1949) ya se refirieron a una corriente descendente que se desplaza cuando la nube de tormenta asociada se mueve con respecto al suelo, de modo que la ráfaga descendente en sí misma determina un flujo de impulso horizontal descendente desde lo alto hacia la capa límite atmosférica. La inclinación del eje de



**Figura 7.** Vistas de planta de las líneas de flujo de viento cerca de la superficie del suelo según Fujita (1985): (izquierda) ráfaga descendente estacionaria, (centro) ráfaga descendente moviéndose lentamente, (derecha) ráfaga descendente móvil

la corriente descendente está relacionada con el movimiento de la tormenta, pero las corrientes descendentes no verticales pueden deberse a diferentes causas. Por ejemplo, Hjelmfelt (1988), analizando las ráfagas descendentes registradas durante el Proyecto JAWS en Colorado, relacionó la inclinación del eje de la corriente descendente con la cizalladura vertical del viento por debajo de la base de la nube en lugar de con el movimiento de la tormenta. La Figura 8 reproducida de Hjelmfelt (1988) y Burlando (2019), muestra una vista esquemática en 3D de las líneas de flujo en una ráfaga descendente móvil.



**Figura 8.** Representación 3D de una microrráfaga que muestra que la inclinación del eje descendente está relacionada con el viento ambiental debajo de la base de la nube asociada (Hjelmfelt, 1988).

De hecho, Burlando (2019) señala que pocos modelos de flujo de ráfagas descendentes incluyen el efecto del movimiento de la tormenta, citando como excepción el modelo propuesto por

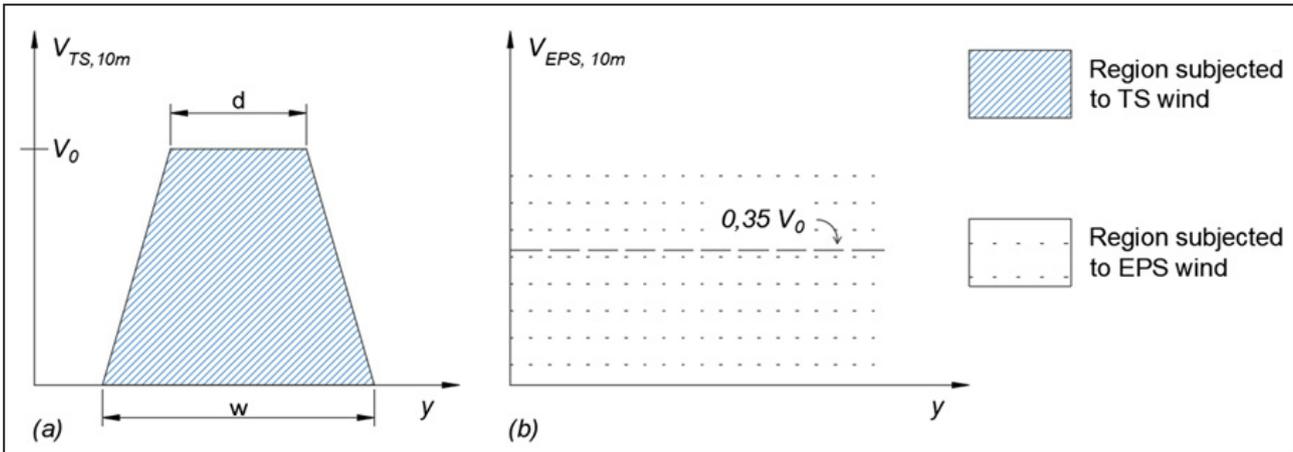
Holmes y Oliver (2000), pero ninguno de ellos considera la posibilidad de que el campo de flujo medido real,  $V$ , pueda ser la superposición de tres contribuciones: el flujo axial-simétrico de ráfaga descendente,  $V_1$ , el movimiento de la tormenta,  $V_2$  y el campo de flujo de la capa límite atmosférica,  $V_3$ .

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (14)$$

En este contexto, parece obvio que los componentes de la velocidad del viento observados en las estaciones meteorológicas a la altura estándar de 10 m, son en realidad la superposición de tres contribuciones: el flujo de salida de ráfaga descendente (aproximadamente) axial-simétrico,  $V_1$ , el movimiento de la tormenta,  $V_2$  y el campo de flujo de la capa límite atmosférica,  $V_3$ . Sin embargo, sólo se registra  $V$ , es decir, la participación relativa de cada componente sigue siendo desconocida y sólo podría estimarse sobre la base de datos estadísticos aún inexistentes. Iida et al. (2021) informan cargas de viento en edificios prismáticos, para la excitación causada por la traslación de ráfagas descendentes, determinadas experimentalmente en un simulador de chorros de aire móvil de laboratorio. Riera (2016) había argumentado previamente que sólo los vientos causados por ráfagas descendentes dentro de los campos de viento sinópticos en las llamadas líneas de inestabilidad (squall line) requieren consideración en el diseño estructural, sugiriendo para tal propósito un modelo simplificado para la determinación de las cargas de viento, también descrito por Miguel et al. (2018). La propuesta equivale a aceptar que la velocidad del viento TS de diseño

**Tabla 1:** Parámetros básicos de las cinco categorías de ráfagas descendentes (DB) (Riera, 2016; Miguel et al, 2018).

Designación (DB)	$V_0$ (m/s)	d (m)	w (m)	b (m)	T (s)
DB 1	$V_0 \leq 30$	10	40	20	60
DB 2	$30 < V_0 \leq 40$	20	60	40	120
DB 3	$40 < V_0 \leq 50$	40	100	80	180
DB 4	$50 < V_0 \leq 60$	60	160	120	300
DB 5	$60 > V_0$	80	240	160	480



**Figura 9.** Dimensiones de la sección transversal del canal de viento virtual en una línea de inestabilidad (Riera, 2016; Miguel et al, 2018).

(componente horizontal a 10 m de altura) ocurre cerca del eje horizontal de la Figura 7 (derecha), lo que implica que las componentes  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  en la ecuación (14) están orientadas en la misma dirección. Cuando no se cumple esta suposición, la respuesta estructural máxima, en la dirección de la velocidad instantánea máxima, será necesariamente menor y, por lo tanto, no es necesario considerarla a los efectos del diseño estructural. El perfil vertical de velocidad para la componente no sinóptica adoptada en los trabajos mencionados anteriormente fue modificado por **Riera** (2018) sobre la base de argumentos holísticos (**Gheno et al, 2015**). El procedimiento propuesto requiere la especificación de la *velocidad máxima de la ráfaga en eventos de corrientes descendente*, información que debiera incluirse en las revisiones en curso de varios códigos de viento.

### Carga estructural inducida por líneas de inestabilidad

**Riera** (2016) observa que los efectos de la corriente descendente, a los fines del diseño estructural, alcanzarán la máxima intensidad dentro

de la región descrita anteriormente, en la que la velocidad inducida no difiere significativamente de  $V_x$ , como se describe en la ecuación (10) con  $\theta = \pi/2$  y  $\beta = 0$ . Además, los coeficientes aerodinámicos especificados en los códigos de viento o determinados experimentalmente en túneles de viento convencionales, suponiendo una tormenta a escala sinóptica, seguirían siendo aplicables, siempre que las dimensiones de la sección transversal de la estructura considerada sean compatibles con las dimensiones del túnel de viento virtual que se produce a lo largo del eje de la línea de inestabilidad. La traza de la línea de inestabilidad sobre el suelo es similar a la trayectoria de un tornado. **Schwarzkopf y Russo** (1982) mapearon tales trayectorias en Argentina, mostrando que, en caso de vientos rectos, las líneas de flujo en los límites de la trayectoria están orientadas en la misma dirección, mientras que en caso de tornados están orientadas en direcciones opuestas. Por lo tanto, el supuesto básico en el modelo propuesto (**Riera, 2016**) es que se pueden sumar los campos de viento inducidos tanto por la corriente descendente como por el evento

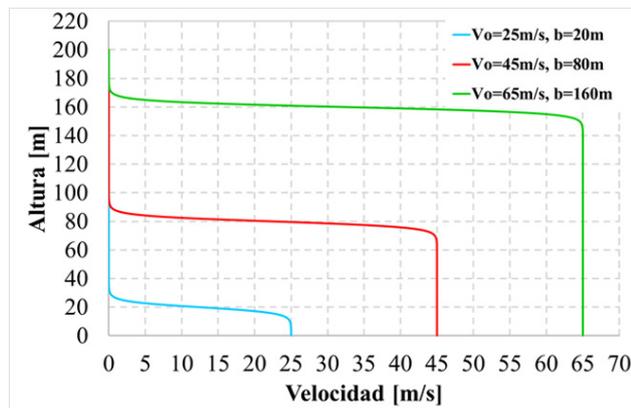
sinóptico que transporta la tormenta TS, despreciando cualquier interacción. El error del modelo resultante de la última simplificación no debería tener importancia en las aplicaciones de ingeniería y, en la mayoría de los casos, debería sobrestimar la carga real del viento.

Se sugieren las siguientes expresiones para la componente horizontal de la velocidad causada por una ráfaga descendente a distancias superiores a  $D$  desde la línea central de la misma (Riera, 2018):

$$V = V_0 f(z) \quad (15)$$

$$f(z) = \exp[-(z - b) / 2] / \{1 + \exp[-(z - b) / 2]\} \quad (16)$$

Las ecuaciones (15) y (16),  $f(z)$  representan la función logística. En la Tabla 1 se sugieren valores de  $b$  para diferentes categorías de eventos TS, como se muestra en la Figura 9, con  $D \approx 2b$ . La capa límite adyacente al terreno no supera unos pocos metros y, por lo tanto, se desprecia, es decir,  $\eta = 0$ .



**Figura 10.** Perfiles de velocidad horizontales / verticales inducidos por ráfagas descendentes.

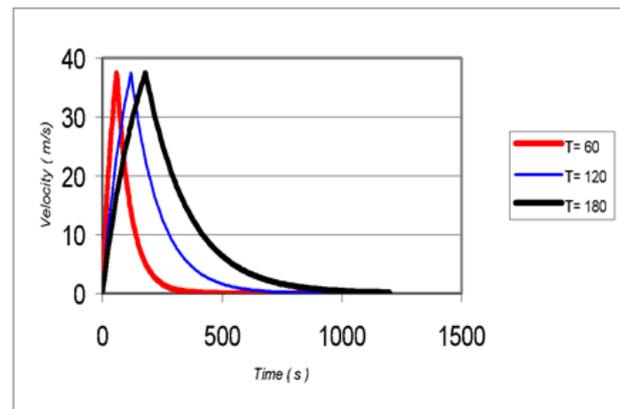
Además, se encontró que la expresión propuesta por **Holmes y Oliver** (2000) para describir la evolución con el tiempo de la componente de velocidad TS modela satisfactoriamente la mayoría de

las observaciones experimentales y fue adoptada aquí:

$$V(t) = 1,58 V_t [1 - \exp(-t/T)] \quad t \leq T \quad (17)$$

$$V(t) = V_t \exp[-(t-T) / T] \quad t > T \quad (18)$$

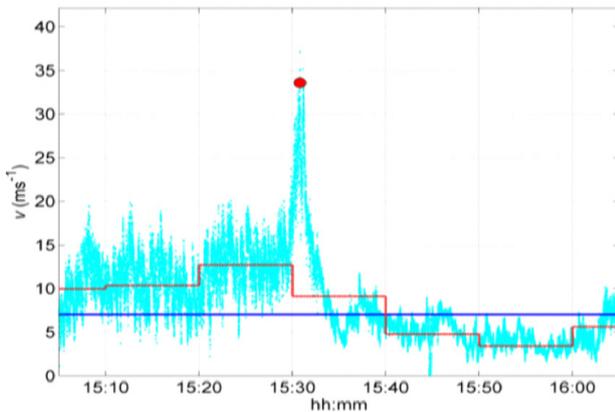
donde  $T$  representa el tiempo característico, factor que depende de la categoría de la ráfaga descendente (Tabla 1).



**Figura 11.** Evolución en el tiempo de la contribución de la corriente descendente para  $V_t = 37.5$  m/s y tres valores diferentes del tiempo característico  $T$

Tenga en cuenta que la orientación  $x$  coincide con la orientación de la velocidad media del viento a la altura estándar de 10 m. Cuando el centro de la línea de inestabilidad pasa por la ubicación de una estación meteorológica, no se observará ningún cambio en la orientación del viento registrada hasta que el eje de la ráfaga descendente esté exactamente por encima del instrumento de registro, cuando la componente horizontal del viento inducido por la ráfaga descendente sea cero. A continuación, la orientación de la componente horizontal gira  $180^\circ$  y la contribución de la ráfaga descendente debe deducirse de la velocidad sinóptica del viento para obtener el módulo de la velocidad.

El proceso es claramente descrito por **Le y Caracoglia** (2017) con relación a la tormenta Andrews (Tormenta registrada en la Base de la



**Figura 12.** Componente horizontal de la velocidad de viento durante el evento TS en Puerto La Spezia, Italia, (25/11/2011) en el que el pico de ráfaga reportado por Solari (2015) fue  $V_o=35m/s$ .



**Figura 13.** Registros fotográficos de los daños causados en el sur de Brasil por una línea de inestabilidad que atravesó una carretera, como se muestra a la izquierda, arrastró un camión pesado aproximadamente 150 m, como se muestra a la derecha, y volcó a muchos otros (Junio de 2018, RS, Brasil)

Fuerza Aérea de St. Andrews). La mayor carga de viento en las estructuras dentro de la trayectoria de la tormenta ocurre antes de que la componente horizontal de la ráfaga descendente disminuya notablemente, por lo tanto, la sección posterior al pico del registro suele ser de menor relevancia para el diseño ingenieril. Un ejemplo típico se muestra en el registro de la Figura 12, en el que la velocidad de la ráfaga para el evento de corriente descendente fue  $V_o = 35 m/s$  (Solari, 2015). Se puede observar que la contribución de la corriente descendente es transportada por un viento sinóptico con una velocidad media a la altura de referencia de 10 m estimada de cerca por la relación propuesta de  $0,35 V_o$ . Las propiedades de turbulencia, así como los perfiles verticales de la contribución sinóptica del viento, dependen de la rugosidad del terreno aguas arriba. Tanto la excitación sinóptica del viento como la respuesta estructural resultante pueden modelarse como procesos aleatorios estacionarios. La contribución de la ráfaga descendente, por otro lado, se modela como la carga transitoria resultante de la función velocidad vs. tiempo dada por las ecuaciones (17) y (18) y se muestran en la Figura 11 y, además, en los perfiles verticales ilustrados en la Figura 10. Si bien un solo perfil caracteriza la contribución sinóptica del viento, se sugiere aplicar un perfil vertical diferente para cada categoría de ráfaga descendente. Por último, obsérvese que, a efectos del diseño, la velocidad máxima de la ráfaga  $V_o$  se define en las Figuras 1 y 2 por las líneas rectas de la derecha o por la línea roja trazada en la Figura 3, que corresponden a eventos TS. Estos describen las amplitudes en la región de baja probabilidad, es decir, largos períodos de recurrencia. Lógicamente, se puede esperar que el error del modelo propuesto disminuya a medida que aumenta el período de recurrencia del diseño.

### Más evidencias de vientos extremos en líneas de inestabilidad

Finalmente, hay que tener en cuenta que, aunque son relativamente poco comunes, los vientos rectos conocidos como *derechos* por su designación inicial en México, también se producen fuera de América del Norte. En Europa, según *Wikipedia*, un evento de este tipo ocurrió el 10 de

julio de 2002 en el este de Alemania y partes limítrofes de países vecinos, y también se han descrito casos similares en Finlandia, España, Francia y Bulgaria. El caso de Finlandia fue el primero que se documentó por encima de los 60 grados de latitud. Un factor que limita la ocurrencia de vientos rectos en Europa y otras partes más frías del mundo puede ser la naturaleza poco frecuente de las capas mixtas elevadas (EML). Aunque los fenómenos meteorológicos y los campos de viento resultantes difieren en cierta medida de los eventos TS, aparentemente el modelo propuesto en este documento podría aceptarse como una aproximación ingenieril hasta que se disponga de evidencia adicional. En un evento reciente de línea de inestabilidad en el sur de Brasil, un viento recto que dejó una trayectoria de unos 250 m de ancho, causó daños, como se ilustra en la Figura 13, compatibles con una velocidad del viento de referencia en el centro de la traza superior a 60 m/s. La traza tenía varios kilómetros de longitud, pero las estaciones meteorológicas situadas en la región fuera de la traza registraron velocidades máximas del viento inferiores a 15 m/s. En cuanto a las velocidades del viento para el diseño de estructuras críticas, está claro que las velocidades de diseño superiores a unos 50 m/s, que no son eventos extremadamente raros, también deben asociarse al impacto de proyectiles, incluidos los vehículos aerotransportados (Holmes, 2010).

## Conclusiones

Se discute brevemente la relevancia de los diferentes fenómenos meteorológicos que provocan vientos extremos en la atmósfera inferior, así como las propuestas para evaluar las cargas resultantes a los efectos del diseño estructural, enfatizando la necesidad de evaluar, para fines de diseño, la

probabilidad de ocurrencia de velocidades máximas de ráfagas de viento debido a corrientes descendentes dentro de las líneas de inestabilidad o eventos no sinópticos similares.

Se demostró que la componente horizontal de la velocidad de vientos causados por nubes estacionarias o de movimiento lento, a la altura de referencia de 10 m sobre el nivel del terreno, muy rara vez supera los 30 m/s, su efecto sobre el diseño estructural en cualquier dirección horizontal es menor que los efectos inducidos por los vientos sinópticos. Por lo tanto, no requiere un tratamiento específico en los códigos de viento que aborden adecuadamente la ocurrencia y los efectos de las tormentas meteorológicas sinópticas, como es el caso de la mayoría de los códigos de viento modernos, incluido el código brasileño NBR 6123. Sin embargo, no es admisible en la segunda década del siglo XXI desprestigiar la posibilidad de que ocurra simultáneamente una ráfaga descendente y un evento sinóptico, que puede dar lugar a componentes horizontales de la velocidad del viento a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, superiores a 60 o incluso 70 m/s.

Finalmente, se describe un esquema que no requiere una extensa investigación teórica o experimental adicional para ser aplicable a estructuras sometidas a vientos descendentes dentro de las líneas de inestabilidad. El enfoque propuesto permitiría adoptar, para los eventos no sinópticos descritos, coeficientes aerodinámicos ampliamente disponibles determinados para los vientos sinópticos.

## Agradecimientos

El autor agradece el apoyo del Consejo Nacional de Investigación de Brasil (CNPq).

## Referencias

ASCE 7, 2016: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.

AS/NZS 1170.2:2011, 2011: Structural design actions. Part 2: Wind actions.

BURLANDO M. 2019: "Downburst flow reconstruction by wind profile measurement", 5th International Conference on Wind Engineering Beijing, China; September 1-6, 2019

**BYERS H.R. and BRAHAM, H.R.**, 1949: "The Thunderstorm", US Department of Commerce, Washington DC, 1949, 287 pp.

**DAVENPORT A.G.** 1957. International Research Seminar: "Wind Effects on Buildings and Structures". Proceedings, Volume 1, Canada.

**FADEL MIGUEL L. F. and RIERA J. D.**, 2013: "Loads induced on tall structures by thunderstorm winds in temperate latitudes". 11<sup>th</sup> International Conference on Structural Safety and Reliability – ICOSSAR, 2013, New York, United States.

**FUJITA T.T.**, 1985: "The Downburst", SMRP Research Paper Number 210, University of Chicago, Chicago, 1985, 122 pp.

**GHENO R.M., MENEZES R. C. R., RIERA J.D. and FADEL MIGUEL L. F.**, 2015: "Loads Induced on Cables by Convective Winds in Temperate Latitudes", 14<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, June 2015, Porto Alegre, RS, Brazil.

**HJELMFELT M.R.**, 1988: "Structure and Life Cycle of Microburst Outflows Observed in Colorado", J. Appl. Meteor., 27, 900-927.

**HOLMES J. D. and OLIVER, S. E.**, 2000: "An empirical model of a downburst", Engineering Structures, Elsevier, 22, 1167-72.

**HOLMES J. D.**, 2010: "Windborne debris and damage risk models: a review", Wind and Structures, Vol. 22, N°2, pp. 95-108.

**IIDA Y., ASANO K. and UEMATSU, Y.**, 2021, "Experimental study of downburst-induced wind loading on buildings with different sizes and heights", J. of Wind Engineering (JAWE), Vol. 46, N° 1 (N° 166), pp. 12-28, January 2021.

**LE T-H and CARACOGLIA L.**, 2017: "Computer based model for the transient dynamic analysis of a tall building during a digitally simulated Andrews AFB thunderstorm", Computer and Structures, 193, 44-72

**LETCHFORD C. W., and LOMBARDO F. T.**, 2015: "Is codification of non-synoptic wind loads possible?", Invited Lecture, 14<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, June 2015, Porto Alegre, RS, Brazil.

**LOREDO-SOUZA A.M.; PFEIL M.; NASCIMENTO E.L.; RIERA J.D.; FISCH G.F. and BECK A.T.**; 2022: "Towards a climatological approach in the proposal for the wind speed map in the new Brazilian wind code", 14<sup>th</sup> American Conference on Wind Engineering (ACWE), Lubbock, TX, May 17-19, 2022.

**MIGUEL L.F.F.; RIERA J.D. and FADEL MIGUEL, L.F.**, 2018: "Assessment of downburst wind loading on tall structures", J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics, (174) 252-259.

**PONTE Jr., J.**, 2005: "Modelagem e simulação do campo de velocidades do vento em tormentas elétricas". Doctoral Thesis, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil.

**PONTE Jr. J. and RIERA J. D.**, 2007: "Wind velocity field during thunderstorms", Wind and Structures, An International Journal, Vol. 10, No. 3, 287-300.

**PONTE, Jr., J., and RIERA, J. D.**, 2010: "Simulation of extreme wind series caused by thunderstorms in temperate latitudes". Structural Safety, 32, 231-237.

**RIERA J. D. and NANNI L.F.**, 1989: "Pilot study of extreme wind velocities in a mixed climate considering wind orientation". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, The Netherlands, 32, 11-20.

**RIERA, J.D., VIERA F.B. and dos SANTOS M.L.W.**, 1989: "Probabilistic assessment of wind loading for structural analysis", Proceedings, 5th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR'89, Innsbruck, Austria, Balkema, Rotterdam.

**RIERA, J. D.**, 2016: "Sobre a definição do vento para projeto estrutural na NBR 6123 e outras normas sul-americanas". Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, (ASAE), Passo Fundo, RS, Brasil, v. 13, n. 3, p. 1-27, set/dez. 2016. <http://dx.doi.org/10535/rsee.v13i3/6532>.

**RIERA J. D.**, 2018: "Sobre el perfil vertical de las velocidades inducidas por corrientes descendentes", Anales, XXXVIII Jornadas Sud Americanas de Ingeniería Estructural, Lima, Perú, Oct. 2018.

**SCHWARZKOPF M. L. A. and RUSSO, L. C.**, 1982: "Severe storms and tornadoes in Argentina", Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, American Meteor. Soc., 59-62.

**SOLARI G., DE GAETANO P. and REPETTO M. P.**, 2015: "Thunderstorm response spectrum: fundamentals and case study", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 143, 62-77.

**VALLIS M. B.; LOREDO-SOUZA A. M.; WATRIN L. C.; BENIA, M. C. D.**, 2018: "Extreme winds east of the Andes", Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Lima, Peru.

**VALLIS M.B.**, 2019: "Brazilian extreme wind climate", PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Eng. School, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.

**VICKERY B.J. and WATKINS R.D.**, 1964. "Flow-induced Vibrations of Cylindrical Structures". University of Sydney. School of Civil Engineering. Research report no. R.34.

## AUTOR

**RIERA, Jorge D.** ID  ORCID 0000-0002-4902-237X



REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

# Estudio CFD aplicado al diseño de una microválvula intravesical para tratar afecciones de la vía urinaria

Martín Rearte<sup>1</sup>, Joaquín Bolívar<sup>2</sup>

Instituto de Estructuras M. Guzmán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán.  
SIPROSA, Ministerio de Salud Pública de Tucumán.  
[martinrearte@gmail.com](mailto:martinrearte@gmail.com), [docbolivar@hotmail.com](mailto:docbolivar@hotmail.com)

## Resumen

En el ser humano se presentan diversas patologías que pueden alterar el normal funcionamiento del tracto urinario desembocando en trastornos de la micción entre ellos la incontinencia o retención urinaria. Estas patologías afectan actualmente a más del 4% de la población mundial disminuyendo la calidad de vida e incluso llevando a la exclusión social a más de 300 millones de personas. Para abordar esta problemática se diseñó una microválvula intravesical utilizando herramientas MEF para tratar estos trastornos. El dispositivo, inicialmente concebido para hombres, mujeres y niños, se enfocó en pacientes masculinos de edad media. Se utilizó SolidWorks® para su diseño paramétrico y simulaciones numéricas de fluidos. La validación se basó en comparar el gasto energético con obstrucciones como la hiperplasia prostática, mediante simulaciones en SolidWorks® Flow Simulation. Se desarrolló una herramienta de diagnóstico comparativo (HDC) y prototipos a escala real se ensayaron en un banco de pruebas con presiones intravesicales simuladas. Para un funcionamiento óptimo, el paciente debe retener algunas funciones naturales básicas, como el control del músculo detrusor. Se buscaron alternativas de fabricación conforme a normas de productos médicos invasivos, asegurando la conformidad con los estándares de la autoridad de aplicación nacional (ANMAT).

**Palabras clave:** Incontinencia, CFD, microválvula

## ***Applied CFD study to the design of an intravesical microvalve to treat urinary tract disorders***

### **Abstract**

*In humans, various pathologies can disrupt the normal functioning of the urinary tract, leading to urinary disorders such as incontinence or urinary retention. Currently affecting over 4% of the global population, these conditions decrease quality of life and can even result in social exclusion for over 300 million individuals. To address this issue, a microvalve was designed using Finite Element Method (FEM) tools to treat these disorders. Initially intended for men, women, and children, the device focused on middle-aged male patients. SolidWorks® was employed for parametric design and numerical fluid simulations. Validation relied on comparing energy expenditure with obstructions like prostate hyperplasia, utilizing simulations in SolidWorks® Flow Simulation. A Comparative Diagnostic Tool (CDT) was developed, and real-scale prototypes were tested in a trial setup with simulated intravesical pressures. Optimal functioning requires patients to retain some basic natural functions, such as control of the detrusor muscle. Manufacturing alternatives were sought to comply with invasive medical product standards, ensuring adherence to national regulatory standards (ANMAT).*

**Keys words:** Incontinence, CFD, microvalve

## Introducción

En este trabajo, se han fusionado enfoques de la medicina y la ingeniería, destacando el papel dominante de esta última en el desarrollo del dispositivo propuesto. A pesar de los desafíos inherentes a la integración de ambas disciplinas, la principal motivación para avanzar en los estudios y etapas del proyecto ha sido la oportunidad de ayudar a pacientes reales, incluyendo hombres, mujeres y niños que sufren de trastornos del tracto urinario, los cuales impactan su calidad de vida y pueden derivar en condiciones más graves.

Si bien existe un gran número de patologías que afectan el Tracto Urinario (TU) este trabajo fue enfocado en el desarrollo de un tratamiento alternativo para las patologías que afectan el acto de la micción, específicamente la incontinencia y la retención urinaria (IU o RU), patologías descritas de forma clara y sencilla en el capítulo 14 "Incontinencia y retención urinaria" del Tratado de Geriatria para Residentes (Bravo, 2005).

De todas las patologías que derivan en IU o RU, luego de un proceso de validación, en este trabajo nos hemos enfocado en ciertos casos en los que el tratamiento tradicional presenta riesgos para la salud de los pacientes y pueden ser corregidos con la implementación del dispositivo propuesto.

Antes de comenzar con el desarrollo técnico, para entender las condiciones de borde y las hipótesis de simplificación del problema, debemos conocer un poco sobre la patología central a tratar, la insuficiencia urinaria (IU), la ICS (International Continence Society) descrita extensamente por (Abrams P, 2002), es cualquier pérdida involuntaria de orina que supone un problema social o higiénico pero para nuestro caso ampliaremos el alcance también a la continencia urinaria, es decir la retención de la orina en la vejiga.

Estas afecciones se presentan tanto en personas sanas como asociada a diferentes enfermedades y que puede ser consecuencia de diversas causas como se describe en "La incontinencia Urinaria" de J. Robles (Robles, 2006).

El dispositivo biomecánico propuesto en este trabajo, denominado "microválvula intravesical de doble efecto" (MVI), tiene consecuentemente el objetivo primordial de aliviar las presiones internas de la vejiga y del TU para lograr el acto de la micción en presencia de diferentes patologías que complican esta capacidad natural en hombres y mujeres. Como premisa de diseño, se tiene que dicho dispositivo represente para el organismo una menor resistencia al flujo, es decir el gasto de energía (Griffiths, 1980) de la ocasionada por patologías tales como: la hiperplasia prostática

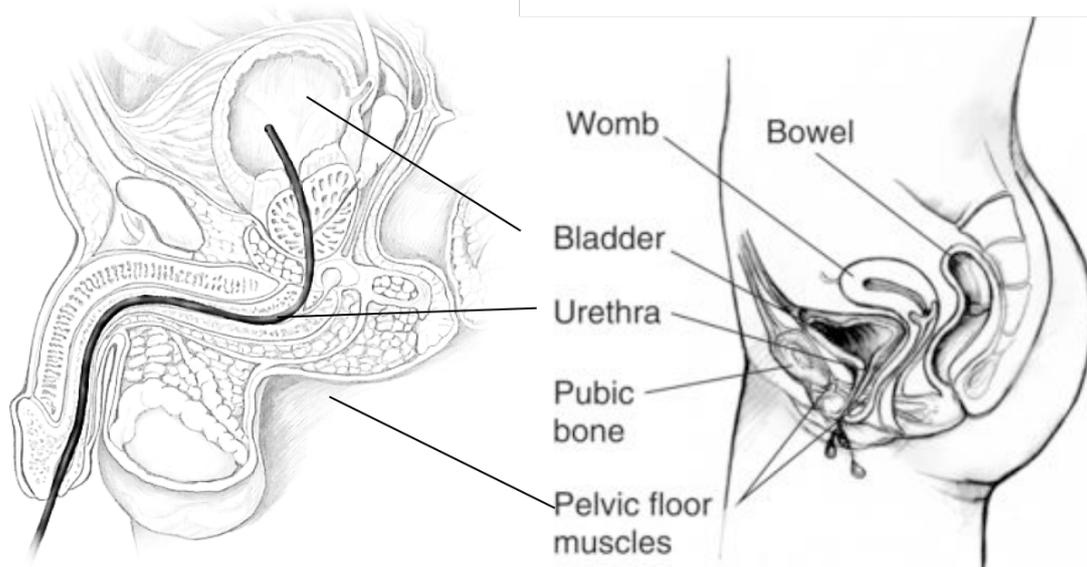


Fig. 1 - Ilustraciones de sistema urinario en hombres (con catéter) y mujeres (National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, National Institutes of Health)

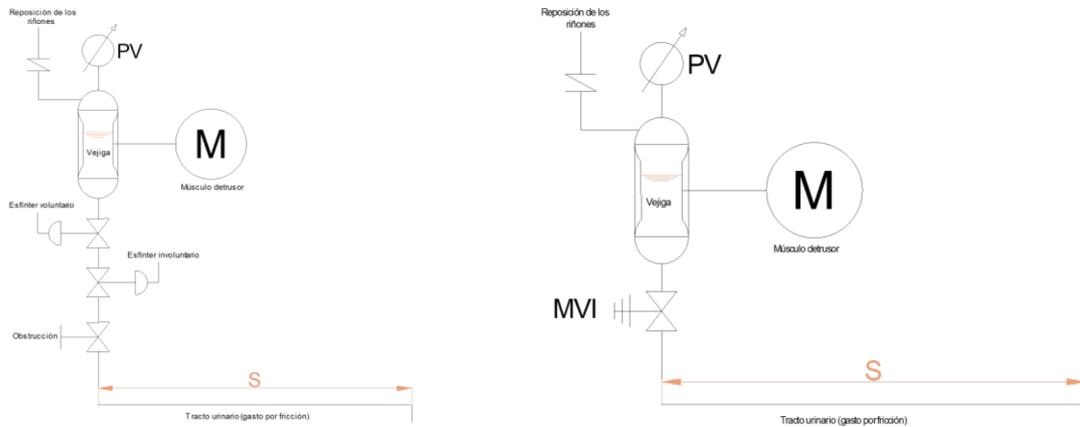


Fig. 2 - Simplificación del sistema urinario para análisis, arriba tracto obstruido con esfínteres funcionales, abajo colocación de la MVI en reemplazo de los esfínteres y la obstrucción

benigna (HPB), que es el agrandamiento de la glándula prostática, una afección frecuente a medida que los hombres envejecen. Cabe mencionar que las denominadas Patologías benignas de la próstata (Maya R. Rodríguez-López, 2007) son las consideradas para el diseño del presente dispositivo. Como se puede observar en la figura 1, el tracto urinario es un sistema hidrodinámico complejo que presenta componentes que pueden ser identificadas, simplificadas y luego plasmadas en un modelo computacional para su análisis utilizando la mecánica de los fluidos. En base a dicho modelo computacional, se propone optimizar el diseño del dispositivo de manera tal de minimizar el gasto energético generado por la introducción de la MVI.

### Mecánica del Aparato Urinario

El flujo depende de 3 variables: la contractibilidad vesical (presión proporcionada a la orina por el músculo detrusor vesical), el volumen miccionado y la resistencia a la salida de la orina que ofrecen la uretra y los esfínteres. En los esquemas simplificados que se muestran en la Fig. 2, para el TU masculino, la orina se acumula dosificada por los riñones, aumentando el volumen en la vejiga de tejido contraíble, adicionalmente al aumento del volumen, el músculo que rodea a la vejiga, el músculo detrusor aplica una presión externa sumando a la presión intravesical, variable que se

mide a través de los estudios urodinámicos. La evacuación de este líquido se logra con el trabajo armónico del músculo detrusor y la liberación del tracto a través del accionamiento de los esfínteres, voluntario e involuntario para dar paso al fluido a través de la uretra venciendo la resistencia del tubo colapsable de tejido elástico hasta alcanzar la presión atmosférica en la punta del meato para la fisionomía masculina a la que se apunta con este trabajo. Si bien esto solo es una aproximación conceptual, puede ser utilizada como base de un desarrollo de un modelo constitutivo específico como el desarrollado por (Tim Idzenga, 2006).

### Desarrollo

La idea inicial surge de relevar necesidades de pacientes con afecciones reales en la vía urinaria que debido a estas deben que someterse a diálisis diarias disminuyendo su calidad de vida. Uno de los síntomas principales estudiados fue la incapacidad de realizar la micción a voluntad.

Con el objetivo de ayudar a minimizar esta y otras patologías similares se conceptualizó una microválvula que accionada externamente pudiera facilitar el vaciamiento de la vejiga, un concepto aún rudimentario teniendo en cuenta los intrincados mecanismos que actúan para lograr este aparente simple acto fisiológico.

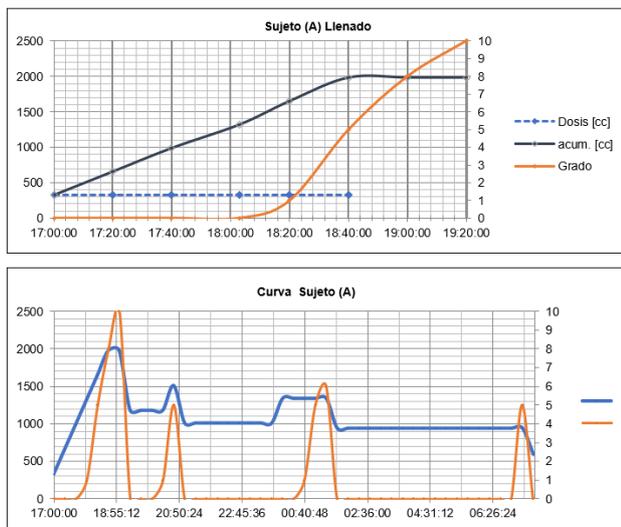


Fig. 3 - Ejemplo de ensayos de parametrización de pacientes (curva Vol [cc] vs tiempo)

El proceso de prototipado incluyó el estudio de pacientes sanos para parametrizar el acto de la micción e identificar variables de forma práctica como se observa en la Fig. 3 donde documentando la ingesta de líquidos y el acto miccional de varios pacientes durante 24 horas se pudo obtener valores de caudales y velocidades de flujo reales contrastadas con ensayos urodinámicos.

Con los resultados se dimensionaron los primeros prototipos tomando en consideración las recomendaciones de especialistas urólogos.

Se dimensionó la válvula para el caso de la uretra masculina adulta la cual, si bien está constituida de un material viscoelástico membranoso, tiende a ser entre 8 y 10 mm de diámetro pudiendo adaptarse a diámetros mayores, pero para la colocación, un diámetro de estas medidas es factible de introducir a la uretra sin necesidad de una intervención quirúrgica, hito a cumplir como metodología de inserción del dispositivo propuesto.

### Prototipado y fabricación

Se inició proyectando su construcción con materiales metálicos y grílón, ambos factibles de mecanizar localmente quedando pendiente de estudio otros materiales como resinas plásticas o de fabricación aditiva en 3D, básicamente por la posibilidad de lograr bajas rugosidades, tomando como guía algunos conceptos y criterios de selección de máquinas

de “Machine Tools for High Performance Machining” de (Lacalle, 2009) la técnica de fabricación elegida fue el microfresado en grílón (poliamida 6) para probar el accionamiento y trabajar en el dimensionado de los componentes electromecánicos que tendrían que ser ferromagnéticos. Basado en el “Estudio de la influencia de los parámetros de corte y geometría con herramienta de acero rápido en procesos de mecanizado en el polímero poliamida 6” de (Hernández, 2018) se presentan a continuación las propiedades del material del primer prototipo funcional y los conceptos considerados para la fabricación bajo la técnica de microfresado (Tabla 1).

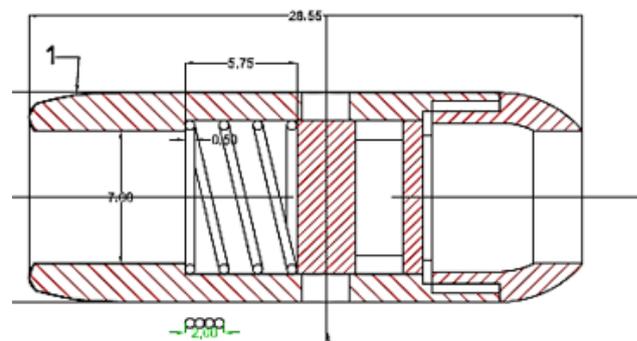
Tabla 1 - Propiedades mecánicas de la poliamida 6 (grílón blanco)

Propiedad	Poliamida 6 (nombre comercial) Zytel
Gravedad específica	1,15
Resistencia a la tracción [MPa] ASTM D 638	55,4
Elongación para romper [%]	378
Módulo de flexión [MPa] ASTM D 790	59
Resistencia al impacto con muecas [kg/m] ASTM D 256	4,92
Dureza Shore D1	74
Temperatura de fusión	222
Temperatura de degradación	440

### Mecanizado de prototipo funcional

Para la fabricación de un prototipo funcional se realizaron planos con alto grado de detalle como se muestra en la Fig.4.

Fig. 4 - Planos preliminares para fabricación (medidas en mm)

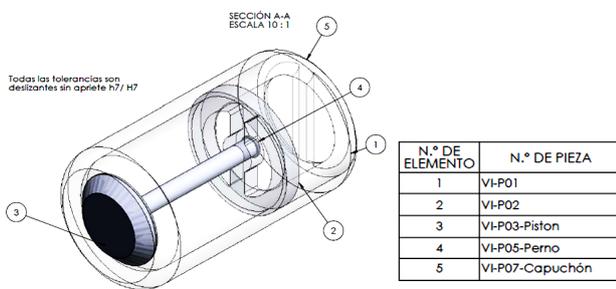


Al realizar la búsqueda de metalmecánicas en la provincia de Tucumán que pudieran fabricar el diseño con los planos de la primera versión simplificada (Fig.

4), una de ellas dio el apoyo al proyecto al reducir los costos de fabricación para lograr 12 microválvulas funcionales, pero debido a las limitaciones de las máquinas herramientas disponibles se tuvo que realizar una segunda simplificación del modelo, que al igual que la primera simplificación prescindía de los componentes electrónicos del modelo original, aprovechando únicamente la presión intravesical para su accionamiento. En la Fig. 5 se pueden ver la versión simplificada que cuenta con 5 piezas.

### Fabricación del prototipo final

Fig. 5 - Modelo 3D para fabricación de prototipo simplificado V1.0



Adicionalmente, se tuvieron que realizar modificaciones en este último diseño debido a la forma de las herramientas para lograr la cavidad principal y el contra asiento del pistón (VI-P02 Fig. 5) ya que, en las dimensiones presentadas, no se podía lograr con una rugosidad aceptable como la observada en la Fig.7.

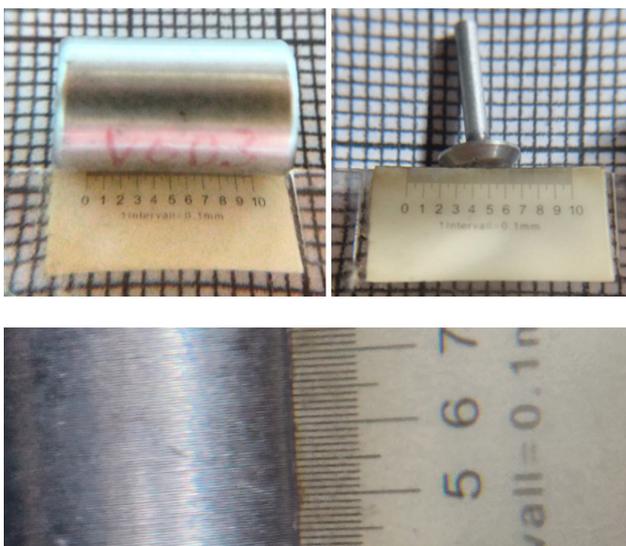


Fig. 6 - (Izq.) cuerpo principal de la MVI, (Der.) pistón central. (Aba.) rugosidad alcanzada en el proceso de fabricación.

### Proceso de validación mediante simulaciones

Se realizó un estudio de flujo CFD preliminar sobre el diseño original (Fig. 7) en el cual, la pieza 2, se ajustaba mediante un sistema de rosca por un tercer componente de soporte el cual fue simplificado para el estudio quedando una geometría similar para las simulaciones de fluido para validar en primera medida la geometría y el comportamiento del flujo.

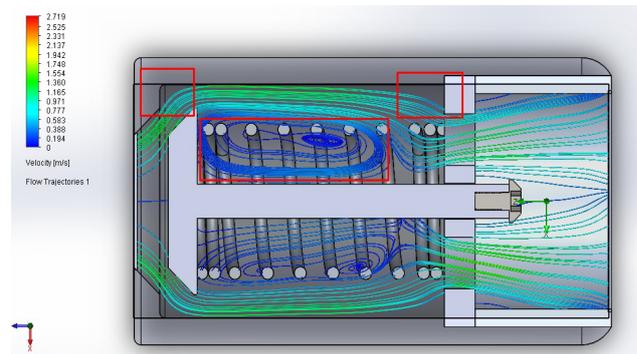


Fig. 7 – Estudio CFD donde se observan puntos de estanqueidad y la formación de remolinos donde el fluido no interactúa fuertemente.

De estas observaciones preliminares se validaron las modificaciones propuestas del análisis de fabricación y adicionalmente para el prototipo se decidió modificar la esquina de ingreso del flujo para armonizar el cuerpo al sentido del flujo. Respecto al cuerpo central, al ser un elemento elástico que se accionará con cada apertura, el riesgo de sedimentación se supone menor quedando como punto a estudiar a futuro.

Para simplificar el estudio fluido-estructura se desagregó el trabajo en la simulación mecánica por pasos de apertura en función a las presiones intravesicales relevadas y estudiadas en las primeras etapas del diseño y luego el comportamiento del flujo para cada estado mecánico.

Esta simplificación se postula debido a la simpleza del diseño y al extenso conocimiento disponible en término de estudios MEF y materiales.

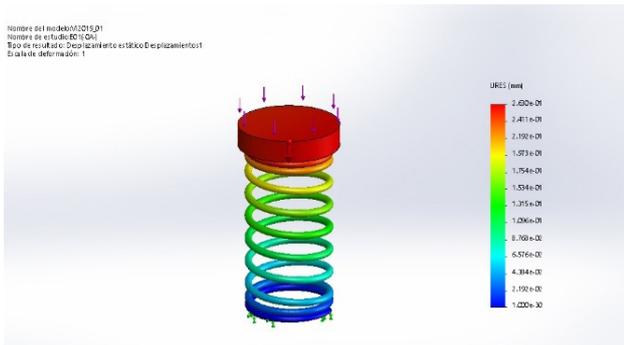


Fig. 8 – Simulación SW de desplazamientos unitarios (mm)

En este trabajo se seleccionó SolidWorks como plataforma de trabajo por su versatilidad en cuanto a diseño en ingeniería y las características del estudio. El software ofrece la posibilidad de realizar los estudios estáticos lineales en los cuales la MVI trabaja. Éstos calculan desplazamientos, fuerzas de reacción, esfuerzos, esfuerzos, criterios de falla, factor de seguridad y estimaciones de error (Fig. 8).

El software presenta además de los materiales convencionales, materiales ortotrópicos elásticos, entre ellos los seleccionados para el diseño.

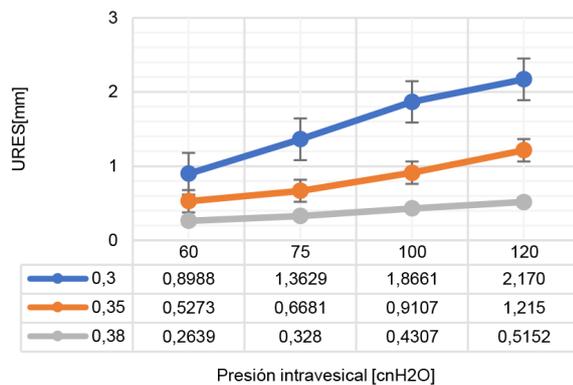


Fig. 9 - Simulaciones del resorte para diferentes diámetros de alambre de cobre.

Estos valores determinaron las cotas de aberturas de la MVI para 4 diferentes puntos de la curva urodinámica (Fig.9), condiciones de borde necesarias para el estudio CFD dedicado.

## Características del estudio CFD

Para entender mejor el comportamiento del fluido dentro de un dispositivo como el propuesto, considerando los espacios, interferencias y cavidades internas, se debe definir el flujo en un régimen ya sea laminar o turbulento, entendiendo que existen zonas de transición. Las ecuaciones de conservación del momento y de conservación de la masa proporcionan las herramientas más recurrentes para ser utilizada en la comprensión de los flujos de fluidos. Junto con la ecuación de conservación de la energía, estas ecuaciones también se conocen como ecuaciones de Navier-Stokes las cuales son la base de cálculo para una simulación CFD. Para el caso de fluidos newtonianos (densidad constante) las ecuaciones de Navier - Stokes se pueden simplificar con menor costo computacional.

En situaciones prácticas, los problemas pueden analizarse utilizando la ecuación extendida de Bernoulli la cual incorpora las pérdidas de cargas que en nuestro caso nos significará la rugosidad interior y las condiciones de vorticidad o turbulencia.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 + H_L \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde,

$H_L$ : pérdidas de carga debido a la fricción o la viscosidad.

$y_1$  e  $y_2$ : alturas de entrada y salida.

$p$ : presiones,  $\rho$ : densidad,  $v$ : velocidades,  $g$ : gravedad

La aplicación del principio de conservación de energía conduce a una relación entre presión, elevación y velocidad de flujo en un fluido. Esta relación se llama ecuación de Bernoulli. Es una de las ecuaciones más conocidas y ampliamente utilizadas en mecánica de fluidos.

Para este trabajo las ecuaciones gobernantes son las leyes de conservación para masa, momento angular y energía en el sistema de coordenadas cartesianas que giran con velocidad angular sobre un eje que pasa por el origen del sistema de coordenadas, se pueden escribir en la forma de conservación de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad \text{Ec. 4}$$

$$H = h + \frac{u^2}{2} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde “u” es la velocidad del fluido, “ρ” es la densidad “Si” es una fuerza distribuida uniformemente en la masa por unidad de masa debida a la resistencia de un medio poroso ( $S_i^{\text{porous}}$ ), la flotabilidad ( $S_i^{\text{gravity}} = -\rho \cdot g_i$ , donde  $g_i$  es la componente de aceleración gravitacional en la dirección coordenada i-esíma) y la rotación del sistema de coordenadas ( $S_i^{\text{rotation}}$ ), por lo tanto,  $S_i = S_i^{\text{porous}} + S_i^{\text{gravity}} + S_i^{\text{rotation}}$ , “h” es la entalpía térmica, “ $Q_H$ ” es la fuente de calor o sumidero por unidad de volumen,  $\tau_{ij}$  es el tensor de la tensión de corte por viscosidad, “qi” es el flujo de calor difusivo. En la ecuación, los subíndices se usan para expresar la suma en las tres direcciones coordenadas.

Para el cálculo de flujos compresibles a alta velocidad y flujos con ondas de choque, se utiliza la siguiente ecuación de energía:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i (E + p)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H, \quad \text{Ec. 6}$$

$$E = e + \frac{u^2}{2}, \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

ρ: Densidad del fluido.

E: Energía total por unidad de masa, donde:

e: Energía interna específica.

$u_i, u_j$ : Componentes de la velocidad en las direcciones i y j.

$\tau_{ij}$ : Tensor de tensión viscosa.

qi: Flujo de calor difusivo.

ε: Término de disipación viscosa.

$S_i$ : Fuerza distribuida por unidad de masa en la dirección i.

$Q_H$ : Fuente o sumidero de calor por unidad de volumen.

Para los fluidos newtonianos, el tensor de tensión

de corte viscoso se define como:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

Siguiendo el supuesto de Boussinesq, el tensor de tensión Reynolds tiene la siguiente forma:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde “ $\delta_{ij}$ ” es la función delta de Kronecker (la cual es igual a la unidad cuando  $i = j$ , y cero en caso contrario), “μ” es el coeficiente de viscosidad dinámica, “ $\mu_t$ ” es el coeficiente de viscosidad de turbulencia por remolinos y “k” es la energía cinética de turbulencia. Nótese que “k” y “ $\mu_t$ ” son iguales a cero para flujos laminares. En el marco de un modelo “k-ε” turbulento, “ $\mu_t$ ” se define utilizando dos propiedades básicas de turbulencia llamadas, energía cinética de turbulencia “k” y la disipación de turbulencia “ε”.

$$u_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde “ $f_\mu$ ” es un factor de viscosidad turbulenta y se define por la siguiente ecuación:

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.0165 R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_\tau}\right) \quad \text{Ec. 11}$$

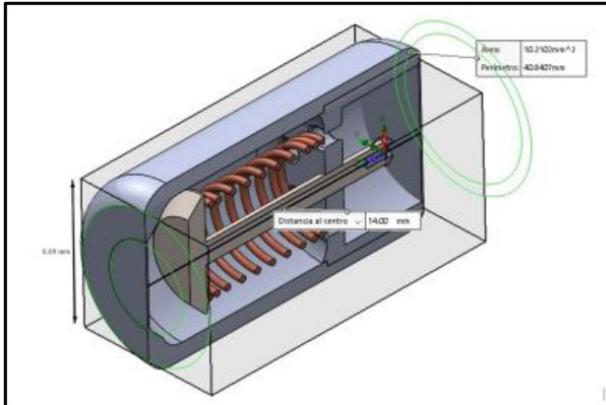
Donde Reynolds nos queda:

$$R_\tau = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}, \quad R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu} \quad \text{Ec. 12}$$

Y “y” es la distancia desde la pared. Esta función nos permite tener en cuenta la transición laminar-turbulenta. Adicionalmente el software utiliza dos ecuaciones de transporte adicionales para describir la energía cinética turbulenta y la disipación. Estas ecuaciones describen tanto los flujos laminares como los turbulentos. Además, las transiciones de un caso a otro y de vuelta son posibles. Los parámetros k y  $\mu_t$  son cero para flujos puramente laminares hipótesis a verificar en la MVI a través de las simulaciones CFD.

A continuación, se muestran las características generales del estudio, el dominio computacional y el mallado con el detalle del refinamiento (Fig.10 y

11). Se debe tener en cuenta que el tipo de análisis CFD en 3D utiliza celdas que se discretizan como para aplicar el método de volúmenes finitos.



Diámetro [mm]	Presión cmH2O			
	60	75	100	120
0,3	0,8988 mm	1,3629 mm	1,8661 mm	2,170 mm

Fig. 10 - Dominio computacional utilizado (vista de corte) y geometrías de estudio paramétricas.

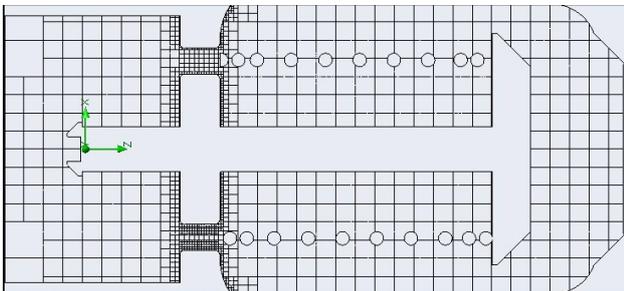


Fig. 11 – Corte en el plano medio de referencia para el mallado básico del fluido en el dominio computacional.

### Herramienta de diagnóstico comparativo (HDC)

Para poder llevar a cabo una comparación del comportamiento urodinámico de la microválvula intravesical frente a diferentes patologías se llevó a cabo un relevamiento bibliográfico e interconsultas a especialistas para desarrollar una herramienta de diagnóstico y pruebas del TU. De esta información se logró modelar una uretra masculina paramétrica, la cual permitiría el estudio de diversas patologías y comparar con la MVI y su interacción.

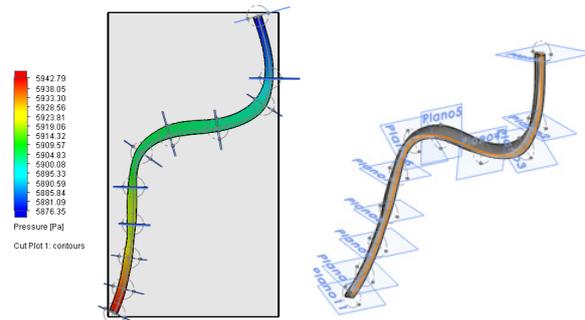


Fig. 12 - Reconstrucción 3D de una uretra masculina

Para comparar el funcionamiento de la válvula frente a diferentes obstrucciones del tracto urinario se realizaron simulaciones bajo las mismas hipótesis en las condiciones de borde para una uretra sana la cual se puede apreciar en la Fig. 12 y una patología obstructiva similar a las que se pueden observar a continuación en la Fig. 13.



Fig. 13 - Imágenes de cistografías en diferentes obstrucciones

Estas simulaciones mostraron resultados comparables con los estudios urodinámicos correspondientes a grados de obstrucción (Fig.13) validando que la HDC puede utilizarse para generar datos comparativos con la MVI y para otras aplicaciones médicas.

### Resultados

Para comparar el funcionamiento real de la MVI frente a una obstrucción del tracto urinario se utilizó un banco de pruebas (BdP) basado en el modelo propuesto por Griffiths "La Mecánica e Hidrodinámica del Tracto Urinario Inferior" (Griffiths, 1980), en donde se muestra una propuesta de montaje. Con el BdP se obtuvieron curvas y se compararon con los estudios de uroflujo-metría de la práctica médica.

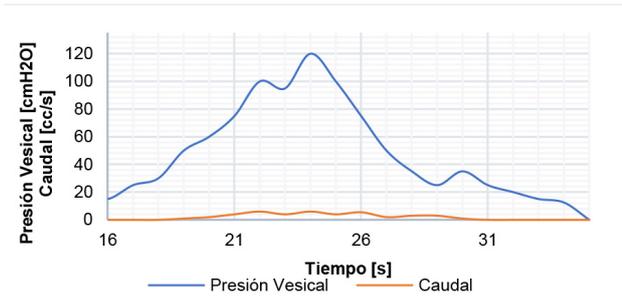


Fig. 14 - Curva urodinámica obtenida de la práctica médica.

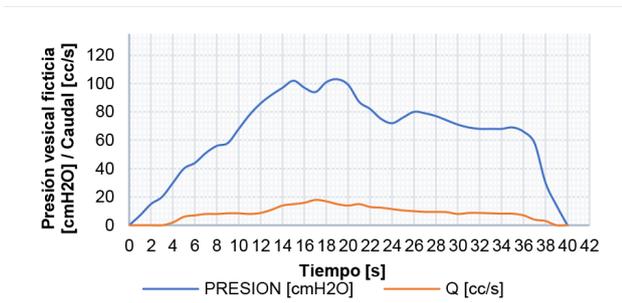


Fig. 15 - Curva urodinámica obtenida en BdP con la MVI\_e12

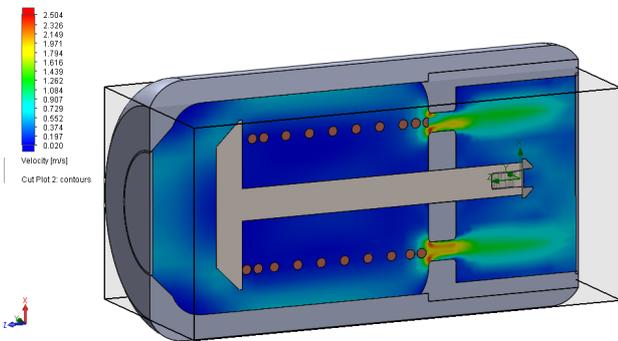


Fig. 16 - Vista 3D adicional del perfil de velocidades.

El comportamiento de la MVI se analizó dinámicamente en el BdP (Fig. 14 y 15) y los valores máximos de presión estática mediante el estudio CFD en el dominio definido (Fig. 16) tomando como referencia diferentes grados de apertura en función a las curvas de presión uretral obtenidas. Se logró obtener una gráfica (fig. 17) donde los valores se encuentran en el umbral de las presiones esperadas para una obstrucción menor.

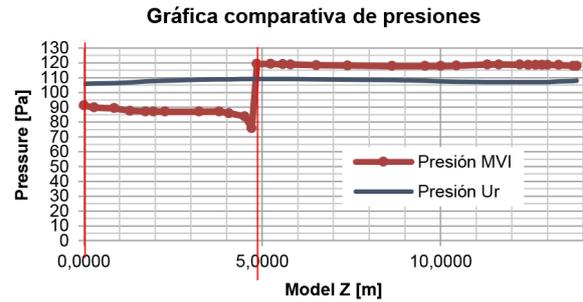


Fig. 17 - Comparación de presiones en el tracto simulado HDC y la MVI.

## Discusiones y conclusiones

Si bien la metodología se puede mejorar, el trabajo realizado buscaba establecer generar herramientas para este campo de estudio y se pudo validar que pese a las diferencias y saltos de presiones en los estrechamientos bruscos de la MVI (Fig. 17), son admisibles como una mejoría al caso de estudio simulado como una estenosis simple, la cual se consideraría una obstrucción menor para la uretra en la que los valores de presión en la zona de control resultando un 8,33% menor la zona de ingreso y un 18% menor para las zonas de mayor restricción en la MVI para la posición de mayor apertura líneas marcadas en la Fig. 17. Esta es una simplificación de un modelo SFI que compensa el efecto de interacción del fluido sobre el pistón, sumando el efecto desagregado de deformación elástica sobre el “resorte” interior en un estudio paramétrico con diferentes materiales y geometrías. Este trabajo se podría refinar con un método “time-dependent” estableciendo un número de pasos de cálculo no muy demandante para el estudio CFD.

## Agradecimientos

Al Instituto de Estructuras Arturo M. Guzmán, FACET-UNT por la contención y el apoyo para lograr con este trabajo el doctorado.

A Joaquín y a su familia, cuya vivencia fue el motivo principal del desarrollo y de la patente (Argentina Patente nº P20090103273, 2018).

A mi familia y mis colegas que me apoyaron a avanzar pese a las dificultades, especialmente a la Dra. Mariela Luege por la paciencia.

## Referencias

- Abrams P, C. L. (2002). The standardisation of terminology in lower urinary tract function: report from the standardisation sub-committee of the International Continence Society. *Neurourology and urodynamics*, 167-178.
- Bravo, C. V. (2005). Incontinencia y retención urinaria. *Tratado de geriatría para residentes*, 155-160.
- Griffiths, D. J. (1980). *Urodynamics - The Mechanics and Hydrodynamics of the Lower Urinary Tract*. Rotterdam: Adam Hilger Ltd.
- Hernández, C. C. (2018). Estudio de la influencia de los parámetros de corte y geometría con herramienta de acero rápido en procesos de mecanizado en el polímero poliamida 6. Quito: Universidad Politecnica Salesiana.
- Lacalle, L. L. (2009). *Machine Tools for High Performance Machining*. London: Springer.
- Maya R. Rodríguez-López, I. B.-C.-V. (2007). Patologías benignas de la próstata: prostatitis e hiperplasia benigna. *Revista Biomédica*, 18:47-59.
- National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, National Institutes of Health. (n.d.). National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, National Institutes of Health. Retrieved from <https://www.niddk.nih.gov/>.
- Rearte, M., & Bolivar, J. (2018). Argentina Patent No. P20090103273.
- Robles, J. E. (2006). La incontinencia urinaria. *An. Sist. Sanit. Navar.*, 29 (2): 219-232.
- Tim Idzenga, J. J. (2006). A biophysical model of the male urethra: comparing viscoelastic properties of PolyVinyl Alcohol urethras to male pig urethras. Rotterdam: The Netherlands: ErasmusMC, Dept. of Urology, Sector Furore.

## AUTOR

**REARTE, Martín** ID  ORCID 0000-0002-6876-0116

**BOLIVAR, Joaquín.**



REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

# Una reseña de (casi) 30 años de investigación sobre el comportamiento y falla de tanques de almacenamiento de petróleo

GODOY, Luis A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>a) Universidad Nacional de Córdoba. Profesor Emérito

<sup>1</sup>b) Investigador Superior del CONICET

## RESUMEN

En este trabajo intentamos recapitular brevemente la evolución de nuestros propios intereses sobre temáticas relacionadas con la estabilidad elástica y las acciones dinámicas sobre estructuras industriales y la manera en la cual pasamos de focalizar las investigaciones “teóricas” (extender una teoría existente) a intentar dar respuesta a problemas de estructuras de interés en una industria específica, tal como se presentan en la práctica.

Aunque se trata de experiencias y trayectorias del autor de esta nota a lo largo de tres décadas, esperamos que esta panorámica contenga algunas observaciones que pueden ser de utilidad a investigadores jóvenes.

**Palabras claves:** Estabilidad elástica – Viento – Tanques de petróleo

## *A review of (almost) 30 years of research into the behavior and failure of oil storage tanks*

### **Abstract**

*In this paper we attempt to briefly recapitulate the evolution of our own interests on topics related to elastic stability and dynamic actions on industrial structures and the way in which we went from focusing “theoretical” research (extending an existing theory) to trying to respond to structural problems of interest in a specific industry, as they are presented in practice. Although these are experiences and trajectories of the author of this note over three decades, we hope that this overview contains some observations that may be useful to young researchers.*

*Keywords: Elastic Stability – Wind – Oil Tanks*

## Introducción

### **Primeras exploraciones en la teoría general de estabilidad elástica**

Como muchos investigadores jóvenes, enfoqué mis primeros años post-doctorales en temas teóricos de la mecánica estructural, con

la esperanza de hacer contribuciones que enriquecieran una disciplina con un historial centenario. Con la culminación de mis estudios doctorales en la Universidad de Londres, la única opción que me planteaba era continuar profundizando los problemas que había identificado durante mis estudios en Inglaterra.

A mi regreso a Argentina, un colega que trabajaba en Tucumán, a quien había conocido en Londres, iniciaba un nuevo programa de Maestría en Ingeniería Estructural, algo que era altamente innovador en el país. La invitación de este colega, Rodolfo Danesi, fue de colaborar con el dictado de asignaturas en ese programa, y con el tiempo constituyeron cursos de elementos finitos y de estabilidad de estructuras. Con motivo de esa participación tuve el privilegio de interactuar con Danesi y sus colegas y con estudiantes de primer nivel (aunque ellos no lo supieran todavía) de diferentes lugares de Argentina.

Las primeras versiones de estas lecciones de estabilidad de estructuras se enfocaban en temas de interés teórico, en los que enfatizaba la formulación y la metodología por sobre la aplicación de esas ideas hacia problemas de interés práctico en la ingeniería de estructuras. Hacia 1980 la teoría de estabilidad elástica estaba bien fundamentada, en gran medida por las contribuciones de mis profesores en Londres, pero había áreas que permanecían inexploradas y que requerían de introducir modificaciones para abarcarlas. Como ejemplo de nuestras contribuciones, abordamos problemas que presentaban restricciones en el campo de desplazamientos, un tema en el que trabajó un egresado de Tucumán. Otros temas fueron la implementación de elementos finitos sobre la formulación de estabilidad y la interacción entre cargas estáticas y dinámicas en problemas de estabilidad. Algunos de esos avances dieron origen a numerosos artículos y un texto sobre la teoría de estabilidad elástica **Godoy** (2000).

En estas páginas quisiera comentar acerca de cómo fue el cambio de énfasis que me llevó a estudiar la estabilidad en problemas ingenieriles de interés práctico. Algunas reseñas del trabajo realizado se encuentran en **Godoy** (2016) y **Godoy et al.** (2022).

## Desarrollo

### **La realidad supera la ficción: Consecuencias de desastres naturales sobre estructuras de tanques**

Hacia 1995 había cambiado varias veces de lugar de trabajo cuando, estando como profesor e investigador en la Universidad de Puerto Rico, pude

conocer de primera mano lo que era un huracán (no ya en teoría sino porque tuve que sufrirlos con bastante angustia). Con motivo del huracán Marilyn que azotó las Islas Vírgenes americanas en 1995, viajamos con colegas a investigar las consecuencias estructurales y allí encontré que, entre las estructuras metálicas de pared delgada, las que más habían sufrido eran los tanques de petróleo. Debido a la esbeltez de estos tanques, la forma más común de falla estaba asociada al pandeo de la cáscara, lo que se acercaba mucho a mis intereses relacionados con estabilidad de estructuras de paredes delgadas. Fue mi oportunidad de unir la teoría y llevarla a problemas que fueran de interés no solo dentro de la academia sino también en la ingeniería y la producción de bienes y servicios.

En los años siguientes en Puerto Rico, con estudiantes de maestría y doctorado, nos enfocamos en problemas de pandeo de tanques de petróleo bajo cargas de viento, lo cual nos permitió relacionarnos con otros grupos de investigación principalmente en Europa y Asia.

En 1998 el huracán Georges cruzó la isla de Puerto Rico dejando importantes secuelas en las plantas de petróleo cercanas a la costa, lo cual motivó nuestra curiosidad e interés por investigar las formas de falla que no eran comunes en este tipo de estructuras. Los estudios de túnel de viento realizados en Australia eran la base del estado del arte, mientras que las modelaciones de tanques se hacían usando métodos simplificados. En Puerto Rico hicimos estudios en túnel de viento para determinar presiones debidas a viento, las cuales se aplicaban en forma secuencial sobre la cáscara para evaluar su estabilidad mediante análisis de elementos finitos. Este enfoque secuencial fue una novedad en el estado del arte en ese momento.

La escala del problema real subió en 2005 con la llegada de los huracanes Katrina y Rita, que en el lapso de un mes destruyeron buena parte de las facilidades de almacenamiento de crudo y derivados del petróleo en las costas del Golfo de México en Luisiana y Texas. Con el apoyo de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NSF) y por encargo de NIST (National Institute of Standards and Technologies), tuvimos acceso a recorrer las zonas afectadas a fin de identificar

modos de falla. Basado en una amalgama entre expectativas teóricas y la visualización de las consecuencias del fenómeno, fue posible establecer formas de daño que pueden esperarse de estos desastres naturales actuando sobre tanques de almacenamiento **Godoy** (2007). De los trabajos que hemos publicado en estos años, quizás esos fueron los que han tenido mayor repercusión tanto en la academia como en la ingeniería.

Un aspecto nuevo que surgió de estas misiones de reconocimiento de zonas afectadas por huracanes fue la dimensión social, porque a cada paso uno se enfrenta con personas que han sido afectadas por una u otra razón y su vida cambió asociada al evento. En zonas cercanas al río Mississippi en New Orleans, el desborde del río causó inundación en poblaciones enteras, como en Chalmette, y en las granjas de tanques se produjeron flotaciones de tanques, causando ruptura de la conexión entre tuberías y tanques. Esto ocasionó derrames de petróleo que desbordaron las instalaciones y las aguas contaminadas llegaron a zonas vecinas habitadas. Los pobladores debieron huir de sus viviendas y ya no pudieron regresar.

Esta línea de estudio del pandeo bajo viento continuó algunos años después con estudiantes de las Universidades Nacionales de Córdoba y del Comahue y posteriormente incursionamos en estudios de túnel de viento para tanques sometidos a condiciones especiales con colegas de La Plata y Resistencia. La modelación del flujo de viento sobre tanques realizada en la Universidad Nacional de Córdoba permitió identificar factores topográficos en este problema.

Recientemente hemos trabajado en temas de riesgo y fragilidad de tanques bajo la acción de viento, con énfasis en eventos asociados a vientos regionales y no ya a vientos huracanados. Estos estudios permiten explorar probabilidad de ocurrencia de niveles de daño para valores crecientes de la intensidad de viento. Esta es un área en la que estamos en proceso de incluir nuevos investigadores con experiencia en metodologías de análisis de fragilidad.

La experiencia de moverse de temas “teóricos” a temas “aplicados” fue algo muy beneficioso y enriquecedor, permitiendo palpar de cerca la

importancia de usar estudios avanzados de mecánica aplicada para comprender temas que preocupan a ingenieros, industriales y a la población.

Paralelamente con los estudios de viento surgió el interés de investigar la respuesta sísmica de tanques. Esta temática fue motivo de una tesis doctoral en Puerto Rico. En esta línea de trabajo había muchos investigadores interesados en diferentes países, incluyendo Estados Unidos, Japón y Argentina. Finalmente decidimos discontinuar esos estudios sísmicos y concentrarnos en otros temas que eran novedosos en el área de tanques. Uno de ellos fue el pandeo de tanques debido a descenso de la fundación. Por primera vez, el tema de cedimiento de la fundación en tanques fue visto como un problema de estabilidad. Esta temática fue posteriormente explorada principalmente por investigadores de China.

### **Nuevas experiencias que surgieron de accidentes de incendios en tanques**

Nuestro interés en problemas de fuego como causa de daño de tanques de almacenamiento de combustibles estuvo nuevamente asociado a un accidente de grandes proporciones: en 2009 se produjo un incendio en una planta de almacenamiento en Bayamón, cercana a la ciudad de San Juan de Puerto Rico, que destruyó más de 20 tanques durante los tres días que duró antes de ser extinguido. Para tener una idea de su magnitud, las nubes negras ocasionadas por el incendio podían verse desde la Estación Espacial Internacional. A diferencia de desastres de origen natural, como viento o sismo, los incendios de este tipo se conocen como de origen tecnológico.

Este era un campo bastante nuevo, que había sido estudiando principalmente en Edimburgo motivado por el incendio de una planta de almacenamiento de combustible en la localidad de Buncefield en 2005. Una novedad del incendio de Buncefield fue que quienes llevaron a cabo las investigaciones forenses a fin de delimitar responsabilidades fueron comisiones designadas por el gobierno y los resultados de esas investigaciones eran de dominio público. Por el contrario, en problemas similares ocurridos en otros países (incluyendo Estados Unidos), las compañías petroleras evitan compartir detalles de sus accidentes y no revelan información que pueda perjudicarlas de

alguna forma, por ejemplo, en litigios con compañías aseguradoras o con terceros que reclaman perjuicios.

El estudio detallado del comportamiento de tanques en la planta de Bayamón permitió reconstruir el proceso de deformación de algunos tanques, incluyendo modos de pandeo y de falla. En estas simulaciones iniciales no se estudió el problema acoplado, es decir modelando tanto la llama como el tanque al que llegan los efectos de radiación térmica, sino que se consideró como un problema desacoplado en el que se supone un campo de temperaturas que llegan al tanque objetivo. Esto es adecuado si solamente se intenta representar la primera ocurrencia de pandeo, pero no para estados más avanzados. Debido a la fuerte incidencia de las condiciones de contorno en este problema, se identificaron grandes diferencias de comportamiento entre tanques con techo fijo y tanques abiertos en su parte superior.

Estudios posteriores, en los que se incluyó a una investigadora de ingeniería química de la Universidad Nacional del Comahue, permitieron simular detalles de la llama y estudiar la transferencia de calor desde la fuente al tanque objetivo. Esto puso en evidencia qué factores importantes del accidente podían incluirse en la simulación, como el combustible que se quema, la distancia entre la llama y el tanque, efectos debidos a viento y su direccionalidad, así como detalles de la llama misma, como las zonas en las cuales el fuego está acompañado de humo. También se refinó el análisis estructural, siguiendo por primera vez el comportamiento post-crítico hasta alcanzar las máximas temperaturas que pueden obtenerse en la llama en base a sus condiciones.

### **Accidentes en plantas de tanques de almacenamiento debidos a explosiones**

La evidencia de accidentes disponible muestra que en la mayoría de los casos de incendios de tanques de almacenamiento de combustibles se generan explosiones que afectan a tanques vecinos, independientemente de los efectos térmicos. Tales explosiones se manifiestan como ondas de presión que se liberan en el foco de la explosión y se transmiten hacia el tanque objetivo, que recibe fuertes presiones dinámicas.

Para comprender mejor la problemática se hicieron inicialmente ensayos de explosiones con colegas de la Universidad de Carolina del Norte en Charlotte sobre modelos de tanques en escala reducida. Esto permitió confirmar la distribución espacial y temporal de las presiones dinámicas que afectan el tanque objetivo. El modelado de la respuesta dinámica del tanque objetivo, realizado en la Universidad Nacional de Córdoba, supuso tales distribuciones, permitiendo evaluar la estabilidad estática y dinámica de tanques bajo explosiones. Se ensayaron diferentes estrategias de análisis y de criterios de estabilidad del problema, dado que las categorías existentes no conducían a una adecuada representación del fenómeno de pandeo de cáscaras bajo cargas repentinas. También se tomaron en cuenta efectos de plasticidad en el material de un tanque.

La siguiente etapa ha sido el trabajo en conjunto con investigadores de la Universidad Nacional de Tucumán, quienes aportaron su gran experiencia en simulaciones de explosiones que afectan las estructuras vecinas, en gran medida gracias a la participación de Rodolfo Danesi y sus discípulos directos. En este caso las simulaciones fueron de tipo acoplado, en las que tanto la fuente como el objetivo forman parte del mismo modelo. Esto permite seguir la generación de la onda de choque en un ambiente computacional hasta su impacto con la estructura del tanque y evaluar las deformaciones de las paredes del tanque y daño del material. De modo similar al estudio acoplado entre la llama y el tanque, en este caso la modelación acoplada permite incluir factores como el tipo de explosivo, la localización con respecto al tanque objetivo, la distancia entre la fuente y el objetivo y los efectos del suelo en la transferencia de la onda.

### **Conclusiones**

En este trabajo intentamos recapitular brevemente la evolución de nuestros propios intereses y la manera en la cual pasamos de focalizar las investigaciones “teóricas” (extender una teoría existente), a intentar dar respuesta a problemas de estructuras de interés en una industria específica, tal como se presentan en la práctica.

Aunque se trata de experiencias y trayectorias del autor de esta nota, esperamos que esta panorámica contenga algunas observaciones que puedan ser de utilidad a investigadores jóvenes.

## Reflexiones finales

Nuestros temores iniciales estaban asociados a desprendernos del bagaje teórico que conlleva una teoría general bien establecida, lo cual permite trabajar con una cierta seguridad. Pero la experiencia de estos 30 años nos ha demostrado que la transferencia de conocimientos a situaciones de la práctica no es trivial y que requiere de superar nuevos desafíos que vale la pena enfrentar. En nuestra experiencia, el nivel de las investigaciones no se redujo en tal proceso, sino que cambiaron las motivaciones y los interlocutores.

Un cambio sustancial experimentado durante estos años fue el pasaje de investigaciones llevadas a cabo individualmente o con un grupo muy reducido, a la interacción y trabajo en equipo con investigadores de otras instituciones y países. La interacción con investigadores de Argentina fue de inmensa importancia, porque los lazos establecidos se han prolongado por décadas, como en el caso de la Universidad Nacional de Tucumán, liderada por Rodolfo Danesi en muchos momentos. En un inicio la interacción se materializó mediante el dictado de cursos, pero pronto se transformó en el desarrollo de líneas de investigación.

Los investigadores asociados extranjeros en estos temas provenían principalmente de Estados Unidos, Inglaterra, Grecia e Israel, llevándose también a cabo intercambios con investigadores de Francia, China, Brasil, Sudáfrica. En algunos casos no llegamos a conocer de manera presencial a algunos investigadores con quienes colaboramos, pero la interacción se mantuvo por muchos

meses y se lograron resultados importantes.

Nuestra experiencia en estos años de trabajo sobre tanques de petróleo también incluye aspectos como la conveniencia de abandonar un tema cuando las condiciones no parecen ser favorables para su estudio por un grupo de investigación. Esto quedó ilustrado luego de cuatro años dedicados a la respuesta sísmica de tanques, que fueron muy productivos, pero llegó un momento en que nuestros propios límites y posibilidades nos indujeron a cambiar de rumbo. La lección aprendida fue que no debíamos aferrarnos a un tema específico cuando se llega a un punto en el cual se hace difícil continuar produciendo trabajo original.

## Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a la memoria del Dr. Rodolfo Danesi, el gran propulsor de los estudios avanzados e investigación de Ingeniería Estructural en Tucumán. Su actuación permitió colocar esta área en un primer plano a nivel nacional e internacional.

Agradecemos a los miembros de grupos de investigación con quienes compartimos estos estudios sobre tanques: Fernando G. Flores, Sergio A. Elaskar, Oscar Falcinelli, Luis Soria-Castro, Mariano P. Ameijeiras, Carlos A. Prato (en Córdoba), Julio C. Méndez, Sandra López-Bobonis, Genock Portela, Juan C. Virella, Eduardo M. Sosa, Jean C. Batista-Abreu, Luis E. Suárez, Ali Saffar (en Puerto Rico), Rossana C. Jaca, Susana N. Espinosa, H. Daniel Calabró, Carlos A. Burgos (en Neuquén), Bibiana Luccioni (en Tucumán), David Weggel, Mathew J. Whelan (en Carolina del Norte), James G. A. Croll (en Londres), Daphne Pantousa (en Grecia), Aphonse Zingoni (en Sudáfrica), Moshe Eisenberger (en Israel).

## Referencias

**Godoy L. A.** (2000) "Theory of Elastic Stability: Analysis and Sensitivity", *Taylor and Francis*, Philadelphia, PA, USA.

**Godoy L. A.** (2007) "Performance of storage tanks in oil facilities following Hurricanes Katrina and Rita", *ASCE Journal of the Performance of Constructed Facilities*, vol. 21 (6), pp. 441-449.

**Godoy L. A.** (2016) "Buckling of oil storage steel tanks: Review of static buckling", *Thin-Walled Structures*, vol. 103(1), pp. 1-21.

**Godoy L. A., Jaca R. C., Ameijeiras M. P.** (2022) "On buckling of oil storage tanks under nearby explosions and fire", *Above Ground Storage Tank Oil Spills: Applications and Case Studies*, M. Fingas (Ed.), Elsevier, Capítulo 7, pp. 199-259.

## AUTOR

**GODOY, Luis A** ID  ORCID 0000-000323618471



cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

# Breve CV del Dr. Rodolfo Francisco Danesi

LUCCIONI, Bibiana María<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.  
Instituto de Estructuras "Arturo M. Guzmán".  
Av. Independencia 1800, Tucumán. Argentina.  
bluccioni@herrera.unt.edu.ar.  
<https://orcid.org/0000-0003-2860-8117>

**Rodolfo Danesi** cursó sus estudios universitarios de grado en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, graduándose como Ingeniero Civil en julio de 1963. Siendo aún estudiante, se inició en la investigación científica bajo la dirección del Profesor Ing. Arturo M. Guzmán, con quien trabajó primero como auxiliar y luego como Instructor en el Laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería Civil.

En 1964, viajó a los Estados Unidos becado por el CONICET para realizar trabajos de investigación sobre "El Comportamiento Plástico de Estructuras de Hormigón Armado", bajo la dirección del Profesor Dr. Edward Nawy. Permaneció allí más de dos años, durante los cuales realizó cursos de posgrado en las universidades de "Princeton University" y de "Rutgers University" obteniendo el grado académico de "Master of Science" (in Civil Engineering).

En 1967, regresó a Tucumán siendo designado Profesor Asistente con dedicación exclusiva en las cátedras de "Elasticidad Aplicada" y de "Ensayo de Estructuras", reincorporándose al grupo de investigación del Laboratorio de Estructuras que, para ese entonces, dirigía el Profesor Dr. Alfredo Schegg.

En 1970, viajó a Inglaterra becado por el Gobierno Británico para realizar estudios de perfeccionamiento en el "Imperial College of Science and Technology" de Londres, bajo la dirección del Profesor Dr. A.L.L. Baker, quien más tarde lo invitó a permanecer en Inglaterra por tres años más en calidad de "Research Fellow" a fin de realizar un trabajo de investigación sobre "Puentes Pretensados de Sección Cajón" para el Ministerio de Transporte del Reino Unido. En base a los

resultados de esas investigaciones elaboró su tesis doctoral obteniendo el grado académico de "Doctor of Philosophy" (in Engineering) de la Universidad de Londres, en Mayo de 1977.

En Agosto de 1977 regresó al país y se reintegró inmediatamente a la Universidad Nacional de Tucumán como Profesor Titular del Instituto de Ingeniería Civil, siendo designado a su vez Director del Laboratorio de Estructuras. A partir de entonces dirigió varios programas de investigación sobre "Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado" y sobre "Estructuras Sismorresistentes", la mayoría con financiación de la Universidad Nacional de Tucumán y subsidios del CONICET y del BID. Paralelamente, con la colaboración de un importante grupo de trabajo, organizó cursos de graduados sobre distintos temas de Ingeniería Estructural.

Gracias a su iniciativa, proyecto y gestión se crearon las carreras "Magister en Ingeniería Estructural" y "Doctorado en Ingeniería" que se implementaron en la FACET UNT, por primera vez en el país. Desde 1986 hasta el año 2005 se desempeñó como Director Académico de dichas Carreras de Posgrado.

Fue Miembro del Honorable Consejo Superior y Presidente de la Comisión de Becas de la Universidad Nacional de Tucumán durante cuatro períodos consecutivos. Fue Secretario de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Miembro Titular del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán, Director de la Regional NOA de la Asociación Argentina del Hormigón Pretensado (AAHP) y Presidente de la Federación de Docentes e Investigadores de la Universidad Nacional de Tucumán (FEDIUNT).

Bajo su dirección, propulsó la transformación del Laboratorio de Estructuras en Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán” que tuvo lugar en el año 2000. Continuó como director de dicho Instituto hasta el año 2003.

Participó en trabajos de asesoramiento de elevada complejidad como el peritaje del atentado a la Embajada de Israel, encargado por la Suprema Corte de Justicia de la Nación en el año 1996, y el peritaje del atentado al edificio de la AMIA, encargado por el Tribunal Oral en lo Criminal Federal N°3 en el año 2001.

Fue distinguido como Profesor Visitante de varias universidades extranjeras: de la Heriot-Watt University, Edimburgo, Escocia, en 1981 y 1982, de la University of Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda en 1989 y del Imperial College of Science and Technology de Inglaterra, en 1991 y 1994.

Llegó a ser Investigador Principal del CONICET y autor de más de 100 trabajos de investigación, presentados a congresos nacionales e internacionales y publicados en revistas del país y del extranjero.

En 1983 recibió en Londres el “Premio Thomas Telford”, máxima distinción internacional en el campo de la Ingeniería Civil que anualmente otorga

“The Institution of Civil Engineers” de Inglaterra al autor de la contribución más valiosa del año.

En 1985, fue incorporado a la Academia Nacional de Ingeniería como Académico Correspondiente, y en 1987, la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales le otorgó el “Premio Enrique Villarreal” en mérito a su labor de investigación científica en el campo de la Ingeniería Estructural. A su vez, en 1990 fue designado Académico Correspondiente de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

En 1994 fue designado “Profesor Plenario” de la Universidad de Belgrano “por su reconocida trayectoria científica en el ámbito nacional e internacional”. En 2009 recibió el título de “Doctor Honoris Causa” de la Universidad Nacional de Cuyo.

Integró la “Comisión del Centenario”, comisión que creó la UNT con miembros “notables” para organizar las celebraciones del centenario.

En otro ámbito, fue Legislador de la Provincia de Tucumán entre los años 2003 y 2007.

La Universidad Nacional de Tucumán le concedió el título de Dr. Honoris Causa, título que no pudo recibir personalmente, por lo que se le entregó a su familia después de su fallecimiento ocurrido el 20 de febrero de 2023.

cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

# LEGADO EN CONCRETO:

## Memoria Fotográfica de un Maestro de la Ingeniería





## RECUERDOS DEL DR. RODOLFO DANESI

LUCCIONI, Bibiana María

Verdaderamente es para mí un gran honor poder escribir estas palabras en homenaje a alguien tan querido, valioso y destacado en el Instituto de Estructuras, en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, en la Universidad Nacional de Tucumán, como lo fue y seguirá siendo el Dr. Rodolfo Danesi, cuya actuación trascendió el ámbito académico. No voy a referirme a su *curriculum* que muestra el nivel de excelencia que alcanzó en la actividad académica. Intentaré describir brevemente lo que el Dr. Danesi representó para el Instituto de Estructuras, la Facultad y la Universidad Nacional de Tucumán.

Lo conocí providencialmente antes de entrar a la Universidad. Tenía dudas sobre la carrera universitaria que seguiría y vine al centro Herrera. Sin querer, llegué al entonces Laboratorio de Estructuras. Percibí desde la entrada un clima distintivo del ambiente de investigación que allí se vivía. Al llegar a las oficinas, encontré un grupo de docentes reunidos, probablemente estaban ocupados discutiendo algún tema académico, pero me recibieron como si hubieran estado esperándome. Se trataba justamente del Dr. Rodolfo Danesi y de los Ingenieros Juan Carlos Reimundín y Roberto Cudmani, que ya se destacaban como profesores por sus tareas de investigación.

Allí me contaron que, junto al Ing. Arturo Mario Guzmán, de quien lleva actualmente el nombre el Instituto de Estructuras, habían iniciado las actividades de investigación en el área de las estructuras en el año 1961. Estos trabajos de investigación habían dado lugar a la participación en congresos de la especialidad y a la posibilidad de que las actividades del grupo se proyectaran a nivel nacional y de Sudamérica.

Los objetivos que había planteado ya en ese entonces el Ing. Guzmán, estaban dirigidos hacia la formación de recursos humanos en la docencia y la investigación científica. Fue así que, junto al Dr. Schegg, habían comenzado a incentivar a sus

discípulos a realizar cursos de posgrado en el extranjero, ante la inexistencia de los mismos en las áreas de las ingenierías en nuestro país.

El Dr. Danesi, que había viajado a Inglaterra para realizar el doctorado en el Imperial College de Londres, había regresado en 1977 y se había hecho cargo de la dirección del Laboratorio.

Después de una charla muy motivadora me fui convencida de que quería estudiar Ingeniería Civil y dedicarme a las estructuras. No volví a ver al Dr. Danesi hasta cuarto año cuando cursé la materia Elasticidad Aplicada. En esas clases brillantes y entretenidísimas que se dictaban en el Laboratorio de Estructuras no había lugar para distraerse ni un momento. Cuando estaba terminando el penúltimo año de la carrera, surgió la posibilidad de presentarme a una beca de iniciación en la investigación para alumnos y no dudé en pedirle trabajar bajo su dirección en el Laboratorio de Estructuras, donde me quedé hasta la fecha, gracias a las posibilidades que él mismo me fue dando de seguir formándome en esta universidad.

El Dr. Danesi y los Ings. Reimundín y Cudmani, habían comenzado a sembrar años atrás la idea del posgrado en la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, dirigido a la formación sistemática de recursos humanos para la docencia universitaria y la investigación. En momentos bastante difíciles para el país, encontraron muchas dificultades para concretar sus ideas. Sin embargo, fueron creando antecedentes valiosísimos que culminaron con la creación del Departamento de Posgrado de la Facultad en el año 1982.

Algunos años más tarde, en febrero de 1986, el Honorable Consejo Superior Provisorio de la Universidad Nacional de Tucumán aprobó la carrera de posgrado "Magister en Ingeniería Estructural" propuesta por el Dr. Danesi.

Gracias a la colaboración de prestigiosos profesores de las Universidades Nacionales de Buenos Aires, Córdoba y Rosario y de la Universidad

Federal de Río Grande do Sul (Brasil) que aceptaron integrar el Cuerpo de Profesores junto con los profesores de la Universidad Nacional de Tucumán, fue posible iniciar las actividades del “1er Magister en Ingeniería Estructural” en agosto de 1986. Se trataba en ese entonces de la primera carrera de posgrado estructurada de la UNT y la primera de este tipo en el área de la Ingeniería Civil en el país.

Tuve el honor de contarme entre los 10 alumnos de la primera cohorte. 9 alumnos finalizamos exitosamente demostrando que la Maestría había nacido fuerte.

El éxito alcanzado por el “Magister en Ingeniería Estructural” dio origen, también por iniciativa del Dr. Danesi, a la creación del “Doctorado en Ingeniería” en 1988, en el que nos inscribimos varios de los egresados del primer Magister.

El Doctorado en sus inicios estaba orientado a la Ingeniería Estructural, pero, con los años, se fue abriendo a otras áreas de la Ingeniería, mecánica, aeronáutica. Una muestra evidente de esto fueron las charlas técnicas a cargo de egresados organizadas en el marco del homenaje al Dr. Danesi.

El Dr. Danesi tuvo a su cargo la Dirección Académica de la Maestría en Ingeniería Estructural y del Doctorado en Ingeniería desde su creación hasta el año 2005, casi 20 años.

Desde el punto de vista institucional, el hecho de mantener en el tiempo esta política de formación de recursos humanos, ha dado destacables resultados entre los que se pueden mencionar las sucesivas acreditaciones con la máxima calificación a nivel nacional obtenidas por la Maestría en Ingeniería Estructural y el Doctorado en Ingeniería.

Se han desarrollado 17 ciclos de la Maestría con 57 egresados y 24 del Doctorado. Estos egresados se desempeñan exitosamente en la docencia e investigación tanto en la UNT como en otras universidades del país, incluso algunos en el extranjero. Otros desarrollan su actividad en destacadas empresas públicas y privadas insertándose con facilidad en los más altos niveles.

Esta escuela de posgrado iniciada en el año 1986 ha servido de ejemplo y aliento a otras que se iniciaron luego en la Facultad de Ciencias Exactas y

Tecnología, que hoy cuenta con seis doctorados, siete maestrías y tres carreras de especialización, y a otras Maestrías en Ingeniería Estructural que se abrieron en distintas universidades argentinas impulsadas por los mismos egresados, como la Maestría en Ingeniería Estructural de la Universidad Nacional de Cuyo, creada y dirigida durante muchos años por un egresado de la Maestría en Ingeniería Estructural y del Doctorado en Ingeniería.

Era admirable la capacidad de gestión del Dr. Danesi y la facilidad con que se vinculaba exitosamente con colegas de prestigiosas universidades extranjeras con las cuales firmaron convenios que dieron lugar a intercambios académicos de los que nos beneficiamos muchos de los alumnos de posgrado e incluso algunos docentes.

El Dr. Danesi se preocupaba también por todos los aspectos materiales y sobre todo personales, para que pudiéramos estudiar e investigar eficientemente. Basta mencionar que, además de ocuparse de que los que venían de otros lugares tuvieran vivienda y acondicionarlos a cada uno un lugar de estudio en el laboratorio, durante los cursos nos conseguía entradas para los conciertos organizados por la Universidad y logró que una prestigiosa profesora de danza diera clases de gimnasia. Organizaba encuentros sociales con las familias de los que él y su familia también participaban. Fue muy cercano siempre, acompañándonos en todos los acontecimientos felices y también en los momentos duros. Todo esto nos permitió a muchos cultivar una amistad familiar que aún perdura en el tiempo.

Nos impulsaba siempre a la excelencia. Estaba convencido de que el prestigio académico y profesional es una herramienta poderosa para servir a la sociedad que requiere no sólo conocimientos y prácticas, sino también el desarrollo de virtudes humanas y otras habilidades que permiten resolver los problemas de manera más eficaz. Nos impulsaba a ser decididos y audaces. Recuerdo, por ejemplo, que, al recibir el requerimiento por parte de la Academia Nacional de Ingeniería de la simulación computacional del atentado de la AMIA, lo cual en esa época representaba un verdadero desafío, por las connotaciones del trabajo y el tiempo que requería, dudé inicialmente de poder hacerlo. Entonces me dijo que debíamos

hacerlo, que teníamos una formación sólida y veníamos estudiando esos temas, así que pusieramos todos los medios para lograrlo. Ese trabajo representó un importante avance en la investigación que veníamos realizando y dio lugar a publicaciones y conexiones académicas.

A su lado tuve la oportunidad y el orgullo de formarme no sólo en investigación (fue mi director de tesis de Maestría y de Doctorado) sino también en la tarea de conducción de las carreras de posgrado. Destaco la forma natural en que nos fue transmitiendo su saber y entusiasmo, dándonos responsabilidades gradualmente crecientes para capacitarnos en esta tarea, de manera de poder hacernos cargo en el momento que fuera necesario. Sabía delegar para ocuparse de aquellos temas en los que era insustituible.

No dudaba en corregirnos claramente cualquier actitud que pudiera ser perjudicial para la armonía del equipo. La idea de esa gran familia del Laboratorio (luego Instituto) donde los valores y las personas prevalecen sobre cualquier logro académico/científico quedó grabada en todos los que nos formamos a su lado.

La vinculación con el actual Instituto de Estructuras y sus miembros no se limitó al período en el que estuvo como Director. Siguió siendo siempre un referente al cuál recurríamos para pedir consejo sobre las decisiones importantes. Además,

estaba siempre atento y disfrutaba que le contáramos cómo se iban desarrollando las cosas por acá. No faltaba nunca a los actos y celebraciones.

Considero que estas breves palabras explican claramente el origen de la admiración, agradecimiento y cariño que sentimos hacia Rodolfo Danesi, como me animé a referirme a él en los últimos años, cuando ya la brecha de edad se hizo relativamente menor.

Será siempre reconocido como el fundador y continuo impulsor de esta escuela de excelencia académica y de quien todos destacamos, admiramos y agradecemos, además de su capacidad intelectual, su espíritu visionario, perseverancia y entrega personal.

Le estaré siempre profundamente agradecida por su grandeza y a Dios por haberme dado la oportunidad de conocerlo, formarme y trabajar a su lado.

Sin duda, la mejor forma de homenajearlo es con el acto en el que se reunieron las autoridades, sus discípulos, su familia y amigos y con las charlas técnicas organizadas que mostraron el nivel de excelencia de sus discípulos en muchas áreas de la Ingeniería y cómo están contribuyendo a resolver los problemas de la sociedad. Pero también lo recordamos y homenajeamos a través de este encuentro de la gran familia que él gestó en el Instituto de Estructuras, donde seguirá estando presente mientras haya quienes sigan su legado.

## AUTOR

LUCCIONI, Bibiana María ID  ORCID 0000-0003-2860-8117



REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

## Instrucciones para Autores

La revista cuenta con distintas **categorías**, clasificadas según el **tipo de trabajo** presentado. Las categorías corresponden a trabajos de: INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN; DOCENCIA; EXTENSIÓN; INFORME TÉCNICO; NOTAS, ARTE Y OPINIÓN; HOMENAJES; COMUNICACIONES CORTAS.

Las **instrucciones** que se presentan a continuación tienen el propósito de **estandarizar la presentación de trabajos**.

El texto completo se debe presentar solamente en versión digital, editado con un procesador de texto (documento en Word o compatible). Debe estar formateado para hoja tamaño DIN A4 (210 x 297 mm), a simple espacio y con márgenes de 2,5 cm en los cuatro lados de la página. Podrá tener una extensión de hasta 8 páginas para trabajos de INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN y de hasta 5 páginas para las categorías: DOCENCIA; EXTENSIÓN; INFORME TÉCNICO; NOTAS, ARTE Y OPINIÓN; HOMENAJES.

Las COMUNICACIONES CORTAS son pertinentes si ellas resultan de un trabajo que muestre una contribución nueva o de **importancia inmediata**. Deben ser escritas en no más de 1000 palabras. Se acepta como máximo una tabla o gráfico y una fotografía; en este caso, el número máximo de caracteres debe reducirse a 800. Deben satisfacer las instrucciones para los artículos originales y pueden o no tener subtítulos.

En todas las categorías el texto principal debe estar escrito con tipografía **Arial**, tamaño de fuente de **10 pt**, con párrafos sin sangría y **a dos columnas**.

La versión digital se debe enviar como archivo adjunto al correo electrónico [revista@herrera.unt.edu.ar](mailto:revista@herrera.unt.edu.ar). El autor debe consignar la **categoría** en la que considere que debe ser incluido su trabajo. El **asunto** del correo electrónico debe contener la siguiente información y formato: "Apellido del primer autor – Categoría" (Ej.: "Pérez - INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN"). La categoría puede ser modificada por los editores.

Los títulos de los artículos deben ser sucintos y suficientemente informativos y precisos, en lo que se refiere al contenido, como para que tengan un interés práctico en las listas de títulos, así como para la codificación. No deben contener abreviaturas. No pueden exceder los **100 caracteres**, incluyendo los espacios. En el caso de los trabajos de la categoría Investigación, Desarrollo e Innovación, los títulos deben ser presentados en castellano y en inglés.

Luego del título del artículo deben identificarse los autores con sus filiaciones. En la firma de la publicación debe aparecer siempre la **filiación institucional** después del nombre de los autores, en idioma español, sin siglas, abreviaturas ni traducciones. Ejemplos:

Apellido/s, nombre/s<sup>1</sup>

<sup>1</sup> a) Universidad Nacional de Tucumán. Facultad (denominación completa). Y, según corresponda: Departamento / Instituto / Cátedra / Escuela / Secretaría. Dirección postal (si correspondiera), Tucumán. Argentina.

Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

<sup>1</sup> b) En otro tipo de centros, institutos u organismos, públicos o privados.

Denominación completa del centro, instituto u organismo, seguida de su sigla en paréntesis si existiera. Y, según corresponda: Área / Departamento / Instituto / Otro.

Dirección postal (si correspondiera), Provincia / Estado. País. Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

Apellido/s, nombre/s<sup>1,2</sup>

<sup>2</sup> a) En centros o institutos con dependencia compartida con CONICET.

Denominación completa del centro o instituto seguida de su sigla en paréntesis si existiera. Universidad Nacional de Tucumán-CONICET.

Dirección postal (si correspondiera), Provincia / Estado. País.

Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

<sup>2</sup> b) En centros o institutos con múltiple dependencia.

Denominación completa del centro o instituto seguida de su sigla en paréntesis si existiera. Universidad Nacional de Tucumán-CONICET -Tercera institución – Cuarta institución ( según corresponda)

Dirección postal (si correspondiera), Provincia / Estado. País.

Dirección de correo electrónico institucional (si correspondiera). Código ORCID.

Los trabajos de INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN a editarse serán acompañados por un **Resumen** en castellano de no más de 200 palabras y otro en inglés de igual límite de extensión.

Para facilitar la búsqueda temática, a continuación de los resúmenes se incluirán **tres palabras clave** en castellano y las correspondientes tres en inglés. Los editores podrían sugerir una corrección del idioma o introducir correcciones menores cuando se considere necesario. El resumen es generalmente la parte leída por el mayor número de interesados. Es una condensación informativa de los principales logros del trabajo, no una descripción de los contenidos del trabajo. El resumen debe presentar tanta información cualitativa y cuantitativa como sea posible, siendo al mismo tiempo breve, específica y autocontenida. El resumen no deberá contener detalles experimentales triviales, figuras o ecuaciones.

El **Resumen** será seguido por la **Introducción**, en la cual los autores deberán compendiar las motivaciones del trabajo, especificar claramente los objetivos del estudio e incluir una búsqueda actualizada de la literatura. En la sección **Desarrollo** o **Material** y **Métodos** deberán ser incluidos: descripciones de experimentos, técnicas, métodos, instrumentos o aparatos y procedimientos empleados, con la precisión adecuada, para permitir a otros observadores que reproduzcan sus resultados. Los **Resultados** serán seguidos por la **Discusión** y finalmente por las **Conclusiones**, al final del manuscrito. Los reconocimientos a instituciones, soportes financieros, discusiones, etc, deberán ser incluidos en los **Agradecimientos**, al final de las Conclusiones.

Las **Referencias** son trabajos citados en el texto. Debe seguirse el sistema Harvard. En el caso de un autor, nombre del autor en negrita y año de publicación entre paréntesis. Ej.: **Jones** (1999). En el caso de dos autores, ambos apellidos deben mencionarse. Ej.: **Fisher y Holleberg** (1963). Para tres autores o más, el nombre del primer autor debe ser seguido por “et al.”. Ej.: **Fisher et al.** (1980). La **Bibliografía** se refiere a textos relacionados con el tema, que el autor considera oportuno listar, al final del trabajo, en orden alfabético por el apellido del autor principal.

La **Información Biográfica** sobre el autor o autores debe presentarse con una extensión máxima de 160 palabras por cada autor. Se incluirá la dirección electrónica del autor/es indicando la Institución donde se realizó el trabajo y la fecha.

Dentro del texto, los **títulos** y **subtítulos** no deben numerarse.

Las unidades correspondientes a las distintas magnitudes deben ser indicadas sin punto.

Las **fórmulas** deben ser señaladas por números progresivos ubicados sobre la derecha, entre paréntesis.

Las **figuras** o **fotografías** deben ser numeradas progresivamente para su identificación. Se presentarán fuera del texto, deben tener la referencia precisa de ubicación y ser citadas en el cuerpo del texto. Las figuras y las fotografías deben ser originales de los autores. Si son modificaciones o reproducciones de otro artículo, es necesario acompañar el permiso del editor correspondiente, para salvaguarda de los derechos del autor. Los **epígrafes** de las figuras serán escritos todos juntos en hoja aparte. Las figuras por publicarse en una columna deben tener 8 cm de ancho aproximadamente, mientras que las que se van a publicar a dos columnas, 17 cm de ancho aproximadamente. Para fotografías, las dimensiones se pueden tomar con más tolerancia. Debe

verificarse que la resolución de la imagen sea la adecuada para la publicación digital de la Revista. Los **rótulos** insertos en figuras y fotografías deben ser **legibles**, el tamaño de letra no debe ser inferior a un equivalente de 10 pt. Identifique y explique todo símbolo, flecha, número o letra que haya empleado para señalar alguna parte de las ilustraciones.

Las **tablas** serán creadas con el procesador de texto. Deben ser numeradas progresivamente para su identificación, se presentarán fuera del texto, deben tener la referencia precisa de ubicación y ser citadas en el cuerpo del texto. Los epígrafes de las tablas serán escritos todos juntos en hoja aparte. En las secciones **Referencias** y **Bibliografía**, al final del artículo, las citas deben ser presentadas en orden alfabético por el apellido del primer autor, de acuerdo con los siguientes ejemplos:

Cuando se refiere a un artículo de revista:

**Apellido e inicial del nombre del autor** (Año, subdivididos en a, b, c, etc. para trabajos del mismo año). "Título del artículo" entre comillas, *Nombre de la revista*, volumen, número, página inicial y final del artículo.

Ejemplo: **Hibbs, R. G., Burch, G. E., Phillips, J. H.** (1958). "The fine structure of the small blood vessels of normal dermis and subcutis", *Am Heart J.*, Vol. 56, pp. 662-670. Por favor, tenga en cuenta el modo de puntuación usado en el ejemplo de arriba. Para abreviar correctamente los nombres de las revistas consulte ISI Journal Abbreviations Index: <http://library.caltech.edu/reference/abbreviations/>.

Cuando se refiere a un artículo de revista consultado electrónicamente:

**Apellido e inicial del nombre del autor** (Año) "Título del artículo", *Nombre de la revista*, volumen, número, página inicial y final del artículo. Dirección con el formato <http://www.../> ... y fecha del último acceso. E-mail del autor.

Cuando se refiere a un libro completo:

**Apellido e inicial del autor** (Año) *Nombre del libro*. Editorial, lugar.

Ejemplo: **Happel, J. and Brenner, H. (eds.)** (1985) *Low Reynolds Number Hydrodynamics with Special Applications to Particulate Media*. Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, New Jersey, E.E.U.U.

Cuando se refiere a un capítulo de un libro:

**Apellido e inicial del nombre del autor del capítulo** (Año) Título del capítulo, En: *Título y subtítulo del libro*, (Editores del libro), Editorial, Lugar de edición, Página inicial y final del Capítulo. Ejemplo: **Green, K.P., Smith, P. and Martin, K.** (1993) Exitatory amino acids, En: *Glutamate Receptors*, (Jones, T., ed.), J. Wiley Press, New York, E.E.U.U., pp. 24-59.

Cuando se refiere a un libro consultado electrónicamente:

**Apellido e inicial del nombre del autor.** *Título del libro*. Nombre del editor, compilador o traductor. Datos de la publicación. Fecha de consulta. Acceso (dirección completa de Internet).

Ejemplo: **Austen, J.** *Pride and prejudice*. Ed. Henry Churchyard. 1996. 10 Sept. 1997. <<http://www.pemberley.com/janeinfo/pridprej.html>>

Cuando se refiere a un trabajo publicado en anales de un congreso (*proceedings*), conferencia o reunión:

**Apellido e inicial del nombre del autor del trabajo** (Año) Título del trabajo, En: *Nombre del congreso, conferencia o reunión*, lugar, Página inicial y final del trabajo.

Ejemplo: **Billings, C. y Wilder, J.** (1974) Major applications of fabric filters, En: *Proceedings of EPA Symposium on Control Emission*, San Francisco, California, E.E.U.U., pp. 120-133.

Cuando se refiere a una tesis o trabajo de grado:

**Apellido e inicial del nombre del autor** (Año) "Nombre de la tesis o trabajo de grado" entre comillas. Grado Académico. Nombre de la Institución.

Ejemplo: **Ramírez, M.** (2004) "Violencia en relaciones de pareja y conductas autodestructivas en mujeres". Tesis. Maestría en Psicología Clínica y Psicoterapia. Universidad Iberoamericana de Puebla.