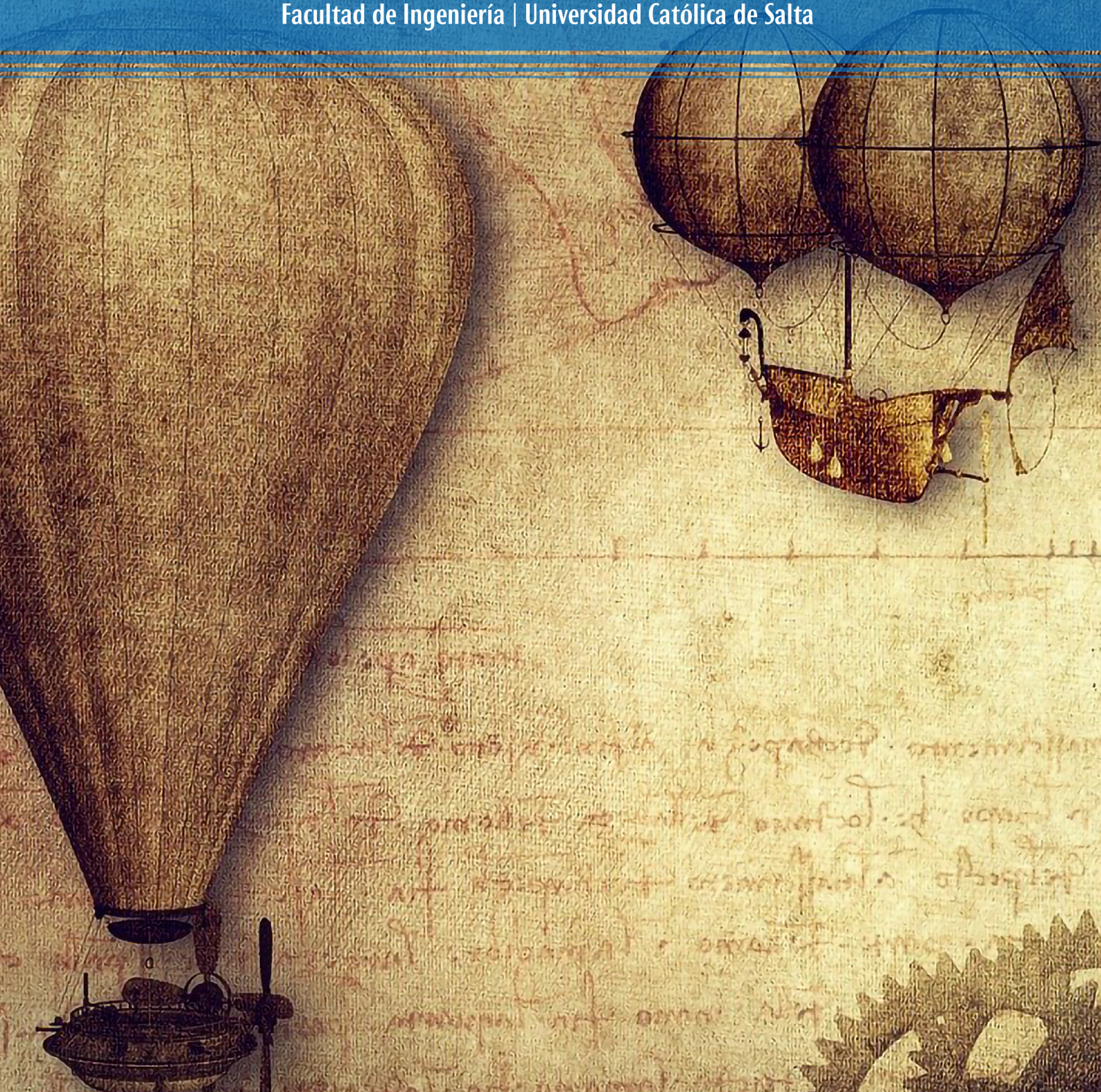


REVISTA

Número 3, 2025

ConCiencia Joven

Facultad de Ingeniería | Universidad Católica de Salta



INGENIERÍA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA

REVISTA

ConCiencia Joven

Facultad de Ingeniería
Universidad Católica de Salta
Salta - Argentina

Número 3, 2025



INGENIERÍA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA

Comité Editorial

DIRECTORA

Dra. Ing. Beatriz Parra de Gallo

Directora Instituto de Estudios Interdisciplinarios
de Ingeniería (IESIING), Universidad Católica de Salta

MIEMBROS

Mg. Ing. Guillermina Nieves

Decana de la Facultad de Ingeniería
Universidad Católica de Salta

Mg. Lic. Lorena Talamé

Secretaria Académica
Facultad de Ingeniería

Esp. Ing. Manuel Luis Zambrano Echenique

Jefe de la Carrera de Ingeniería Industrial
Universidad Católica de Salta

Ing. Fernando Javier Albarracín

Jefe de la Carrera de Ingeniería Civil
Universidad Católica de Salta

Ing. Roberto Daniel Breslin

Jefe de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones
Universidad Católica de Salta

Ing. Sergio Appendino

Jefe de la Carrera de Ingeniería en Informática
Universidad Católica de Salta

Lic. Néstor Alberto Valdiviezo

Jefe de la Carrera Licenciatura en Higiene y Seguridad en el Trabajo
Universidad Católica de Salta

Dra. Ing. Lía Orosco Segura

Coordinadora de Investigación
Facultad de Ingeniería - Universidad Católica de Salta

Esp. Ing. Juan Francisco Linares

Jefe del Departamento de Extensión, Graduados y Bienestar
Facultad de Ingeniería - Universidad Católica de Salta

Corrección y edición

TPN Lucía Guillén

Contenidos

EDITORIAL	5
ARTÍCULOS	7
Análisis de los ciberataques sufridos en empresas y organismos del Estado en Argentina en los años 2023 y 2024	8
<i>Lucas Gustavo Gutiérrez Guzmán</i>	
Simulación de ensayo de compresión simple: análisis de geomateriales	16
<i>Candelaria Carminatti y Fernando Javier Albarracín</i>	
Planta de regeneración de aceites lubricantes	27
<i>Olivera Hoyos, Zaira Fabiana</i>	
Desarrollo de un sistema inmersivo de control de gimbals en drones mediante realidad virtual para inspecciones en infraestructuras críticas	33
<i>Nicolás Rolando Corimayo Morales</i>	
Análisis del comportamiento estructural de la edificación de mampostería de la escuela Dr. Benjamín Zorrilla con el uso del software 3Muri	36
<i>Lautaro Agustín, Vera García y Emiliano Gastón, Medina</i>	
Sobre la Revista	48

EDITORIAL

Estimados amigos, luego de haber estado como decano catorce años en esta querida Facultad de Ingeniería, veo allá a lo lejos la tarea que inició el equipo de la Facultad, en especial los que se dedican a la noble función sustantiva de la investigación; se han logrado mantener dos publicaciones de alto nivel, una para docentes “Cuadernos de Ingeniería” y otra, la novel “ConCiencia Joven” para los estudiantes que han realizado una significativa experiencia en esta área.

La multiplicidad de temas que se han incorporado relacionados con las carreras de ingeniería civil, industrial, informática y telecomunicaciones nos muestra que aquello que se había iniciado como una imperiosa necesidad hace 20 años con las acreditaciones sucesivas ante CONEAU, ahora se puede prolongar en el tiempo producto de estas investigaciones realizadas por lo alumnos, en temáticas que incorporan lo más difundido como ser la Inteligencia Artificial, la Ciencia de Datos, la ciberseguridad entre otros.

El trabajo de los alumnos relacionado con la investigación, muestra el entusiasmo, profundidad de los temas, interrelación de las cátedras, internacionalización del conocimiento y actualidad en las curriculas de los planes de estudio, además de la permanente búsqueda de la verdad, que es un mandato en la tarea investigativa. Nuestros alumnos deben tener una experiencia que permita luego identificar los posibles continuadores de los grupos de investigación, en todos los temas que puedan producir un cambio en nuestra sociedad.

Luego de este recorrido del proceso de génesis, que nos tiene que llenar de orgullo porque tendrá una permanencia en el trabajo de los alumnos y los docentes, el despertar de las vocaciones de investigadores es una tarea que se debe fomentar sin pausa ya que los frutos siempre serán a largo plazo.

Felicito a todo el equipo de la facultad por haber incorporado, como una política de desarrollo, esta difusión de los trabajos de investigaciones de los estudiantes, y que de seguro es un estímulo para que todos puedan animarse también a hacerlo.

Mg. Ing. Nestor E. Lesser
Ex Decano-Facultad de Ingeniería - Ucasal

ARTÍCULOS

Análisis de los ciberataques sufridos en empresas y organismos del Estado en Argentina en los años 2023 y 2024

Analysis of cyberattacks suffered by companies and government agencies in Argentina in 2023 and 2024

Lucas Gustavo Gutiérrez Guzmán

Resumen

Es cada vez más frecuente escuchar y leer en portales que las empresas privadas y los organismos estatales sufren vulneraciones a la seguridad informática. La pandemia se produjo en los años 2019 y 2020 obligó a muchas empresas a volcar sus servicios y gran parte de sus procesos en la nube, a adaptarse a nuevas modalidades, como la aparición del teletrabajo que vino para quedarse y a ofrecer canales digitales a fin de interactuar con clientes y proveedores. Esta situación generó un cambio disruptivo en la manera en que las empresas gestionan sus negocios y también en las preferencias de consumo por parte del público en general.

Los Estados nacionales y sus dependencias no son ajenos a estos cambios y en los últimos años también evolucionaron gran parte de sus operaciones hacia los sistemas informáticos.

Tanta información digital resulta un objetivo vulnerable para atacantes que, se deba a razones políticas o económicas, sustraen información a fin de venderla en el mercado negro, filtran información crítica, interrumpen la prestación de servicios e infectan sistemas de empresas y organismos.

Este trabajo consiste en una investigación cualitativa y documental de los ciberataques sufridos en Argentina en los años 2023 y 2024.

El objetivo de este estudio es dar a conocer los ataques sufridos y evidenciar cuáles son los más frecuentes. Este trabajo pretende brindar orientación a quien tenga la tarea de evaluar cuán preparada está la defensa en el país frente a posibles ciberataques.

Palabras clave

Argentina, ciberataque, ciberseguridad, ciberdefensa, denegación de servicios, filtración de datos, malware, phishing, ransomware.

Abstract

It is increasingly common to hear and read on websites that private companies and government agencies are suffering breaches of their IT security. The pandemic that occurred from 2019 to and 2020 forced many companies to move their services and a large part of their processes to the cloud, to adapt to new modalities, such as the emergence of teleworking, which is here to stay, and to offer digital channels for interacting with customers and suppliers. This situation generated a disruptive change in the way companies manage their businesses and also in the consumption preferences of the general public.

National governments and their agencies are no strangers to these changes, and in recent years, they have also evolved much of their operations toward computer systems.

So much digital information makes it a vulnerable target for attackers who, whether for political or economic reasons, steal information to sell it on the black market, leak critical information, shut down services, and infect the systems of companies and agencies.

This work consists of qualitative and documentary research on cyberattacks suffered in Argentina in 2023 and 2024.

The objective of this study is to raise awareness of the attacks suffered, and highlight which ones are most frequent. This work aims to provide guidance for those tasked with assessing how prepared the country's defenses are against possible cyberattacks.

Key words:

Argentina, cyberattack, cybersecurity, cyberdefense, denial of service, data breach, malware, phishing, ransomware.

Introducción

El presente trabajo se lleva a cabo en el marco de la materia Proyecto de Grado, de la carrera Ingeniería en Informática de la Universidad Católica de Salta, como parte de los requisitos excluyentes a fin de obtener la regularidad de la misma, al acompañar al proyecto de grado, que se realiza en paralelo.

Se autoriza a la Universidad a publicar este artículo en la revista ConCiencia Joven dentro de la unidad académica.

Desarrollo

Se abordará la temática desde la información recopilada de diferentes fuentes bibliográficas. En principio, se propone definir los términos que son relevantes para la comprensión del trabajo. Luego, se describirá el estado de la cuestión en Argentina, al exponer los datos de distintos informes y recopilaciones periodísticas.

Términos

- » Ciberataque: “El concepto de ciberataque es lo suficientemente complejo, ya que a medida que la tecnología avanza, se va adaptando”. Se puede entender al ciberataque como una operación cibernética, ya sea ofensiva o defensiva, de la que cabe esperar razonablemente que cause lesiones o la muerte de personas o el daño o la destrucción de bienes” [1]. Una o más personas realizan estas operaciones, incluso aquellas que forman parte de organizaciones con ese fin. Los términos que se definen a continuación son técnicas de ciberataque.
- » *Malware*: “Es todo *software* capaz de generar daño en otros sistemas de *software*” [2].
- » *Phishing*: “El término *phishing*, en informática, denota un uso de la ingeniería social para intentar adquirir información confidencial, por ejemplo, contraseñas, cuentas bancarias, datos de tarjetas, etcétera, de manera fraudulenta” [3].
- » *Ransomware*: El *ransomware* es un tipo de *malware* que se introduce en los equipos y dispositivos móviles, que impide el acceso a la información, al cifrarla y al solicitar un rescate (*ransom*, en inglés) a fin de que sea accesible una vez más. Después de la infección inicial, el *malware* intentará propagarse al resto de los sistemas conectados a la red, inclusive las unidades de almacenamiento compartidas [4].
- » DoS: Tiene como objetivo inhabilitar el uso de un sistema, una aplicación o una máquina, con el fin de bloquear el servicio para el que está

destinado. Este ataque puede afectar, tanto a la fuente que ofrece la información, por ejemplo, una aplicación o el canal de transmisión, como así también a la red informática. Se realizan mediante peticiones o conexiones que emplean un gran número de ordenadores o direcciones IP. [5].

Estado de la cuestión

Como se observa en la Figura 1, en el mundo se reporta una tendencia en incremento respecto a las incidencias de ciberseguridad, donde lo que predomina es la denegación de servicios (DoS) y la intrusión a sistemas. Esto viene atado al hecho de que las empresas y los gobiernos se han visto obligados, desde la pandemia del COVID-19, a migrar sus operaciones a entornos informáticos. Este cambio vertiginoso, en muchas ocasiones, no ha permitido a las organizaciones tomar el tiempo de plantearse los problemas de seguridad de sus sistemas, ni mucho menos a capacitar al personal sobre estos temas.

En Argentina, no existe un organismo centralizado que lleve registros de ciberataques ocurridos en el territorio nacional ni que brinde soporte ante estos incidentes. No obstante, hay algunos organismos disgregados que de alguna manera cumplen estas funciones. Por citar alguno, existe un Equipo de Respuesta ante Emergencias Informáticas (CERT, por sus siglas en inglés), que es una dependencia de la Secretaría de Innovación Pública. Cada año publica un reporte respecto de las incidencias de ciberseguridad.

El Equipo de Respuesta ante Emergencias Informáticas nacional (CERT.ar) de la Dirección Nacional de Ciberseguridad registró trescientos setenta y nueve incidentes de seguridad informática durante el año 2023. La cifra representa un ligero aumento del 13 % en comparación con el año 2022, cuando se detectaron trescientos treinta y cinco incidentes.

En línea con la tendencia del año anterior, el *phishing* todavía comprende la principal amenaza, al representar el 75 % de los incidentes reportados en el 2023. Respecto a su accionar, se observa una evolución en las técnicas empleadas y los ataques más sofisticados a través de las redes sociales [6].

En la Figura 2, es posible observar que los sectores más afectados en el país fueron el de Finanzas y los Estados, y en la Figura 3 la distribución por cada tipo de incidente.

Casos reportados en Argentina

En este apartado se citarán y analizarán las incidencias de seguridad más relevantes y de públi-

co conocimiento sucedidas en Argentina en el período 2023-2024, ordenadas de modo cronológico.

Incidente 1: Grupo Albanesi

Fecha de ocurrencia: 16/02/2023

Clasificación: *ransomware*

Detalle: Incidente en el Grupo Albanesi. Principal comercializador de gas del país.

“Una de las organizaciones de *ransomware* más grandes del mundo, LockBit, nombró al Grupo Albanesi, el principal proveedor de gas natural y electricidad de Argentina, como una de sus víctimas” [7].

Incidente 2: La Segunda Seguros

Fecha de ocurrencia: 21/02/2023

Clasificación: *ransomware*

Detalle: “La Segunda Seguros confirmó haber sufrido un ataque informático con *ransomware* que afectó parte de sus sistemas. La compañía aseguradora con sede en Rosario activó sus protocolos de seguridad para normalizar la situación e investigar las causas del ataque” [8].

Incidente 3: publicación de información de Garbarino

Fecha de ocurrencia: 10/03/2023

Clasificación: filtración de datos

Detalle: “El grupo de *ransomware* Medusa anuncia a Garbarino como nueva víctima.” [9].

Incidente 4: incidente en la Superintendencia de Seguros de la Nación

Fecha de ocurrencia: 04/04/2023

Clasificación: denegación de servicio

Detalle: “La Superintendencia de Seguros de la Nación se vio envuelta en un caso de ciberdelincuencia, que afectó a la seguridad de sus datos. El ataque afectó a las aplicaciones Mi Argentina y Mi Seguro” [10].

Incidente 5: incidente en la ANMAT (Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología médica)

Fecha de ocurrencia: 21/04/2023

Clasificación: denegación de servicio

Detalle: “La Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica comunicó que los servidores de la entidad fueron hackeados por lo que no se puede realizar ningún tipo de trámite” [11].

Incidente 6: incidente en la INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria)

Fecha de ocurrencia: 02/05/2023

Clasificación: *ransomware*

Detalle: “Las autoridades del Organismo enviaron una carta a todo el personal del país para advertir sobre la situación [...]. Es un ataque del tipo *ransomware* dirigido a organizaciones de gran envergadura, que se difunde por propagación, infectando cada vez más equipos en la red y encriptando sus contenidos” [12].

Incidente 7: incidente en la carga de tarjetas Salta y Tucumán propiedad del grupo Bizland

Fecha de ocurrencia: 11/05/2023

Clasificación: *ransomware*

Detalle: “Bizland alegaba haber sido víctima de un intento de hackeo que no implicó el robo de datos sensibles de los beneficiarios y prestadores, pero sí afectó a la operatividad de su red de comunicaciones” [13].

Incidente 8: incidente de ciberseguridad en el canal de YouTube del Senado de Mendoza

Fecha de ocurrencia: 29/05/2023

Clasificación: intrusión

Detalle: “Hackearon la cuenta de Google del Senado de Mendoza y el canal de Youtube fue eliminado. Allí estaban cargadas las sesiones desde la gestión de Laura Montero” [14].

Incidente 9: incidente de ciberseguridad en el Hospital Castro Rendón, el más grande de la provincia de Neuquén

Fecha de ocurrencia: 07/06/2023

Clasificación: filtración de datos.

Detalle: “Desde el Hospital Provincial de Neuquén confirmaron la fuga de información de más de 100 mil usuarios de salud” [15].

Incidente 10: incidentes de ciberseguridad en la Comisión Nacional de Valores

Fecha de ocurrencia: 07/06/2023

Clasificación: *ransomware*

Detalle: “El grupo de *ransomware* Medusa difundió una lista con 1,5 TB de información al vencer el plazo de pago. Pedían un rescate de 500 mil dólares” [16].

Incidente 11: incidentes de ciberseguridad en Papel Prensa

Fecha de ocurrencia: 30/07/2023

Clasificación: *ransomware*.

Detalle: "Papel Prensa confirmó que fue víctima de una intromisión en su estructura informática, por intermedio de *ransomware* (secuestro de datos) y que trabaja para asegurar su integridad y proteger la operación y el funcionamiento de la empresa" [17].

Incidente 12: incidentes de ciberseguridad en PAMI, obra social pública para adultos mayores que cubre todo el país

Fecha de ocurrencia: 02/08/2023

Clasificación: *ransomware*.

Detalle: "El Programa de Atención Médica Integral (PAMI) sufrió un ciberataque de *ransomware*, un tipo de virus que encripta archivos para pedir un rescate en dinero a cambio" [18].

Incidente 13: incidentes de ciberseguridad en el Ministerio de las Mujeres

Fecha de ocurrencia: 12/08/23

Clasificación: intrusión.

Detalle: "La cuenta de correo electrónico del Ministerio de las Mujeres, Géneros y Diversidad de la Nación fue hackeada y tanto desde ese mail como de la línea telefónica 40004 se enviaron mensajes discriminatorios a la base de datos del organismo, informó la cartera que lidera Ayelén Mazzina, que también aclaró que se trabaja para solucionar el problema" [19].

Incidente 14: incidentes de ciberseguridad en Musimundo, cadena de venta de electrónica pequeña

Fecha de ocurrencia: 31/10/2023

Clasificación: intrusión

Detalle: "Cayó la base de datos de Musimundo: las sucursales están abiertas, pero no atienden al público" [20].

Incidente 15: incidentes de ciberseguridad en Avalian, cobertura médica

Fecha de ocurrencia: 31/10/2023

Clasificación: denegación de servicio

Detalle: "Producto del hackeo de los sistemas por parte de un virus que logra ingresar, datos de la compañía quedan encriptados. Y luego los ciberdelincuentes extorsionan con un pedido de dinero (en criptoactivos) a cambio de liberar la información. Este tipo de hecho puede provocar inconvenientes en la gestión del servicio" [21].

Incidente 16: incidentes de ciberseguridad en Universidad de Buenos Aires

Fecha de ocurrencia: 14/12/2023

Clasificación: *ransomware*

Detalle: "La Universidad de Buenos Aires (UBA) sufrió un ciberataque de *ransomware*, un tipo de programa malicioso que encripta los archivos de la víctima, los vuelve inaccesibles y pide un rescate de dinero a cambio. Desde el jueves, servidores de una parte de la institución educativa están comprometidos y esto impide a docentes y alumnos gestionar notas, inscribirse a cursos de verano y más" [22].

Incidente 17: incidentes de ciberseguridad Poder Judicial de Chubut. Datos filtrados

Fecha de ocurrencia: 04/02/2024

Clasificación: filtración de datos.

Detalle: "La situación fue advertida por la Fiscalía de Cybercrimen, que descubrió a través de publicaciones en redes sociales que una persona había logrado ingresar al sistema y obtener datos personales del usuario en cuestión" [23].

Incidente 18: incidentes de ciberseguridad, robo de información en el Estado Mayor conjunto, datos filtrados, acceso no autorizado

Fecha de ocurrencia: 24/02/2024

Clasificación: intrusión y filtración de datos

Detalle: "El grupo autodenominado LulzSec Muslims ha supuestamente hackeado la estructura militar de las Fuerzas Armadas Argentinas, según se desprende de información publicada en la red X. En un mensaje difundido en la Dark Web, el grupo afirma haber accedido a una amplia gama de datos sensibles, que incluyen nombres, apellidos, números de teléfono, direcciones, identificaciones, cuentas bancarias y tarjetas militares" [24].

Incidente 19: *ransomware* en Telecentro (Telco Internet), extorsión por 40 GB de información

Fecha de ocurrencia: 08/03/2024

Clasificación: *ransomware*

Detalle: "Telecentro fue anunciado como víctima de Akira Ransomware" [25].

Incidente 20: *ransomware* en Medifé Salud

Fecha de ocurrencia: 15/03/2024

Clasificación: *ransomware*

Detalle: "Una prepaga de salud argentina, que tuvo que enfrentar una irrupción en sus servicios el viernes de la semana pasada" [26].

Incidente 21: *ransomware* en la Municipalidad de Morón, provincia de Buenos Aires

Fecha de ocurrencia: 31/03/2024

Clasificación: *ransomware*

Detalle: "El Municipio de Morón sufrió un hackeo en todo su sistema informático. El acceso a la red municipal y a cada uno de los servidores que utiliza la comuna fue afectado hoy por un programa de secuestro de datos" [27].

Incidente 22: *DataBreach* en la Secretaría de Transporte de la Nación

Fecha de ocurrencia: 16/04/2024

Clasificación: filtración de datos

Detalle: "Un usuario puso a la venta un archivo con 5.7 millones de archivos que contiene imágenes de licencias de conducir argentinas. El filtrador publicó una muestra donde se pueden ver los permisos para manejar de famosos, entre ellos, el Presidente de la Nación, Javier Milei, y varios funcionarios" [28].

Incidente 23: RENAPER (Registro nacional de las personas), 1,2 TB, 65 millones de archivos expuestos

Fecha de ocurrencia: 17/04/2024

Clasificación: filtración de datos

Detalle: "Un ciberdelincuente asegura que tiene en su poder toda la base de datos de uno de los sistemas internos del Registro Nacional de las Personas (RENAPER), el organismo encargado de emitir el documento nacional de identidad (DNI) y el Pasaporte de los residentes del país latinoamericano" [29].

Incidente 24: el diario La Nación sufrió un ciberataque de *ransomware*

Fecha de ocurrencia: 27/04/2024

Clasificación: *ransomware*

Detalle: "La Nación explicó que activó los protocolos de seguridad correspondientes para estos incidentes tras detectar una actividad inusual en los servidores de la compañía, se identificó el alcance del incidente, que dejó fuera de servicio a una parte de los sistemas internos. De forma inmediata, se implementó un plan de contingencia junto a un equipo de especialistas en ciberseguridad" [30].

Incidente 25: *ransomware* en la empresa de logística y correo OCASA

Fecha de ocurrencia: 21/06/2024

Clasificación: *ransomware*

Detalle: "OCASA, empresa de transporte y logística, sufrió un ciberataque que dio de baja el sitio web de la compañía. Clarín confirmó que se trata de un *ransomware*, un programa malicioso (*malware*) que ingresa a los sistemas, encripta información y pide un rescate en criptomonedas a cambio" [31].

Incidente 26: Poder Judicial de la Nación

Fecha de ocurrencia: 18/09/2024

Clasificación: denegación de servicio

Detalle: "El sistema del Poder Judicial de la Nación fue víctima de sucesivos intentos de ciberataques del tipo distribuido de denegación de servicios (DDoS). Se bloquearon las conexiones IP de las Defensorías. Afectó al sistema DEOX y enlaces con MPF y MPD" [32].

Conclusión

A partir del análisis de aquellos incidentes, es posible concluir que en el país predominan los ataques por *ransomware*. Este tipo de ataques está fuertemente ligados con técnicas de ingeniería social, por medio de la cual los atacantes logran obtener acceso al sistema debido al descuido de algún usuario mediante el uso del engaño.

En caso de que la información tenga un costo operativo para las empresas u organizaciones, un atacante decide encriptarla y pedir una compensación económica a cambio de las claves de descifrado. En caso de no obtener lo que pretende, el atacante decide filtrar la información, que luego vende como parte de una base de datos en la *dark web*.

De acuerdo con lo descrito a lo largo de este artículo, se proponen las siguientes estrategias de mejora:

1. En términos de seguridad, la pieza fundamental que se debe fortalecer es el capital humano. Por lo tanto, una medida importante a favor de la evolución cultural hacia la ciberseguridad se trata de la implementación de asignaturas relacionadas con la seguridad de la información en los distintos niveles educativos.
2. La creación de un organismo centralizado que sirva de referencia a temas inherentes a la ciberseguridad, que sea capaz de brindar ayuda frente a casos de ciberataques y que promueva campañas de concientización en el uso de las TICs y los datos a todos los ciudadanos.
3. El fortalecimiento de las organizaciones en temas de ciberseguridad se da en la medida

que comparten sus vivencias, los ataques recibidos y las estrategias de mitigación y prevención. Como última sugerencia, la conformación de una comunidad de empresas que compartan estos temas en foros abiertos y participativos.

Figuras

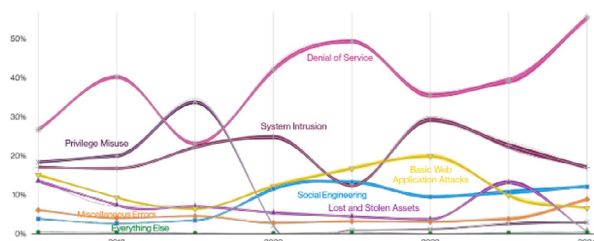


Figura 1: Patterns over time in incidents [33].

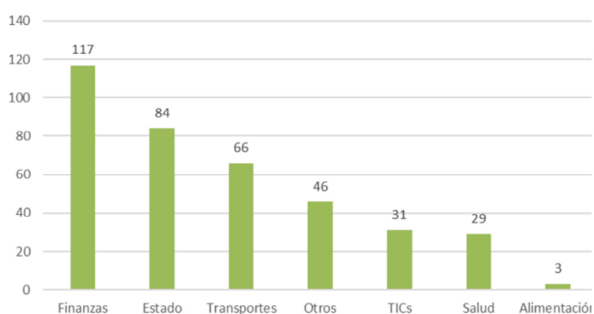


Figura 2: distribución de incidentes por sector. Informe anual de incidentes de seguridad informática registrados en el 2023 [6].

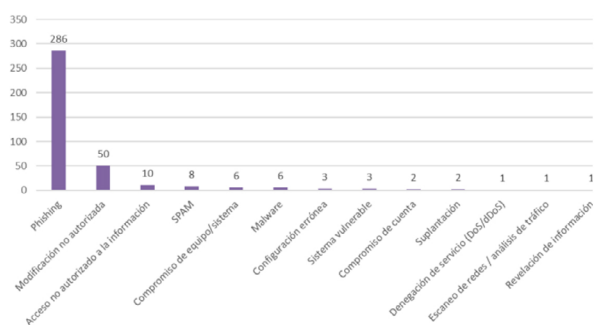


Figura 3: distribución anual por tipo de incidente. Informe anual de incidentes de seguridad informática registrados en el 2023 [6].

Clasificación de incidentes 2023-2024

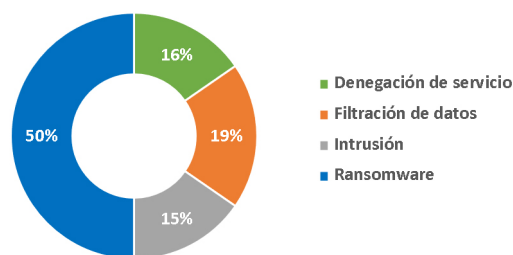


Figura 4: porcentaje de ataques reportados según clasificación (2023-2024). Autoría propia

Referencias

- [1] M. N. Schmitt, Ed., *Tallinn Manual 2.0 on the International Law Applicable to Cyber Operations*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [2] S. Kramer and J. C. Bradfield, "A general definition of malware", *Journal in Computer Virology*, vol. 6, no. 2, pp. 105-114, 2010. doi: 10.1007/s11416-009-0137-1
- [3] F. G. Jara H Pacheco, *Ethical Hacking 2.0*, 1a ed., Buenos Aires: Fox Andina y Dálaga, 2012.
- [4] INCIBE, "Qué es el ransomware y cómo recupero mi información", 16-abr-2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.incibe.es/protege-tu-empresa/blog/el-ransomware-y-recupero-mi-informacion>
- [5] OSI - Oficina de Seguridad del Internauta (España), "¿Qué son los ataques DoS y DDoS?", 21-ago-2018.
- [6] CERT.ar, "Informe Anual de Incidentes de Seguridad registrados en el 2023 por el equipo de respuesta ante Emergencias Informáticas Nacional", Dirección Nacional de Ciberseguridad, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2024/05/informe_2023_del_cert.ar.pdf
- [7] *Runrún energético*, "Otra empresa argentina ha sido agregada por LockBit a su lista de víctimas de ransomware: Grupo Albanesi", 17-feb-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.runrunenergetico.com/otra-empresa-argentina-ha-sido-agregada-por-lockbit-a-su-lista-de-victimas-de-ransomware-grupo-albanesi/>
- [8] *Diario El Norte*, "Rosario: la Segunda Seguros, víctima de hackers", 25-feb-2023. [En línea]. Disponible en: <https://diarioelnorte.com.ar/rosario-la-segunda-seguros-victima-de-hackers/>
- [9] Breachsense, "Garbarino", marzo 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.breachsense.com/breaches/garbarino-data-breach/>

- [10] *iProUP*, "Hackeo a la Superintendencia de Seguro: aconsejan circular con la documentación física obligatoria", 7-abr-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iproup.com/economia-digital/39333-mi-argentina-y-mi-seguro-afectadas-por-ataque-hacker>
- [11] Redacción MDZ, "Trámites paralizados: hackearon los servidores informáticos de la Anmat", MDZ, 21-abr-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdzol.com/sociedad/2023/4/21/tramites-paralizados-hackearon-los-servidores-informaticos-de-la-anmat-331986.html>
- [12] *Infobae*, "Hackearon al INTA: piden USD 2,5 millones para restablecer sus sistemas", 2-may-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.infobae.com/economia/campo/2023/05/02/hackearon-al-inta-piden-usd-25-millones-para-restablecer-sus-servidores/>
- [13] *Seguinfo*, "Ataque de ransomware a empresa Bizland afecta a farmacias y red de transporte #Farmalink", 16-may-2023. [En línea]. Disponible en: <https://blog.segu-info.com.ar/2023/05/ataque-de-ransomware-empresa-bizland.html>
- [14] *Memo*, "Un hacker eliminó todo el archivo audiovisual del Senado de Mendoza", 30-may-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.memo.com.ar/poder/un-hacker-elimino-todo-el-archivo-audiovisual-de-sesiones-del-senado-de-mendoza/>
- [15] *Neuquén al instante*, "Hackearon la base de datos del Castro Rendón: Qué dijeron desde el hospital", 7-jun-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.neuquenalinstante.com.ar/noticias/2023/06/07/97340-hackearon-la-base-de-datos-del-castro-rendon-que-dijeron-desde-el-hospital>
- [16] J. Brodersen, "Publicaron los archivos robados a la Comisión Nacional de Valores: hay información sensible y datos privados", *Clarín*, 20-jun-2023. [En línea]. Disponible en: https://www.clarin.com/tecnologia/publicaron-archivos-robados-comision-nacional-valores-informacion-sensible-datos-privados_0_4EL06yMc7u.html
- [17] *San Pedro hoy*, "Hackearon los sistemas de Papel Prensa", ago-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sanpedrohoj.com.ar/2023/08/hackearon-los-sistema-de-papel-prensa-y.html>
- [18] J. Brodersen, "El PAMI confirmó un ciberataque de ransomware: dio de baja el sitio, pero aseguran que 'fue mitigado'", *Clarín*, 2-ago-2023. [En línea]. Disponible en: https://www.clarin.com/tecnologia/pami-confir-mo-ciberataque-ransomware-aseguran-mitigado_0_U29WNR9srl.html
- [19] *La Nación*, "Hackearon el correo electrónico y la base de datos de celulares del Ministerio de las Mujeres", 12-ago-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanacion.com.ar/politica/hackearon-el-correo-electronico-y-la-base-de-datos-de-celulares-del-ministerio-de-las-mujeres-nid12082023/>
- [20] *Conclusión*, "Cayó la base de datos de Musimundo: las sucursales están abiertas, pero no atienden al público", 30-ago-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.conclusion.com.ar/info-general/cayo-la-base-de-datos-de-musimundo-las-sucursales-estan-abiertas-pero-no-atienden-al-publico/08/2023/>
- [21] *Rosario3*, "Importante empresa de cobertura médica, víctima de un ciberataque", 31-oct-2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.rosario3.com/informaciongeneral/Importante-empresa-de-cobertura-medica-victima-de-un-ciberataque-20231031-0029.html>
- [22] *Brodersen*, "La UBA sufrió un ciberataque de ransomware: docentes y alumnos no pueden acceder a los sistemas", *Clarín*, 18-dic-2023. [En línea]. Disponible en: https://www.clarin.com/tecnologia/uba-sufrio-ciberataque-docentes-alumnos-pueden-acceder-sistemas_0_hSLyvy1RGy.html
- [23] Redacción Chubut, "Ingresaron de manera ilegal a la red interna del Poder Judicial de Chubut", *El Chubut*, 4-feb-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elchubut.com.ar/trelew/2024-2-4-16-58-0-ingresaron-de-manera-ilegal-a-la-red-interna-del-poder-judicial-de-chubut>
- [24] *Zona militar*, "Supuesto hackeo a las Fuerzas Armadas argentinas desata preocupaciones en materia de ciberdefensa", 22-feb-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.zona-militar.com/2024/02/22/supuesto-hackeo-al-ambito-militar-argentino-desata-preocupaciones-en-materia-de-ciberdefensa/>
- [25] J. Brodersen, "Por qué está suspendido el reconocimiento facial en la Ciudad de Buenos Aires: usos y peligros de esta IA", *DarkNews*, 8-mar-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.brodersendarknews.com/p/reconocimiento-facial-ia-profugos-buenos-aires>
- [26] J. Brodersen, "Medifé sufre un ransomware y detectan una nueva campaña de phishing patrocinada por Google: FakeBat", *DarkNews*, 22-mar-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.brodersendarknews.com/p/medife-ransomware-google-ads-phishing>
- [27] *Hace instantes*, "El Municipio de Morón sufrió un hackeo en todo su sistema informático", 31-mar-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.haceinstantes.com/moron-sufrio-un-hackeo-en-todo-su-sistema-informatico-31-mar-2024>

- ponible en: <https://www.haceinstantes.com/noticias/2024/03/31/182682-el-municipio-de-moron-sufrio-un-hackeo-en-to-do-su-sistema-informatico>
- [28] J. Brodersen, "Robaron casi 6 millones de imágenes de licencias de conducir: las venden y suben una muestra con el registro de Javier Milei", *Clarín*, 16-abr-2024. [En línea]. Disponible en: https://www.clarin.com/tecnologia/robaron-6-millones-imagenes-licencias-conducir-venden-suben-muestra-registro-javier-milei_0_jYMJpHtuft.html
- [29] J. Marquez, "Un ciberdelincuente publica una enorme base de datos: asegura que son los DNI filtrados de todos los ciudadanos argentinos", *Xataka*, 19-abr-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/seguridad/ciberdelincuente-publica-enorme-base-datos-asegura-que-dni-filtrados-todos-ciudadanos-argentinos>
- [30] J. Brodersen, "El diario La Nación sufrió un ciberataque: restablecen servicios y llevarán el caso a la Justicia", *Clarín*, 22-abr-2024. [En línea]. Disponible en: https://www.clarin.com/tecnologia/diario-nacion-sufrio-ciberataque-restablecen-servicios-llevaran-caso-justicia_0_ljQIPhAgMP.html
- [31] J. Brodersen, "La empresa de logística OCASA sufrió un ciberataque de ransomware: la web está caída", *Clarín*, 21-jun-2024. [En línea]. Disponible en: https://www.clarin.com/tecnologia/empresa-logistica-ocasa-sufrio-ciberataque-ransomware-web-caida_0_AhR-2VtSgrd.html
- [32] *Diario Judicial*, "Poder Judicial bajo ataque", 18-sep-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.diariojudicial.com/news-98779-poder-judicial-bajo-ataque>
- [33] Verizon, "DBIR, 2024 Data Breach Investigations Report", 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.verizon.com/business/resources/T86c/reports/2024-dbir-data-breach-investigations-report.pdf>
- [34] Kaspersky, "¿Qué es la inyección de SQL? Definición y explicación", [En línea]. Disponible en: <https://latam.kaspersky.com/resource-center/definitions/sql-injection>
- [35] J. Izaguirre Olmedo and F. León Gavilánez, "Análisis de los ciberataques realizados en América Latina", *INNOVA Research Journal*, vol. 3, no. 9, pp. 172–181, 2018.
- [36] M. Pallero, "Argentina: Incidentes de #ciberseguridad relevantes. (sector público y privado, y de todo el país), desde 2017, con link a la noticia", *Twitter*, 24-oct-2022. [En línea]. Disponible en: https://twitter.com/Marce_I_P/status/1584491707726368768?s=20&t=RNPss-3mZqjuadBLnI3zoIA
- [37] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), "Digital Development Dashboard", 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Dashboards/Pages/Digital-Development.aspx>

Simulación de ensayo de compresión simple: Análisis de geomateriales

Simulation of uniaxial compression test: geomaterial analysis

Candelaria Carminatti

carminatticandelaria@gmail.com

Fernando Javier Albarracín

falbarracin@ucasal.edu.ar

Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UCASAL

Resumen

Este proyecto presenta el desarrollo de un software de código abierto a fin de simular el ensayo de compresión simple en probetas cilíndricas, con el objetivo de obtener el diagrama tensión-deformación específica de geomateriales.

El trabajo combina el desarrollo de un código con la realización de ensayos físicos, y su validación se realiza mediante la comparación de la similitud entre las curvas generadas por el programa y las obtenidas a través de la experimentación. El sistema implementa principalmente el Método de Elementos Finitos (MEF), el modelo constitutivo Drucker-Prager, el análisis de sólidos de revolución y el ensayo de compresión simple.

La simulación permite predecir el comportamiento mecánico del material, al minimizar la necesidad de ensayos físicos, lo cual optimiza tiempo y recursos. Este enfoque ofrece una herramienta accesible para ingenieros e investigadores, al fomentar soluciones constructivas más sustentables y seguras y al promover el desarrollo de futuras normativas de construcciones de barro.

Palabras clave

Simulación numérica, ensayo de compresión simple, geomateriales, Método de Elementos Finitos, Drucker-Prager, software de código abierto, sólidos de revolución.

Abstract

This project presents the development of open-source software in order to simulate uniaxial compression tests on cylindrical specimens, with the objective of obtaining the specific stress-strain diagram of geomaterials.

The work combines the development of code with physical testing, and its validation is carried out by comparing the similarity between the curves generated by the program and those obtained experimentally. The system mainly implements the Finite Element Method (FEM), the Drucker-Prager constitutive model, the analysis of solids of revolution, and the uniaxial compression test.

The simulation allows predicting the mechanical behavior of the material, minimizing the need for physical testing and thereby optimizing time and resources. This approach provides an accessible tool for engineers and researchers, promoting safer and more sustainable construction solutions, and encouraging the development of future regulations for earthen constructions.

Key words

Numerical simulation, uniaxial compression test, geomaterials, Finite Element Method, Drucker-Prager, open-source software, solids of revolution.

Introducción

En diversas regiones del mundo, la construcción con tierra todavía constituye una práctica habitual, que las comunidades que aprovechan los recursos locales transmiten de generación en generación. Este tipo de edificación presenta ventajas ambientales, económicas y culturales; sin embargo, persiste una falta de normativas técnicas y herramientas que permitan evaluar su comportamiento estructural de forma confiable y estandarizada.

En este contexto, el presente trabajo propone el desarrollo de un *software* de código abierto que simule el ensayo de compresión simple en probetas cilíndricas, como alternativa numérica a fin de predecir el comportamiento mecánico de los materiales elastoplásticos. El sistema combina el MEF, el modelo constitutivo Drucker-Prager y el análisis de sólidos de revolución. Este sistema se calibró mediante la comparación con resultados obtenidos en ensayos físicos reales.

Esta herramienta no solo permite reducir la necesidad de ensayos experimentales, al optimizar el tiempo y los recursos, sino que también se presenta como un aporte accesible para ingenieros e investigadores que trabajan en la caracterización de materiales locales. Su aplicación promueve el desarrollo de las soluciones constructivas más seguras, sustentables y acordes a los contextos rurales, al sentar las bases para futuras normativas orientadas a las construcciones de barro.

Estado del arte

El diagrama tensión-deformación específica de un material es fundamental en ingeniería, ya que describe su comportamiento bajo la aplicación de cargas y permite conocer sus propiedades fundamentales.

En general, estos diagramas se obtienen mediante ensayos destructivos, como el ensayo de compresión. Sin embargo, este proceso se puede simplificar por medio de simuladores [1].

Con el objetivo de realizar una simulación de manera precisa, resulta esencial aplicar métodos numéricos y modelos constitutivos.

Existen diversos *softwares* que posibilitan llevar la simulación a cabo. Sin embargo, suelen ser de código cerrado y su uso requiere la compra de costosas licencias.

Por otro lado, dado que la aplicación del código se orienta al análisis de geomateriales, resulta relevante abordar sus características. Las construcciones de barro ofrecen múltiples ventajas en comparación con las realizadas con materiales industriales. Este material natural regula la hu-

medad ambiental, posee una excelente inercia térmica, es reutilizable, requiere poca energía en su elaboración y permite reducir de manera significativa los costos de construcción. No obstante, también presenta desventajas, como la falta de estandarización, la baja impermeabilidad y la alta contracción [2].

En la actualidad, en Argentina no existe una normativa específica para este tipo de construcciones, lo que dificulta el reconocimiento y la regulación [3].

Definición del problema

Ante esta situación, se plantea como objetivo general del proyecto desarrollar un *software* de código abierto que permita simular el ensayo de compresión simple de probetas cilíndricas de geomateriales, al generar curvas tensión-deformación específicas. Si bien en este trabajo se aplica a materiales de la Quebrada del Toro, Salta, la herramienta se diseñó con el objetivo de utilizarse en cualquier contexto, lo que facilita el análisis del comportamiento de distintos materiales, al optimizar los recursos y al reducir la necesidad de ensayos físicos.

Para ello, los objetivos específicos son los siguientes:

- » crear un algoritmo de mallador aplicado al MEF;
- » modificar y ampliar un código de análisis de estado de tensiones planas y deformaciones planas que se adapte al análisis de sólidos de revolución;
- » fabricar probetas talladas y reconstituidas provenientes de mampuestos de adobe de La Quebrada del Toro, Salta;
- » ensayar probetas en máquina de ensayo de compresión simple y obtener diagramas tensión-desplazamiento;
- » calibrar el modelo constitutivo Drucker-Prager.

Solución propuesta

A fin de afrontar la escasez de herramientas computacionales accesibles para investigadores y profesionales que permitan obtener el diagrama tensión-deformación específica de materiales elastoplásticos, sin necesidad de realizar numerosos ensayos físicos, se propone desarrollar un *software* de código abierto y gratuito capaz de simular el ensayo de compresión simple en probetas cilíndricas. Además, con el propósito de resaltar la importancia del barro como material de construcción y fomentar su estudio, se aplica la simulación a geomateriales provenientes de La Quebrada del Toro, del departamento de Rosario de Lerma, Salta.

El desarrollo de la solución se estructura en los siguientes ejes:

- » Desarrollo del *software*: se presenta el desarrollo realizado en el programa.
- » Ejecución de ensayos físicos: se detalla el proceso de fabricación de probetas y la realización de los ensayos.
- » Calibración y simulación: se describen la obtención de los parámetros necesarios para la calibración y las simulaciones realizadas.

Desarrollo del *software*

Mallador

Lo primero que se trabajó fue un mallador automático que, a partir de ciertos parámetros de entrada, genera la malla aplicada al MEF y provee los archivos necesarios a fin de iniciar la simulación.

La filosofía del MEF propone que, con el propósito de resolver un sistema complejo, es posible separarlo en elementos cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad y, a continuación, reconstituir el sistema original para comprenderlo a partir de dichos componentes [4].

El sistema continuo que se estudia es una probeta cilíndrica, que puede representarse de manera geométrica como un sólido de revolución. Un sólido de revolución es un cuerpo generado al rotar una región en el espacio alrededor de un eje fijo. Por lo tanto, se define el área de análisis con el plano (r,z) , donde r es el radio y z la altura de la probeta (Figura 1).

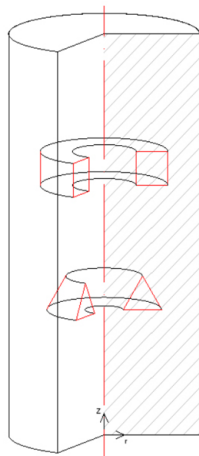


Figura 1. Sistema continuo y área de análisis del mismo.

Aunque la forma de los elementos puede variar, se ofrecen al usuario dos opciones: una malla conformada por elementos poligonales de tres nodos o una de cuatro. Para el ejemplo, se optaron tres nodos, como se aprecia en Figura 2.

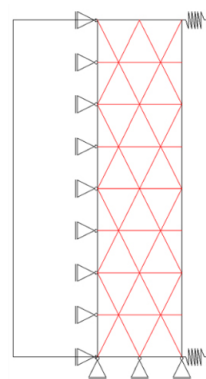


Figura 2. Representación de sistema constituido por elementos poligonales de tres nodos.

El sentido de creación de nodos en dirección horizontal es de izquierda a derecha y en dirección vertical es de abajo hacia arriba.

A continuación, en la Figura 3, se presenta un diagrama de flujo del mallador.

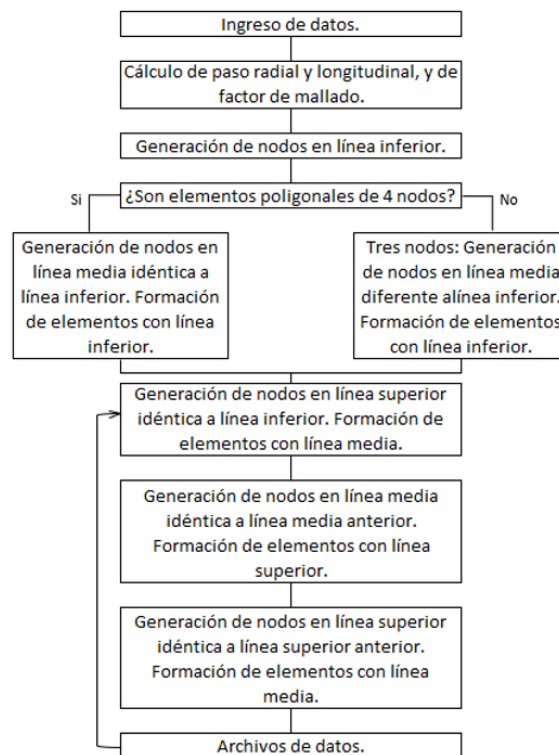


Figura 3. Diagrama de flujo del mallador.

De esta forma, las filas de elementos se crean de a dos hasta subdividir el sistema completo. Ver Figuras 4.a y 4.b.

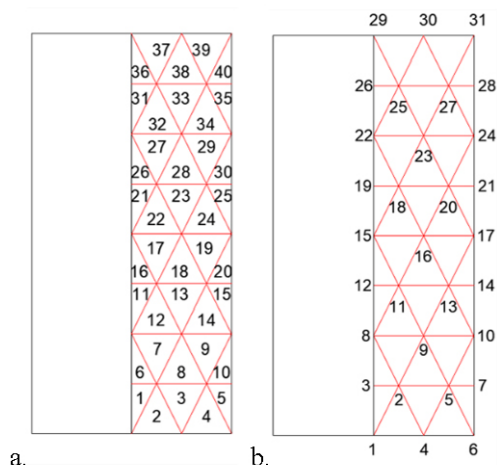


Figura 4. Subdivisión del sistema.

Referencia:

- a. Elementos.
- b. Nodos.

A medida que se producen las iteraciones, se generan de manera automática los distintos archivos presentados a continuación, en la Tabla 1.

Tabla 1. Archivos de datos generados por el mallador.

Archivo	Datos
nodos	Coordenadas radial y longitudinal.
ccontorno	Número de nodo y condiciones de apoyo en dirección radial y longitudinal.
Kresorte	Amortiguamiento radial y longitudinal.
elementos	Número de nodos y material a analizar.
qborde	Número de bordes y cargas en dirección radial y longitudinal.
pcontrolU	Número de nodo y norma fijada de desplazamientos longitudinales.
Toeocontrol	Número de elementos.

Simulador

El siguiente paso consistió en modificar un código base, diseñado para el análisis de tensiones y deformaciones en régimen plano, y adaptarlo al estudio de sólidos de revolución.

La diferencia fundamental entre ambos análisis radica en la cantidad y el tipo de componentes de tensión y deformación involucrados. En el caso de tensión plana y deformación plana, se consideran tres componentes de deformación y tres de tensión dentro del plano, mientras que las normales a este son nulas. Aquellos componentes son los siguientes:

- » Deformación: normal en el eje x, normal en el eje y y distorsión angular en el plano (x;y)

- » Tensión: normal en el eje x, normal en el eje y y tangencial en el plano (x;y)

Por otro lado, en el análisis de sólidos de revolución, debido a la simetría en torno al eje de revolución, un desplazamiento en dirección radial genera una deformación circunferencial, lo que introduce un cuarto componente tanto en tensión como en deformación (Figura 5.). En este caso, los componentes son los siguientes:

- » Deformación: normal en el eje r, normal en el eje z, circunferencial θ y distorsión angular en el plano (r;z).
- » Tensión: normal en el eje r, normal en el eje z, circunferencial θ y tangencial en el plano (r;z).

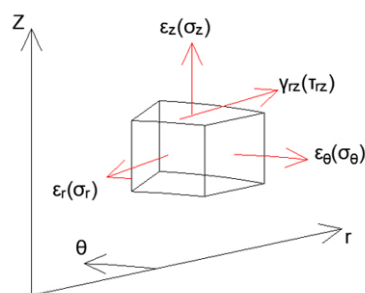


Figura 5. Tensiones y deformaciones de sólidos de revolución.

Referencia:

- ϵ_r : deformación normal en eje r
- ϵ_z : deformación normal en eje z
- ϵ_θ : deformación circunferencial en eje
- γ_{rz} : distorsión angular en plano (r;z)
- σ_r : tensión normal en eje r
- σ_z : tensión normal en eje z
- σ_θ : tensión circunferencial en eje
- τ_{rz} : tensión tangencial en plano (r;z)

En este proyecto se presenta un modelo elastoplástico. Por un lado, la solución de la parte elástica lineal del problema puede obtenerse de manera directa al resolver el diagrama de la Figura 6.

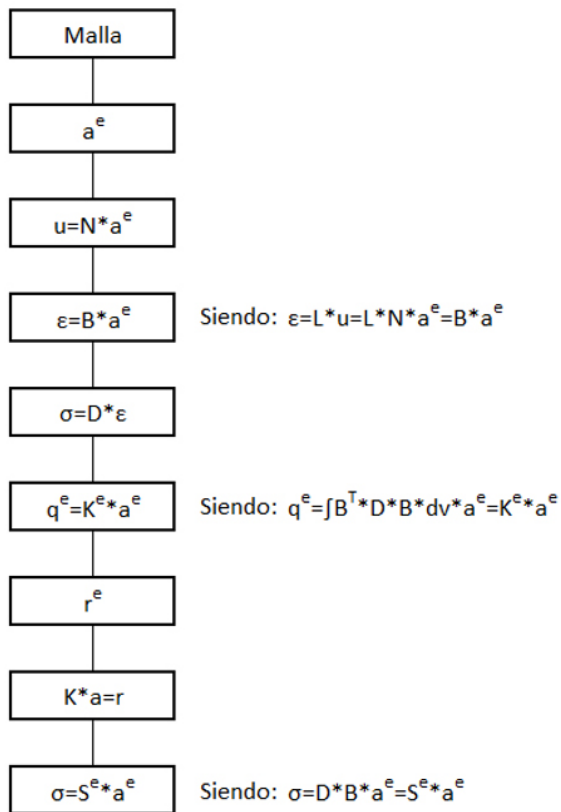


Figura 6. Diagrama de flujo del MEF.

Referencia:

a^e : desplazamiento del elemento en función de los desplazamientos nodales

u : desplazamiento de cualquier punto del elemento.

N : función de forma de desplazamientos.

ε : deformación específica de cualquier punto del elemento

L : operador lineal.

σ : tensiones en cualquier punto del elemento.

D : matriz de elasticidad en función de propiedades del material.

q^e : fuerzas equivalentes nodales.

K^e : matriz de rigidez del elemento.

r^e : carga externa del elemento aplicada en los nodos.

K : matriz global de rigidez.

a : matriz global de desplazamientos.

r : matriz global de fuerzas externas.

S^e : matriz de tensiones.

Por otro lado, a fin de abordar la parte plástica, se aplica de manera iterativa el mismo diagrama, pero en cada iteración se ajusta la matriz D , ahora llamada elastoplástica y, en este caso, la solución se obtiene mediante un método más complejo llamado Newton-Raphson, lo que se debe a que la plasticidad depende de un parámetro de endurecimiento k .

Además de adoptar un nuevo método de solución, para analizar de manera correcta la plasticidad de un material, es necesario introducir nuevos conceptos [5]:

- » Criterio de fluencia: es una condición matemática que describe el instante en el que el material cambia su comportamiento mecánico, al pasar de estado elástico a plástico, bajo la aplicación de cargas externas. En este proyecto, se utiliza el criterio de fluencia Drucker-Prager, que define una superficie de fluencia en el espacio de tensiones. Mientras el estado de tensiones del material permanezca dentro de esta superficie, el material se comporta de manera elástica. No obstante, cuando las tensiones alcanzan dicha superficie, el material comienza a deformarse de manera plástica.
- » Drucker-Prager: la superficie de fluencia queda definida por la ecuación (1):

$$F = 3 * \alpha' * \sigma_m + \bar{\sigma} - K = 0 \quad (1)$$

Referencia:

α' y K : parámetros de endurecimiento por deformación, véanse expresiones 2 y 3.

$$\alpha' = \frac{2 * \sin(\varnothing)}{\sqrt{3} * (3 - \sin(\varnothing))} \quad (2)$$

$$K = \frac{6 * c * \cos(\varnothing)}{\sqrt{3} * (3 - \sin(\varnothing))} \quad (3)$$

Referencia:

$\varnothing$: ángulo de fricción.

C : cohesión.

Ambos valores, $\varnothing$ y C se extraen de Tabla [6].

La representación gráfica de la superficie de fluencia se asemeja a un cono en el espacio de tensiones y se esquematiza en la Figura 7:

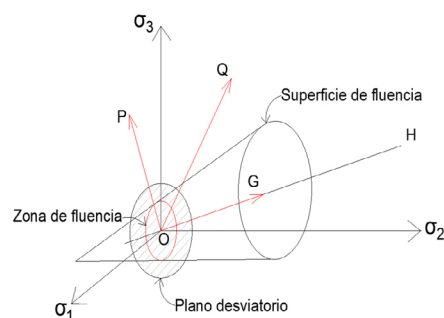


Figura 7. Superficie de fluencia Drucker-Prager.

Referencia:

$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$: espacio tensorial.

OH : vector de cosenos directores.

OQ : vector de tensiones.

OG : vector de tensiones hidrostáticas.

OP : vector de tensiones desviadoras.

Es posible trabajar en un sistema de coordenadas cartesianas, donde el eje horizontal es el promedio del primer invariante (ecuación (4)) y el eje vertical es la raíz cuadrada del segundo invariante (ecuación (5)). De esta manera, se analiza una curva de fluencia y se arriba a expresiones útiles:

$$\sigma_m = \frac{J_1}{3} = \frac{\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta}{3} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{J_2} = \sqrt{\frac{s_r^2 + s_z^2 + s_\theta^2}{2} + \tau_{rz}^2} \quad (5)$$

Por ende:

$$s_r = \sigma_r - \sigma_m \quad (6)$$

$$s_z = \sigma_z - \sigma_m \quad (7)$$

$$s_\theta = \sigma_\theta - \sigma_m \quad (8)$$

En el software $p = \sigma_m$ y $q = \bar{\sigma}$ y la curva Drucker-Prager resulta $q(p)$.

Luego, se deben determinar los vectores gradientes.

$$\left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}$$

El potencial plástico es una función que describe la dirección en la que ocurren las deformaciones plásticas una vez que el material ha alcanzado la superficie de fluencia, al corregir, de esta manera, el valor de las tensiones. Se trabaja un criterio conocido como principio de ortogonalidad, ya que la dirección en la que se desarrollan las deformaciones plásticas es perpendicular a la curva de potencial plástico. El potencial plástico queda establecido por la ecuación 9:

$$Q = \eta * 3 * \alpha' * \sigma_m + \bar{\sigma} - K = 0 \quad (9)$$

Referencia:

η : parámetro de calibración.

El valor del parámetro para calibrar la dirección del flujo plástico varía en el rango de $0 \leq \eta \leq 1$. Cuando $\eta=1$ se encuentra ante una plasticidad asociada y $F=Q$. Esto significa que sus derivadas tienen la misma dirección, y, es posible que los materiales demuestren un aumento de volumen significativo durante la deformación plástica, lo cual no siempre es realista. Caso contrario, la plasticidad es no asociada y $F \neq Q$. Es decir, el flujo plástico sigue una dirección definida por un potencial distinto a la fluencia, lo que puede reflejar un comportamiento más complejo, tal y como es el caso de este proyecto.

Luego, se deben hallar los vectores gradientes,

$$\left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\}$$

que definen la dirección de la tasa de deformación plástica en el espacio de tensiones.

Mediante el uso de los gradientes definidos, se formula la matriz elastoplástica D_{ep} mencionada con anterioridad.

La matriz D_{ep} desempeña un papel fundamental, ya que establece la relación entre los incrementos de tensiones y los incrementos de deformaciones, lo que permite describir el comportamiento del material bajo carga. Su expresión se observa en la ecuación 10:

$$D_{ep} = D - D \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D \left[A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \right]^{-1} \quad (10)$$

Con:

$$A = -\frac{\partial F}{\partial k} * dk * \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

Referencia:

D_{ep} : matriz elastoplástica.

D : matriz elástica.

dk : diferencial de parámetro de endurecimiento.

A : Parámetro en función del endurecimiento k .

λ : Constante de proporcionalidad.

Respecto a las deformaciones, durante un incremento infinitesimal de tensiones, se supone que la variación de deformación se constituye de una parte elástica y otra plástica, como se aprecia en la ecuación (12):

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p = D^{-1} * d\sigma + \lambda * \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (12)$$

En definitiva, debido a que la matriz tangente se conoce gracias a los valores definidos de tensión y de dirección de las fuerzas actuantes. La solución del problema se basa en la integración de la expresión (13):

$$d\sigma = D_{ep} * d\varepsilon \quad (13)$$

Ejecución de ensayos físicos

La etapa inicial de los ensayos consistió en la adquisición de los mampuestos de adobe (Figura 8). Se consiguieron cuatro adobes provenientes de La Quebrada del Toro, en específico, dos mampuestos del paraje llamado San Bernardo de las Zorras y dos de El Rosal, ambos pertenecientes al departamento de Rosario de Lerma, en la provincia de Salta. Se ubican alrededor de 102 km y 107 km de la capital, respectivamente.



Figura 8. Mampuesto de adobe.

El armado de las probetas se realizó en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Salta. Se enfrentó un proceso complejo debido a los inconvenientes que surgieron durante la preparación y la manipulación de los materiales. En un principio, se planteó tallar las probetas directamente de los mampuestos, pero se encontraron piedras, troncos y otras impurezas, como se observa en la Figura 9.

Su presencia dificultó la obtención de muestras con dimensiones uniformes, al convertir al material en un cuerpo discontinuo, lo cual, no solo afecta la integridad de las probetas, sino que también incrementa el tiempo requerido a fin de lograr resultados aceptables.



Figura 9. Impurezas del material.

A pesar de estos desafíos, se logró obtener tres muestras satisfactorias (Figura 10.) a partir de los bloques provenientes del paraje San Bernardo de las Zorras, los cuales presentaban una menor cantidad de impurezas en comparación con los de El Rosal. Estos últimos no solo contenían una cantidad excesiva de partículas, sino que además muchas de ellas eran de gran tamaño. Tras varios intentos fallidos, se decidió discontinuar el tallado de estos bloques.



Figura 10. Probetas talladas, comunidad San Bernardo de las Zorras.

Ante esta eventualidad, se planteó como alternativa crear probetas reconstituidas a partir del material de los mampuestos. Para ello, se fabricaron tres moldes, como se aprecia en la Figura 11.



Figura 11. Moldes de probetas.

Luego, se procedió a demoler los bloques de adobe, al triturar el material hasta obtener una mezcla homogénea.

Una vez finalizado este proceso, se colocó el material en bolsas impermeables, cada una debidamente identificada según su procedencia. Esto permitió mantener el material protegido de la humedad y evitar cualquier posible contaminación.

La presencia de partículas grandes dentro de la mezcla puede generar zonas con distinta resistencia, lo que afecta la distribución uniforme de tensiones dentro de la probeta. Además, podrían generar fracturas localizadas o afectar la forma en que se propagan las fisuras, lo que altera la interpretación de los resultados. Por lo cual, se decidió reconstituir las probetas sin su incorporación. Se colocó una porción del material en una bandeja y se realizó la separación manual de los componentes no deseados, tal como muestra la Figura 12.



Figura 12. Separación de impurezas.

A continuación, se añadió agua de forma gradual, hasta obtener una consistencia aceptable.

Una vez que la mezcla estuvo lista, se prepararon los moldes al recubrir las paredes internas con aceite quemado para evitar la adherencia de las probetas. Luego, se procedió a colocar la mezcla en su interior, al realizar el llenado en tres capas. Después de cada capa, se aplicaron suaves golpes laterales con una varilla metálica sobre el molde, a fin de asegurar una distribución homogénea del material. Por último, se enrasó la superficie de cada molde y se dejó reposar durante una semana a temperatura ambiente en la sombra, lo que permitió una pérdida de humedad uniforme a través de la cara superior de la probeta. Véase la Figura 13:



Figura 13. Armado de probetas reconstituidas.

Después de transcurrido el tiempo, se demoldaron las probetas y se repitió este procedimiento con el material del otro paraje.

De este modo, se obtuvieron tres probetas talladas del Paraje San Bernardo de las Zorras, tres reconstituidas de San Bernardo de las Zorras y tres reconstituidas del Paraje El Rosal. Se identificaron debidamente todas las probetas y se preservaron en profilácticos dentro de una caja hasta la fecha de los ensayos, a fin de garantizar su conservación (Figura 14).



Figura 14. Probetas fabricadas.

A continuación, se llevaron las probetas a la empresa TecnoSuelo, que amablemente se comprometió a realizar los ensayos de compresión simple sin costo alguno.

Previo a los ensayos, se llevó a cabo un meticuloso proceso de lijado en las probetas hasta alcanzar las dimensiones establecidas en la hipótesis, donde la altura es el doble del diámetro, lo que garantizó que el esfuerzo aplicado en la dirección longitudinal se distribuyera de manera uniforme en el volumen de la probeta. Además, se prestó especial atención a fin de asegurar que las caras que luego se apoyarían en los cabezales de la máquina, resultaran paralelas entre sí. Esta medida es crucial para garantizar que la falla de la probeta ocurra por compresión pura y no por flexo-compresión.

Tras finalizar el lijado, los operarios procedieron a medir las dimensiones de cada probeta, al verificar que todas tuvieran un diámetro de

3,5 cm y una altura de 7 cm, como así también, la verticalidad en dirección axial.

Por último, se procedió a la ejecución de los ensayos, como se observa en la Figura 15.



Figura 15. Ejecución de ensayo de compresión simple en empresa TecnoSuelo

Calibración y simulación

La calibración del *software* consiste en hallar por tanteo ciertos parámetros del material, hasta obtener una curva similar a la proporcionada por el ensayo físico. Puesto que la empresa TecnoSuelo entregó unas curvas de tensión-desplazamiento, el *software* se debe calibrar con los mismos valores, al identificar a esas curvas como carga-desplazamiento.

Para cada probeta, se debe correr una sola vez el mallador y cuantas veces sean necesarias el simulador, hasta obtener curvas aceptables. Se simularon un total de ocho probetas, ya que, en el ensayo físico de la cuarta probeta (reconstituida de San Bernardo de las Zorras), la máquina presentó una falla y no se obtuvo un resultado válido.

Con el propósito de generar la malla de cada probeta, la única variable modificada es la carga última de resistencia, al ingresar la resistencia últimos de compresión obtenida en los ensayos físicos. De esta manera, se obtienen todos los archivos de datos mencionados con anterioridad.

Luego se trabaja en el *software* del simulador. Los ocho parámetros del material requeridos son los siguientes:

- » Módulo de elasticidad: se adopta un valor en función de datos teóricos [6]. Ecuación 14:

$$E = (255-2550) \quad (14)$$

- » Coeficiente de Poisson: también se asume este valor con base en los datos teóricos [6]. Ver ecuación 15:

$$\mu = (0.2-0.3) \quad (15)$$

- » Peso específico: por hipótesis de trabajo, se desprecia el peso propio; por lo tanto, el peso específico se considera nulo.
- » Resistencia a la compresión: se emplean los valores de resistencia obtenidos en los ensayos físicos.
- » Resistencia a la tracción: dado que no se realizaron ensayos físicos a fin de determinar este valor, se lo estima como un porcentaje de la resistencia a compresión. Esto se justifica en el hecho de que los materiales frágiles tienden a fallar primero por tracción, por lo que su resistencia a tracción es necesariamente menor. Ecuación 16:

$$f_t = 0.40 * f_c \quad (16)$$

- » Parámetro de potencial plástico: puede variar entre $0 \leq \eta < 1$, si se trata de una plasticidad no asociada y $\eta = 1$ cuando es asociada. Los materiales elastoplásticos presentan un comportamiento no asociado, por lo que, el valor del parámetro resultó cercano a cero.
- » Parámetro de endurecimiento: también se determinó mediante tanteo, asumiendo un valor elevado.
- » Radio de la probeta: queda establecido por el usuario.

Todos los parámetros obtenidos deben introducirse en el programa con cuidado. Cada fila representa una probeta, mientras que las columnas responden a los parámetros, en el orden del mencionado. El código lee únicamente la primera fila de este archivo, por lo que, ubicamos la base de datos de las probetas a partir de la tercera fila. Con el propósito de estudiar una probeta, se debe copiar su fila de parámetros y pegarla en la primera fila, como muestra la Figura 16.

1	Aquí se copia y pega la fila de datos de la probeta									
2										
3	369	0.3	0	11.76	4.70	0.2	160	1.75		
4	369	0.3	0	12.74	5.10	0.2	160	1.75		
5	420	0.3	0	15.12	6.05	0.2	400	1.75		
6	430	0.3	0	24.31	9.72	0.2	400	1.75		
7	450	0.3	0	25.48	10.19	0.2	440	1.75		
8	369	0.3	0	17.74	7.10	0.2	200	1.75		
9	420	0.3	0	22.15	8.86	0.2	400	1.75		
10	369	0.3	0	15.66	6.26	0.2	140	1.75		

Figura 16. Datos cargados en software.

El procedimiento de simulación consiste en los siguientes pasos:

1. Introducir los parámetros.

2. Correr el simulador.
3. Comparar la curva obtenida con la proveniente del ensayo físico.
4. Ajustar parámetros hasta obtener curvas similares.

A modo representativo, se muestran los resultados obtenidos para la probeta N.º 6 reconstituida del paraje San Bernardo de las Zorras.

Como se mencionó, en el proyecto se trabaja con una malla de elementos poligonales de tres nodos. El mallador genera distintos archivos de datos, que más tarde, el simulador incorpora a su proceso. La Figura 17 muestra la malla aplicada al área de análisis, generada por el simulador. Los apoyos móviles en el eje horizontal inferior representan el cabezal de asiento de la prensa, mientras que los del eje vertical describen la rigidez del eje de revolución.

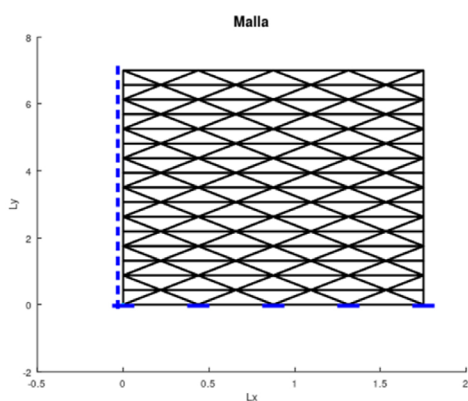


Figura 17. Malla del sistema.

Por un lado, se observa la Figura 18, que representa el diagrama presión de carga vs. desplazamiento, obtenido mediante las simulaciones del software. Por otro lado, se presenta la Figura 19, con la curva tensión vs. desplazamientos del resultado del ensayo de compresión simple.

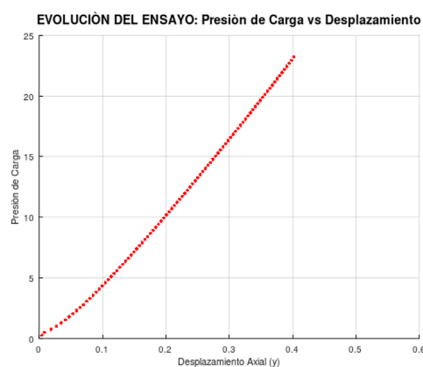


Figura 18. Curva presión de carga (kgf/cm²) vs. desplazamiento axial (cm).



Figura 19. Curva tensión (kgf/cm²) vs. desplazamiento axial (mm). (TecnoSuelo)

La primera se calibra al modificar reiteradas veces los parámetros del material, mencionados con anterioridad, hasta obtener una curva similar a la segunda.

Una vez que estas se asemejan, se puede intuir que, las demás curvas resultantes del programa, también se aproximan a las reales. Entre ellas, tenemos la curva del criterio de fluencia en la Figura 20:

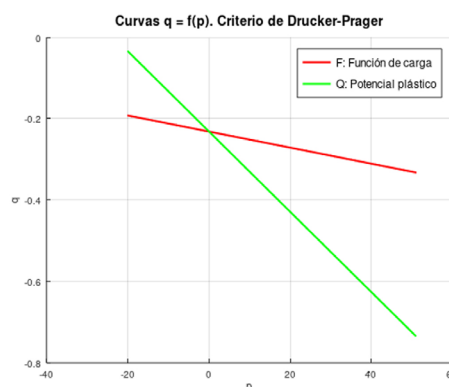


Figura 20. Criterio de fluencia Drucker-Prager.

Asimismo, el diagrama tensión-deformación específica en la Figura 21, cuya determinación es el objetivo de este proyecto, también se asemejan a las reales.

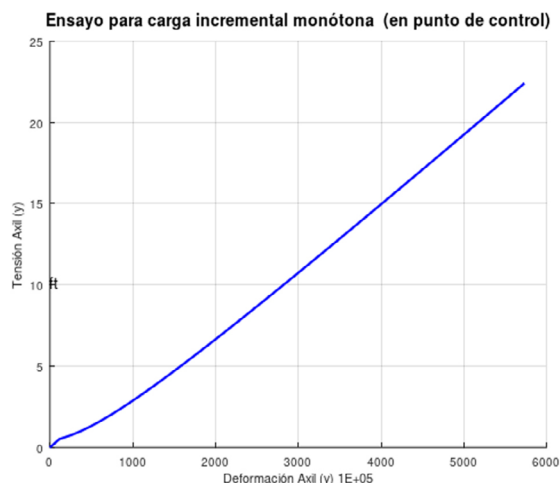


Figura 21. Diagrama tensión (kgf/cm²)-deformación específica.

Conclusiones

- » Se desarrolló el mallador y se modificó un código de estado plano de tensiones y deformaciones, al adaptarlo a un análisis de sólidos de revolución.
- » Se fabricaron probetas de adobe talladas y reconstituidas. Asimismo, se realizaron los ensayos de compresión simple.
- » La comparación entre las curvas obtenidas por los ensayos físicos y por las simulaciones numéricas mostró una correlación satisfactoria en las tendencias generales, lo que indica que la metodología aplicada logra representar de manera adecuada el comportamiento del material analizado, que proporciona diagramas tensión-deformación específica aceptables.
- » Se observa una fase inicial muy corta de deformación al parecer elástica, seguida de una zona de plastificación con endurecimiento.
- » Se evidencia la variabilidad de la resistencia de las probetas.
- » Se define el *software* como la base de una herramienta útil para futuros estudios sobre geomateriales y posibles aplicaciones en el análisis estructural.
- » El simulador aún está en período de prueba, se recomienda usarlo de modo exclusivo en el ámbito académico.

Futuras líneas de investigación

- » Desarrollar una interfaz con el usuario. Una opción sería utilizar el *software* DEV C++, donde se trabaja en lenguaje C++. El mallador del proyecto se desarrolló en el mismo, por lo cual podrían unificarse ambos *softwares* y además solucionar la situación de la interfaz

- » Realizar estudios más controlados en laboratorio, al utilizar geomateriales cuya composición sea previamente conocida. Esto permitiría obtener resultados más precisos y extrapolables a otros contextos.
- » Explorar la posibilidad de desarrollar normas técnicas específicas para los geomateriales locales, lo que facilitaría tanto su análisis como su incorporación en prácticas constructivas más estandarizadas, al promover la construcción sostenible y segura en regiones rurales.

Referencias

- [1] C. G. Castellanos, "Estudio simulación esfuerzos en acero AISI/SAE 1045 por medio de la modelación en SolidWorks", *InGente Americana*, 2023.
- [2] G. Minke, *Manual de construcción en tierra*. Montevideo: Fin de Siglo, 2008.
- [3] A. D. Dubos, *Relevamiento y análisis de normas jurídicas y técnicas referidas a la construcción con tierra vigentes en la República Argentina*. Red Protierra Argentina, 2020.
- [4] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, y S. Govindjee, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 8th ed. Amsterdam: Elsevier, 2024.
- [5] J. Chakrabarty, *Theory of Plasticity*. Oxford: Elsevier, 2006.
- [6] GeoStru, *GeoStru* [En línea]. Disponible en: https://help.geostru.eu/georock2d/es/database_terreni.htm.

Planta de regeneración de aceites lubricantes

Lubricating oil regeneration plant

Olivera Hoyos, Zaira Fabiana

Zaira_salta@hotmail.com

Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, UCASAL

Resumen

El proyecto de inversión realiza los estudios necesarios a fin de analizar la factibilidad y la viabilidad de la instalación de una planta de regeneración de aceites lubricantes usados, en el marco de provocar mejoras medioambientales y soluciones de reciclaje para desechos peligrosos en la provincia de Salta.

En la actualidad, estos desechos se procesan mediante métodos que no son los más adecuados con el fin de evitar la contaminación medioambiental.

Se seleccionó el método de extracción por propano líquido para la obtención de aceite de base mineral regenerado de buena calidad, similar a la del primer refino, al partir de productos usados, y sin la producción de agentes tóxicos ni nocivos hacia el ecosistema.

El proyecto busca cubrir un 30 % de la demanda en la provincia de Salta, que en términos de aceites usados se traduce en 692.208 litros anuales. Por lo tanto, es posible estimar unos 57.684 litros mensuales, de los cuales un 80 % se recupera con la implementación del método de extracción por propano líquido, lo que representa 553.766 litros anuales de aceite base lubricante regenerado, listo para comercializar.

El proceso planteado en el proyecto surge de la idea de brindar una solución eficaz y ecológica al problema medioambiental mundial de la gestión del aceite lubricante usado, con el objetivo de asegurar la calidad total del producto obtenido y a la sostenibilidad medioambiental. Un aceite lubricante virgen se compone por un 90 % de base lubricante y el 10 % de aditivos que se agregan con el propósito de mejorar su funcionalidad, mientras que un aceite lubricante usado, mantiene más de un 75 % de base lubricante no deteriorada, 20 % de agua y 5 % de otros desechos. Es decir, que mantiene intacta parte de los componentes que lo integran; por ende, los mismos pueden reutilizarse. Es ahí donde encontramos una oportunidad de desarrollar este proyecto basado en la recuperación de las bases lubricantes intactas que posee. Es un proceso altamente competitivo, respetuoso del medioambiente, rentable y funciona con éxito en Europa desde el año 2000.

Palabras clave

Planta de residuos peligrosos, destilación, regenerado, reutilización aceite usado, propano líquido.

Abstract

This project conducts the necessary studies to analyze the feasibility and viability of installing a used lubricating oil regeneration plant as part of generating environmental improvements and recycling solutions for hazardous waste in the province of Salta.

Currently, this waste is treated using processes that are not the most appropriate for preventing environmental pollution. The liquid propane extraction method was selected to obtain regenerated mineral base oil of good quality similar to that of the initial refining process by implementing used products and without producing toxic or harmful agents for the ecosystem.

The project seeks to cover 30% of the demand in the province of Salta, which in terms of used oils translates to 692,208 liters per year, with a projected 57,684 liters per month. 80% of this is recovered through the implementation of the liquid propane extraction method, representing 553,766 liters of regenerated lubricating base oil per year, ready for sale.

The process proposed in the project arises from the idea of providing an effective and ecological solution to the global environmental problem of used lubricating oil management, aiming at the total quality of the obtained product and environmental sustainability. A virgin lubricating oil is composed of 90% lubricant base and 10% additives added to improve its functionality, while a used lubricating oil retains more than 75% of undeteriorated lubricant base, 20% water, and 5% other waste. In other words, it maintains some of its constituent components intact and can be re-used. This is where we found an opportunity to develop this project based on the recovery of its intact lubricant base. It is a highly competitive, environmentally friendly, cost-effective process that has been operating successfully in Europe since the year 2000.

Key words

Hazardous waste plant, distillation, regeneration, reuse of used oil, liquid propane.

Introducción

Los aceites lubricantes usados son un material altamente contaminante; estos pueden causar daños al medioambiente cuando se vierten en el suelo o en las corrientes de agua, lo que incluye resumideros y desagües. El aceite lubricante usado contiene diversos compuestos químicos, tales como metales pesados, (por ejemplo: cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros), hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y, algunas veces, solventes clorados, entre otros. Estos compuestos químicos producen un efecto directo sobre la salud humana, y varios de estos productos son cancerígenos.

En Argentina, se rige la Ley Nacional N.º 24.051 que contempla los residuos considerados “peligrosos” junto con sus categorías sometidas a control. En la provincia de Salta, en coherencia con la Ley Nacional, se encuentra la Ley N.º 7070 “manual operativo de generadores, transportistas y operadores de residuos peligrosos”.

El proyecto económico se centrará en el tratamiento y la reutilización de los residuos peligrosos de corrientes Y8: desechos de aceites minerales no aptos para el uso a que estaban destinados.

Como todos los residuos aprovechables, el aceite usado exige unos requisitos previos. Debe ser extraído de manera correcta y almacenado. Una vez recuperado, se lo analiza en los centros de almacenamiento temporal o en centros de transferencia donde se determina su destino final a fin de llevar a cabo su tratamiento a través de un proceso que consiste en eliminar el agua, aditivos, metales pesados y otros sedimentos del residuo con el propósito de obtener una base lubricante válida para su reformulación en nuevo aceite lubricante, lo que contribuye a un notable ahorro de materias primas en la producción de nuevos aceites.

El objetivo primordial de este proyecto se trata de fomentar la economía circular, al brindar un servicio de recolección de aceites lubricantes usados, lo que constituye una planta de disposición final en la que se regenere el aceite usado, al obtener aceite de base lubricante con el objetivo de lanzarlos al mercado.

Estado del arte

En la actualidad, los procesos de tratamiento de residuos peligrosos más implementados en el país elegidos por mayor eficiencia y costos, en lo que respecta a las grandes operaciones de eliminación, son la incineración, el procesamiento y la disposición final en relleno de seguridad. Al considerar todas las categorías de residuos peligrosos, puede observarse que la menor parte de los residuos se remiten a enterramiento.

En materia normativa en Argentina, la Ley de Residuos Peligrosos N.º 24.051 regula la gestión de los mismos. Esta ley, de carácter nacional, implicó en la práctica la generación de conflictos jurídicos respecto a la delimitación de competencias entre la Nación y las provincias. Al tratarse de una ley de adhesión, invita a las provincias y a los municipios a adherirse mediante normas de igual naturaleza. Sin embargo, con la Reforma Constitucional de 1994, el panorama normativo se tornó más complejo, ya que se introdujo el régimen de presupuestos mínimos de protección y se redefinieron términos respecto al ámbito de aplicación, la competencia jurisdiccional y cuestiones de interjurisdiccionalidad.

Definición del problema

Los aceites lubricantes usados son un material altamente contaminante; estos pueden causar daños al medioambiente cuando se vierten en el suelo o en las corrientes de agua, lo que incluye a los resumideros y a los desagües. El aceite lubricante usado contiene diversos compuestos químicos, tales como metales pesados, (por ejemplo: cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros), hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y, algunas veces, solventes clorados, entre otros. Estos compuestos químicos producen un efecto directo sobre la salud humana, y varios de estos productos son cancerígenos. Disponer el aceite lubricante usado y los materiales contaminados en los rellenos sanitarios o en los basurales a cielo abierto, como sucede en muchos países en la actualidad, no es una solución adecuada. Sin duda alguna, el aceite se convierte en parte del lixiviado y termina en las aguas subterráneas, lo que provoca que esta no sea apta para el consumo humano. La contaminación del agua superficial o del suelo es perjudicial para los seres humanos y todas las demás formas de vida, puesto que la presencia del aceite altera los procesos de intercambio en los ecosistemas. El aceite lubricante usado que se quema bajo condiciones no controladas puede emitir más plomo en el aire que cualquier otra fuente industrial, según estudios desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

El proyecto económico se centrará en el tratamiento y la reutilización de los residuos peligrosos de corrientes Y8: desechos de aceites minerales no aptos para el uso al que estaban destinados. Durante su utilización, el aceite lubricante se degrada, lo que origina sustancias tóxicas y metales pesados que se producen por la exposición a altas temperaturas y a la presión dentro de los motores, las máquinas y los procesos donde se utilizan. El poder contaminante del aceite industrial usado se da de diversas formas.

- » El agua produce una película impermeable que puede asfixiar a los seres vivos que allí habitan. Un litro de aceite usado puede contaminar un millón de litros de agua.
- » En el aire, si el aceite usado se quema, emite gases muy tóxicos, debido a la presencia de plomo, cloro, fósforo, azufre, entre otros antes mencionados.
- » En la tierra, el vertido del aceite usado puede perjudicar tanto el suelo como las aguas superficiales y subterráneas, lo que afecta gravemente a la fertilidad del suelo, al alterar su actividad biológica y química.

El aceite usado se trata de un residuo de gran riqueza que requiere de una gestión responsable. En su composición aparecen importantes recursos materiales y energéticos, que permiten que el aceite usado se valore y utilice en su totalidad como materia prima para la fabricación de nuevos productos.

Solución propuesta

El proceso seleccionado se basa en el método español del grupo SENER. La regeneración es un tratamiento en el que se recuperan las bases lubricantes con el fin de reutilizarlas y, de esa manera, comercializarlas una vez más para su uso en cualquier tipo de motor. El método para la regeneración será la reutilización por extracción de propano líquido. Este método es el más bar-

to para plantas de baja demanda de aceite. Asimismo, es eficiente, se obtiene un producto de calidad y se recupera el propano casi en su totalidad. Es un tratamiento que se realiza de forma continua, a temperaturas moderadas con productos químicos y catalizadores, al eliminar los contaminantes del aceite en la etapa de extracción. El aceite lubricante usado se almacena y se somete a un análisis previo, a fin de determinar si el aceite recolectado es apto o no para su regeneración, dependiendo del contenido de contaminantes que posee. Si el mismo no es apto, se lo envía a una empresa habilitada para dar una disposición final a través del método de incineración, de lo contrario se lo somete al proceso de reutilización. Al realizar la extracción con propano a temperatura ambiente, permite separar los aditivos, contaminantes (agua y asfaltos) sin producir descomposición térmica, al impedir así los problemas de craqueo, olores y ensuciamientos en los equipos. En la destilación se obtiene entre un 75 % hasta un 80 % de aceite regenerado (aceite de base lubricante), con características semejantes a los lubricantes obtenidos en el primer refinado (color, olor, acidez, estabilidad ideal) sin necesidad de tratamientos posteriores; 18 % de componentes asfálticos, 2 % de combustibles ligeros, que se utilizará como aporte energético en la propia planta, y agua, la que deberá tratarse como residuo peligrosos y enviarse a un operador autorizado para su disposición final.

Desarrollo del proceso de utilización

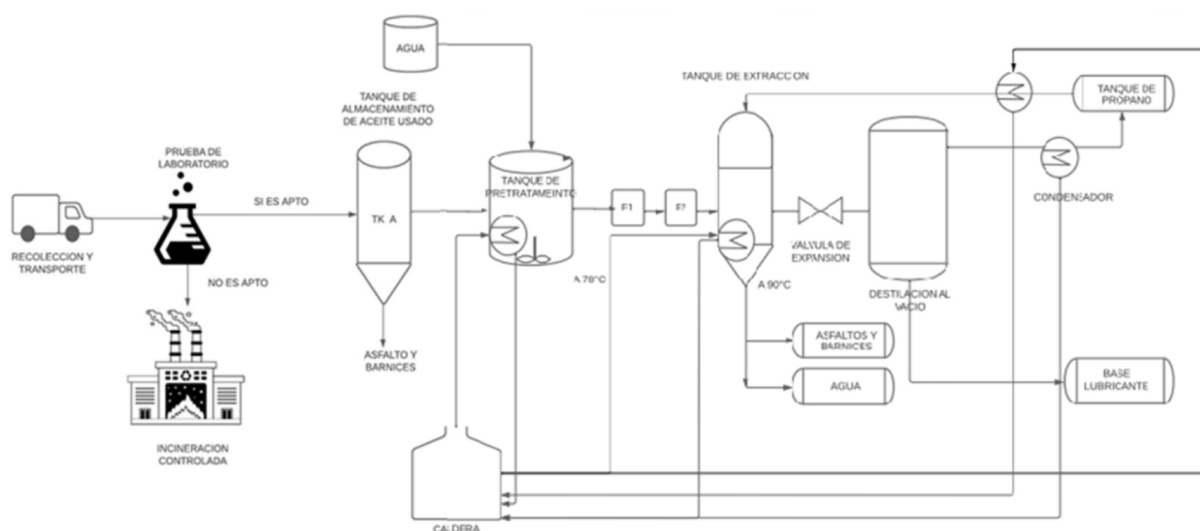


Figura 1: diagrama de proceso de reutilización de aceite usado por extracción de propano líquido

El proceso empleado se compone de operaciones bien diferenciadas: recepción y almacenamiento, extracción con propano, destilación y almacenamiento y distribución. A continuación, se detallará cada operación.

Recolección y almacenamiento

El proceso inicia con la recolección en los generadores inscriptos en la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la provincia de Salta, Programa de Residuos Peligrosos, con los cuales se realizarán los convenios. El aceite se almacenará en tachos de 200 litros de aceite usado, proporcionados por el proyecto. Arribado el aceite a la planta se someterá a pruebas de laboratorio de acuerdo a la normativa ASTM, al analizar el estado y la composición de este, donde se determinará el grado de contaminación del aceite, a fin de evaluar si es apto para su regeneración, de lo contrario el aceite se enviará a un operador habilitado, Hábitat Ecológico, ubicada en el Parque Industrial de la ciudad de Salta, la cual le dará disposición final a través del método de incineración controlada. Los costos de este tratamiento lo deben asumir los generadores. El aceite apto para la regeneración debe contener 5 % de agua. El almacenamiento del aceite lubricante usado apto para su regeneración se realizará en dos tanques de 10.000 l cada uno.



Figura 2: tachos para aceites lubricantes

Tabla 1: cantidad de tachos requeridos para el proyecto

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Aceite usado	288	298	309	319	330	342	354	366	379	392
Aceite regenerado	245	254	262	271	281	291	301	311	322	333

Pretratamiento

En el pretratamiento se debe comenzar al calentar el aceite usado para su regeneración y, en caso de ser necesario, se debe añadir agua hasta completar la concentración requerida. Se homogeniza el aceite con el mezclador mientras se calienta hasta alcanzar entre 60 y 70 °C de temperatura.

Filtrado

En el filtrado se elimina el barro y los sólidos que puedan contener el aceite usado. Se bombea al hacer pasar el aceite primero por un filtro grueso que retiene los sólidos más grandes y posteriormente por un filtro fino donde se retiene la arena y los restos sólidos de menor dimensión.

Extracción con propano

En la extracción con propano líquido se realiza la purificación del aceite, al separar el agua, los asfaltos y los barnices que pueda contener. El aceite ingresa al tanque de extracción, donde se calienta a una temperatura de 90 °C a una presión controlada de 30 bar, condiciones adecuadas para el mezclado con propano líquido, que constituye el disolvente de extracción. Todas las bases lubricantes de recuperación son solubles en este disolvente, no así las impurezas y resto de productos no deseados. Es necesario que el propano líquido almacenado a 30 °C de temperatura y 12 bar de presión, que con anterioridad debe incorporarse al tanque de extracción, se caliente a 90 °C e incrementar la presión a 30 bar, condiciones para poder realizar el arrastre, y de esa manera, decantar el agua, el asfalto y los barnices. El agua residual obtenida se enviará para su disposición final a al operador habilitado Hábitat Ecológico, ubicado en el Parque Industrial de la ciudad de Salta. Asimismo, los lodos se acopiarán para el uso como materia prima en la fabricación de cemento y/o elaboración de capas asfálticas.

Destilación

En la destilación al vacío a *flash* se obtienen las bases lubricantes, es decir, el aceite mineral de base lubricante regenerado. Antes de la destilación, se transporta la mezcla de aceite usado y propano líquido por una válvula de expansión, lo que reduce la presión de 30 kg/cm² a 15 kg/cm² a la salida del tanque de extracción, para así producir la evaporación súbita del propano. El destilador debe mantener su nivel de líquido entre un valor mínimo y máximo para evitar la succión de gas por la salida de líquido y la succión de líquido por la salida del gas. Una válvula solenoide sobre la salida de las bases lubricantes realizará este control. Es en este punto en el que se realiza la separación de fases en bases lubricantes y propano. Las bases lubricantes se escurren por la parte inferior de la cámara, mediante la apertura de la válvula solenoide. El propano sigue un ciclo cerrado, por lo que se requiere condensar para luego volver a ser bombeado a su tanque de almacenamiento y cerrar el ciclo.

Envasado y almacenamiento

La base lubricante obtenida se almacenará en tachos de 200 litros, los cuales se comercializarán y enviarán a los lubricentros, donde se retira el aceite usado. De esta manera, se asegura el retiro y la distribución del aceite obtenido en un mismo viaje, es decir, la “logística inversa”.

Tamaño del proyecto

La planta tendrá una capacidad operativa proyectada de 78.325 litros/mes, con una capacidad equivalente a 392 tachos/mes de 200 litros cada uno, con un promedio de veinte tachos diarios, tras trabajar en un turno de ocho horas durante cinco días a la semana.

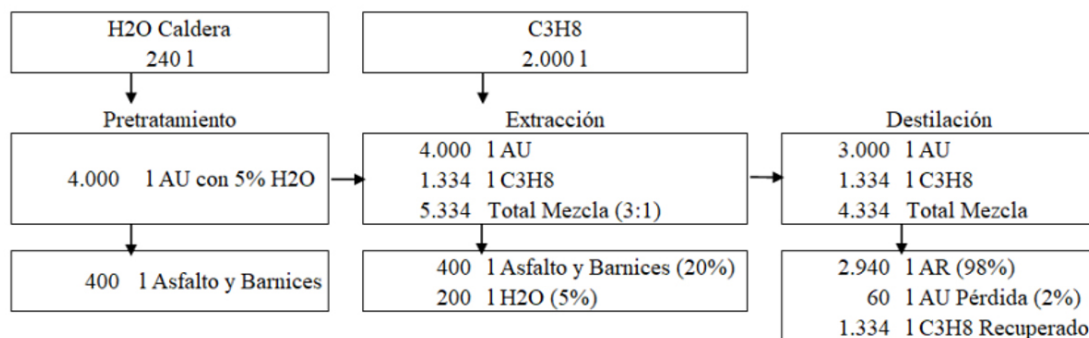


Figura 4: balance de masa

Para Argentina y el mundo, es un reto el manejo de los residuos peligrosos, entre ellos los aceites lubricantes usados, por lo cual una de las medidas es establecer los aspectos técnicos en las diferentes etapas de manejo (generadores, operadores, transportistas, plantas de tratamiento y disposición final), que de ser aplicadas, permitirán proteger la salud humana y el ambiente.

Conclusiones

En cuanto a la reutilización del aceite lubricante usado, se propone el método por extracción de propano líquido, el óptimo, más limpio y menos contaminante, a fin de obtener aceite base lubricante de muy alta calidad, similar a la del primer refino. El proyecto implica una ubicación de la planta estratégica, donde se dará disposición final al desecho peligroso de corriente Y8, una correcta logística de abastecimiento y distribución, los análisis de la materia prima arribada y los equipos de la mejor calidad con el objetivo de contar con un excelente proceso hermético y sin emisiones.

El presente proyecto busca cubrir un 30 % de la demanda en la provincia de Salta, que en términos de aceites usados se traduce en 692.208 litros anuales, lo que se estima en 57.684 litros mensuales, de los cuales un 80 % se recupera con la implementación del método de extracción por propano líquido. Esto representa 553.766 litros anuales de aceite base lubricante listo con el fin de comercializar.

Propuesta de desarrollos futuros

- » Diseñar plantas de reutilización de aceites usados a pequeña escala para empresas de manera individual
- » Ahondar en estrategias de *marketing* y ventas a fin de fomentar el uso de aceites lubricantes recuperados y, de acuerdo a los requerimientos de cada motor, graduar el uso de aditivos.
- » Profundizar la concientización con el propósito de adoptar la reutilización de desechos que involucre a toda la comunidad.

Referencias

- [1] L. F. Reinoso, *Criterios para la elaboración de estudios de impacto ambiental*. Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2013. ISBN: 9789872934040.
- [2] Secretaría de Ambiente, “Residuos peligrosos,” [en línea]. Disponible en: <http://ambiente.salta.gov.ar/area/38/residuos-peligrosos.html>.
- [3] Gobierno de Salta, “Resolución 169/09,” [en línea]. Disponible en: http://boletinoficialsalta.gob.ar/NewDetalleResolucion.php?nro_resolucion=169/09.
- [4] Secretaría de Ambiente, “Manual operativo,” [en línea]. Disponible en: http://ambiente.salta.gov.ar/assets/uploads/documentos/manual_operativo.pdf.
- [5] Ingemecánica, “Tutorial semanal N°68,” [en línea]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn68.html>.

- [6] Redalyc, "Artículo académico," [en línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4962/496254902015/html/>.
- [7] Spirax Sarco, "Technical information SV60 TI-SI3-27," [en línea]. Disponible en: <https://content.spiraxsarco.com/-/media/spiraxsarco/international/documents/en/ti/sv60-ti-si3-27-en.ashx?rev=3b0262075228400d828302f-26c83ef09>.
- [8] Gobierno de Salta, "Producción," [en línea]. Disponible en: <https://produccionsalta.gob.ar/>.
- [9] Universidad Politécnica Salesiana, "Tesis UPS-CT006977," [en línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14195/1/UPS-CT006977.pdf>.
- [10] UTN Córdoba, "Sistema integrado de gestión ambiental para aceites lubricantes usados," [en línea]. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/5910/Cordoba%20-%20Sistema%20Integrado%20de%20Gestion%20Ambiental%20para%20Aceites%20Lubricantes%20Usados.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [11] Observatorio Ambiental de Bogotá, "Documento técnico," [en línea]. Disponible en: https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlim_download&p=3792.
- [12] SPIQyP, "Escala paritarias 2021-2022," [en línea]. Disponible en: <https://spiqyp.org.ar/wp-content/uploads/2021/07/Escala-Paritarias-2021-2022-1-ok.pdf>.
- [13] Argentinambiental, "Resolución 468/19 aceites usados," [en línea]. Disponible en: <https://argentinambiental.com/legislacion/buenos-aires/resolucion-46819-aceitesusados/>.
- [14] UNI, "Regeneration of used lubricant oils," [en línea]. Disponible en: <https://acreditacion.uni.edu.pe/wp-content/uploads/2017/05/Regeneration-of-UsedLubricant-Oils.pdf>.
- [15] Gobierno de Argentina, "Ministerio de Producción," [en línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/produccion>.
- [16] Gobierno de Argentina, "Seguro ambiental," [en línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/control/seguro-ambiental>.
- [17] Gobierno de Argentina, "Resolución 1639/2007," [en línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resolucion-1639-2007-134704/texto>.

Desarrollo de un sistema inmersivo de control de *gimbals* en drones mediante realidad virtual para inspecciones en infraestructuras críticas

Development of an immersive system for drone gimbal control using virtual reality for critical infrastructure inspections

Nicolás Rolando Corimayo Morales

Facultad de Ingeniería, UCASAL

Resumen

Este artículo describe el desarrollo e implementación de un sistema inmersivo que permitirá controlar el gimbal de un dron mediante gafas de realidad virtual (RV) Oculus Quest 2, al optimizar las inspecciones de infraestructuras de alto riesgo sin exponer al operador a peligros físicos. La comunicación entre el dron y las gafas se realizará mediante el protocolo MavLink y la controladora de vuelo PX4, lo que permitirá un control preciso y en tiempo real del gimbal. Se evaluarán los beneficios de este sistema en comparación con métodos tradicionales de inspección en términos de seguridad, precisión y eficiencia operativa. Los resultados prevén una mejora en la calidad de las inspecciones y una reducción significativa del tiempo de operación. Este trabajo contribuirá a la adopción de tecnologías avanzadas en Argentina y propondrá futuras mejoras a fin de enfrentar las limitaciones actuales en condiciones ambientales adversas.

Palabras clave:

realidad virtual, control inmersivo, drones, gimbal, inspección de infraestructuras, Oculus Quest 2, protocolo MavLink, controladora de vuelo PX4.

Abstract

This article describes the development and implementation of an immersive system that will allow the gimbal of a drone to be controlled using Oculus Quest 2 virtual reality (VR) glasses, optimizing high-risk infrastructure inspections without exposing the operator to physical hazards. Communication between the drone and the headset will be carried out using the MavLink protocol and the PX4 flight controller, allowing precise, real-time control of the gimbal. The benefits of this system will be evaluated in comparison with traditional inspection methods in terms of safety, accuracy, and operational efficiency. The results are expected to show an improvement in the quality of inspections and a significant reduction in operating time. This work will contribute to the adoption of advanced technologies in Argentina and propose future improvements to address current limitations in adverse environmental conditions.

Key words:

virtual reality, immersive control, drones, gimbal, infrastructure inspection, Oculus Quest 2, MavLink protocol, PX4 flight controller.

Introducción

La inspección de infraestructuras críticas, que a menudo requiere exposición a riesgos físicos de alto nivel, es esencial en la industria moderna. Estas estructuras suelen ubicarse en entornos peligrosos, lo que representa un riesgo considerable para los operadores humanos [1]. La introducción de drones ha mitigado estos riesgos; sin embargo, el control preciso del *gimbal* y la estabilidad del *streaming* capturado todavía presentan un desafío, en especial, en condiciones de viento o vibraciones externas [2]. La realidad virtual (RV) surge como una tecnología que puede ofrecer soluciones innovadoras para este problema, al permitir que el operador controle el *gimbal* mediante una interfaz inmersiva, y al proporcionar un control más intuitivo y detallado de los movimientos de la cámara sin necesidad de exposición física.

Mediante el protocolo de comunicación MavLink y la controladora de vuelo PX4, el sistema interpretará los movimientos de cabeza del operador capturados por el Oculus Quest 2 con el propósito de ajustar el *gimbal*. Este avance ofrecerá una alternativa efectiva y segura a las inspecciones tradicionales, lo que aumentará la precisión de las capturas y reducirá los tiempos de operación. Esta innovación será en especial relevante en Argentina, donde el uso de RV para aplicaciones industriales es aún limitado.

Estado del arte

Diversos estudios han explorado el uso de interfaces inmersivas en el control de drones, al destacar los beneficios de la RV con el propósito de mejorar la precisión y reducir los riesgos en entornos industriales complejos. Por ejemplo, en el campo de la automatización, se ha demostrado que el control en primera persona mediante RV permite a los operadores navegar y capturar detalles con mayor facilidad en entornos complejos [3]. Además, investigaciones en el ámbito de sistemas autónomos han destacado cómo los sistemas inmersivos permiten maniobras complejas sin exposición física del operador, lo que posibilita una adopción rápida por usuarios con mínima experiencia en RV [4].

El protocolo MavLink, ampliamente utilizado en aplicaciones de inspección industrial, permite un control autónomo de drones y *gimbals*, que asegura una comunicación robusta en entornos difíciles [5]. La combinación del protocolo MavLink con PX4 ha sido efectiva al lograr la estabilidad y la precisión necesarias para la transmisión de datos entre el dron y el *gimbal* [6]. Sin embar-

go, en Argentina, el uso de esta tecnología aún no ha alcanzado una adopción amplia, lo que limita su impacto en la industria. La solución propuesta en este artículo posicionará al país en la vanguardia de la adopción de tecnologías inmersivas en inspección industrial, lo que promoverá la reducción de riesgos y la optimización de recursos.

Metodología

En cuanto al desarrollo del sistema, se integrarán las gafas Oculus Quest 2, el protocolo MavLink y la controladora de vuelo PX4. Las gafas detectarán los movimientos de cabeza del operador, los cuales se interpretarán como comandos de control a fin de ajustar la posición del *gimbal* en tiempo real. Este sistema de comunicación se configurará con el propósito de asegurar una baja latencia, al enviar los comandos de control desde las Oculus Quest 2 al controlador PX4 mediante MavLink, lo que permitirá una respuesta rápida y precisa del *gimbal*.

Se realizarán pruebas a fin de evaluar la respuesta del sistema en diferentes condiciones de viento y vibración. Con el objetivo de asegurar una evaluación integral, el sistema se examinará tanto por operadores experimentados como por novatos, quienes registrarán datos sobre la precisión, la latencia y la estabilidad del *gimbal* en cada prueba. Los operadores realizarán inspecciones simuladas de infraestructuras, al capturar imágenes a diferentes alturas y en diversas condiciones ambientales. Los datos obtenidos se analizarán a fin de evaluar la precisión del control, la facilidad de uso del sistema y su efectividad en condiciones adversas.

Resultados

Los resultados anticipan que el sistema inmersivo permitirá un control en tiempo real con una latencia aceptable, lo que asegurará una experiencia fluida y una captura precisa de las imágenes. En condiciones de viento moderado, se espera que el *gimbal* mantenga estabilidad, lo que permitirá capturas detalladas de la infraestructura sin pérdida de calidad en el *streaming*. Los operadores novatos deberían lograr adaptarse al sistema en un corto periodo de tiempo, lo que indicaría que el control mediante RV es intuitivo y sencillo de aprender.

En términos de eficiencia operativa, el sistema prevé una reducción considerable en los tiempos de inspección en comparación con métodos tradicionales. Además, la precisión en la captura del video debería mejorar de manera significativa, lo que le posibilitaría al operador capturar detalles específicos con un alto grado de estabilidad. Estos hallazgos confirman que el sistema inmer-

sivo propuesto ofrecerá una alternativa segura y efectiva para la inspección de infraestructuras críticas, al optimizar tanto el tiempo de operación como la seguridad del operador.

La combinación de la tecnología Oculus Quest 2 con el protocolo MavLink, la controladora de vuelo PX4 y el *gímbal* proporcionará una experiencia de control fluida e intuitiva que minimizará los riesgos y optimizará la captura de datos en entornos de alto riesgo. Este estudio se alinearán con investigaciones previas que indican que la RV es una tecnología eficaz para el control de drones en situaciones donde la visibilidad y la precisión son críticas [2].

Conclusión

El sistema inmersivo de control de *gimbals* mediante RV propuesto en este estudio presentará una solución innovadora para la inspección de infraestructuras críticas, lo que maximizará tanto la seguridad como la precisión en la captura de datos. Se anticipa que el sistema mejorará de manera significativa la eficiencia operativa en comparación con los métodos tradicionales, al ofrecer un control preciso y estable en tiempo real. Las limitaciones identificadas proporcionarán una base para futuras investigaciones, que podrían enfocarse en mejorar la robustez del sistema bajo condiciones climáticas adversas y en desarrollar versiones de bajo costo a fin de promover su adopción en el sector industrial.

Este avance contribuirá al desarrollo tecnológico del país y establecerá una base sólida para la adopción de sistemas inmersivos en aplicaciones de alta exigencia y riesgo, al impulsar así la innovación en el ámbito de la inspección industrial y la seguridad operativa.

Referencias

- [1] M. M. Rahman, M. Nagai, and T. Shibayama, "Review of recent trends in remote sensing technology for infrastructure inspection," *Sensors*, vol. 21, no. 2, p. 571, 2021.
- [2] H. Duan and P. Li, "Progress in unmanned aerial vehicles for civil applications: A survey," *Unmanned Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 1–22, 2014.
- [3] H. Shakhathreh *et al.*, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 48572–48634, 2019.
- [4] Q. Zou, J. Ni, T. Zhang, Q. Wang, and Q. Li, "Unmanned aerial vehicle (UAV) visual research: A review," *Artificial Intelligence Review*, vol. 52, no. 3, pp. 907–943, 2019.
- [5] A. S. Saeed, K. K. Nai, and H. K. Chieng, "Review of MavLink protocol and applications in multirotor UAVs," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 10, no. 3, pp. 983–990, 2018.
- [6] L. Meier, P. Tanskanen, L. Heng, G. H. Lee, F. Fraundorfer, and M. Pollefeys, "PIXHAWK: A micro aerial vehicle design for autonomous flight using onboard computer vision," *Autonomous Robots*, vol. 33, no. 1, pp. 21–39, 2012.

Análisis del comportamiento estructural de la edificación de mampostería de la escuela Dr. Benjamín Zorrilla con el uso del software 3Muri

Analysis of the structural behavior of the masonry building of the Dr. Benjamin Zorrilla school using 3Muri Software

Lautaro Agustín, Vera García
veragarcialautaro@gmail.com

Emiliano Gastón, Medina
emimed6678@gmail.com

Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UCASAL

Resumen

La escuela Dr. Benjamín Zorrilla forma parte del patrimonio histórico de la provincia de Salta, debido a su antigüedad (construida en el año 1798) y su estilo arquitectónico colonial. La edificación se caracteriza por muros de mampostería portante sin confinar y cubiertas de madera. Esto, sumado al hecho de ubicarse en zona sísmica, hace que la estructura pueda presentar un elevado riesgo sísmico. A fin de llevar a cabo su estudio, se utilizó el software 3Muri Project, el cual se basa en el uso de macroelementos. El mismo permite generar modelos simplificados sin perder la precisión que se espera en los resultados, lo que constituye una alternativa al Método de Elementos Finitos. Las tareas realizadas incluyeron el relevamiento de la estructura, la interpretación de las normativas que utiliza el software, y el aprendizaje de sus herramientas.

Gracias a los resultados obtenidos y al tener en cuenta la metodología de análisis, se establecieron las ventajas y las desventajas que posee 3Muri para poder utilizarse en la región. El análisis concluye que la edificación presenta un buen comportamiento frente a la amenaza sísmica, lo que se verificó gracias a la mayoría de los análisis realizados. Además, se destaca la utilización de normativas europeas, que permiten un estudio detallado de este tipo de estructuras, mediante la resolución de algunas deficiencias presentes en la normativa CIRSOC vigente en Argentina. Por último, se proponen dos opciones de refuerzo estructural con el objetivo de mejorar el comportamiento sísmico y la preservación de la edificación.

Palabras clave

Estructuras de mampostería, Macro-elementos, 3Muri Project

Abstract

Dr. Benjamín Zorrilla School is part of the historical heritage of the Province of Salta, due to its age (built in 1798) and its colonial architectural style. The building is characterized by unconfined load-bearing masonry walls and wooden roofs. This, added to the fact that it is located in a seismic zone, means that the structure may present a high seismic risk. The 3Muri Project software was used for the study, which is based on the use of macro-elements. It allows the generation of simplified models without losing the accuracy expected in the results, being an alternative to the Finite Element Method. The tasks performed included the survey of the structure, the interpretation of the regulations used by the software, and the learning of its tools.

Thanks to the results obtained and taking into account the analysis methodology, advantages and disadvantages of 3Muri for use in the region were established. The analysis concludes that the building has a good performance against seismic hazards, verifying most of the analyses performed. In addition, the use of European standards is highlighted, which allows a detailed study of this type of structures, solving some deficiencies present in the CIRSOC standards in force in Argentina. Finally, two structural reinforcement options are proposed to improve the seismic behavior and the preservation of the building.

Key words

Masonry Structures, Macro-elements, 3Muri Project

Introducción

La Ciudad de Salta (en especial, parte de su casco céntrico) se caracteriza por contar con una gran cantidad de edificaciones realizadas con mampostería, muchas de ellas de importante envergadura y de tipología colonial. Algunas poseen un carácter histórico por el cual resulta imprescindible su conservación. Si sumamos a esto el hecho de que la ciudad se encuentra categorizada como zona sísmica 3 (amenaza sísmica elevada) según el instituto INPRES [1], cabe la posibilidad de que muchas de estas estructuras presenten un elevado riesgo sísmico.

Debido al paso del tiempo, se ha visto en la necesidad de utilizar métodos de análisis que permitan una mejor comprensión del estado actual y desempeño de las estructuras frente a la acción sísmica y con ello poder obtener información sobre la vulnerabilidad de las mismas [2].

En virtud de lo expresado con anterioridad, se ha escogido a la Escuela Zorrilla (ubicada sobre la calle 20 de febrero N.º 21) como objeto de estudio, ya que representa una construcción que forma parte del Patrimonio Histórico de la Provincia, con más de doscientos veinticinco años de antigüedad. La misma se caracteriza por presentar muros de mampostería y cubiertas de madera, propios de la época en la que fue construida [3]. Abarca una superficie de alrededor de 800 m² y cuenta con un estilo arquitectónico colonial, como se observa en la Figura 1.

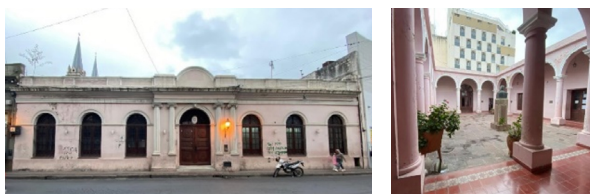


Figura 1: frente y patio interno de la escuela

Del mismo modo, se seleccionó el 3Muri Project como el *software* para la realización del análisis estructural, debido a sus ventajas a la hora del estudio de construcciones de mampostería. Dicho programa cuenta con un uso extendido en el continente europeo, en donde se utiliza principalmente para la verificación de estructuras existentes. Su funcionamiento se basa en el estudio de un modelo 3D conformado por una malla de macroelementos (lo que se conoce como macro-modelo [4]), al aplicar una teoría en particular, denominada “Teoría del Marco Equivalente” [5]. En este caso, el *software* considerará a los distintos elementos que componen la estructura como

elementos tipo barra (*frame*), unidos mediante nudos rígidos. Además, el *software* describe el comportamiento de la mampostería de manera meticulosa a partir de estudios realizados en edificaciones luego de eventos sísmicos y ensayos en laboratorio. Lo mencionado con anterioridad da como resultado modelados simplificados que requieren un menor esfuerzo computacional, pero que se vinculan con la obtención de resultados precisos [5], [6], [7]. Por lo tanto, resulta ser una interesante alternativa a la representación de la mampostería en forma de micromodelos, realizados con elementos finitos.

La necesidad de utilizar la normativa argentina (CIRSOC 103 [1], [8] y CIRSOC 501 [9]) en conjunto con la europea (Eurocode 6 [10], Eurocode 8 [11], [12] y NTC-2018 [13], principalmente) se tomó en cuenta debido a que la primera no se encuentra disponible en el *software*. Sin embargo, el uso de las normativas europeas demuestra ser beneficioso por la rigurosidad y el grado de detalle que estas poseen a la hora de verificar y/o diseñar estructuras.

Tareas preliminares al modelado 3D

Se realizaron dos tareas de manera simultánea, previas a iniciar el modelado de la escuela.

Relevamiento de la edificación

Los objetivos de esta tarea fueron la obtención de planos (el plano de planta se muestra en Figura 2) y los materiales utilizados en la construcción de la escuela, además de la identificación de las características de la cubierta.

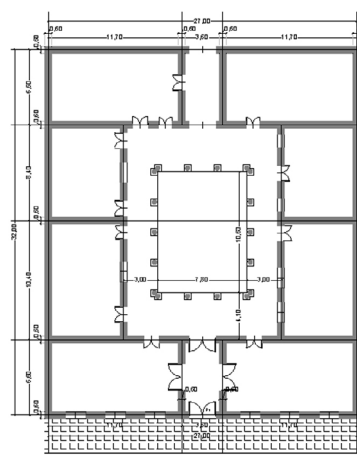


Figura 2: plano de planta

En términos generales, la construcción está conformada por muros de 60 cm de espesor y las alturas que varían entre los 5,50 m y 8,20 m. En cuanto a la cubierta, la misma se caracteriza

por cabriadas y tirantes de madera cubiertos con tejas y tejas coloniales en la parte superior, como se observa en la Figura 3.



Figura 3: imágenes de cubierta

Aprendizaje del programa

La segunda tarea consistió en un modelado de prueba en el *software* de una estructura de menor envergadura (ver Figura 4) a fin de comprender su funcionamiento y las normativas con las que este trabaja. Realizar esta prueba permitió realizar un modelado adecuado de la escuela.

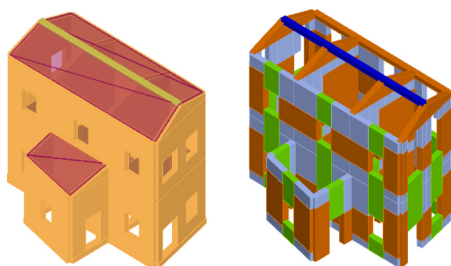


Figura 4: Modelo de prueba realizado

Modelado 3D de la escuela

Se procedió al modelado de la estructura, siguiendo el flujo de trabajo observado en Figura 5.

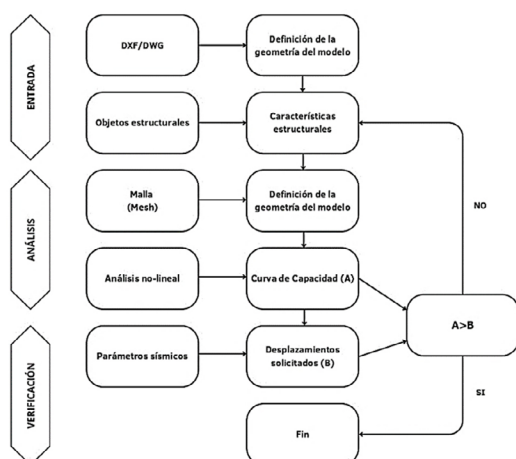


Figura 5: diagrama de flujo del software

Asignación de parámetros iniciales

Como se explicó en un principio, en el programa se utilizó el Eurocode como reglamentación de referencia. Entre algunas diferencias que se tienen con la normativa CIRSOC se puede destacar la consideración de distintos Estados Límites Últimos (ELU) y la posibilidad de trabajar con modelos no-lineales, como es el caso del análisis *pushover* que realiza el *software*.

Cabe destacar la aplicación del factor de confianza (FC), dependiente del grado de conocimiento que se tenga de la estructura [12] y que funciona como factor de seguridad cuando no se conocen con precisión las características de los diferentes materiales. En cuanto a los demás parámetros considerados, es posible observar la Figura 6.

[1] Materials		[1] Bilinear parameters	
Existing: Drift-shear	0.004	Intersection bilinear-pushover	0.7
Existing: Drift-Bending	0.008	[2] LS of Near Collapse (NC)	
Existing: FC-LC1	1.35	Limit condition (NC)	Decay
Existing: FC-LC2	1.2	Decay value	0.8
Existing: FC-LC3	1	Make use of q* limit	No
New: Drift-shear	0.004	q* limit	3
New: Drift-Bending	0.008	Make use of dt*/det* limit	Yes
Reduction factor for cracked stiffness	0.6	dt*/det* limit	3
[2] Static calculation		Displacement reduction factor	1
yG1	1.2	[3] LS of Significant Damage (SD)	
yG2	1.2	Limit condition (SD)	By NC
yQ	1.6	Storey height drift limit (SD)	0.02
Q _{wind}	1.5	Limit value coeff.	0.75
O _{wind}	0.6		
Dominant wind load	No		
Initial eccentricity coefficient	450		
Limit slenderness	27		

Figura 6: Parámetros considerados en el software

Materiales y modelado de muros

La construcción se compone principalmente de mampostería y elementos de madera, a los cuales se les asignaron propiedades geométrico-mecánicas. Según lo observado durante el relevamiento y lo obtenido de datos históricos [3], se consideró a la mampostería formada de ladrillo cerámico macizo con juntas de mortero de cal y al lapacho amarillo como la especie de madera a modelar. Cualquier discrepancia con los valores considerados [8], [9], [10], [14], [15], observados en Tablas 1 y 2, se puede subsanar con la aplicación de un factor de confianza elevado. El modelado de muros se observa en Figura 7.

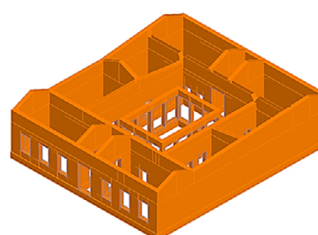


Figura 7: modelado de muros

Mampostería		
Denominación	Propiedad física	Valor
E	Módulo de elasticidad longitudinal	2100 Mpa
G	Módulo de elasticidad transversal	420 Mpa
w	Peso específico del material	17 kN/m ³
f _m	Resistencia media a compresión	2,1 Mpa
f _{vm0}	Resistencia media a corte (sin influencia del esfuerzo de compresión)	0,19 Mpa
f _{vlm}	Resistencia límite a corte	2,2 Mpa
f _k	Resistencia característica a compresión	1,75 Mpa
FC	Factor de confianza	1,35
γ _m	Factor de seguridad del material	3
Shear drift	Deriva por corte	0,004
Bending drift	Deriva por flexión	0,008
Φ _∞	Coefficiente de fluencia lenta	1

Tabla 1: propiedades de la mampostería

Madera		
Denominación	Propiedad física	Valor
E	Módulo de elasticidad longitudinal	18200 Mpa
G	Módulo de elasticidad transversal	1100 Mpa
w	Peso específico del material	11 kN/m ³
f _{vm}	Resistencia media a compresión	84,5 Mpa
f _{vk}	Resistencia característica a compresión	43 Mpa
K _{mod}	Coefficiente de corrección por duración de cargas	0,6
FC	Factor de confianza	1,35
γ _w	Factor de seguridad del material	1,3

Tabla 2: propiedades de la madera

Modelado de cubiertas

Una de las particularidades con las que cuenta 3Muri es la posibilidad de representar de una manera correcta pisos y/o cubiertas, los cuales son analizados como diafragmas flexibles [5], [6], [16], característicos de este tipo de construcciones de mampostería antiguas [3], [4]. Para ello, se asignó en el *software* la tipología de la misma (según lo observado en la sección 2.1), al igual que sus dimensiones y materiales (ver Figura 8). Las cargas que se establecieron sobre cubierta (según CIRSOC 101 [17]) se tratan de las siguientes:

- » Peso propio cubierta: 1,24 kN/m²;
- » Demás cargas permanentes: 0,93 kN/m²;
- » Sobrecarga por mantenimiento: 1 kN/m².

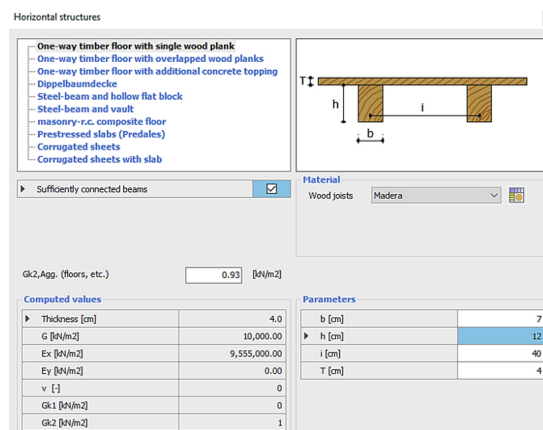


Figura 8: modelado de cubierta

- » El cálculo de la rigidez de cubierta (ver Figura 9) se realiza de manera automática [16], [18] según los datos introducidos en el *software*, que fueron los siguientes:
- » Módulo de elasticidad Ex: 9555 MPa
- » Módulo de elasticidad G: 10 MPa

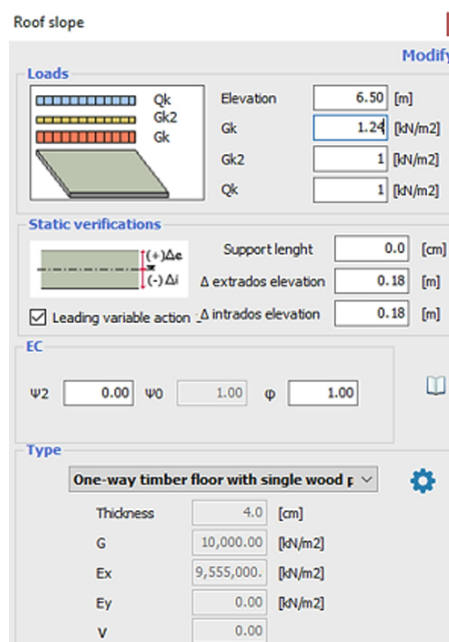


Figura 9: valores de cargas y rigidez

El modelo 3D de la estructura se observa en la Figura 10.

Formación de los macro-elementos

El programa realiza una serie de controles que se deben de cumplir antes de proceder al análisis del modelo, como se muestra en Figura 11. Esto ayuda a garantizar que el mismo ha sido realizado de manera correcta y que los resultados sean los apropiados.

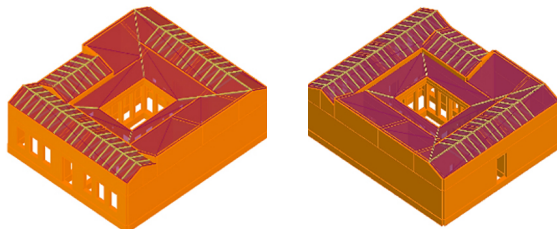


Figura 10: modelo de la escuela

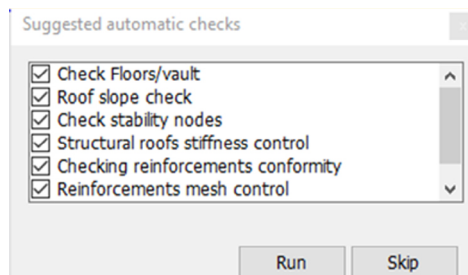


Figura 11: controles realizados por 3Muri

La Figura 12 muestra el mallado de macroelementos de la edificación, cada uno de ellos caracterizados por un color y un comportamiento determinados [5], [6]:

- » Naranja: elementos de tipo panel (*pier*), principalmente presentan fallas por esfuerzo de corte.
- » Verde: elementos de tipo dintel (*sprandel beam*), principalmente presentan fallas por esfuerzo de flexión.
- » Gris: elementos rígidos que no llegan a sufrir daños y son los que interconectan a los demás elementos.
- » Azul: elementos de madera.

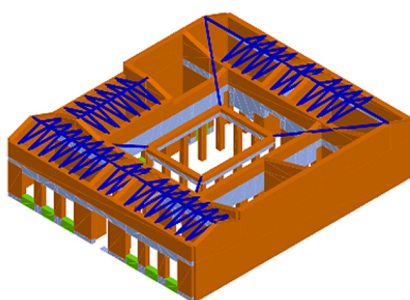


Figura 12: mallado de macroelementos

La Figura 13 muestra, a modo de ejemplo, cómo la presencia de aberturas es clave en la formación y disposición de los macroelementos [6].

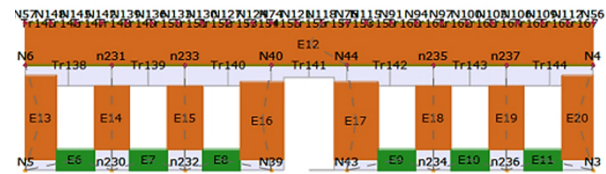


Figura 13: Mallado del muro de fachada

Determinación de la demanda sísmica

Los parámetros sísmicos a fin especificarla demanda sobre el modelo se determinaron según los lineamientos del reglamento CIRSOC 103-Parte I. Las características que se adoptaron de la zona de emplazamiento y del tipo de estructura [1], [19] fueron las siguientes:

- » zona Sísmica 3 (peligrosidad elevada);
- » valor de $V_{s30} \approx 400$ m/s;
- » factor de riesgo (γ_r) igual a 1,3.

El espectro sísmico se puede observar en la Figura 14.

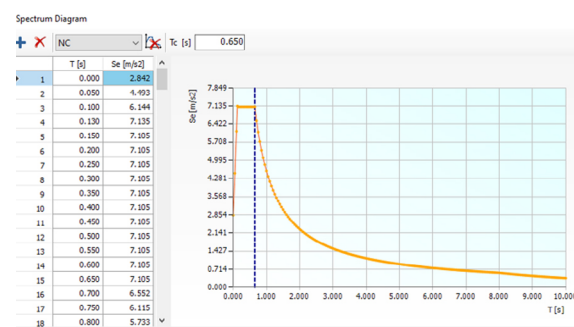


Figura 14: espectro de demanda

Análisis del modelo

3Muri ejecuta diferentes análisis de manera individual, lo que permite una menor complejidad en el modelo [5]. Los principales análisis realizados fueron los que se detallan a continuación.

Análisis global a cargas laterales

Este representa el principal análisis que realiza el *software* sobre el modelo. En el mismo, se realiza un análisis estático no lineal (*pushover*) en donde se tiene como principal hipótesis el comportamiento de tipo caja (o *scatolare*) de la estructura [6], [18]. Gracias a este análisis, se obtiene como resultado la curva de capacidad (ver Figura 18), en donde se compara el esfuerzo de corte basal con los desplazamientos sobre un nudo de control. Luego, con base en el Eurocode [11] y el espectro introducido, se determina la demanda sísmica sobre la estructura. La comparación entre la demanda y la capacidad se realiza median-

te la obtención del índice de vulnerabilidad (α), en términos de desplazamiento, como se observa en la siguiente expresión (1):

$$\alpha = \frac{d_{\text{capacidad}}}{d_{\text{demanda}}} \geq 1 \quad (1)$$

Para este análisis, solo se toman en cuenta las cargas laterales sobre el plano de los muros [5]. La Figura 15 muestra el resumen de todos los análisis que se realizaron, en donde se tienen distintas combinaciones de dirección, sentido y excentricidad accidental. En este caso, se concluye que la capacidad de la estructura no se ve superada por la demanda en ninguno de los casos. El nudo de control que se escogió sobre el modelo fue aquel que contaba con los valores del índice α más bajos, por representar la situación más desfavorable.

Verify analysis														
No.	Insert in report	Seism. dir.	Seismic load	Eccentricity [mm]	d1 MC [mm]	d2 MC [mm]	d1 SD [mm]	d2 SD [mm]	d1 DY [mm]	d2 DY [mm]	α MC	α SD	α DY	d1/DR MC
1		+X	Uniform	0.00	6.56	18.81	4.07	14.10	1.56	1.879	2.541	1.809	2.867	
2		+X	Static forces	0.00	6.27	18.41	3.88	13.80	1.46	1.803	2.530	1.803	2.930	
3		-X	Uniform	135.00	6.12	17.96	3.80	13.36	1.44	1.830	2.460	1.771	2.940	
4		-X	Static forces	135.00	6.40	18.00	4.03	13.50	1.45	1.578	2.379	1.673	2.187	
5		+Y	Static forces	135.00	9.20	12.81	4.08	9.60	0.35	1.191	1.639	1.240	1.379	
6		+Y	Static forces	135.00	10.71	11.61	4.09	8.70	0.65	1.049	1.430	1.049	1.084	
7		-Y	Uniform	0.00	10.20	11.81	4.28	9.84	0.45	1.194	1.577	1.163	1.284	
8		-Y	Static forces	0.00	10.10	12.79	4.38	9.60	0.31	1.142	1.563	1.147	1.250	
9		+X	Uniform	160.00	6.03	18.61	3.78	13.50	1.31	1.836	2.479	1.754	2.987	
10		+X	Static forces	160.00	6.53	18.80	4.06	13.10	1.38	1.835	2.530	1.807	2.966	
11		-X	Uniform	160.00	5.69	17.65	3.53	13.20	1.20	1.847	2.409	1.681	2.095	
12		-X	Static forces	160.00	6.11	17.00	3.80	12.90	1.44	1.555	2.352	1.692	2.153	
13		+Y	Uniform	0.00	6.50	19.11	4.08	14.40	1.54	1.902	2.566	1.849	2.943	
14		+Y	Static forces	0.00	6.20	18.70	3.86	13.80	1.40	1.804	2.540	1.804	2.957	
15		-Y	Uniform	135.00	6.12	17.99	3.80	13.30	1.34	1.830	2.466	1.771	2.940	
16		-Y	Static forces	135.00	6.40	18.00	4.03	13.50	1.35	1.578	2.379	1.673	2.187	
17		+Y	Static forces	135.00	10.21	12.80	4.08	9.60	0.49	1.193	1.639	1.240	1.379	
18		+Y	Static forces	135.00	10.71	11.61	4.09	8.70	0.63	1.049	1.430	1.049	1.084	
19		-Y	Uniform	0.00	10.20	12.81	4.30	9.30	0.34	1.112	1.528	1.136	1.203	
20		-Y	Static forces	0.00	10.02	12.02	4.23	9.00	0.25	1.090	1.500	1.107	1.176	
21		+X	Uniform	160.00	6.21	18.16	4.08	13.34	0.45	1.227	1.606	1.240	1.432	
22		+X	Static forces	160.00	10.00	12.00	4.11	9.30	0.53	1.089	1.475	1.039	1.182	
23		-Y	Static forces	160.00	9.00	13.91	4.04	10.10	0.35	1.246	1.708	1.256	1.495	
24		-Y	Static forces	160.00	10.00	12.00	4.09	9.30	0.40	1.097	1.490	1.040	1.147	

Figura 15: análisis realizados

Las Figuras 16 y 17 muestran los resultados del último paso del análisis *pushover*, en donde cada color representa algún tipo de daño sobre los macroelementos. Esto sirve de gran utilidad a la hora de definir a qué zonas prestarle mayor atención si se busca mejorar el comportamiento de la estructura.

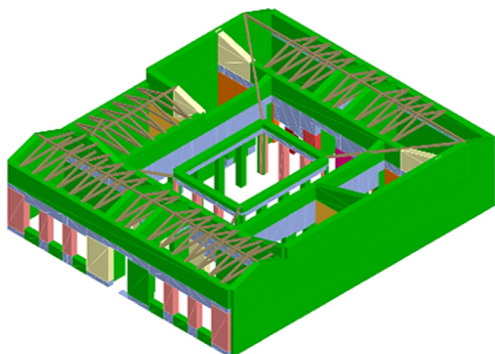


Figura 16: último paso del pushover

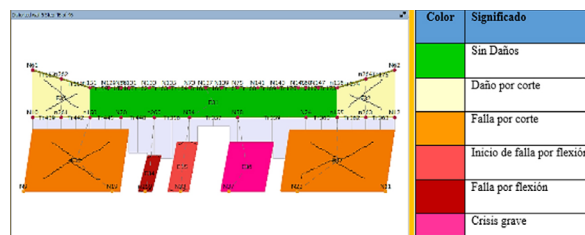


Figura 17: daños en macro-elementos de muro

Se pudo observar que se tienen los principales daños y los desplazamientos en las zonas de aberturas y cubierta del modelo, por lo que se consideran como partes primordiales a la hora de realizar posibles refuerzos estructurales.

La Figura 18 muestra, a modo de ejemplo, la curva de capacidad de uno de los análisis realizados. En el mismo se puede observar el comportamiento de la estructura, inicialmente lineal, para luego pasar a un periodo no lineal, hasta producirse su colapso. También se observa un diagrama equivalente bilineal, el cual es útil para el cálculo de la demanda que luego debe compararse con la capacidad.

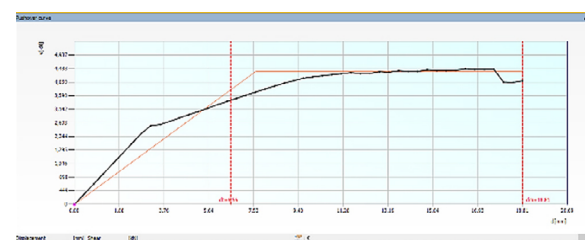


Figura 18: curva de capacidad

Análisis global a cargas verticales

En este segundo análisis, se realizan las dos siguientes verificaciones (ver Figura 19):

- » verificación de esbelteces;
- » verificación a cargas verticales.

La primera de ellas se ve satisfecha gracias al espesor que poseen los diferentes muros, a pesar de su elevada altura. Mientras que en la segunda, se verifica que la carga vertical actuante (N_{Ed}) sobre cada uno de los macroelementos no supera a la resistencia (N_{Rd}) de los mismos, descrito en la expresión (2):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1 \quad (2)$$

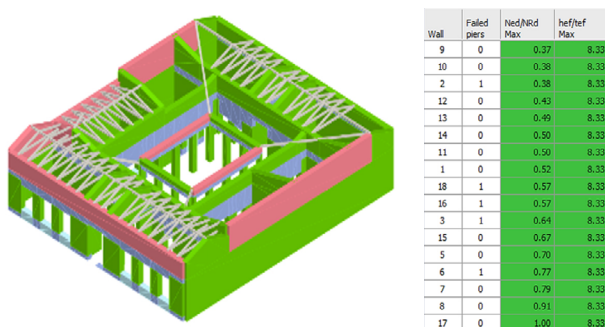


Figura 19: resultados del análisis a cargas verticales

La Figura 20 muestra cómo el valor máximo de tensión de compresión en el modelo es de 0,04 kN/cm² (igual a 0,4 MPa), el cual no llega a superar el valor de resistencia f_k (ver Tabla 1) de 1,75 MPa.

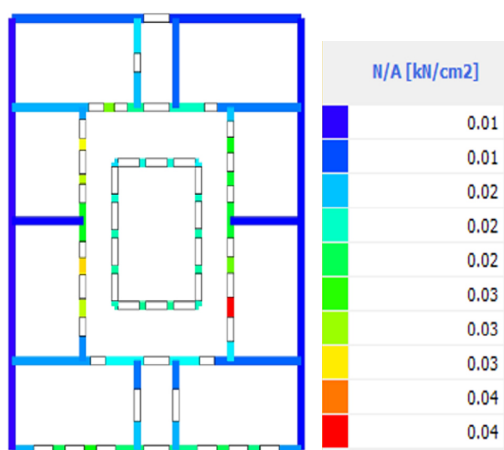


Figura 20: valores de tensiones de compresión

Análisis global a flexión fuera del plano

Para este análisis, el software procede de una forma similar a la expresada en la reglamentación CIRSOC 103, en donde se busca que los muros presenten una adecuada resistencia a cargas perpendiculares, cumpliéndose lo que indica la expresión (3):

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Ed}} \geq 1 \quad (3)$$

En este caso, la Figura 21 indica que parte de un muro medianero no cumple con la verificación, por lo cual debería reforzarse si se busca evitar su vuelco.

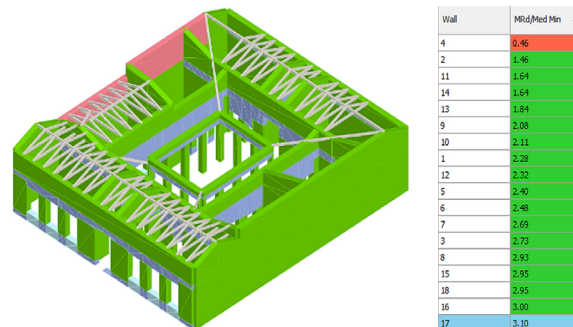


Figura 21: resultados del análisis a flexión fuera del plano

Análisis de mecanismos locales

Los análisis mostrados con anterioridad partieron del supuesto de que la hipótesis del comportamiento del tipo *scatolare* por parte de la estructura era válida. Esta particularidad puede no llegar a presentarse en construcciones existentes por múltiples causas [20], lo que daría lugar a la formación de mecanismos no previstos, tanto fuera como en el plano del muro [21], [22]. Las verificaciones se realizan según la normativa italiana NTC-2018, en donde se debe verificar que la aceleración de activación del mecanismo no sea superada por la de demanda sísmica, como muestra la expresión (4):

$$a_0^* > a_{0-\min}^* \quad (4)$$

1. Mecanismos fuera del plano del muro

Las zonas críticas que se estudiaron fueron las siguientes:

- » intersección de muros en donde estos pueden desvincularse y volcar;
- » muro de fachada, en donde se puede tener el vuelco hacia vereda (como se ilustra en Figura 22, que en este caso no verifica);
- » intersección de muros con la cubierta, en donde se puede presentar el vuelco por el empuje de esta.

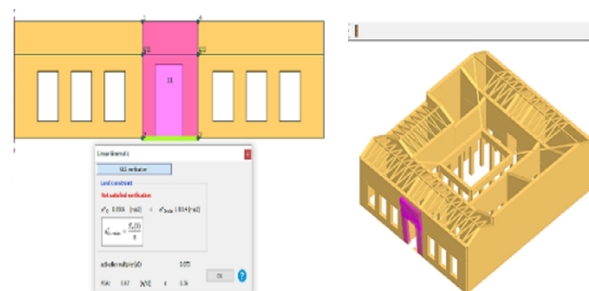


Figura 22: análisis de mecanismo sobre fachada

La Figura 23 resume las zonas de la estructura que se analizaron, en donde la mayoría de estas (marcadas en rojo) no cumplieron con la verificación. Las zonas de mayor compromiso corresponden a la intersección entre muros y cubiertas.

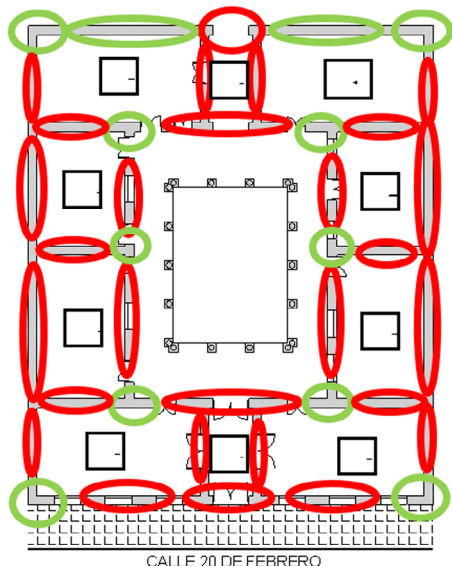


Figura 23: zonas de análisis

2. Mecanismos en el plano del muro

La verificación se realizó sobre el patio interno de la escuela, que presenta una galería con arcos de grandes aberturas, los cuales pueden desarrollar este tipo de mecanismos [22]. En la Figura 24 se muestra el mecanismo, con las rótulas y líneas de rotura planteadas. El análisis demuestra, en Figura 25, que la verificación no se cumple, por lo que se debe proponer un refuerzo a fin de evitar la formación del mecanismo.

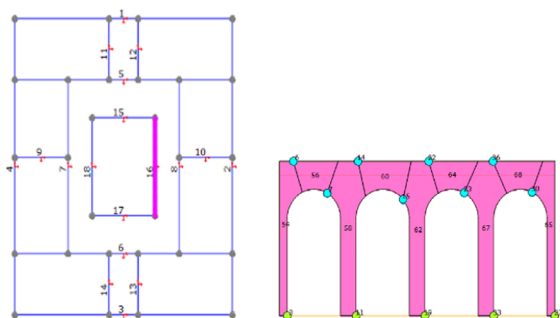


Figura 24: planteo del mecanismo de galería

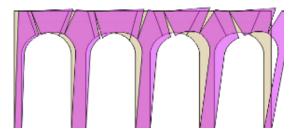
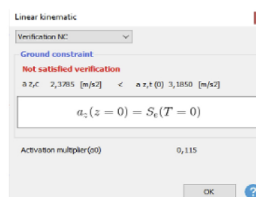


Figura 25: Análisis del mecanismo

Conclusiones de uso del software

Es posible enunciar ciertas ventajas a la hora de utilizar 3Muri, algunas de ellas son las siguientes:

- » Permite un modelado preciso de la estructura, lo que posibilita agregar distintos elementos propios de una construcción de mampostería.
- » El uso de macroelementos, permite la obtención de un mallado más simplificado y el cómputo de los resultados en un menor tiempo al compararlo con el uso del Método de Elementos Finitos.
- » Al definirse el comportamiento de la mampostería según criterios empíricos y ensayos, se obtiene precisión en los resultados.
- » Al basarse en normativas europeas, se obtiene un análisis exhaustivo de toda la estructura.
- » El modelado de cubiertas y pisos como diafragmas flexibles permite una distribución más realista de las fuerzas laterales sobre los muros.
- » Este *software* puede llegar a ser de gran utilidad en cuanto a posibles verificaciones de construcciones antiguas en la provincia.
- » La futura actualización del Mapa de Peligrosidad Sísmica de Argentina considerará a todo el país bajo amenaza sísmica, lo que generará un mayor número de edificaciones a verificar.
- » El *software* sugiere cuáles son los análisis más desfavorables y a qué zonas de la estructura se les debe prestar mayor atención.

En cuanto a las desventajas, se pueden señalar las siguientes:

- » El uso del *software*, desarrollado para el análisis de mampostería, puede quedar limitado a un pequeño campo de estudio debido al uso predominante de H⁹A° y acero en la actualidad.
- » Se requiere el conocimiento de las normativas europeas para un mejor uso del programa.
- » Al ser poco conocido en la región, puede quedar relegado frente a otros *softwares* de uso más extendido.

Propuestas de refuerzo estructural

La Tabla 3 muestra un resumen de los análisis realizados y la solución que se propone en caso de requerirlo.

Tabla 3: resumen de análisis realizados

Análisis	Conclusión	Solución propuesta
Global a cargas laterales	Verifica pero se pueden plantear refuerzos para aumentar la capacidad de la estructura	Reforzamientos en aberturas y muros
Global a cargas verticales	Verifica	No se necesitan reformas
Flexión fuera del plano	Posible falla en muro medianero Este	Reforzamiento en muro
Mecanismos fuera del plano	Falla local en algunos muros	Colocación de tensores de acero para evitar la formación de los mismos
Mecanismos en el plano	Falla local en galería	Colocación de atirantado de acero en los arcos de galería

Refuerzos sobre aberturas y muros

Aunque el análisis a cargas laterales concluye que la estructura verifica, el refuerzo sobre aberturas podría, en este caso, además de aumentar la capacidad del modelo, garantizar una mayor seguridad en estas zonas críticas. Para ello, se planteó un encamisado curvo con perfiles de acero (2 x UPN 140) para las aberturas en arco (ver Figura 26) y refuerzos de columna y dintel (IPN 100) para las restantes.

Respecto a los muros, se tuvieron en cuenta dos metodologías de refuerzo, las cuales el software es capaz de analizar.

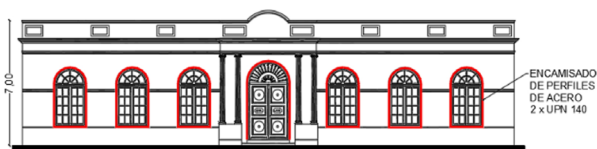


Figura 26: refuerzo en aberturas de fachada

Refuerzos de muros con tensores

Una primera opción de refuerzo es la disposición de un sistema de tensores conformados por barras de acero AL-235, los cuales pueden evitar el vuelco de las distintas porciones de muro. Para este caso, se adicionaron a los distintos mecanismos que no verificaron inicialmente (sección 4.4.1) fuerzas opuestas a la dirección del sismo, para representar la actuación de estos tensores. La Figura 27 muestra cómo la aplicación de dos pre-esfuerzos de 20 kN evita la formación del mecanismo en el muro de fachada (ver Figura 22). Dichos esfuerzos se pueden materializar (de manera conservadora) en dos barras de AL-235 de 16 mm de diámetro. Se consideró también la simetría en cuanto a la disposición de las

barras, como se observa en Figura 28, colocadas todas ellas a una altura de 5 m.

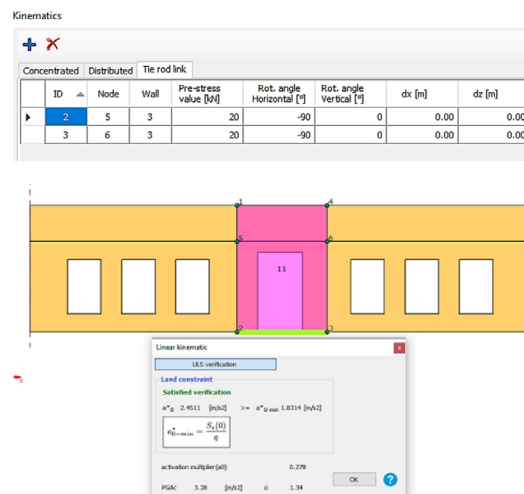


Figura 27: mejora del mecanismo local

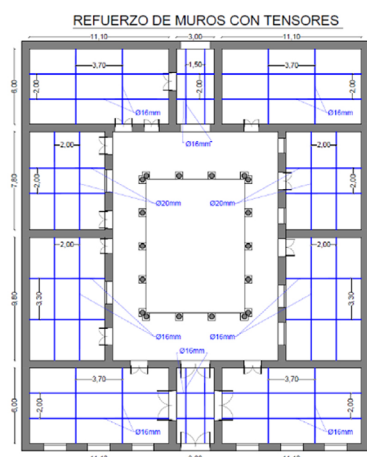


Figura 28: plano de refuerzo con tensores

Una ventaja de este sistema es su costo relativamente bajo; sin embargo, se debe considerar que su implementación estará sujeta a la modificación del aspecto original de la construcción.

Refuerzos de muros con FRP

Una segunda opción para el refuerzo de muros, es la utilización de un sistema de bandas de FRP (polímero reforzado con fibra), en donde sus características se observan en Tabla 4. Estas, una vez adheridas al muro mediante el uso de resina epoxi, permiten absorber los esfuerzos de tracción y, en consecuencia, mejorar la resistencia a corte y flexión [23].

Tabla 4: Características de las bandas de FRP

Característica	Valor
Ancho x Espesor	50 x 1,20 mm
Resistencia a tracción	2.900 MPa
Módulo de Elasticidad a tracción	165.000 MPa
Área de corte	60 mm ²
Deformación de rotura	1,8 %
Refuerzo del polímero	Fibra de carbono
Colocación de refuerzo sobre muro (altura máxima 5 m)	Opción A: Bandas verticales y longitudinales colocadas cada 1 m
	Opción B: Bandas verticales cada 5 m con bandas transversales a 45° (en cruz)

Como se observa en la Figura 29, si se analizan los valores de α sobre el mismo nudo de control visto en sección 4.1, se tiene un aumento en la capacidad de la estructura (color verde) en comparación con la estructura sin reforzar (color azul).

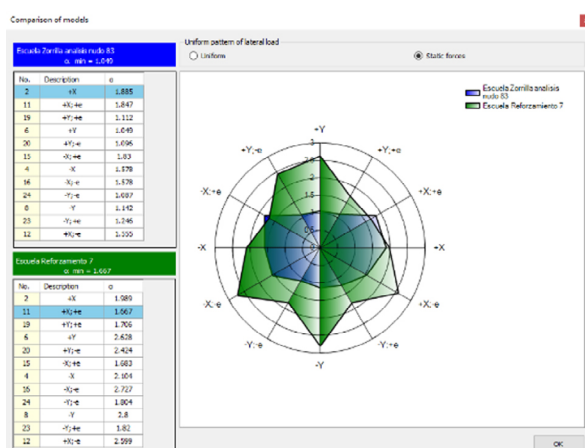


Figura 29: comparación entre modelos

La utilización de este sistema no afectaría el aspecto original de la escuela, aunque su problemática radica en su elevado costo. En Figura 30, se observa una posible disposición de este sistema sobre el muro de fachada.

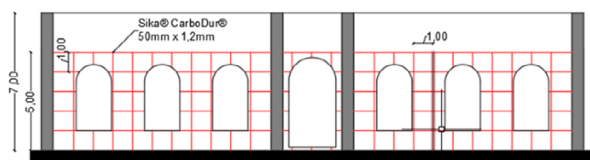


Figura 30: refuerzo en muro de fachada

Refuerzos sobre galería

A fin de llevar a cabo el análisis, se procede de manera similar a lo expuesto en la sección 5.2, en donde, en este caso, la verificación se cumple (ver Figura 31) si se plantea sobre los arcos de galería la colocación de barras AL-235 de 32 mm de diámetro, como muestra el croquis de Figura 32.

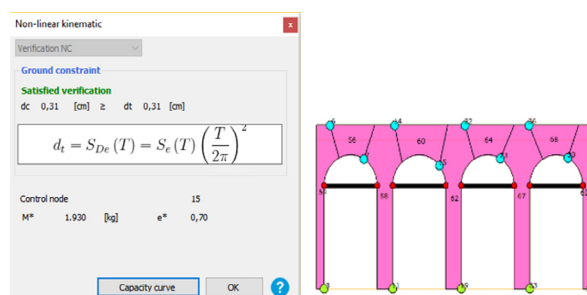


Figura 31: mejora del mecanismo de galería

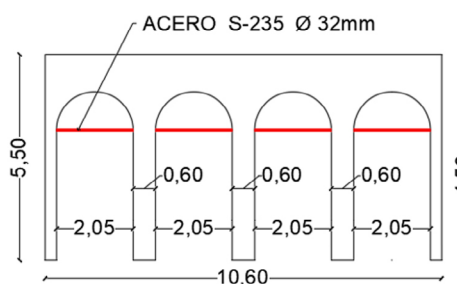


Figura 32: Refuerzo en galería

Conclusiones finales

- » El estudio de construcciones de mampostería con el uso de la Teoría de macroelementos ha demostrado ser eficiente en el análisis de una estructura como la planteada, siendo una alternativa al uso del Método de Elementos Finitos.
- » El análisis por capacidad permite obtener una mejor comprensión de la vulnerabilidad que posee la estructura, además de ser un requerimiento en las normativas actuales.
- » La edificación demostró tener un buen comportamiento en la mayoría de los análisis realizados, presentando un grado no muy elevado de vulnerabilidad sísmica. Sin embargo, frente al deterioro que presenta en la actualidad, sería recomendable su rehabilitación y puesta en valor.
- » El inconveniente de contar con muros de gran altura en la edificación se ha visto solucionado gracias al espesor de los mismos, al aumentar la sección resistente a esfuerzos y al reducir los problemas de esbeltez, vuelco, etc.

- » El análisis de los mecanismos locales indica que sería recomendable estudiar la eficiencia de las distintas conexiones entre los elementos estructurales a fin de evitar la formación de fallas, al priorizar la zona de la cubierta, que fue el punto crítico durante el estudio.
- » Los refuerzos estructurales planteados permitirían una posible rehabilitación de la edificación, aunque se debe considerar que algunas de estas propuestas estarían sujetas a una modificación en el aspecto original de la construcción.
- » El uso de normativas europeas para el análisis de la estructura ha resultado satisfactorio, al solucionar así las deficiencias con las que cuenta la normativa CIRSOC en cuanto al estudio de construcciones existentes.
- » Se debe destacar la calidad y eficiencia que se ha logrado en la construcción de la escuela, pese a la inexistencia de reglamentaciones en el momento de su ejecución.

Referencias

- [1] INTI, *INPRES-CIRSOC 103: Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte I: Construcciones en General*. Argentina: INTI, 2018.
- [2] S. B. Gea, "El riesgo sísmico en nuestras construcciones", *Revista COPAIPA*, vol. 13, pp. 79–83, 2020.
- [3] H. Cancinos, "La muy noble y leal ciudad de Salta", *Revista Kairos*. [En línea]. Disponible en: <https://revistakairos.org/sobre-el-imaginario-urbano-colonial-la-muy-noble-y-leal-ciudad-de-salta/>
- [4] F. Peña Mondragón, "Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas", *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol. 83, pp. 43–63, 2010.
- [5] S. Lagomarsino, A. Penna, A. Galasco, y S. Cattari, "Tremuri program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings", *Engineering Structures*, vol. 56, pp. 1787–1799, nov. 2013.
- [6] G. Guerrini y A. Penna, "Equivalent-frame modeling of masonry buildings: An effective approach for calculation and interpretation", en *Conferencia de Evaluación Sísmica de Edificios de Mampostería Existentes*, Grecia, 2018.
- [7] G. Guerrini, *3Muri: Seismic vulnerability assessment and mitigation of existing masonry buildings* [En línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=MoxoFhR6L-zo&list=PLxEHJVeom5rz2Slv68seGVF6PejNG8oYD&index=5/>.
- [8] INTI, *INPRES-CIRSOC 103: Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte III: Construcciones de Mampostería*. Argentina: INTI, 2018.
- [9] INTI, *CIRSOC 501: Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería*. Argentina: INTI, 2007.
- [10] CEN, *Eurocode 6: Design of Masonry Structures – Part 1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Structures*. Brussels: CEN, 2005.
- [11] CEN, *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*. Brussels: CEN, 2004.
- [12] CEN, *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings*. Brussels: CEN, 2005.
- [13] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *NTC 2018: Norme Tecniche per le Costruzioni*. Roma: Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 2018.
- [14] CEMA, *Fichas Técnicas de Madera* [En línea]. Disponible en: <https://www.cema.com.ar/newsletter-2/fichas-tecnicas-de-maderas/>.
- [15] CEN, *Eurocode 5: Design of Timber Structures*. Brussels: CEN, 2004.
- [16] A. Brignola, S. Pampanin, y S. Podestà, "Evaluation and control of the in-plane stiffness of timber floors for the performance-based retrofit of URM buildings", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 42, 2009.
- [17] INTI, *CIRSOC 101: Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras*. Argentina: INTI, 2005.
- [18] S.T.A. DATA, *3Muri Project Version 14.2.0.11 User Manual*. Italia: S.T.A. DATA, 2023.
- [19] E. F. Lesser, L. E. Orosco, y G. A. Rodrigo Molina, "Determinación del parámetro Vs30 para la ciudad de Salta a partir de mediciones de micro-trepidaciones en arreglos multicanal", en *XXIV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Salta, 2018.
- [20] G. Beolchini, *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura – Sisma Marche 1997*. L'Aquila: Universidad de L'Aquila, 2007.
- [21] F. J. Yuste Navarro y B. Perepérez Ventura, "Análisis cinemático de estructuras de fábrica bajo acciones sísmicas", en *Congreso Eu-*

ro-Americano sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio, Burgos, 2016.

[22] S.T.A. DATA, *3Muri Project: Local Collapse Mechanisms*. Italia: S.T.A. DATA, 2023.

[23] V. C. Rougier, "Refuerzo de muros de mampostería con materiales compuestos", Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Tucumán, 2007.

SOBRE LA REVISTA

ConCiencia Joven es una revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Salta, Argentina, creada en el año 2022.

ConCiencia Joven brinda a la comunidad universitaria una plataforma de discusión, reflexión y exploración, teniendo como punto de partida la producción intelectual y material de alumnos vinculados a las carreras de grado, pre-grado y posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UCASAL o de carreras de ingeniería de otras instituciones universitarias reconocidas.

La revista recibe artículos en español y en inglés.

Domicilio editorial – Facultad de Ingeniería. Sede Central: Campo Castaños - (Salta - Argentina)

Código Postal A4400EDD

Tel.: 54 - 0387 - 4268607

0810 555 822725 (UCASAL)

<http://www.ucasal.edu.ar/eucasa>

Política de acceso abierto y licencias de uso

Es una revista de acceso abierto publicada bajo licencia [Creative Commons Atribución-NoComercial- CompartirIgual](#). Es decir que todo su contenido está libremente disponible sin cargo para usos lícitos por los usuarios, sin autorización previa del autor o del editor. Los autores retienen, sin embargo, el derecho a ser adecuadamente citados.



Esta publicación adhiere a la [Iniciativa de Acceso Abierto de Budapest](#), llevando a la práctica sus recomendaciones y definiciones.



La revista aplica la misma licencia y derechos de uso de contenidos ya sea para el sitio web en general como para cada número y artículo publicado. Los autores mantienen el control total y exclusivo sobre la integridad de su trabajo publicado, como también el derecho a ser citados y debidamente reconocidos. Se adhiere en todos los casos a los lineamientos y sus respectivas prácticas para el uso justo, "Fair use", desarrollado por [DOAJ](#).

El Autor/a retiene los derechos sobre su obra. Y este concede a la Casa Editora el derecho a la primera publicación y un derecho no exclusivo permanente de preservar y poner en acceso abierto la obra en su totalidad o en parte por los medios y canales digitales institucionales vigentes, bajo la misma licencia de uso original de publicación en la revista, o de iguales características.

Todo uso que el Autor/a haga de la obra, que signifiquen acuerdos contractuales con terceros, debe incluir un reconocimiento a la publicación original realizada en esta revista, y por consiguiente al respectivo número donde se encuentra el artículo. En este sentido, el Autor/a asume el compromiso de informar al Editor/a, de manera formal, las autorizaciones y licencias pertinentes contraídas con terceros para el uso de la obra.

Apertura editorial

La revista mantiene y fomenta como política editorial la participación de autores, y miembros del equipo editorial, ajenos a la propia Universidad y unidades académicas vinculadas.

Autoría - Responsabilidad

La responsabilidad sobre las opiniones vertidas en los textos y sobre el respeto a la propiedad intelectual corresponde a los autores.

Asimismo, los autores declaran haber cumplido con las normas internacionales en materia de conflicto de intereses y normas éticas para la investigación y publicación de material académico y científico. En cualquier caso se debe informar sobre la existencia de vínculo comercial, financiero o particular con personas o instituciones que pudieran tener intereses relacionados con los trabajos que se publican en la revista.

Proceso editorial

Proceso de Evaluación

Los artículos basados en Proyectos finales, tesis, tesinas, etc. de grado o posgrado, además de la corrección correspondiente por parte del jurado académico en su momento, serán seleccionados para su publicación por el Comité Editorial, considerando la calidad académica sobresaliente y/u originalidad.

Los artículos que presentan resultados de investigaciones, deberán ser avalados por el director del proyecto en el marco del cual se desarrolló el trabajo, y a criterio del Comité Editorial, podrá ser objeto de evaluación académica.

Aquellos artículos provenientes de actividades de capacitación formal universitaria, o tipos de trabajos provenientes de actividades no curriculares, quedarán a criterio del Comité Editorial quien determinará la necesidad de una evaluación académica.

En todos los casos, se realizará una revisión de formato y estructura del contenido, de modo que el trabajo se ajuste a los requerimientos que en tal sentido formule la revista.

Integridad ético-académica

El equipo editorial de ConCiencia Joven se compromete con la comunidad educativa a garantizar la ética y la calidad de los artículos que publica. La revista adhiere al Código de conducta y buenas prácticas establecido por el Committee on Publication Ethics o COPE, *Code of Conduct and Best Practice Guidelines for Journal Editors* y *Code of Conduct for Journals Publishers*.

En cumplimiento de este código, la revista asegurará la calidad técnica y académica de las publicaciones y la adecuada respuesta a las necesidades de los lectores y los autores. El código alcanza a todas las partes implicadas en el proceso editorial de la revista. El Comité Editorial se compromete a publicar las correcciones, aclaraciones, retracciones y disculpas cuando sea preciso.

Cargos por publicación

ConCiencia Joven es digitalmente distribuida sin fines de lucro, garantizando el acceso abierto a la publicación. Asimismo, la revista no retribuye económicamente a sus colaboradores por su participación, independientemente de si actúan como evaluadores o escritores.

La revista no aplica costos de ningún tipo, ya sea para el acceso al texto completo de todos los números y artículos, como para el envío de originales, evaluación, procesamiento de artículos aprobados y su respectiva publicación.

Política de privacidad

Compromisos generales del comité editorial

El Comité Editorial de *ConCiencia Joven* se compromete a velar por el cumplimiento del debido proceso editorial establecido.

Entrega de información relativa a una publicación

Toda la información brindada por aquellos que colaboran en el proceso editorial de la revista es archivada en bases de datos propias. Los mismos podrán ejercer sus derechos a conocer, actualizar, rectificar y suprimir sus datos personales en el caso que así lo consideren.

Interacción con los autores

El equipo editorial de *ConCiencia Joven* se compromete a mantener la confidencialidad de los artículos recibidos y a no usar en sus propias investigaciones datos, argumentos o interpretaciones hasta que el artículo sea publicado con expresa referencia de su origen. Asimismo, el equipo editorial garantiza imparcialidad y gestión adecuada de los artículos recibidos.

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros o para su uso con otros fines.

Derechos del Autor

El Autor retiene los Derechos sobre su Obra, contemplando todos los objetos digitales que pueden resultar de la publicación electrónica posterior y/o distribución.

Una vez aceptada la Obra, el Autor concede a la Editorial el derecho exclusivo de su primera publicación, como también el derecho permanente a incluirla en todos los servicios y productos documentales que desarrolle la casa editora y constituyan un sistema de acceso al texto completo.

El Autor puede establecer acuerdos contractuales adicionales para la distribución no exclusiva de la versión publicada en la revista. Se debe proporcionar en el documento una mención de la publicación inicial en esta revista.

REVISTA

ConCiencia Joven

Número 3 - 2025



INGENIERÍA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SALTA