

Desarrollo de una herramienta informática pedagógica para el análisis pushover de pórticos
regulares planos de concreto reforzado

Raúl Andrés Parada Sepúlveda y Juan Pablo Bautista Cala

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

David Sebastián Cotes Prieto

MSc en Ingeniería Civil

Codirector

Juan David Bravo Rivera

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A nuestros padres y madres nuestra inspiración en todo momento. A todos aquellos que ven en la tecnología y la innovación una forma de transformar nuestra realidad en Latinoamérica y el mundo.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias por su cariño y su apoyo infinito. A nuestro director y codirector por su guía y acompañamiento excepcional. A Semiosis Lab UIS y su directora por despertar en nosotros el espíritu innovador y exponencial. A Platzi y la comunidad de desarrollo de software por nuestra formación tecnológica. A nuestros compañeros, amigos y colegas que hicieron parte de este proceso de crecimiento profesional y personal. A todos, gracias.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	11
1. Metodología.....	13
1.1 Análisis Pushover	14
1.1.1 Método matricial de rigidez.....	15
1.1.2 Momento curvatura.....	19
1.1.3 Plasticidad concentrada	24
1.1.4 Factores de carga o factores de colapso.....	24
1.1.5 Criterios de parada del análisis	26
1.1.6 Análisis Pushover gravitacional y lateral	27
1.1.7 Curva de capacidad y secuencia de plastificación.....	29
1.2 Desarrollo web e interfaz grafica.....	30
1.2.1 Principios de desarrollo de código.....	31
1.2.2 Pruebas unitarias o unit testing.....	32
1.3 Validación mediante casos de prueba.....	34
2. Resultados.....	37
2.1 Framez Studio.....	37
2.2 Resultados casos de prueba	41
2.2.1 Caso 1	41
2.2.2 Caso 2	44

2.2.3 Caso 3	46
2.2.4 Caso 4	49
2.2.5 Caso 5	52
2.2.6 Tiempo de cómputo casos de prueba.....	54
3. Conclusiones.....	56
4. Recomendaciones	57
Referencias Bibliográficas.....	59

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo método matricial de rigidez.....	15
Figura 2. Fuerzas y desplazamientos de un elemento	16
Figura 3. Diagrama de momento curvatura típico y bilineal de una sección rectangular de concreto reforzado.	20
Figura 4. Curva esfuerzo deformación del acero.....	20
Figura 5. Diagrama de deformación y esfuerzos para la primera cedencia del acero	21
Figura 6. Diagrama de deformación y esfuerzos para el momento ultimo.....	22
Figura 7. Localización de rotulas plásticas en un elemento bajo el modelo de plasticidad concentrada.....	24
Figura 8. Método de factores de colapso	26
Figura 9. a) Estructura con cargas de servicio b) Estructura con cargas de servicio y carga lateral	28
Figura 10. Diagrama de flujo análisis Pushover por el método de factores de colapso	29
Figura 11. Esquema de análisis para la construcción de la curva de capacidad.....	29
Figura 12. Curva de capacidad típica de una estructura.	30
Figura 13. Diagrama de entorno de desarrollo	31
Figura 14. Diagrama de flujo codificación de componentes y funciones	33
Figura 15. Distribución en planta (Estructura Caso 5)	36
Figura 16. Distribución en altura (Caso 5)	36
Figura 17. Interfaz de preproceso ágil.....	38

Figura 18. Interfaz de preproceso de un elemento.....	38
Figura 19. Interfaz de configuración análisis Pushover	39
Figura 20. Interfaz curva de capacidad.....	40
Figura 21. Interfaz gráfica de secuencia de plastificación.....	40
Figura 22. <i>Curva de capacidad caso 1</i>	43
Figura 23. Secuencia de plastificación caso 1	43
Figura 24. Curva de capacidad caso 2	45
Figura 25. Secuencia de plastificación Caso 2	46
Figura 26. Curva de capacidad caso 3	48
Figura 27. Secuencia de plastificación Caso 3	49
Figura 28. Curva de capacidad caso 4	51
Figura 29. Secuencia de plastificación Caso 4	52
Figura 30. Secuencia de plastificación caso 5	53
Figura 31. Curva de capacidad caso 5	54

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Información de Casos de Prueba	35
Tabla 2. Valores curva de capacidad caso 1	41
Tabla 3. Valores curva de capacidad caso 2.....	44
Tabla 4. Valores curva de capacidad caso 3	47
Tabla 5. Valores curva de capacidad caso 4.....	51
Tabla 6. Valores curva de capacidad caso 5	53
Tabla 7. Tiempo de cómputo casos de prueba.....	55

Resumen

Título: Desarrollo de una herramienta informática pedagógica para el análisis pushover de pórticos regulares planos de concreto reforzado*

Autores: Raúl Andrés Parada Sepúlveda y Juan Pablo Bautista Cala**

Palabras clave: análisis pushover, software libre, pórticos, concreto reforzado, plasticidad concentrada, análisis no lineal, estructuras

Descripción

El análisis estructural no lineal pushover ha demostrado tener una mejor estimación del desempeño sísmico de las edificaciones que los métodos de análisis lineales tradicionales. Esto ha aumentado el interés de la academia por impartir cursos al respecto. Dado su alto volumen de cálculos, es necesario acudir a software especializado para su aplicación. Sin embargo, el software existente tiene un enfoque profesional amplio, requiere equipos de cómputo potentes y procesos de configuración extensos. Además, no está pensado para un cálculo en entornos académicos. Esto dificulta el primer acercamiento de los estudiantes a este tipo de análisis. Esta investigación desarrolló una herramienta digital alojada en la web y de código abierto, llamada Framez Studio, orientada a realizar análisis no lineal estático pushover sobre pórticos planos regulares de concreto reforzado. Framez Studio permite visualizar las fuerzas internas en los elementos y los desplazamientos de la estructura a medida que se van desarrollando los mecanismos de plastificación de las estructuras en diferentes instancias del análisis pushover, así como obtener, la curva de capacidad. Este programa se desarrolló como una aplicación web progresiva de modo que pueda utilizarse tanto en dispositivos móviles como de escritorio y en cualquier sistema operativo. Para validar la precisión de la herramienta, se calcularon las curvas de capacidad para cinco casos en Framez Studio y en el programa comercial SAP2000®. Los resultados de este análisis mostraron que las curvas de capacidad calculadas para todos los casos de estudio en ambos programas describen la misma tendencia sin presentar diferencias relativas entre el cortante basal y desplazamientos de entre el 0.0% y el 6.0%. Además, en el programa Framez Studio se mantiene la misma secuencia de plastificación que se presenta en SAP2000®, lo que evidencia que Framez Studio es una herramienta precisa para el estudio de la respuesta no lineal de pórticos planos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: David Sebastián Cotes Prieto. MSc en Ingeniería Civil. Codirector: Juan David Bravo Rivera. Ingeniero Civil.

Abstract

Title: Development of a pedagogical computer tool for pushover analysis of reinforced concrete regular plane frames *

Authors: Raúl Andrés Parada Sepúlveda y Juan Pablo Bautista Cala **

Keywords: pushover analysis, software, frames, reinforced concrete, concentrated plasticity, nonlinear analysis, structures.

Description

Nonlinear pushover structural analysis has shown to provide a better estimate of the seismic performance of buildings than traditional linear analysis methods. This has increased academic interest in offering courses on the subject. Due to the large volume of calculations involved, specialized software is necessary for its application. However, existing software has a broad professional focus, requires powerful computing equipment, and extensive configuration processes. Additionally, it is not designed for calculation in academic environments, making it difficult for students to approach this type of analysis for the first time. This research developed a web-hosted, open-source digital tool called Framez Studio, aimed at performing static nonlinear pushover analysis on regular reinforced concrete frame structures. Framez Studio allows visualization of internal forces in the elements and structure displacements as the plastic mechanisms of the structures develop at different instances of pushover analysis, as well as obtaining the capacity curve. This program was developed as a progressive web application so that it can be used on both mobile and desktop devices and any operating system. To validate the accuracy of the tool, capacity curves were calculated for five cases in Framez Studio and the commercial SAP2000® program. The results of this analysis showed that the capacity curves calculated for all study cases in both programs described the same trend without presenting relative differences between the base shear and displacements of between 0.0% and 6.0%. Furthermore, in Framez Studio, the same sequence of plasticization that occurs in SAP2000® is maintained, demonstrating that Framez Studio is a precise tool for studying the nonlinear response of flat frames.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering, Civil Engineering School, Director: David Sebastián Cotes Prieto. MSc in Civil Engineering. Co-director: Juan David Bravo Rivera. Civil Engineer.

Introducción

El análisis no lineal estático pushover es un método de análisis estructural que ha adquirido relevancia en aplicaciones de diseño y patología estructural (Comision Asesore Permanente Para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, 2010), puesto que mediante él es posible realizar una mejor estimación del desempeño sísmico de las edificaciones, respecto de los métodos de análisis tradicionales (Fajfar, 2018; Marjanishvili & Agnew, 2006).

Uno de los retos que involucra ejecutar este análisis está relacionado con la cantidad de operaciones numéricas que se deben resolver secuencialmente debido al nivel de detalle de los modelos fisicomatemáticos. A raíz de esto, en las últimas tres décadas, han surgido numerosas herramientas digitales orientadas a la solución de este análisis. Actualmente se encuentran en el mercado diversas herramientas comerciales como como SAP 2000, RFEM 6, ZEUSNL o DIANA FEA (CSI, 2021; DIANA FEA BV, 2022; Dlubal, 2022). Estas herramientas ofrecen gran cantidad de análisis y modelos, sin embargo, condicionan a los estudiantes de ingeniería estructural a tener un primer acercamiento complejo del análisis estructural pues requieren de conocimiento previo y avanzado, y en algunos casos, altos costos de adquisición.

De forma general, ya existen proyectos código abierto como OpenSees (OpenSees, s/f) de la Universidad de Berkeley que buscan mejorar la experiencia de modelado y análisis estructural, este en particular, a través de un framework que facilita el desarrollo de código de aplicaciones de este tipo y que requiere de complementos y software externos, en ocasiones de pago como Matlab[®], para conseguir una interfaz gráfica del mismo (OpenSees, s/f) .

Desde el punto de vista académico, varias investigaciones han desarrollado software libre y pedagógico para subsanar ese problema basados en tecnologías web o entornos existentes como Matlab[®]. Almeida, Piazzlunga y Guimaraes (Barretto et al., 2003) desarrollaron en 2002 un

software web que permite a estudiantes tener un acercamiento sencillo con análisis de carácter estático y concluyeron que el software no solo puede actuar como facilitador de tareas sino también como estimulante del usuario cuando se simplifica el proceso de modelado y análisis. Panagiotopoulos y Manolis (Panagiotopoulos & Manolis, 2016) también desarrollaron en 2016 un software en Java enfocado en la dinámica estructural basados en su experiencia como docentes de la asignatura durante varios años en Aristotle University, logrando una implementación positiva de este en sus cursos siguientes y obteniendo una respuesta positiva en el aprendizaje por parte de los estudiantes.

Autores como Lopes, Rangel y Martha (C. Lopes et al., 2021) desarrollaron una interfaz gráfica para un software educativo existente en Matlab® de análisis estático lineal y evidenciaron así la importancia de que este tipo de software cuente con una interfaz gráfica que facilite el modelado o preproceso, así como la visualización de resultados.

Otro de los programas que más ha ganado relevancia es el software PEFiCa (López Santamaría et al., 2023) de la Universidad Nacional de Colombia con su versión más reciente (2.3) desarrollada por Santamaria, Linero y Estrada la cual incluye múltiples alternativas para el análisis estructural. Sin embargo, se encuentra desarrollado en Matlab y requiere el uso de software externo (GMSH) para el preproceso y postproceso, por lo que su utilización depende de tener acceso a tales softwares y de conocer a detalle el funcionamiento de estos.

A pesar de las ventajas que han demostrado los trabajos anteriores, hasta el momento no se ha encontrado un programa cuyo propósito general sea estudiar desde un enfoque práctico y sencillo el desempeño sísmico de edificaciones implementando pushover acompañado de una perspectiva de fácil y rápido acceso mediante tecnologías web y código abierto.

Con base en lo anteriormente mencionado y con el fin de facilitar el acercamiento pedagógico a los análisis tipo pushover y su fundamentación teórica, esta investigación desarrolló una herramienta computacional pedagógica de código abierto (Framez Studio) orientada al análisis pushover de pórticos planos regulares de concreto reforzado para su uso en cursos de análisis y diseño estructural avanzado con tecnologías que le permiten ser una aplicación web progresiva (PWA, por sus siglas en inglés), lo que facilita su acceso desde dispositivos de escritorio y móviles, en especial estos últimos. El código del programa se encuentra disponible a través de un repositorio público de GitHub (<https://github.com/framez-studio/app-ts>).

1. Metodología

Framez Studio desarrolla, a través de una interfaz gráfica, análisis pushover bidimensional en pórticos planos regulares de concreto reforzado de hasta 20 niveles y 10 luces, utilizando el modelo de elementos de Euler-Bernoulli, el método matricial de rigidez y el método de factores de colapso.

Los mecanismos de plastificación son capturados mediante un modelo de plastificación concentrada (rótulas plásticas) con diagramas momento curvatura de comportamiento elástico perfectamente plástico.

La distribución de carga sísmica utilizada en cada nodo se determinó por el método de fuerza horizontal equivalente según el reglamento colombiano sismorresistente vigente (NSR-10).

A continuación, se describe de forma más detallada los modelos teóricos, tecnologías y programación sobre las que funciona el programa.

Las siguientes consideraciones generales se implementaron en el desarrollo de esta herramienta. Todos los apoyos son empotramientos, actualmente no cuenta con una interfaz para asignar otro tipo de apoyo. El área, inercia y capacidad de momento se calculan con la totalidad de la base y la altura de la sección transversal, y corresponde a los valores ingresados en la configuración del pórtico por parte del usuario. En cuanto a las varillas de refuerzo, el usuario debe ingresar su diámetro en la interfaz de pre-proceso (no cuenta con barras nominales, pero podría añadirse en versiones futuras).

1.1 Análisis Pushover

El análisis pushover o análisis estructural estático no lineal se fundamenta en la aplicación de aumentos de carga de forma monotonica hasta que se supera un desplazamiento objetivo en un punto de control o la estructura en cuestión falla (Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2017)

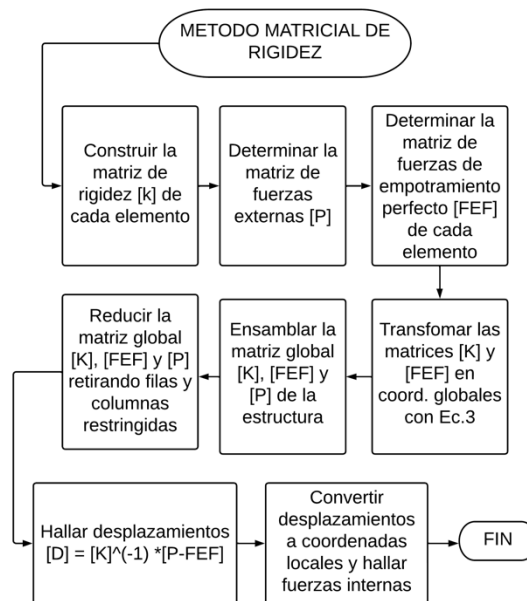
Cada aumento de carga representa un paso dentro de una secuencia de análisis estáticos lineales, entre los cuales la rigidez de la estructura va cambiando, dependiendo de la aparición de comportamientos no lineales en los elementos de esta. análisis pushover o análisis estructural estático no lineal se fundamenta en la aplicación de aumentos de carga de forma monotonica hasta que se supera un desplazamiento objetivo en un punto de control o la estructura en cuestión falla (Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, 2017)

Cada aumento de carga representa un paso dentro de una secuencia de análisis estáticos lineales, entre los cuales la rigidez de la estructura va cambiando, dependiendo de la aparición de comportamientos no lineales en los elementos de esta. A continuación, se describen los modelos teóricos utilizados para la realización del análisis.

1.1.1 Método matricial de rigidez

Figura 1.

Diagrama de flujo método matricial de rigidez



El análisis estático en cada paso del análisis pushover se realizó mediante el método matricial de la rigidez, cuyo procedimiento se muestra en la figura 1. Este método relaciona, a través de la matriz de rigidez, las fuerzas y los desplazamientos en los nodos de una estructura según la ecuación 1.

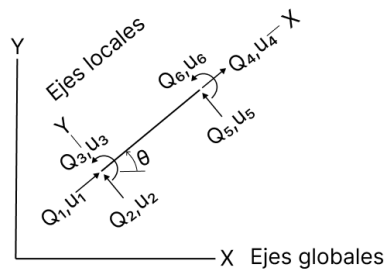
$$\begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Donde Q_i son las fuerzas externas, δ_i los desplazamientos y F_i las fuerzas de empotramiento equivalentes que representan los efectos de cargas distribuidas, siendo n el número total de grados de libertad del sistema.

Con el fin de establecer de forma correcta la matriz de rigidez global de la estructura fue necesario construir la matriz de rigidez local de cada elemento en coordenadas locales. La figura 2 presenta las fuerzas y desplazamientos que relaciona la matriz de rigidez local de un elemento.

Figura 2.

Fuerzas y desplazamientos de un elemento



La matriz de rigidez de un elemento se determina con los parámetros de área de la sección transversal (A), la inercia (I) de la sección transversal, el módulo de elasticidad del material (E) y la longitud del elemento (L), según la ecuación 2:

$$[k] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} \frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6L & 0 & -12 & -6L \\ 0 & 6L & 4L^2 & 0 & -6L & 2L^2 \\ -\frac{AL^2}{I} & 0 & 0 & \frac{AL^2}{I} & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6L & 0 & 12 & 6L \\ 0 & -6L & 2L^2 & 0 & 6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

En Framez Studio se define por defecto un módulo de elasticidad del concreto de $3900\sqrt{f'c}$ [MPa], siendo $f'c$ la resistencia máxima a compresión del concreto en [MPa], el cual puede ser editado manualmente por el usuario.

A partir de la matriz $[k]$ y mediante la matriz de transformación $[T]$ del elemento se obtiene la matriz del elemento a coordenadas globales, según la ecuación 3 y ecuación 4:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K_{global} = [T]^T [K_{local}] [T] \quad (4)$$

Finalmente se ensambló la matriz global de la estructura a partir de la sumatoria de la rigidez para cada grado de libertad de cada matriz individual de los elementos.

- **Método matricial de rigidez en barras articuladas**

Las matrices de rigidez de los elementos se modificaron conforme se desarrollaban los mecanismos de plastificación en los elementos durante el análisis pushover. Esta modificación consistió en la liberación del momento flector los grados de libertad que alcanzan la capacidad máxima de momento, ya que cuando se plastifica el extremo de un elemento su matriz de rigidez cambia según la siguiente ecuación (García Reyes, 1998):

$$[k']_{n \times n} = [k] - \{k_1\}k_3^{-1}\{k_2\} \quad (5)$$

Donde:

$[k']_{n \times n}$ = matriz de rigidez con el grado de libertad liberado con el mismo tamaño de la matriz original (n x n)

$[k]$ = matriz de rigidez original (n x n)

$\{k_1\}$ = vector formado por la columna de la matriz de rigidez correspondiente al grado de libertad que se quiere liberar (1 x n)

k_3^{-1} = inverso del término de la diagonal de la matriz de rigidez original correspondiente al grado de libertad que se quiere liberar.

$\{k_2\}$ = vector formado por la fila de la matriz de rigidez original correspondiente al grado de libertad que se quiere liberar.

La ecuación 6 y ecuación 7 presentan el resultado de esta variación para los casos más comunes:

- Matriz de rigidez elemento articulado en el nodo izquierdo o inicial.

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{L^3} & 0 & 0 & -\frac{3EI}{L^3} & \frac{3EI}{L^3} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EI}{L^3} & \frac{3EI}{L^3} & 0 & \frac{3EI}{L^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

- Matriz de rigidez elemento doblemente articulado

$$[k] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

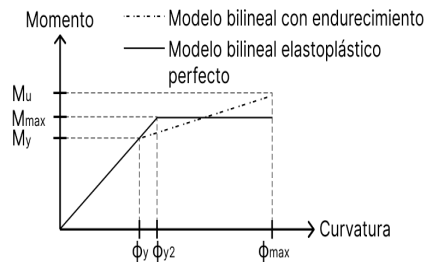
1.1.2 Momento curvatura

El diagrama de momento curvatura es una relación de carga/deformación (rigidez) que permite conocer el momento(positivo/negativo) máximo que puede resistir un elemento antes de la formación de una rotula plástica. Para una sección de concreto reforzado ese momento máximo depende en buena parte de la distribución del refuerzo, en ese sentido Framez Studio no limita la cantidad de filas de refuerzo longitudinal de sus secciones rectangulares.

En Framez Studio se determina la capacidad de momento (M_{max}) a partir de una bilinealización de los valores de momento (M_y) curvatura de fluencia (φ_y) y momento (M_u) curvatura (φ_u) últimos.

Figura 3.

Diagrama de momento curvatura típico y bilineal de una sección rectangular de concreto reforzado.

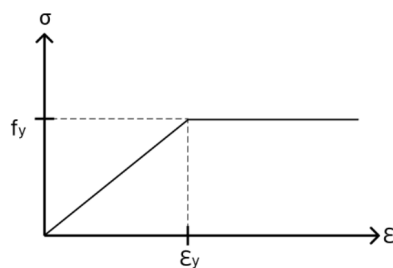


- **Momento de fluencia (M_y) y Curvatura de Fluencia (ϕ_y)**

Para la estimación de M_y y ϕ_y el programa utiliza un modelo de esfuerzo deformación elastoplástico perfecto del acero, que no incluye consideraciones de endurecimiento por deformación según la figura 4.

Figura 4.

Curva esfuerzo deformación del acero.



f_y = Esfuerzo de fluencia

ϵ_y = Deformación unitaria de fluencia

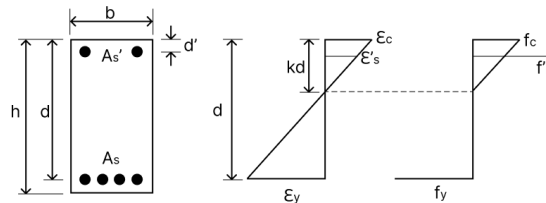
E_s = Modulo de Young (f_y/ϵ_y)

Framez Studio utiliza como valores por defecto $f_y = 420\text{MPa}$ y $\varepsilon_y = 0.0021$. Sin embargo, el usuario tiene libertad de editar estos parámetros.

En el caso del concreto se asumió una distribución triangular del esfuerzo a compresión asumiendo que el material se encuentra en el rango elástico lineal. En la figura 5 se presenta la distribución de esfuerzos y deformación utilizada.

Figura 5.

Diagrama de deformación y esfuerzos para la primera cedencia del acero



A partir de ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos para la sección se estimó el eje neutro para la primera cedencia del acero (kd), el momento M_y , la deformación unitaria del concreto (ε_c) y se calculó φ_y según la ecuación 8:

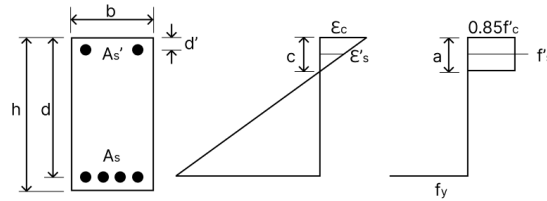
$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{d - kd} \quad (8)$$

- **Momento ultimo (M_u) y Curvatura ultima (φ_u)**

Se incorporo el método de bloque equivalente de Whitney (Park & Pauley, 1975) en Framez Studio para la estimación de M_u y φ_u . La distribución de deformaciones y esfuerzos consideradas en este método se presenta en la figura 6.

Figura 6.

Diagrama de deformación y esfuerzos para el momento ultimo



Framez Studio utiliza como valor por defecto una deformación unitaria máxima del concreto a compresión (ϵ_{cu}) de 0.003. Sin embargo, los usuarios pueden modificar este valor para sus propios análisis.

A partir de ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos para la sección se estimó el eje neutro para el momento ultimo (c), el momento M_u y se calculo ϕ_u según la ecuación 9:

$$\phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{d - c} \quad (9)$$

• **Diagrama Bilineal De Momento Curvatura De Un Modelo Elastoplástico Perfecto y Capacidad de Momento (M_{max})**

Una vez estimados los valores de M_y , ϕ_y , M_u , ϕ_u se realizó la bilinealización de la curva de acuerdo con lo sugerido por Caltrans (Caltrans Seismic Design Criteria, 2019), igualando el área bajo la curva inicial con la de una curva bilineal según las ecuaciones 10, 11, 12, 13 y 14:

$$S = \frac{M_y}{C_y} \quad (10)$$

$$A = A_b \quad (11)$$

Donde:

$$A = \frac{M_y \varphi_y}{2} + \frac{M_y + M_u}{2} (\varphi_u - \varphi_y) \quad (12)$$

$$A_b = \frac{M_{max} * \varphi_{y2}}{2} + MnB(\varphi_u - \varphi_{y2}) \quad (13)$$

$$M_{max} = \varphi_{y2}S \quad (14)$$

Finalmente se obtuvo el valor de M_{max} de la sección que se utilizara en el método de factores de colapso explicado más adelante. A pesar de que existe una curvatura ultima, el programa asume en esta versión que los elementos pueden continuar deformándose infinitamente.

Cabe resaltar que los modelos utilizados en esta versión del programa para la estimación del momento de fluencia, momento ultimo y capacidad de momento constituyen únicamente aproximaciones del comportamiento mecánico de una sección de concreto reforzado. Se espera incluir en versiones posteriores modelos más rigurosos y que realicen consideraciones adicionales como:

- Momentos de fluencia con distribuciones no lineales en el concreto.
- Momento de capacidad para elementos/columnas cargadas axialmente.
- Momento de capacidad para secciones con refuerzo transversal
- Limitar la curvatura máxima del elemento

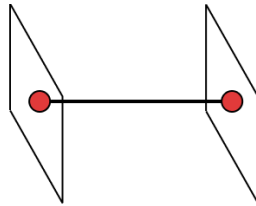
En ese sentido el software ofrece dos ventajas, en primer lugar, permite a los usuarios ingresar sus propios valores de M_{max} que hayan obtenido con consideraciones diferentes a las utilizadas por el programa, en segundo lugar, al ser un software de código abierto cualquier persona puede agregar y mejorar el código del programa para ampliar el alcance de los análisis realizados.

1.1.3 Plasticidad concentrada

Los análisis realizados utilizaron el modelo de plasticidad concentrada y elastoplasticidad perfecta (Scott & Fenves, 2006), es decir, se asumió que el comportamiento inelástico de la estructura tendría lugar únicamente en los extremos de los elementos, a estos puntos se denominaron puntos de plastificación o rotulas plásticas. La figura 7 presenta la localización de las rotulas para un elemento cualquiera.

Figura 7.

Localización de rotulas plásticas en un elemento bajo el modelo de plasticidad concentrada.



1.1.4 Factores de carga o factores de colapso

El método de factores de colapso consiste en determinar para cada paso del análisis la relación entre el momento interno de cada rotula plástica y el momento residual de la rótula (Zhou et al., 2007), a esta relación se le conoce como factor de colapso ($C_{fi,h}$). Una vez obtenidos todos los $C_{fi,h}$ se selecciona el menor de estos y este se convierte en el factor de colapso general de ese paso (C_{fi}). El factor de colapso ($C_{fi,h}$) se determina según las ecuaciones 15, 16 y 17:

$$C_{fi,h} = \frac{M_{ri,h}}{m_{i,h}} \quad (15)$$

$$Mr_{i,h} = M_{max,h} - M_{i,h} \quad (16)$$

$$M_{i,h} = \sum_{i=0}^n m_{i,h} C_{fi} \quad (17)$$

Donde:

$m_{i,h}$ = Momento interno de la rótula h para el paso i

$Mr_{i,h}$ = Momento residual de la rótula h para el paso i

$M_{max,h}$ = Capacidad de momento de la rótula h

$M_{i,h}$ = Momento acumulado en la rótula h para el paso i

Posteriormente, se determina el desplazamiento acumulado (dx) en el nodo de control y el cortante basal acumulado (V) del paso según las ecuaciones 18 y 19:

$$dx = \sum_{i=0}^n dx_i C_{fi} \quad (18)$$

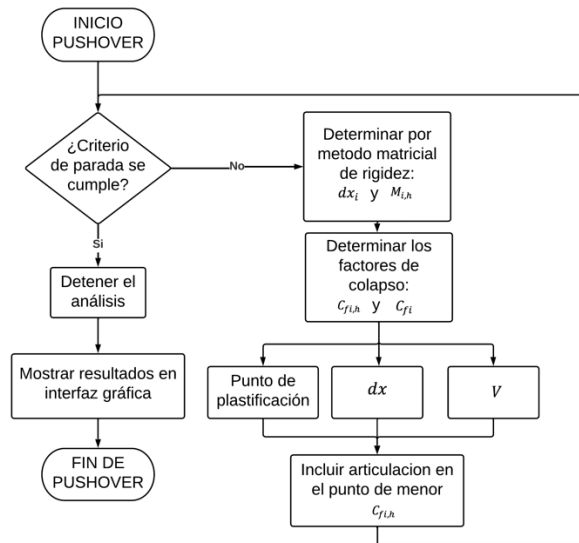
$$V = \sum_{i=0}^n V_i C_{fi} \quad (19)$$

Donde:

dx_i = Desplazamiento del nodo de control para el paso i

V_i = Cortante basal para el paso i

Finalmente, la rótula con el menor $C_{fi,h}$ se convierte en una conexión articulada con comportamiento plástico perfecto, dando lugar a un cambio en la matriz de rigidez de la estructura y por ende a un nuevo paso de análisis. Este proceso se repitió tantas veces como fue necesario hasta alcanzar el criterio de parada del análisis, la selección de este criterio se explicará en secciones posteriores. La figura 8 presenta de forma gráfica el proceso repetitivo realizado para el análisis por el método de factores de colapso.

Figura 8.*Método de factores de colapso*

1.1.5 Criterios de parada del análisis

El criterio de parada del análisis sirve para indicarle al programa cuando debe detener el análisis que se está realizando, ya sea porque se ha alcanzado una condición objetivo (desplazamiento o carga) o la estructura se tornó inestable.

Framez Studio utiliza únicamente parámetros de carga objetivo para análisis gravitacionales y criterio de inestabilidad para análisis laterales, estos se explican en secciones posteriores.

La inestabilidad de la estructura se determinó mediante el grado de indeterminación estático (Basset S. Luisa, s/f) según la ecuación 20:

$$GIE = (3B + \sum R) - (3N + \sum dt_b) \quad (20)$$

Donde:

B = Numero de barras

N = Numero de nodos

$\sum R$ = Numero de reacciones

$\sum dt_b$ = Numero de articulaciones en los extremos de los elementos

El GIE se calcula para cada paso del análisis hasta obtener un valor negativo, instante en el cual se detiene el análisis. Así mismo existen casos, como los mecanismos de rotulación de piso débil (García & Tena-Colunga, 2016) donde se rotulan ambos extremos de todo un piso, que no son rastreables mediante el GIE, sin embargo, estos casos si producen desplazamientos altos debido a la singularidad de la matriz de rigidez que implica inestabilidad geométrica, por lo que de forma complementaria el programa también se detiene al presentarse desplazamientos superiores 1000 metros.

1.1.6 Análisis Pushover gravitacional y lateral

Framez Studio ejecuta en primera instancia un análisis pushover gravitacional iniciando desde un estado de cargas cero y cuyo criterio de parada se configura para alcanzar el estado de cargas de servicio suministrado por el usuario. Este análisis se realiza con el fin de establecer si existen plastificaciones inducidas por las cargas de servicio y determinar las condiciones antecedentes para la realización del análisis pushover lateral en términos del momento acumulado por las rotulas, su posible plastificación y el desplazamiento acumulado en el nodo de control.

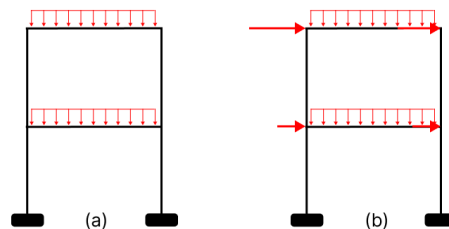
A modo de aclaración, las cargas de servicio se encuentran limitadas a cargas rectangulares distribuidas para toda la longitud de un elemento y pueden ser iguales o diferentes entre los

elementos. La carga de servicio solo tiene en cuenta el valor ingresado por el usuario, es decir no se tiene en cuenta el peso propio de los elementos, a pesar de que este valor si se le solicita al usuario para estimar la masa de estos que servirá de insumo en la distribución de cargas lateral por fuerza horizontal equivalente (FHE).

Una vez se estableció la condición antecedente, el software añade a la estructura, de forma automática, una distribución de cargas laterales calculada mediante el método de fuerza horizontal equivalente (FHE) según lo previsto por la NSR-10. Esta distribución es la única presente en el software, pero podría ampliarse en futuras versiones. Las cargas obtenidas por método dependen del periodo fundamental de la estructura el cual se determinó mediante (A.4.2-3) de la normativa previamente citada.

Figura 9.

a) Estructura con cargas de servicio b) Estructura con cargas de servicio y carga lateral

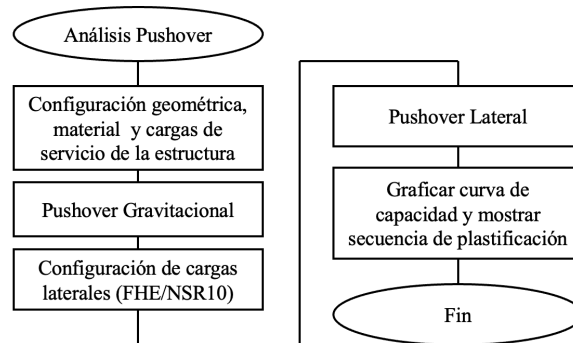


Así mismo las cargas son asignadas a cada nodo de la estructura teniendo en cuenta la masa de este como la sumatoria de las masas de cada elemento conectado a este con una aferencia de la mitad de la longitud del elemento.

Finalmente, se lleva a cabo el análisis pushover lateral cuyo criterio de parada es el colapso o inestabilidad de la estructura. El usuario puede elegir el sentido del análisis pushover (de izquierda a derecha o viceversa). La figura 10 presenta de forma gráfica el proceso descrito.

Figura 10.

Diagrama de flujo análisis Pushover por el método de factores de colapso

**1.1.7 Curva de capacidad y secuencia de plastificación.**

La curva de capacidad de una estructura relaciona el cortante basal (V) con el desplazamiento en un nodo (dx) de control y permite conocer así la respuesta de la estructura ante una distribución de carga sísmica determinada. La figura 11 presenta el esquema de análisis para la construcción de la curva de capacidad con un nodo de control determinado (Ferracuti et al., 2009).

Figura 11.

Esquema de análisis para la construcción de la curva de capacidad

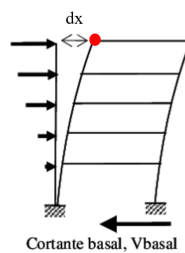
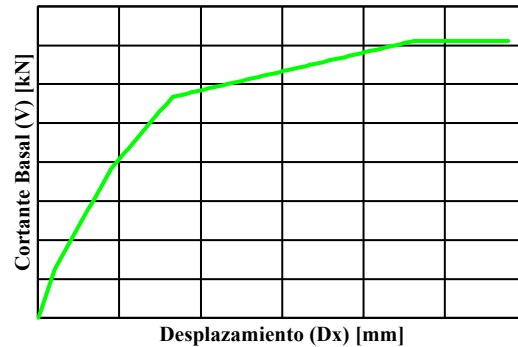


Figura 12.

Curva de capacidad típica de una estructura.



Framez Studio presenta la curva de capacidad de la estructura a partir del desplazamiento y el cortante basal acumulado para cada paso., Framez Studio permite visualizar los datos puntuales de los puntos graficados a modo de tabla y descargarlos en un archivo CSV. La figura 12 presenta una curva de capacidad típica de una estructura.

1.2 Desarrollo web e interfaz grafica

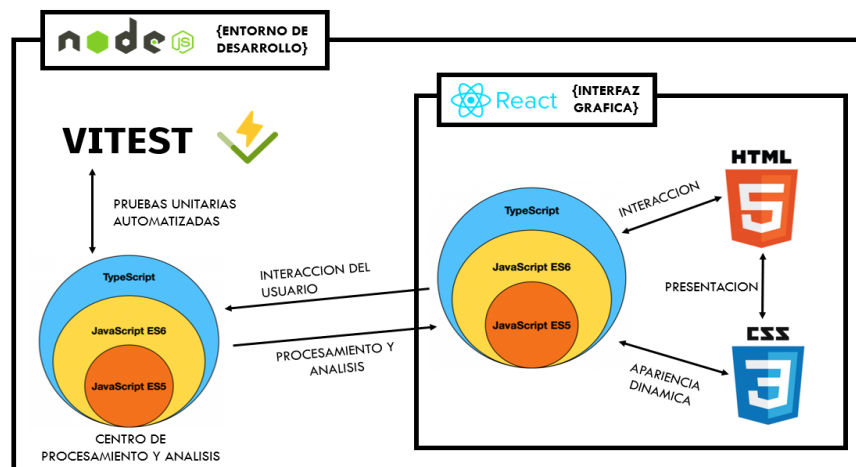
Framez Studio se desarrolló como una aplicación web progresiva (PWA, por sus siglas en ingles). Tal infraestructura, basada en estándares web, le permite ser usada por diferentes tipos de dispositivos de escritorio o móviles, enfocándose en optimizar la experiencia de estos últimos como si fuera una aplicación nativa, sin las complicaciones tecnológicas que eso implica (Coporacion Mozilla & Fundación Mozilla, s/f; Google Inc., s/f). Entre las principales tecnologías que permitieron el desarrollo de este software se encuentran:

- **Typescript, Javascript, CSS y HTML:** Lenguajes de programación asociados al desarrollo web.
- **NodeJS:** Entorno de ejecución multiplataforma para código Javascript y a gestor de paquetes.
- **Vitest:** Framework para el desarrollo y gestión de pruebas unitarias de código.
- **React:** Biblioteca de Javascript para el desarrollo de interfaces de usuario

A continuación, se presenta la interacción de estas tecnologías en la fase de desarrollo:

Figura 13.

Diagrama de entorno de desarrollo



1.2.1 Principios de desarrollo de código

El código desarrollado para la realización de análisis pushover combina programación secuencial, enfocada principalmente en procesos de carácter algebraico, con Programación Orientada a Objetos (POO) y Diseño Orientado a Objetos (DOO), enfocados en optimizar la

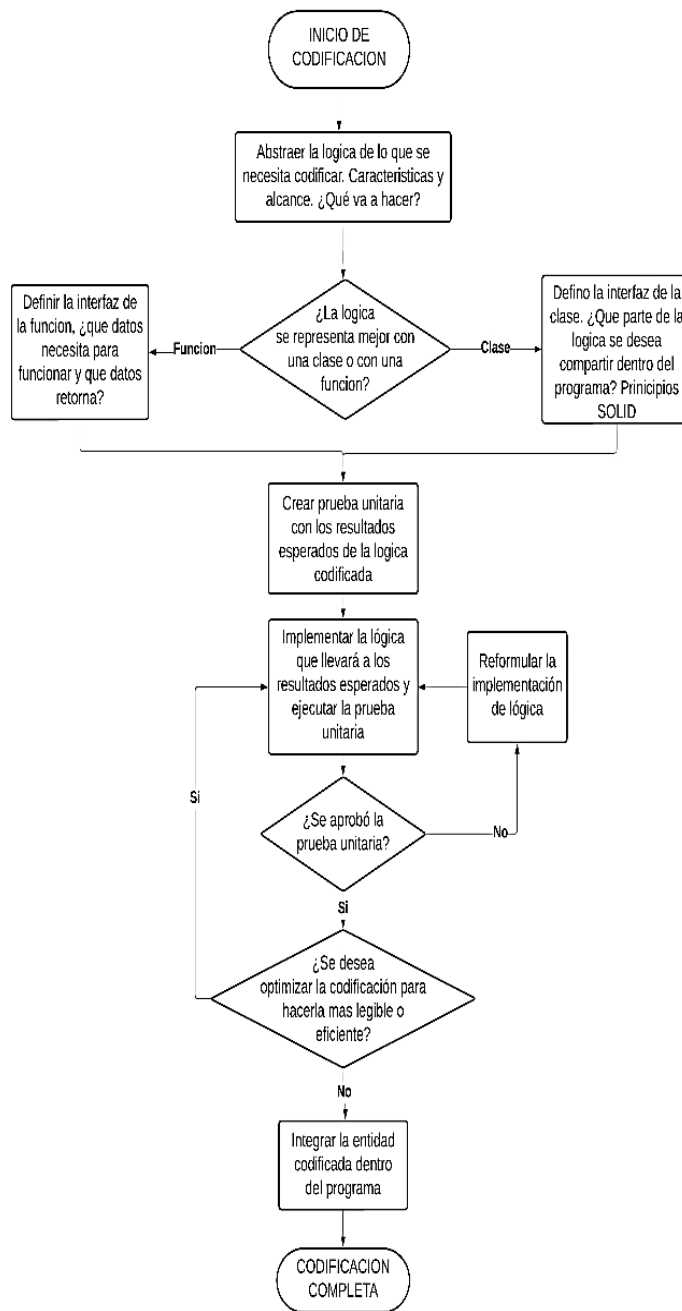
interacción entre las múltiples estructuras de código, secuenciales y no secuenciales, dentro del programa. Para la implementación de POO y DOO se siguieron los principios SOLID introducidos por Robert C. Martin (Martin, 2003).

1.2.2 Pruebas unitarias o unit testing

Las pruebas unitarias (unit testing) son una técnica de prueba de software en la que se prueba individualmente cada componente o unidad del software, de forma aislada del resto del sistema (Buchgeher et al., 2020). Esto se hace mediante la creación de pruebas automatizadas que verifican que la unidad de código se comporta de la manera esperada. La figura 14 presenta el proceso de pruebas unitarias de forma gráfica.

Figura 14.

Diagrama de flujo codificación de componentes y funciones



1.3 Validación mediante casos de prueba

La validación del correcto funcionamiento del software es importante para conocer si los diferentes componentes del software son capaces de actuar en conjunto y brindar resultados satisfactorios que se ajustan a los requerimientos y limitaciones propias del mismo.

Los resultados obtenidos para la curva de capacidad de la estructura por Framez Studio fueron comparados con los obtenidos mediante el modelado en el software licenciado SAP2000® (versión 24.0) (Licencia: de Prueba), de las mismas condiciones de análisis, tales como secciones transversales, materiales, rotulas de momento elastoplástico perfecto y distribución de cargas gravitacionales y laterales según FHE. Para determinar el error relativo se partió de la comparación de desplazamientos y cortantes para cada punto de plastificación de la estructura

A continuación, se exponen los diferentes casos de prueba utilizados para la validación del software.

- **Caso 1:** Pórtico resistente a momento con una luz y un nivel.
- **Caso 2:** Pórtico resistente a momento con dos luces de diferente longitud y un solo nivel.
- **Caso 3:** Pórtico resistente a momento con dos niveles y una luz.
- **Caso 4:** Pórtico resistente a momento con cinco luces y diez niveles.
- **Caso 5:** Caso de estudio de un diseño real con especificaciones de diseño previamente establecidas. En este caso se analizó únicamente el pórtico del eje B sin tener en cuenta ningún muro estructural.

Los casos de estudio 1 al 4 utilizaron los siguientes parámetros para los materiales:

Acero:

$$f_y = 420\text{MPa} \mid \varepsilon_y = 0.0021.$$

Concreto:

$$E_c = 17872 \text{ MPa} \mid f'_c = 17872 \text{ MPa} \mid \varepsilon_{cu} = 0.003$$

El caso 5 utilizo las siguientes propiedades materiales:

Acero:

$$f_y = 420 \text{ MPa} \mid \varepsilon_y = 0.0021.$$

Concreto:

$$E_c = \text{MPa} \mid f'_c = 17872 \text{ MPa} \mid \varepsilon_{cu} = 0.003$$

La tabla 1 presenta la configuración geométrica y capacidad de momento utilizados de cada caso.

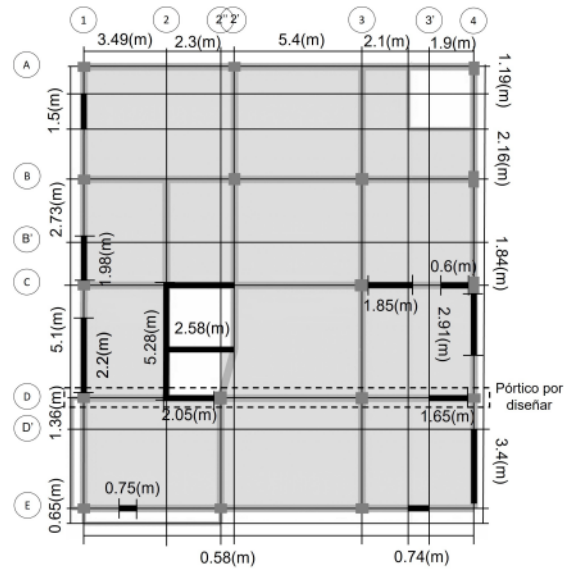
Tabla 1.

Información de Casos de Prueba

Caso	Luces	Niveles	Columnas	Vigas	W Vigas [kN/m]	M_{max} Columnas [kN-m]	M_{max} Vigas [kN-m]
1	#1: 6m	#1: 3m	Sección: 350x350mm	Sección: 300x400mm	40	(+):118.427 (-):120.285	(+):80.931 (-):106.479
2	#1: 6m #2: 3m	#1: 3m	Sección: 350x350mm	Sección: 300x400mm	200	(+):118.427 (-):120.285	(+):80.931 (-):106.479
3	#1: 6m	#1: 3m #2: 4m	Sección: 350x350mm	Sección: 300x400mm	60	(+):118.427 (-):120.285	(+):80.931 (-):106.479
4	1-5: 6m	1-10: 3m	Sección: 600x600	Sección: 300x400mm	18	(+):420.215 (-):420.215	(+):80.931 (-):106.479
5	Ver Figura 15	Ver Figura 18	C1-C5: 300x500mm C2-C3: 500x500mm	Sección: 300x400mm	Entrepisos: 15.65 Cubierta: 7.19	(+):190.524 (-):190.524 (+):193.975 (-):193.975	(+):80.931 (-):106.479

Figura 15.

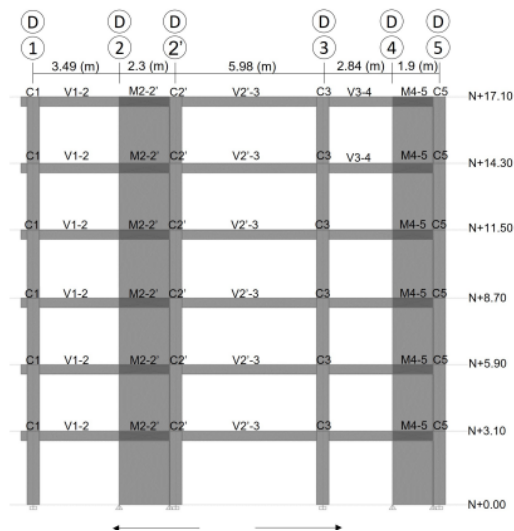
Distribución en planta (Estructura Caso 5)



Nota. Tomado de: (Guerrero, 2023)

Figura 16.

Distribución en altura (Caso 5)



Nota. Tomado de: (Guerrero, 2023)

2. Resultados

2.1 Framez Studio

El resultado principal del proyecto es el software construido en sí mismo. Este software puede instalarse descargando el código fuente del repositorio GitHub y ejecutándose directamente sobre un navegador. También puede accederse fácilmente mediante el enlace <https://framez-app.web.app> desde cualquier dispositivo. Una de las principales ventajas de este software es que está construido en parte sobre programación orientada a objetos y principios SOLID (Martin, 2003), a diferencia de otros proyectos similares como PeFiCa (López Santamaría et al., 2023), que están contruidos sobre programación secuencial y funciones. Esto facilita la escalabilidad y reutilización de código y permitira a futuros autores y proyectos incorporar ágilmente nuevas funcionalidades. Otra ventaja es que cuenta con una interfaz gráfica propia compatible con dispositivos móviles y de escritorio, que facilita su uso y no requiere a diferencia de los proyectos mencionados, el uso de complementos en entornos licenciados como Matlab[®].

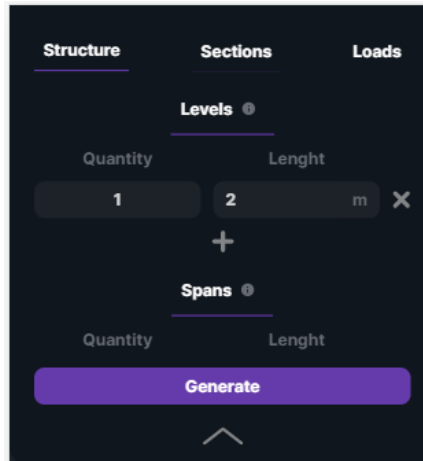
Para ejecutar un análisis en Framez Studio se despliega el menú superior (figura 17) del programa donde se pueden generar rápidamente configuraciones de pórticos regulares. El programa solicita al usuario la cantidad de luces y niveles, las secciones típicas de viga y columnas y una carga de servicio típica para las vigas.

Para ejecutar un análisis en Framez Studio se despliega el menú superior (figura 17) del programa donde se pueden generar rápidamente configuraciones de pórticos regulares. El

programa solicita al usuario la cantidad de luces y niveles, las secciones típicas de viga y columnas y una carga de servicio típica para las vigas.

Figura 17.

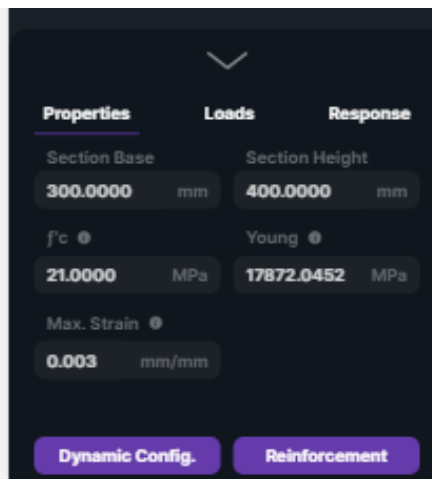
Interfaz de preproceso ágil.



Nota. Tomado de: Framez Studio

Figura 18.

Interfaz de preproceso de un elemento



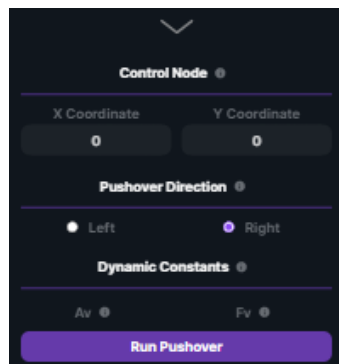
Nota. Tomado de: Framez Studio

Una vez finalizada la configuración geométrica y material, el usuario puede configurar el análisis pushover desplegando el menú inferior (figura 19) (teniendo cuidado de no tener seleccionado ningún elemento ni nodo) y seleccionando el nodo de control y parámetros sísmicos del análisis FHE.

Finalmente presiona el botón “Run Pushover” para realizar el análisis y obtiene la curva de capacidad de la estructura (Figura 20). La opción “See data” permite ver los resultados tabulados y descargarlos en formato csv.

Figura 19.

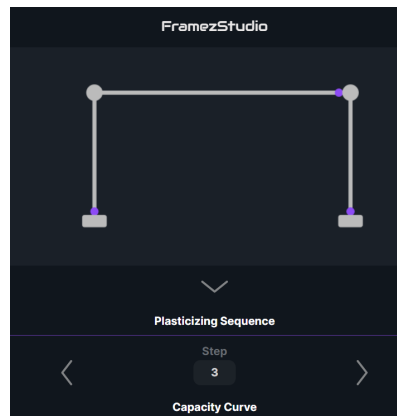
Interfaz de configuración análisis Pushover



Nota. Tomado de: Framez Studio

Figura 20.*Interfaz curva de capacidad*

Nota. Tomado de: Framez Studio

Figura 21.*Interfaz gráfica de secuencia de plastificación*

Nota. Tomado de: Framez Studio

Una vez ejecutado el análisis el usuario podrá ver la secuencia de plastificación por pasos donde las rotulas plastificadas se señalan con círculos morados (figura 21).

2.2 Resultados casos de prueba

Por otra parte, a partir de los resultados obtenidos mediante los casos de prueba se validó el análisis, así como también se calcularon los errores relativos mínimos asociados a cada configuración. A continuación, se exponen y analizan a detalle los resultados para cada caso de validación.

2.2.1 Caso 1

El caso 1 fue la condición de análisis más sencilla para el software con un portico de una luz y un nivel. De esta manera, al ser reducida la cantidad de elementos y puntos de plastificación, se facilitó el proceso de depurar el código, identificar fallos o inconsistencias que no fueron evaluadas en las pruebas unitarias y corregirlas rápidamente antes de continuar con análisis más complejos. Algunos de los aspectos que se verificaron en conjunto con pruebas unitarias fueron: matriz de rigidez, desplazamientos, fuerzas internas y factores de colapso en cada paso, acumulación de desplazamientos del pushover de carga servicio para el pushover lateral. La tabla 2 presenta los resultados finales de desplazamiento (Dx) y cortante basal (V) para cada una de las plastificaciones que ocurren, al igual que el porcentaje de error medio de ambos parámetros.

Tabla 2.

Valores curva de capacidad caso 1

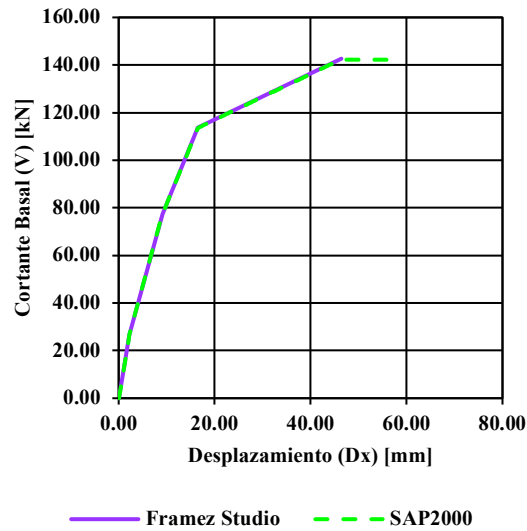
Framez Studio		SAP2000	
Dx [mm]	V [kN]	Dx [mm]	V [kN]
0.06	0.00	0.06	0.00
2.23	26.56	2.23	26.56

Framez Studio		SAP2000	
Dx [mm]	V [kN]	Dx [mm]	V [kN]
9.10	77.33	9.03	76.80
16.54	113.74	16.54	113.56
46.41	142.66	46.17	142.25
Error Medio Dx			0.26%
Error Medio V			0.26%

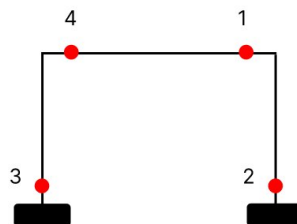
Nota. Elaborado a partir de Framez Studio y SAP2000

Todos los errores tienen magnitudes inferiores al 1% y no son sistemáticos si se analizan punto a punto, es decir no existe un patrón secuencial en el error de los pasos que permita inferir que se trata de un error acumulado o propagado. Hasta este punto se consideró como fuente probable de error la tolerancia utilizada del método de solución utilizado por SAP2000. Sin embargo, en casos posteriores se mencionan otras posibles fuentes de error.

En la figura 22 se presenta la comparación entre las curvas de capacidad calculadas para el Caso 1 mediante el software SAP2000 y Framez Studio. A simple vista la diferencia entre las curvas de capacidad es poco representativa hasta que la estructura alcanza la última plastificación. Después de este punto en SAP2000 se registra un aumento de los desplazamientos laterales manteniendo una resistencia constante del cortante basal, lo cual no es capturado mediante el programa Framez Studio. La incapacidad del programa Framez Studio para capturar estos desplazamientos se debe a que después de la última plastificación, el programa detiene el análisis puesto que la estructura se vuelve inestable.

Figura 22.*Curva de capacidad caso 1*

Por otro lado, para cumplir la de plasticidad perfecta en SAP2000 se definieron valores de curvatura muy grandes, lo que provoca el aumento en los desplazamientos previamente mencionados. Esta diferencia se observará en todas las curvas de capacidad de los casos siguientes.

Figura 23.*Secuencia de plastificación caso 1*

La figura 23 presenta la secuencia de plastificación de la estructura, esta se comparó entre ambos softwares y se evidenció que el orden de plastificación de los nodos es igual en ambos.

2.2.2 Caso 2

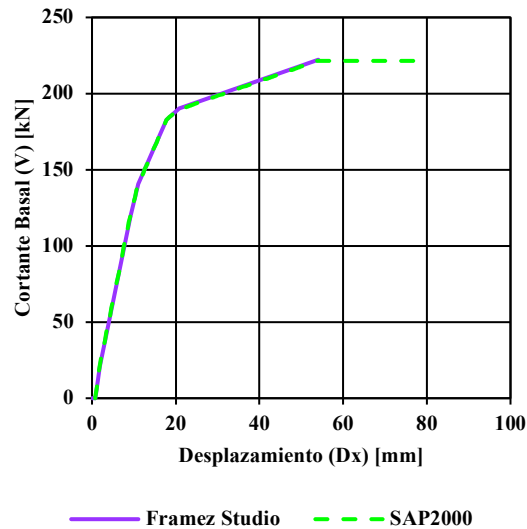
El caso 2 consiste en un pórtico de dos luces y un nivel, con una carga de servicio relativamente alta con el fin de inducir el comportamiento plástico de uno o varios nodos en el pushover realizado para la carga de servicio sin acción lateral. La tabla 3 presenta los resultados finales de desplazamiento (Dx) y cortante basal (V) obtenidos para la curva de capacidad de esta estructura junto con sus errores medios.

Tabla 3.

Valores curva de capacidad caso 2

Framez Studio		SAP2000	
Dx [mm]	V [kN]	Dx [mm]	V [kN]
0.82	0.0000	0.81	1.17
1.89	21.01	1.61	16.74
9.20	119.74	9.47	123.17
11.09	140.60	11.03	140.39
17.79	182.79	17.75	182.71
20.89	190.11	20.55	189.31
54.07	222.23	53.76	221.47
Error Medio Dx			3.52%
Error Medio V			18.46%

Nota. Elaborado a partir de Framez Studio y SAP2000

Figura 24.*Curva de capacidad caso 2*

Para este caso se presentaron errores significativamente mayores a los del Caso 1, una fuente de error probable, complementaria a la planteada en el caso 1, es que las fuerzas laterales en Framez Studio se calculan automáticamente lo que produce una diferencia por truncamiento en la ingresadas manualmente en SAP2000. De ser así, entre más sea el número de nodos, más se sospecha será la diferencia entre ambos softwares.

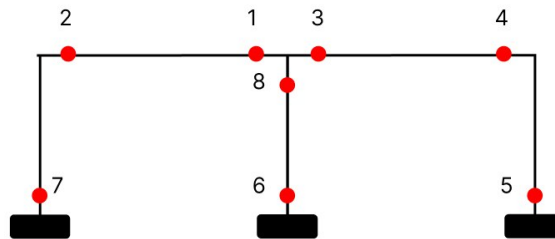
La figura 24 presenta la comparación entre las diferentes curvas de capacidad obtenidas, al igual que en el caso uno, la diferencia a simple vista no es significativa.

Otro resultado importante es que la secuencia de plastificación (figura 25) de la estructura presentada por Framez Studio es igual a la presentada por SAP2000 lo que constituye otro indicador del correcto funcionamiento del programa desarrollado. Este caso, permitió comprobar la correcta recuperación de algunos puntos (2 y 3) que sufrieron rotulación por momento negativo en el pushover de carga de servicio. Este comportamiento se debe a que existen puntos en los que

la carga lateral ejerce un efecto contrario (momento positivo) al ejercido por la carga gravitacional (momento negativo) lo que permite que estos puntos en particular se recuperan y sigan actuando en cierta medida como conexiones rígidas.

Figura 25.

Secuencia de plastificación Caso 2



Las rotulas 2 y 3 no alcanzan a presentar una segunda rotulación por momento positivo debido a que primero ocurre una falla de columna débil según lo evidencian los puntos 6 y 8. Mas adelante, en el caso 3, se evidenciara que pueden existir 2 rotulaciones en un mismo punto durante el mismo análisis.

2.2.3 Caso 3

El caso 3 presenta un pórtico de una luz y dos niveles y también parte con una carga de servicio alta con el fin de nuevamente estudiar la plastificación durante el pushover de servicio previo al pushover de carga lateral.

El comportamiento percibido más importante de este caso radica en que por la simetría de momentos en las vigas durante el pushover de servicio los factores de colapso son iguales en ambos extremos. Hasta el momento previo a este caso de prueba, Framez Studio estaba limitado a una

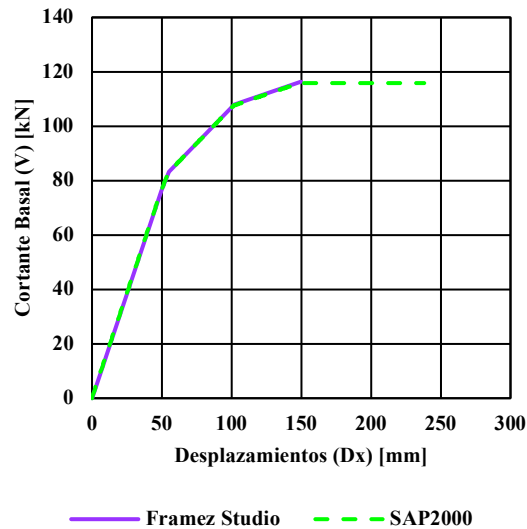
rotulación por cada paso del análisis, sin embargo, este caso permitió corregir esta inconsistencia pues si dos o más factores de colapso son iguales y su C_f corresponde al mínimo de ese paso, se debe permitir tantas rotulaciones como factores haya iguales en ese paso. La tabla 4 presenta los resultados finales de desplazamiento (Dx) y cortante basal (V) de la curva de capacidad para este caso y sus errores promedio.

Tabla 4.

Valores curva de capacidad caso 3

Framez Studio		SAP2000	
Dx [mm]	V [kN]	Dx [mm]	V [kN]
0.0624	0.0000	0.0620	0.0000
49.6833	76.2396	49.3330	76.0220
55.2354	83.2660	54.9330	83.1090
102.1664	107.9776	101.3270	107.5380
149.6788	116.3533	148.5270	115.8590
Error Medio Dx			0.70%
Error Medio V			0.26%

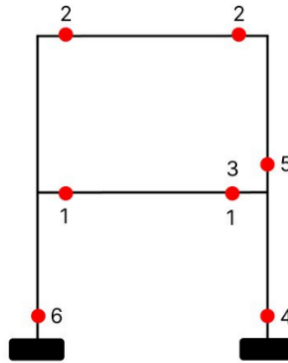
Nota. Elaborado a partir de Framez Studio y SAP2000

Figura 26.*Curva de capacidad caso 3*

En concordancia con la fuente de error planteada en el caso 2 por truncamiento de en las cargas laterales, este caso presenta menos nodos que el anterior y a su vez un menor error relativo lo que refuerza la fuente de error planteada.

La figura 26 nuevamente presenta diferencias imperceptibles a simple vista entre las curvas obtenidas por ambos programas.

En este caso en particular la secuencia plastificación de la estructura presentada gráficamente por SAP2000 no incluye el paso 3 y 5 presentado en la figura 27, a diferencia de Framez Studio que si las presenta. En realidad, esta diferencia es solo de carácter gráfico pues internamente estas plastificaciones si se dan en SAP2000.

Figura 27.*Secuencia de plastificación Caso 3*

Otro ejemplo de la posible inversión de momento descrita en el caso 2 es la rotulación 1 y 3, que, si bien se dan en el mismo punto, la primera corresponde a rotulación por cargas de servicio (momento negativo) y la tercera corresponde a rotulación por carga lateral (momento positivo).

2.2.4 Caso 4

El caso 4 busco medir la capacidad máxima del software en términos de cantidad de luces (10) y niveles (20). Una vez se configuró el caso en Framez Studio y se ejecutó el análisis pushover, se evidenció que la interfaz gráfica deja de responder a nuevos eventos de clic o gestos, es decir, se paraliza. Este inconveniente fue imperceptible en los casos anteriores debido al tiempo de cómputo expuesto en una sección posterior. Sin embargo, para el caso 4 y 5 si se evidencio esta situación.

Al realizar directamente la depuración del código se pudo evidenciar que el software era capaz de determinar los desplazamientos, fuerzas internas, factores de colapso y cortante basal de la estructura, sin embargo, el tiempo que tardaba era de aproximadamente 52 segundos por cada

paso o análisis estático realizado. Se observó mediante puntos de interrupción en la depuración del código que la mayor parte del tiempo consumido se debe al cálculo y ensamblaje de la matriz de rigidez de la estructura. Una posible solución a esto puede ser la paralelización de estos procesos mediante los conocidos “Web Workers” que permiten el uso de más de un hilo de la ejecución (Renzulli & Guan, 2020). Sin embargo, su implementación de estos se sale del alcance teórico del proyecto.

Se estimó con base en el tiempo de un paso y la necesidad de al menos 201 pasos para este caso, el software tardaría unas seis horas en realizar el análisis. Aunque los tiempos en los demás casos de pruebas se estimaron entre los 300 y 1400 milisegundos, la cantidad de tiempo de análisis estimada para este caso representa una clara debilidad en la usabilidad del software respecto a soluciones comerciales (CSI, 2021) o proyectos similares (López Santamaría et al., 2023). Con el ánimo de obtener resultados positivos se dedicó un computador Mac Air M1 con memoria RAM de 8GB únicamente a correr el análisis deseado en Framez Studio. El análisis tardó alrededor de seis horas tal como se había previsto, sin embargo, no se lograron obtener resultados para la curva de capacidad ni para la secuencia de plastificación. Entre las posibles razones de esto se encuentra el límite de memoria del navegador que impide el correcto desarrollo de un análisis de tal magnitud.

Debido a las limitaciones previamente descritas se modificó el caso 4 a las características mencionadas en la tabla 1 tratando de estimar un nuevo límite del programa. La tabla 5 presenta algunos resultados finales de desplazamiento (D_x) y cortante basal (V) de la curva de capacidad para este caso y sus errores promedio.

Tabla 5.

Valores curva de capacidad caso 4

Framez Studio		SAP2000	
Dx [mm]	V [kN]	Dx [mm]	V [kN]
0.16	-	0.17	-
35.23	215.40	36.00	203.71
146.47	486.23	146.80	468.86
148.76	489.09	148.87	471.98
538.21	564.95	483.53	555.31
539.30	565.00	485.76	555.52
Error Medio Dx			7.16%
Error Medio V			3.42%

Nota. Elaborado a partir de Framez Studio y SAP2000

La figura 29 nuevamente presenta diferencias imperceptibles a simple vista entre las curvas obtenidas por ambos programas.

Figura 28.

Curva de capacidad caso 4

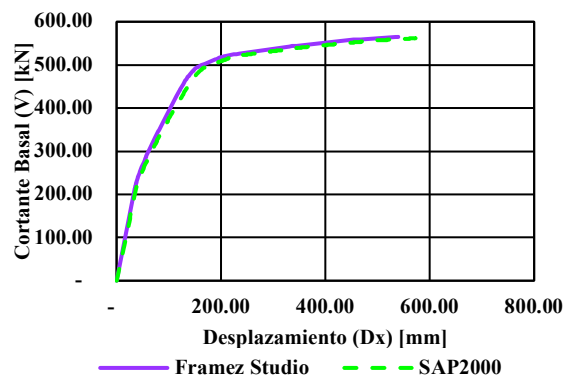
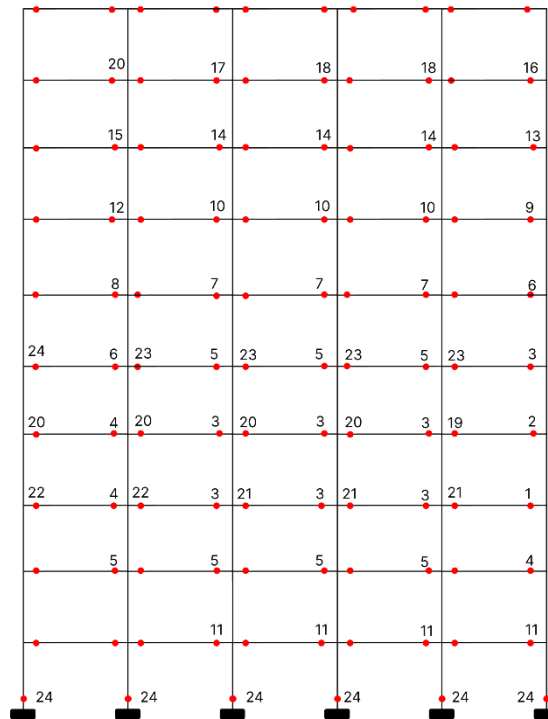


Figura 29.

Secuencia de plastificación Caso 4



2.2.5 Caso 5

El caso 5 supone la puesta a prueba final en la fase de pruebas a la que se limita este proyecto. Este caso analiza bidimensionalmente parte de un diseño realista, el cual contiene múltiples asimetrías horizontales y verticales, diferentes tipos de secciones transversales para columnas y vigas e incluso diferentes cargas de servicio.

La tabla 6 presenta los resultados finales de desplazamiento (Dx) y cortante basal (V) de la curva de capacidad para este caso y sus errores promedio.

Tabla 6.

Valores curva de capacidad caso 5

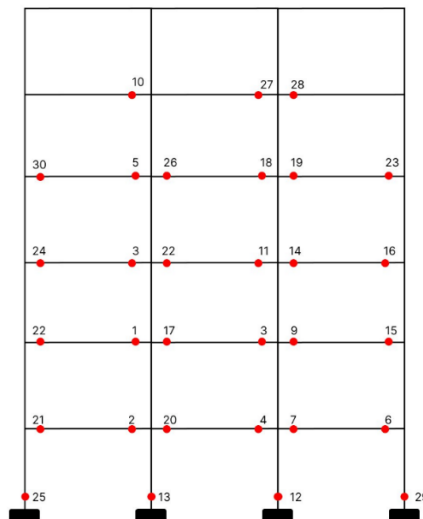
Framez Studio		SAP2000	
Dx [mm]	V [kN]	Dx [mm]	V [kN]
0.22	0.00	0.22	0.00
13.04	89.95	13.42	89.95
54.00	238.10	53.78	236.54
54.28	238.47	54.18	237.00
318.64	297.55	311.27	295.95
355.72	298.94	323.27	296.38
Error Medio Dx			5.88%
Error Medio V			2.71%

Nota. Elaborado a partir de Framez Studio y SAP2000

Este error una vez más refuerza la idea de que el origen de la diferencia entre los dos programas está en el truncamiento de los valores de carga lateral al contar con más nodos en el paso 5 y más truncamientos de valores de carga respecto a los casos anteriores.

Figura 30.

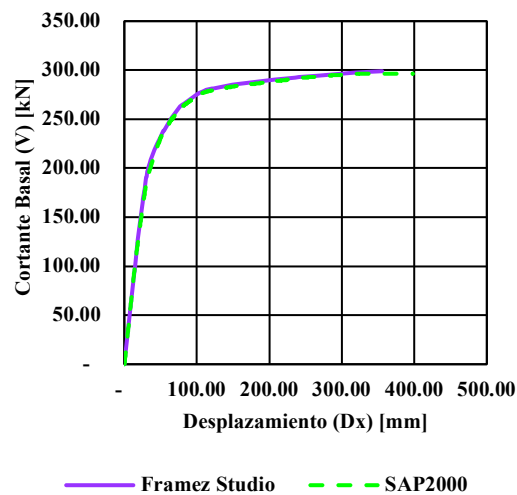
Secuencia de plastificación caso 5



Debido a la cantidad de variaciones de la configuración geométrica y material de la estructura propias de un diseño realista, los resultados del programa permiten evidenciar que los componentes, funciones y métodos que lo conforman están funcionando acorde con los modelos teóricas y limitaciones propias del mismo y que son capaces de brindar en conjunto resultados satisfactorios en los análisis pushover que son objetivo de este. Esto se puede evidenciar mediante la figura 31 que nuevamente presenta diferencias imperceptibles a simple vista entre las curvas obtenidas por ambos programas.

Figura 31.

Curva de capacidad caso 5



2.2.6 Tiempo de cómputo casos de prueba

A partir de los análisis realizados en los casos de prueba la tabla 7 presenta los valores de tiempo en milisegundos de cómputo para Framez Studio y SAP2000.

Tabla 7.*Tiempo de cómputo casos de prueba*

Caso	Framez Studio (ms)	SAP2000 (ms)
1	88	1000
2	166	1000
3	155	2000
4	385806	4000
5	18314	9350

Nota. Elaborado a partir de Framez Studio y SAP2000

Los tiempos de cómputo presentados por Framez Studio son significativamente menores para los casos 1 a 3 lo que evidencia que la ventaja del software en el análisis de estructuras sencillas debido a que SAP 2000 utiliza métodos iterativos e invierte más tiempo en el postproceso detallado del análisis (CSI, 2021). Sin embargo, a medida que aumentan los grados de libertad de la estructura, como en el caso 4 y 5, SAP2000 supera con amplitud en tiempo de cómputo a Framez Studio, esto se debe a que a mayor número de grados de libertad el tiempo de preprocesamiento se vuelve irrelevante frente al tiempo de procesamiento del análisis, un aspecto que la casa de software CSI ha optimizado durante décadas. Otro factor importante es que SAP2000, por ser un software nativo, puede interactuar de forma más directa con el hardware de los dispositivos lo que le permite paralelizar y gestionar mejor el desarrollo de los procesos de análisis estructural.

3. Conclusiones

Esta investigación desarrollo una estructura de algoritmos, componentes y funciones que permite desarrollar análisis pushover en pórticos regulares planos con elementos rectangulares de concreto reforzado mediante typescript y su ejecución en javascript. Los análisis pushover consideran un modelo de plasticidad concentrada con rotulas elásticas perfectamente plásticas y se desarrollan mediante el método de factores de colapso y el método matricial de rigidez. El procedimiento de análisis inicia con un pushover gravitacional que determina los comportamientos inelásticos inducidos por cargas de servicio rectangulares sobre las vigas y establece la condición inicial de la estructura para posteriormente realizar el análisis pushover con una distribución de carga lateral determinada mediante fuerza horizontal equivalente según lo establecido por la NSR-10.

Así mismo, el proyecto desarrollo con éxito una interfaz gráfica para el preproceso de los modelos de análisis que permite que permite a los usuarios definir las siguientes variables: cantidad de luces, niveles, secciones, materiales, nodo de control y parámetros sísmicos para la distribución de carga lateral. La interfaz gráfica también permite visualizar el postproceso o resultados de los análisis de la estructura representados por la secuencia de plastificación y la curva de capacidad de la estructura.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante la validación del software permitieron conocer que no logra procesar estructuras con la cantidad de luces (10) y niveles (20) máxima esperada debido al límite de memoria del navegador. Los casos de prueba mostraron una alta precisión para estimar la curva de capacidad de la estructura, con diferencias respecto al software

SAP2000 de entre 0.00% y 17.16%, principalmente debido al error de truncamiento en las cargas lateral ingresadas de forma manual en este último. Así mismo el mecanismo de plastificación presentado por el software es idéntico en comparación al registrado por SAP2000.

4. Recomendaciones

Desde el punto de vista teórico, la incorporación de nuevos métodos para la estimación de los diagramas de momento de curvatura y la paralelización del análisis matricial pueden ser los abordajes prioritarios de versiones posteriores. Desde el punto de vista de interfaz gráfica, la mejora de la interfaz gráfica para su versión de escritorio y la incorporación de métodos que permitan la edición de propiedades de múltiples elementos simultáneamente constituyen los retos más importantes a futuro.

Advertencia: El software presentado en este proyecto de investigación constituye una herramienta destinada a un uso exclusivamente pedagógico para el aprendizaje y acercamiento a los conceptos de ingeniería estructural y análisis pushover. La Universidad Industrial de Santander y los autores no se hacen responsables por su uso indebido o inadecuado. Para su uso por favor tenga en cuenta las limitaciones del software a la fecha de publicación de este documento listadas a continuación:

- El software utiliza el método matricial de rigidez con rotulación concentrada donde la secuencia de plastificación se determina utilizando el método de factores de colapso.

- Los pórticos modelados deben ser Pórticos Resistentes a Momentos (PRM) de concreto reforzado.
- Las secciones transversales de los elementos están limitadas a rectangulares prismáticas.
- Los elementos pueden tener diferentes secciones transversales entre ellos.
- El modelo desarrollado supone rótulas de carácter bilineal con elastoplasticidad perfecta.
- El criterio de colapso utilizado es la inestabilidad estructural.
- La distribución de carga lateral en altura se realiza a través del método de la Fuerza Horizontal Equivalente según la NSR10.
- El modelo planteado considera la no linealidad material y no se considera los efectos de la no linealidad geométrica en la estructura.
- El modelo planteado no considera los efectos de interacción suelo-estructura.

Acceda al software bajo su propia responsabilidad sobre el uso a través del siguiente enlace https://framez-app.web.app_o mediante el código QR:



Referencias Bibliográficas

- Barretto, S. F. A., Piazzalunga, R., & Ribeiro, V. G. (2003). A web-based 2D structural analysis educational software. *Computer Applications in Engineering Education*, 11(2), 83 – 92.
<https://doi.org/10.1002/cae.10040>
- Basset S. Luisa. (s/f). *Clasificación estática de las estructuras*.
- Buchgeher, G., Fischer, S., Moser, M., & Pichler, J. (2020). An Early Investigation of Unit Testing Practices of Component-Based Software Systems. En M. Pinzger & R. Ramler (Eds.), *VST 2020 - Proceedings of the 2020 IEEE 3rd International Workshop on Validation, Analysis, and Evolution of Software Tests* (pp. 12–15). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/VST50071.2020.9051632>
- C. Lopes, P., L. Rangel, R., & Martha, L. F. (2021). An interactive user interface for a structural analysis software using computer graphics techniques in MATLAB. *Computer Applications in Engineering Education*, 29(6), 1505–1525.
<https://doi.org/10.1002/cae.22406>
- Caltrans Seismic Design Criteria, (2019).
- Comision Asesore Permanente Para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes. (2010). *Reglamento Colombiano de Construccion Sismoresistente | NSR-10: Vol. Titulo A*.
- Coporacion Mozilla, & Fundación Mozilla. (s/f). *Progressive web apps (PWAs)*. Recuperado el 14 de agosto de 2022, de https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Progressive_web_apps

CSI. (2021). *SAP 2000 V24.0 Structural Analysis and Design*.
<https://www.csiamerica.com/products/sap2000>

DIANA FEA BV. (2022). *DIANA FEA*. <https://dianafea.com/node/35>

Dlubal. (2022). *RFEM 6 | FEM Structural Analysis Software*.
<https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem>

Fajfar, P. (2018). Analysis in seismic provisions for buildings: past, present and future: The fifth Prof. Nicholas Ambraseys lecture. En *Bulletin of Earthquake Engineering* (Vol. 16, Número 7, pp. 2567–2608). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0290-8>

Ferracuti, B., Pinho, R., Savoia, M., & Francia, R. (2009). Verification of displacement-based adaptive pushover through multi-ground motion incremental dynamic analyses. *Engineering Structures*, 31(8), 1789–1799.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.035>

García Reyes, L. E. (1998). *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico* /. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil,.

García, D., & Tena-Colunga, A. (2016). Estudio paramétrico de modelos representativos de estructuras propensas a desarrollar pisos suaves o débiles ante excitaciones sísmicas de suelo blando. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 53–80. <https://doi.org/10.18867/ris.95.405>

Google Inc. (s/f). *Aplicaciones web progresivas*. Recuperado el 14 de agosto de 2022, de <https://web.dev/about/>

Guerrero, J. (2023). *Evaluación de la respuesta no lineal en un sistema combinado diseñado por los métodos de fuerzas y desplazamientos*. Universidad Industrial de Santander.

- López Santamaría, N. F., Linero Segrera, D. L., & Estrada Mejía, M. (2023). *Programa didáctico para el análisis dinámico de estructuras bidimensionales por el método de los elementos finitos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Marjanishvili, S., & Agnew, E. (2006). Comparison of various procedures for progressive collapse analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 365–374.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2006\)20:4\(365\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(365))
- Martin, R. C. (2003). *Agile Software Development: Principles, Patterns, and Practices*. En *Alan Apt series*. Pearson Education.
<https://books.google.com.co/books?id=0HYhAQAAIAAJ>
- OpenSees. (s/f). *¿What is OpenSees?* Recuperado el 12 de abril de 2023, de <https://opensees.berkeley.edu/>
- Panagiotopoulos, C. G., & Manolis, G. D. (2016). A web-based educational software for structural dynamics. *Computer Applications in Engineering Education*, 24(4), 599–614.
<https://doi.org/10.1002/cae.21735>
- Park, R., & Pauley, T. (1975). Ultimate Deformation and Ductility of Members with Flexure. En *Reinforced Concrete Structures* (pp. 195–269).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9780470172834.ch6>
- Renzulli, D., & Guan, A. (2020, diciembre 8). *Workers overview*. Workers Overview.
<https://web.dev/workers-overview/>
- Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). Plastic hinge integration methods for force-based beam-column elements. *Journal of Structural Engineering*, 132(2), 244–252.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:2\(244\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:2(244))
- Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, Pub. L. No. 41–17 (2017).

Zhou, J., Cai, J., & Fang, X.-D. (2007). Seismic overstrength factors for reinforced concrete frames. *World Information on Earthquake Engineering*, 23(4), 227–233.