

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS



**EVALUACIÓN SÍSMICA CON OPTIMIZACIÓN EN IA PARA
MEJORAR EL REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON Y SIN FRP DE
UN COLEGIO DE CONCRETO ARMADO, PERÚ 2025**

TESIS

Presentada por:

Bach. Yunior Dani Tafur Álvarez

ORCID: 0009-0008-1975-4095

Asesor:

Dr. Rick Milton Delgadillo Ayala

ORCID: 0000-0002-9763-1938

Para obtener el grado académico de:
MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

TACNA - PERÚ

2026

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
ESCUELA DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS

Tesis

“EVALUACIÓN SÍSMICA CON OPTIMIZACIÓN EN IA PARA MEJORAR EL
REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON Y SIN FRP DE UN COLEGIO DE
CONCRETO ARMADO, PERÚ 2025”

Presentada por:

Bach. Yunior Dani Tafur Alvarez

Tesis sustentada y aprobada el 26 de junio del 2026; ante el siguiente jurado
examinador:

PRESIDENTE : Mtra. Dina Marlene Cotrado Flores

SECRETARIO : Dr. Pedro Valerio Maquera Cruz

VOCAL : Dr. Dennys Geovanni Calderón Paniagua

ASESOR : Dr. Rick Milton Delgadillo Ayala

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Yuniur Dani Tafur Alvarez, en calidad de: Maestrante de la Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Estructura de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI 70815194 Soy autor (a) de la tesis titulada: “EVALUACIÓN SÍSMICA CON OPTIMIZACIÓN EN IA PARA MEJORAR EL REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL CON Y SIN FRP DE UN COLEGIO DE CONCRETO ARMADO, PERÚ 2025” con asesor(a): Dr. Rick Milton Delgadillo Ayala

DECLARO BAJO JURAMENTO

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de magister, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin. Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual. Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 01% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo. Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor (a) de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier dato que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, someténdome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.



Lugar y fecha: 26 de junio del 2026

Nombres y apellidos: Yuniur Dani Tafur Alvarez

DNI: 70815194

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo mi cariño y gratitud a mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y ejemplo de fortaleza; a mi asesor, por su valiosa guía, paciencia y dedicación; y a todos los docentes que con su enseñanza y compromiso han contribuido a mi crecimiento académico y personal. Gracias por haber sido parte fundamental de este logro.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres por su amor, apoyo incondicional y esfuerzo constante, a mi asesor por su guía experta, paciencia y valiosos consejos durante todo este proceso, y a los docentes que me han acompañado con su dedicación y conocimientos, contribuyendo de manera significativa a mi formación académica y personal.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	4
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.2.1 Problema Principal.....	8
1.2.2 Problemas Secundarios	8
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
1.4 OBJETIVOS	10
1.4.1 Objetivo General	10
1.4.2 Objetivos Específicos.....	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	12
2.1.1 Nacional	12

2.1.2	Internacional.....	15
2.2	BASES TEÓRICAS DEL CAMBIO PLANEADO	17
2.2.1	Delimitación conceptual y alcance del marco teórico.....	17
2.2.2	Sismorresistencia en edificaciones educativas de concreto armado .	19
2.2.3	Parámetros normativos de la E.030.....	20
2.2.4	Indicadores de sismicidad y estabilidad estructural	23
2.2.5	Modelación estructural y análisis dinámico con ETABS	26
2.2.6	Secuencia procedimental mínima en ETABS	27
2.2.7	Análisis modal, espectral y control de resultados	29
2.2.8	Comportamiento de materiales y criterios de asignación en el software.....	30
2.2.9	Concreto y acero de refuerzo	31
2.2.10	FRP: mecanismos resistentes y criterios de diseño preliminar	33
2.2.11	Optimización con algoritmo genético aplicada al reforzamiento sísmico.....	37
2.2.12	Codificación, función objetivo y restricciones.....	39
2.2.13	Operadores genéticos y convergencia.....	41
2.2.14	Integración metodológica para el caso de estudio.....	43
2.3	DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS	46
2.3.1	Polímeros Reforzados con Fibras (FRP).....	46
2.3.2	Refuerzo Sismorresistente.....	46
2.3.3	Estructura de Concreto Armado.....	46
2.3.4	Evaluación Sísmica	46
2.3.5	Fibra de Carbono (CFRP)	47
2.3.6	Matriz Polimérica.....	47
2.3.7	Ductilidad.....	47
2.3.8	Capacidad de Carga Sísmica.....	47
2.3.9	Modelos Computacionales de Reforzamiento	48
2.3.10	Efecto de la Corrosión en Concreto Armado	48
2.3.11	Algoritmo Genético aplicado al reforzamiento con FRP	48
2.3.12	Fundamentos operativos del GA y operadores evolutivos.....	48

2.3.13	Codificación de la solución de reforzamiento con FRP.....	48
2.3.14	Construcción del conjunto candidato desde resultados estructurales... ..	49
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO.....		51
3.1	HIPÓTESIS.....	51
3.1.1	Hipótesis General.....	51
3.2	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	51
3.2.1	Identificación de la variable independiente.....	51
3.2.2	Identificación de la variable dependiente.....	52
3.3	TIPO DE INVESTIGACIÓN	53
3.4	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	54
3.5	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	54
3.6	POBLACIÓN DE ESTUDIO	54
3.6.1	Caracterización del caso de estudio y codificación del modelo.....	54
3.7	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	55
3.7.1	Simulación Computacional y Modelado Estructural	55
3.7.2	Revisión Documental (Literatura Técnica y Proyectos Similares)... ..	55
3.7.3	Revisión y Análisis de Datos Históricos.....	56
3.8	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS	56
3.8.1	Análisis de Resultados de Simulaciones.....	56
3.8.2	Análisis de optimización con algoritmo genético	57
3.8.3	Análisis de Incremento de Resistencia Estructural (FRP)	58
3.8.4	Análisis Económico (Costo-Beneficio).....	58
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....		62
4.1	O.E. 1: Determinar el comportamiento sísmico en ETABS de un colegio de concreto armado sin reforzamiento y compararlo con uno reforzado con FRP, utilizando análisis modal y espectral, pushover y tiempo-historia.....	62
4.1.1	Comparación del análisis estático y dinámico en el rango elástico ..	63
4.1.2	Evaluación inelástica mediante análisis pushover	70
4.1.3	Análisis no lineal tiempo-historia y registro de sismos utilizados....	75
4.1.4	Síntesis comparativa del comportamiento no lineal sin y con FRP..	78

4.2	O.E. 2: Optimizar la configuración del reforzamiento estructural con FRP mediante un Algoritmo Genético implementado en Python, considerando criterios de desempeño sísmico.	80
4.2.1	Jerarquización de la demanda estructural	80
4.2.2	Identificación espacial de elementos a reforzar	82
4.2.3	Dirección preponderante del reforzamiento	85
4.2.4	Interpretación por tipología estructural	88
4.2.5	Criterio de selección del tipo de FRP para la solución optimizada... 94	
4.2.5.1	Comparación técnica de los materiales candidatos en la solución optimizada	96
4.2.6	Número de láminas de FRP por elemento.....	97
4.2.7	Análisis de respuesta dinámica sísmica	100
4.3	O.E. 3: Determinar las derivas, cortantes, momentos flectores y evaluación costo-beneficio obtenidos a partir del desempeño sísmico con y sin reforzamiento FRP.	102
4.3.1	Tipo de FRP recomendado por el algoritmo genético	104
4.3.2	Cortantes	106
4.3.3	Derivas	107
4.3.4	Momentos.....	108
4.3.5	Lectura estructural de la intervención propuesta	112
4.3.6	Análisis costo–beneficio del reforzamiento optimizado	113
4.3.7	Integración de resultados y discusión técnica final.....	115
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS		119
CONCLUSIONES		122
RECOMENDACIONES		124
REFERENCIAS.....		126
ANEXOS		133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Correspondencia entre parámetros normativos e indicadores del estudio.....	25
Tabla 2	Parámetros sugeridos de material y modelación.....	33
Tabla 3	Estructura de la función objetivo y restricciones	42
Tabla 4	Parámetros normativos empleados para interpretar la demanda sísmica.....	65
Tabla 5	Participación modal, períodos y masa acumulada del modelo estructural.....	66
Tabla 6	Comparación de cortante basal estático y dinámico, sin FRP y con FRP preliminar.....	67
Tabla 7	Derivas máximas elásticas por nivel, sin FRP y con FRP preliminar.....	69
Tabla 8	Resultados comparativos del análisis pushover y del punto de desempeño.....	70
Tabla 9	Registros peruanos utilizados en el análisis tiempo-historia.....	75
Tabla 10	Síntesis de resultados no lineales y lectura de desempeño estructural.....	78
Tabla 11	Identificación espacial de los 30 elementos para reforzamiento en el Eje X.....	82
Tabla 12	Identificación espacial de los 30 elementos para reforzamiento en el Eje Y.....	83

Tabla 13	Distribución de la dirección de reforzamiento propuesta	85
Tabla 14	Distribución de elementos seleccionados por nivel, bloque y tipología estructural.....	74
Tabla 15	Priorización de intervención por fases según criticidad estructural, Eje X.....	89
Tabla 16	Priorización de intervención por fases según criticidad estructural, Eje Y.....	90
Tabla 17	Características técnicas para el CFRP	94
Tabla 18	Características técnicas para el GFRP.....	95
Tabla 19	Características técnicas para el AFRP.....	96
Tabla 20	Comparativo por tipo de FRP	97
Tabla 21	Distribución del número de láminas por tipo de FRP	98
Tabla 22	Número de láminas de FRP por elemento estructural.....	99
Tabla 23	Parámetros del algoritmo genético aplicado al problema de reforzamiento	102
Tabla 24	Evolución del mejor individuo durante la optimización genética....	103
Tabla 25	Tipo de FRP recomendado según tipología estructural	104
Tabla 26	Cortantes obtenidas con la optimización	106
Tabla 27	Derivas obtenidas luego de la optimización.....	107
Tabla 28	Momentos obtenidos luego de la optimización.....	108
Tabla 29	Solución optimizada por elemento, ubicación, dirección y tipo de FRP, Eje X.....	110
Tabla 30	Solución optimizada por elemento, ubicación, dirección y tipo de FRP, Eje Y.....	111
Tabla 31	Comparación económico–estructural entre alternativas de reforzamiento	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Terremoto de Kahramanmaraş en Turquía	5
Figura 2	Infraestructura deteriorada de colegios en Lima	6
Figura 3	Estado de escuelas en el departamento de Tacna.....	7
Figura 4	Tendencia global del uso de FRP al 2030	8
Figura 5	Efectos básicos de las fuerzas sísmicas sobre edificaciones	19
Figura 6	Modelo numérico de interacción suelo–estructura	27
Figura 7	Curva esfuerzo–deformación para interpretación constitutiva	30
Figura 8	Representación gráfica del operador en algoritmos genéticos	38
Figura 9	Comparación entre espectro medio de respuesta y espectro de diseño.....	44
Figura 10	Detalles típicos de muros de corte y trayectoria resistente	45
Figura 11	Flujograma del proyecto	61
Figura 12	Evolución de la masa modal acumulada en las direcciones principales.....	66
Figura 13	Relación entre cortante dinámico y cortante estático equivalente	68
Figura 14	Comparación de perfiles de deriva elástica por nivel	69
Figura 15	Curvas de capacidad global y punto de desempeño en dirección X.....	71
Figura 16	Curvas de capacidad global y punto de desempeño en dirección y.....	72

Figura 17	Registros peruanos corregidos por línea base: historias de aceleración y velocidad	76
Figura 18	Índice de demanda de los quince elementos más críticos	81
Figura 19	Mapa de criticidad por etiqueta y nivel para los elementos	84
Figura 20	Distribución de elementos a reforzar según la dirección principal.	87
Figura 21	Evolución del fitness del algoritmo genético	103
Figura 22	Distribución del tipo de FRP en la solución optimizada.....	105
Figura 23	Comparación del costo relativo entre escenarios de reforzamiento....	113

RESUMEN

La investigación evaluó sísmicamente un colegio de concreto armado en Lambayeque y optimizó su reforzamiento con polímeros reforzados con fibra (FRP) mediante inteligencia artificial. El objetivo fue comparar el desempeño estructural sin refuerzo y con refuerzo, y seleccionar una configuración óptima de intervención con algoritmo genético. El estudio fue aplicado, cuantitativo, no experimental y comparativo; se modelaron en ETABS los pabellones 1 y 2 del colegio, y se ejecutaron análisis modal, espectral, pushover y tiempo-historia, complementados con optimización en Python. Los resultados muestran que la relación V_{din}/V_{est} mejoró de 0.708 a 0.761 en X y de 0.707 a 0.755 en Y; la deriva máxima dinámica se redujo de 0.0108 a 0.0089; y la cortante máxima del pushover aumentó de 1562 a 1706 kN en X y de 1497 a 1615 kN en Y. La solución optimizada intervino 47 de 109 elementos, cubrió el 60.0 % de la criticidad ponderada y alcanzó un costo relativo de 53.50, menor que el reforzamiento generalizado. Se concluye que el FRP mejora el desempeño sísmico y que la optimización genética permite focalizar la intervención en los miembros más demandados, elevando la eficiencia estructural y económica del reforzamiento propuesto.

Palabras clave: evaluación sísmica, reforzamiento con FRP, algoritmo genético, ETABS, optimización estructural, deriva sísmica.

ABSTRACT

This study performed a seismic assessment of a reinforced-concrete school in Lambayeque and optimized its strengthening with fiber-reinforced polymers (FRP) using artificial intelligence. The objective was to compare structural performance before and after strengthening and to select an optimal intervention layout through a genetic algorithm. The research was applied, quantitative, non-experimental, and comparative; pavilions 1 and 2 were modeled in ETABS and evaluated through modal, response-spectrum, pushover, and time-history analyses, complemented with optimization in Python. Results show that the V_{dyn}/V_{stat} ratio improved from 0.708 to 0.761 in X and from 0.707 to 0.755 in Y; maximum dynamic drift decreased from 0.0108 to 0.0089; and peak pushover base shear increased from 1562 to 1706 kN in X and from 1497 to 1615 kN in Y. The optimized solution strengthened 47 of 109 elements, covered 60.0% of weighted criticality, and reached a relative cost of 53.50, lower than generalized strengthening. It is concluded that FRP improves seismic behavior and that genetic optimization helps focus the intervention on the most demanded members, increasing both structural efficiency and economic viability.

Keywords: seismic assessment, FRP, genetic algorithm, cost-benefit analysis, selective strengthening.

INTRODUCCIÓN

Las edificaciones educativas ubicadas en zonas de alta sismicidad constituyen infraestructura esencial, no solo por el riesgo asociado a la ocupación diaria, sino porque su operatividad posterior a un evento sísmico se relaciona directamente con la continuidad del servicio educativo y la respuesta comunitaria. En varios contextos latinoamericanos, una parte del parque escolar fue edificada con criterios normativos previos, con limitaciones de detallado sismorresistente o con déficits de control, mantenimiento y actualización estructural. Bajo estas condiciones, la evaluación del desempeño sísmico de escuelas existentes y la definición de estrategias de intervención técnicamente justificadas y económicamente viables se vuelven tareas prioritarias.

En ese marco, el reforzamiento con materiales compuestos tipo Fiber Reinforced Polymer (FRP) se ha consolidado como una alternativa de intervención eficiente por su elevada relación resistencia–peso, facilidad de instalación y capacidad para mejorar mecanismos locales críticos (por ejemplo, en conexiones viga–columna) y el comportamiento global de la estructura. Investigaciones recientes reportan mejoras en capacidad, ductilidad y disipación de energía cuando el FRP se diseña y aplica de forma dirigida, reduciendo modos frágiles en zonas vulnerables.

Sin embargo, uno de los retos prácticos del reforzamiento no es únicamente

demostrar que “mejora”, sino definir cuánto, dónde y con qué configuración reforzar, evitando soluciones generalizadas que incrementen costos o invasividad sin un beneficio proporcional. En los últimos años, se ha incrementado el uso de enfoques de optimización (incluyendo algoritmos evolutivos) para apoyar decisiones de reforzamiento considerando objetivos de desempeño y restricciones de costo, lo cual permite pasar de estrategias por ensayo–error hacia procedimientos reproducibles y comparables. En esa línea, se han propuesto marcos basados en Algoritmos Genéticos y variantes multiobjetivo para seleccionar ubicaciones y niveles de intervención, incluyendo el uso de FRP, priorizando la eficiencia costo–desempeño.

En concordancia con lo anterior, la presente tesis desarrolla la “Evaluación sísmica con optimización en IA para mejorar el reforzamiento estructural con y sin FRP de un colegio de concreto armado, Lambayeque 2026”, tomando como caso de estudio un colegio de concreto armado ubicado en Lambayeque. El objetivo general es realizar la evaluación sísmica con optimización en inteligencia artificial para mejorar el reforzamiento estructural con y sin FRP. Para ello, se plantea: (i) comparar el comportamiento sísmico del edificio sin reforzamiento y con reforzamiento con FRP mediante análisis modal y espectral en ETABS; (ii) emplear un Algoritmo Genético implementado en Python para explorar y seleccionar configuraciones de reforzamiento en columnas y vigas; y (iii) evaluar los cambios en derivas, cortantes, momentos flectores y la relación costo–beneficio de la intervención. Este enfoque es consistente con tendencias recientes en evaluación de edificios escolares mediante análisis modales y espectrales en ETABS y contraste entre estados “antes y después” del reforzamiento, fortaleciendo el sustento técnico de la comparación.

El aporte central del trabajo se orienta a integrar análisis dinámico + reforzamiento con FRP + optimización computacional, con énfasis en una estrategia de refuerzo no indiscriminada, sino priorizada según la demanda estructural de los elementos controlantes. De este modo, la tesis busca aportar una ruta metodológica aplicable a infraestructura educativa existente, donde las

decisiones de intervención requieren justificar el beneficio estructural frente a recursos limitados, y donde la optimización con IA puede apoyar una asignación más racional del reforzamiento.

La presente tesis se estructura en cinco capítulos. El Capítulo I desarrolla el planteamiento del problema, la formulación del problema (general y específicos), los objetivos y la justificación de la investigación. El Capítulo II presenta el marco teórico, incluyendo antecedentes y bases científicas sobre evaluación sísmica, reforzamiento con FRP y el desarrollo del Algoritmo Genético aplicado al diseño y optimización del reforzamiento. El Capítulo III expone el marco metodológico, detallando hipótesis, operacionalización de variables, tipo, nivel y diseño de investigación, así como población, muestra y técnicas de recolección y análisis de datos. El Capítulo IV muestra los resultados del modelo base en ETABS y del sistema de optimización mediante GA en Python, incluyendo la selección final de elementos y capas de FRP propuestas. El Capítulo V discute los resultados obtenidos a la luz de los objetivos planteados. Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias y anexos.

CAPÍTULO I. EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, las infraestructuras escolares, especialmente en zonas sísmicamente activas, están expuestas a graves riesgos durante los terremotos, ya que muchas de estas construcciones no cuentan con los estándares de seguridad adecuados. Un ejemplo claro es el terremoto de Kahramanmaraş en Turquía, ocurrido en febrero de 2023, donde miles de escuelas colapsaron debido a la vulnerabilidad estructural. En la Figura (1a) muestra en una fotografía tomado en dron, el grado de daño que representó el terremoto sobre una escuela pública, la Figura (1b, 1d) muestra toda la logística que se activó para socorrer a los damnificados, en la Figura (1c) se muestra edificios multifamiliares colapsados y la Figura (1e) muestra como este evento cobró la vida de una persona.

Figura 1*Terremoto de Kahramanmaraş en Turquía*

Nota. Tomado de Terremotos de Turquía y Siria, 2023, es.wikipedia.org

Este tipo de catástrofe subraya la necesidad urgente de reforzar los edificios escolares. En respuesta a esta situación, las tecnologías avanzadas como el análisis no modal y espectral y los materiales de refuerzo como los polímeros reforzados con fibras (FRP) se presentan como soluciones eficaces para mejorar la resistencia sísmica de estos edificios (Altıok et al., 2025).

A nivel nacional, especialmente en países como Perú, la infraestructura educativa enfrenta desafíos similares. La alta actividad sísmica en diversas zonas del país coloca a muchas escuelas en riesgo, ya que muchas de ellas fueron construidas sin cumplir con los criterios más estrictos de sismorresistencia (Shi et al., 2025). Aunque existen normativas como la Norma E.030, que regula la sismo resistencia, muchas de las estructuras aún no están adecuadamente reforzadas para resistir terremotos de gran magnitud. La aplicación de tecnologías de reforzamiento

como los FRP y el uso de inteligencia artificial para optimizar el diseño sismorresistente de las edificaciones escolares podría contribuir significativamente a mejorar la seguridad de los edificios y proteger a los estudiantes y docentes durante un sismo (Honarparast & Chaallal, 2025). En la Figura (2a) se presenta una serie de fracturas asociadas a esfuerzos cortantes producidos por el evento sísmico, así mismo, la Figura (1b) muestra el agrietamiento alrededor de una junta sísmica.

Figura 2

Infraestructura deteriorada de colegios en Lima



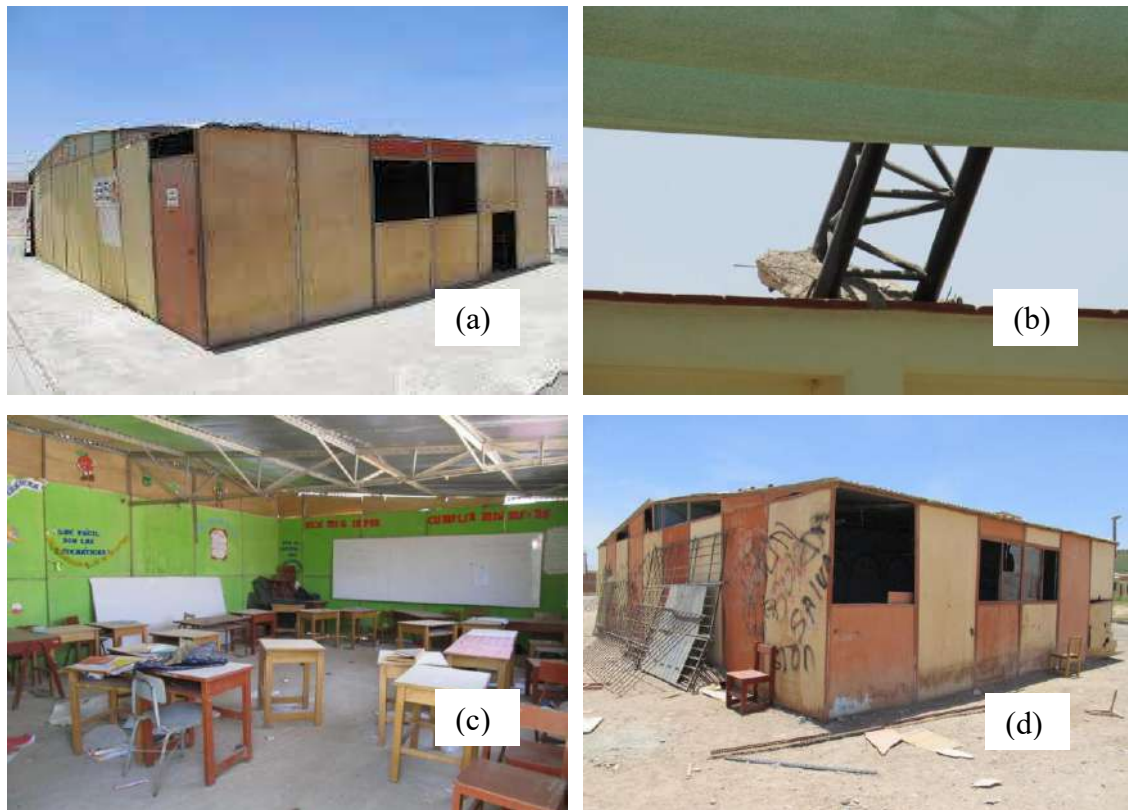
Nota. Tomado de Ventanas rotas y paredes agrietadas: 181 colegios registraron daños por el sismo en Lima, según DRELM, por Alejandro Aguilar (2025), Infobae.com

En el contexto local, en departamentos como Tacna, muchas de las escuelas aún tienen estructuras de concreto armado que no cumplen con los estándares sísmicos modernos. Estas infraestructuras, algunas de las cuales fueron construidas hace varias décadas, carecen de un adecuado análisis y diseño estructural, lo que las hace vulnerables ante eventos sísmicos. La falta de recursos para realizar los refuerzos necesarios agrava aún más la situación. En este sentido, el uso de materiales más accesibles y económicos como los FRP, combinados con tecnologías de optimización mediante inteligencia artificial, podrían ser una solución viable para las autoridades locales, permitiendo realizar mejoras estructurales sin que el costo sea prohibitivo. Estas intervenciones no solo

mejorarían la seguridad, sino también la resistencia de las estructuras a largo plazo (Shendkar et al., 2025).

Figura 3

Estado de escuelas en el departamento de Tacna



Nota. Tomado de “Autoridades dejan en abandono colegios de Tacna”, por Correo, 2014

En la Figura (1a) se muestra los ambientes prefabricados que han sido acondicionados para la enseñanza en un colegio de Tacna, la Figura (1b) muestra la fragilidad estructural al que se está expuesta por falta de mantenimiento en la escuela, la Figura (1c) muestra el colapso de una de las aulas y por último la Figura (1d) se puede representar el abandono total de un módulo.

En resumen, la problemática se centra en la urgente necesidad de reforzar las infraestructuras escolares frente a los riesgos sísmicos, empleando tecnologías avanzadas como los FRP y el análisis mediante inteligencia artificial (Luo et al.,

2025). La implementación de estas soluciones permitiría que las escuelas sean más seguras y resilientes ante los desastres naturales, salvando vidas y asegurando la continuidad educativa en casos de emergencias sísmicas.

Figura 4

Tendencia global del uso de FRP al 2030



Nota. Tomado de “Análisis y participación y tamaño del mercado de polímeros reforzados con fibra tendencia y crecimiento”, por Mordor Intelligence, mordorintelligence.com

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Problema Principal

¿De qué manera la evaluación sísmica con optimización en IA puede mejorar el reforzamiento estructural con y sin FRP de un colegio de concreto armado en Lamabayeque, 2026?

1.2.2 Problemas Secundarios

Y como interrogantes secundarias:

a. ¿Cuál es el comportamiento sísmico obtenido en la simulación en ETABS antes y después del reforzamiento con FRP utilizando un análisis modal y espectral, pushover y tiempo-historia?

- b. ¿Cómo se puede aprovechar el Algoritmo Genético con Python para realizar el análisis sísmico estructural en columnas y vigas del colegio de concreto armado?
- c. ¿Cuáles son las derivas, cortantes, momentos flectores y evaluación costo-beneficio obtenidos a partir del análisis sísmico con y sin reforzamiento de FRP?

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Esta investigación adquiere relevancia y halla su fundamento por las siguientes razones:

Desde el punto de vista teórico

Esta investigación expande el conocimiento de la resistencia sísmica de las estructuras escolares reforzadas con FRP y el análisis modal y espectral, esencial en el diseño sísmico contemporáneo, y la aplicación de la inteligencia artificial para optimizar el diseño y reforzar la estructura es una línea emergente acorde con las últimas tendencias de la ingeniería estructural, proporcionando modelos más exactos para anticipar el comportamiento sísmico de los edificios, lo que contribuye a la teoría en el campo (Zarnani & Ibrahim, 2024).

Desde lo práctico

El refuerzo con FRP y la optimización del diseño estructural con IA son soluciones para mejorar la resistencia sísmica de las infraestructuras escolares, y desde lo social, asegurar la seguridad de los estudiantes en regiones sísmicas es una prioridad social. El estudio ayudará a desarrollar entornos más seguros y resilientes, dando solución a la infraestructura escolar en caso de desastres naturales; la optimización mediante IA mejorará la planificación y asignación de recursos, y el refuerzo con FRP ofrecerá una solución económica y a largo plazo (Buitrago & López, 2025).

Económico

El refuerzo estructural con FRP es costoso, pero sus beneficios económicos a largo plazo son incalculables; los costos de reparación tras un terremoto se reducen drásticamente al prevenir daños severos en las estructuras, lo que genera ahorros significativos en la reconstrucción de edificios. Además, la optimización estructural mediante IA puede dar soluciones efectivas sin gastar tanto dinero, lo que hace que la intervención sea factible para gobiernos locales con poco presupuesto (Singh & Chatterjee, 2023).

Metodológicamente

El enfoque metodológico de la investigación, que integra el análisis modal y espectral y la optimización con IA, es una metodología nueva que proporcionará resultados más precisos sobre la resistencia sísmica de los colegios, mejorando la confiabilidad de los resultados y abriendo nuevas formas de evaluar las infraestructuras escolares ante sismos. Además, la comparación descriptiva entre las estructuras reforzadas y no reforzadas permitirá una evaluación transparente (Zhang, et al. 2023).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Realizar la evaluación sísmica con optimización en IA para mejorar el reforzamiento estructural con y sin FRP de un colegio de concreto armado, Lambayeque 2026.

1.4.2 Objetivos Específicos

a. Determinar el comportamiento sísmico en ETABS de un colegio de concreto armado sin reforzamiento y compararlo con uno reforzado con FRP, utilizando análisis modal y espectral, pushover y tiempo-historia.

b. Optimizar la configuración del reforzamiento estructural con FRP mediante un Algoritmo Genético implementado en Python, considerando criterios de desempeño sísmico.

c. Determinar las derivas, cortantes, momentos flectores y evaluación costo-beneficio obtenidos a partir del análisis sísmico con y sin reforzamiento FRP.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1 Nacional

En la investigación de Canales (2025) titulada: “Análisis funcional del reforzamiento estructural con FRP y encamisado de concreto armado para la reparación de vigas fatigadas en edificaciones residenciales, Pucallpa 2024”, el objetivo fue analizar la efectividad del uso de FRP (polímeros reforzados con fibras) y el encamisado de concreto armado en la reparación de vigas fatigadas. La metodología empleada consistió en realizar pruebas experimentales sobre las propiedades mecánicas del FRP aplicado, comparando vigas reforzadas con FRP y vigas sin este tipo de refuerzo. Los resultados demostraron una mejora significativa en la capacidad de carga de las vigas reforzadas, observándose un aumento del 32% en la resistencia a la flexión y un incremento del 28% en la capacidad de deformación antes de la falla. Las conclusiones apuntaron que el uso de FRP es una opción eficiente para reforzar vigas fatigadas, mejorando su comportamiento estructural y extendiendo su vida útil sin necesidad de costosas sustituciones. La diferencia con el estudio radica en que no es un colegio RC ni usa una optimización con IA; la tesis integra TH+GA y compara sin/con FRP en un colegio.

El antecedente de Canales demuestra con resultados claros que el FRP mejora el desempeño de vigas de concreto armado, aumentando la resistencia a flexión y la capacidad de deformación, lo que respalda su uso como técnica de reforzamiento eficiente y sin reemplazos costosos. Para nuestra investigación, sirve como sustento técnico de que el FRP funciona y orienta qué variables conviene evaluar. La diferencia es que nosotros no haremos ensayos experimentales, sino que mediremos el efecto del FRP en un colegio mediante análisis modal y espectral y lo ajustaremos con optimización (GA) para encontrar una configuración más conveniente.

Por otro lado, en el estudio de Chino (2024) titulado: “Variación de la respuesta sísmica del pabellón II de la I. E. N° 41037 José Gálvez del distrito Miraflores, Arequipa-Perú”, el objetivo fue evaluar la respuesta sísmica de una estructura escolar mediante el uso de tres métodos de análisis: análisis estático no lineal Pushover, análisis pseudodinámico. La metodología consistió en realizar simulaciones de estos tres métodos para comparar cómo cada uno de ellos predecía el comportamiento estructural del pabellón frente a un sismo. Los resultados mostraron que el análisis es más preciso (desplazamiento máximo 20% mayor al estimado por Pushover). Concluyó que el análisis modal y espectral es el más adecuado para evaluar la respuesta sísmica de edificios escolares, ya que proporciona una representación realista del comportamiento ante terremotos.

La diferencia con la tesis es que no diseña/refuerza con FRP ni optimiza; la tesis incorpora FRP y optimización con IA. Su mayor aporte a nuestra tesis es que demuestra que el tiempo-historia más que métodos simplificados, lo que apoya nuestra decisión de usar NLTHA en ETABS para evaluar el desempeño antes y después del refuerzo, y nos guía en no conformarnos con un solo método, sino en justificar por qué escogemos el más exigente, y en definir qué observar: desplazamientos/derivas como medida de respuesta.

En la investigación de Gastulo & Puyen (2024) “Evaluación del comportamiento sísmico de la I.E. N° 10022 Miguel Muro Zapata”, se usó un

análisis modal y espectral para simular el comportamiento sísmico de la estructura escolar, donde se determinó que es altamente vulnerable ante sismos moderados, llegando a desplazarse hasta 10 cm en las columnas principales, lo que representa un riesgo de colapso. Concluyó que es necesario aplicar técnicas de refuerzo estructural como el uso de FRP para mejorar el comportamiento sísmico de estas edificaciones, especialmente en zonas de alta sismicidad. La diferencia es que no llega a reforzar ni optimizar; la tesis diseña FRP y optimiza con GA, comparando sin/con FRP.

Gastulo & Puyen (2024) también informa que incluso sismos moderados pueden generar demandas significativas, utilizando como indicador desplazamientos en columnas, justificando el reforzamiento y mencionando al FRP como una alternativa; nuestra tesis toma esa base, pero va más allá: diseña el FRP y lo optimiza con GA/IA para comparar "sin vs con" refuerzo.

Según Otero & Díaz (2022) en su estudio: “Influence of the aspect ratio on seismic performance of adobe buildings”, analizó cómo la relación altura/base afecta el comportamiento sísmico de las edificaciones de adobe. Mediante un análisis no lineal, se determinó que las estructuras con mayor relación altura/base tienen un 18% más de probabilidad de colapsar durante un sismo de magnitud 6, demostrando que no solo la resistencia es importante en zonas sísmicas, sino también la forma en que se diseñen los edificios, por lo que se recomienda reforzar las estructuras para hacerlas seguras.

Aunque su análisis sea en adobe, la idea se puede replicar en un colegio de concreto armado revisando irregularidades y relaciones de deriva. A diferencia del estudio, no es colegio RC ni optimización con IA; la tesis aplica FRP+GA en colegio RC.

Saenz & De la Cruz (2023), proveen un ejemplo de reforzamiento medido con análisis no modal y espectral, demostrando que un análisis computacional puede cuantificar mejoras reales, siendo su principal contribución la demostración de que los materiales compuestos disminuyen significativamente los

desplazamientos laterales (control de derivas); además, refuerzan que no es suficiente el reforzamiento "en papel", sino que debe medirse en casos reales antes y después.

2.1.2 Internacional

En el estudio de Saldaña & Scaletti (2022) en su “Eficiencia de disipadores de energía en la respuesta sísmica de edificios”, se analizó la eficiencia de los disipadores de energía en la respuesta sísmica de edificios, demostrando que las estructuras con disipadores redujeron en un 22% los desplazamientos máximos y en un 30% las fuerzas internas en comparación con las estructuras sin disipadores, concluyendo que los disipadores son una solución efectiva para disminuir los efectos de los sismos, reduciendo daños estructurales y mejorando la seguridad. La diferencia con la tesis es la tecnología utilizada (disipadores, no FRP) y la ausencia de IA; la tesis usa FRP y optimización. Para nuestra investigación, nos sirve como evidencia de que una intervención bien planteada puede reducir la demanda estructural y, por ende, el daño esperado; aunque la tecnología sea diferente al FRP, la idea principal es la comparación “sin vs con” y el uso de indicadores como desplazamientos y esfuerzos.

El estudio de Valenzuela (2024) en su “Desempeño sísmico mediante análisis estático no lineal Pushover en proyectos de salud en Ayacucho, 2024”, comparó dos métodos de análisis en edificaciones de centros de salud en Ayacucho, demostrando que el análisis da una estimación más precisa de los desplazamientos y la capacidad sísmica de los edificios, con un desplazamiento máximo de 12 cm en el centro de salud más vulnerable. Concluyó que el análisis debería ser el método por defecto para evaluar la seguridad sísmica en proyectos de salud. A diferencia del estudio, sin FRP ni IA y en otra tipología, la tesis aplica TH+FRP+IA en colegio. Valenzuela, 2018, realiza una comparación entre pushover y modal y espectral, donde se predice mejor los desplazamientos y la capacidad sísmica. Para nuestra investigación, eso refuerza que usar NLTHA en ETABS es la mejor manera de evaluar el desempeño del edificio. También nos deja un criterio práctico: los

desplazamientos máximos como señal para identificar el caso más vulnerable y priorizar la intervención. Uso de materiales compuestos reforzados con fibras (FRP) para reforzar estructuras de concreto reforzado, se evaluó la capacidad del FRP para reforzar estructuras de concreto, demostrando que las estructuras reforzadas con FRP mejoraron su resistencia sísmica en un 25% en comparación con las no reforzadas. Concluyó que el FRP es una solución para mejorar el comportamiento sísmico, reforzando sin aumentar significativamente los costos de construcción. La diferencia con la tesis es que se demostró la eficacia del FRP, pero sin optimización IA ni caso práctico de colegio con TH comparativo como en la tesis. Eso nos da soporte técnico para demostrar que el FRP no es solo una idea, sino una alternativa con mejoras reales, y que puede ser eficiente sin aumentar mucho los costos, enlazándose con la parte económica de nuestro estudio.

El estudio de Vélez (2019) llamado Reforzamiento de estructuras de concreto armado con polímeros reforzados con fibras (FRP) analizó estructuras de dos niveles reforzadas con FRP, mejorando su resistencia sísmica en un 18% en el desplazamiento durante un temblor. Las conclusiones dijeron que usar FRP para reforzar estructuras de concreto armado es una manera de mejorar la seguridad sísmica en edificios bajos y medianos, pero el estudio solo tiene un alcance pequeño (2 niveles), sin IA y no escolar; la tesis aplica FRP+TH+GA en colegio multiestrato. Vélez también proporcionó un buen antecedente de que reforzar estructuras de concreto armado con FRP mejora su comportamiento sísmico, reduciendo desplazamientos en un temblor; para nuestra investigación, es una base técnica para justificar que el FRP reduce la respuesta lateral y, por ende, la demanda en elementos principales. También refuerza que este tipo de intervención es más aplicable en edificaciones bajas y medianas, donde el refuerzo puede ser más directo y eficaz.

En el estudio de Villavicencio (2021), se comparó el comportamiento sísmico de un edificio convencional con uno reforzado con disipadores viscoelásticos, reduciendo en un 28% los desplazamientos horizontales del edificio con disipadores y mejorando su desempeño ante sismos. Las conclusiones

mostraron que los disipadores son efectivos para mejorar la resistencia sísmica y proteger las estructuras durante un terremoto severo."A diferencia del estudio, la tecnología es diferente (disipadores, no FRP) y sin IA; la tesis usa FRP y optimización con IA en colegio". "Villavicencio es un buen antecedente porque demuestra cómo una intervención estructural puede disminuir significativamente los desplazamientos horizontales. Para nuestra investigación sirve como antecedente en el sentido de que se puede comparar escenarios (edificio convencional vs edificio reforzado) con indicadores de respuesta definidos. Además, verifica que el tiempo-historia es una herramienta capaz de evidenciar mejoras reales en el desempeño sísmico ante temblores severos".

2.2 BASES TEÓRICAS DEL CAMBIO PLANEADO

2.2.1 Delimitación conceptual y alcance del marco teórico

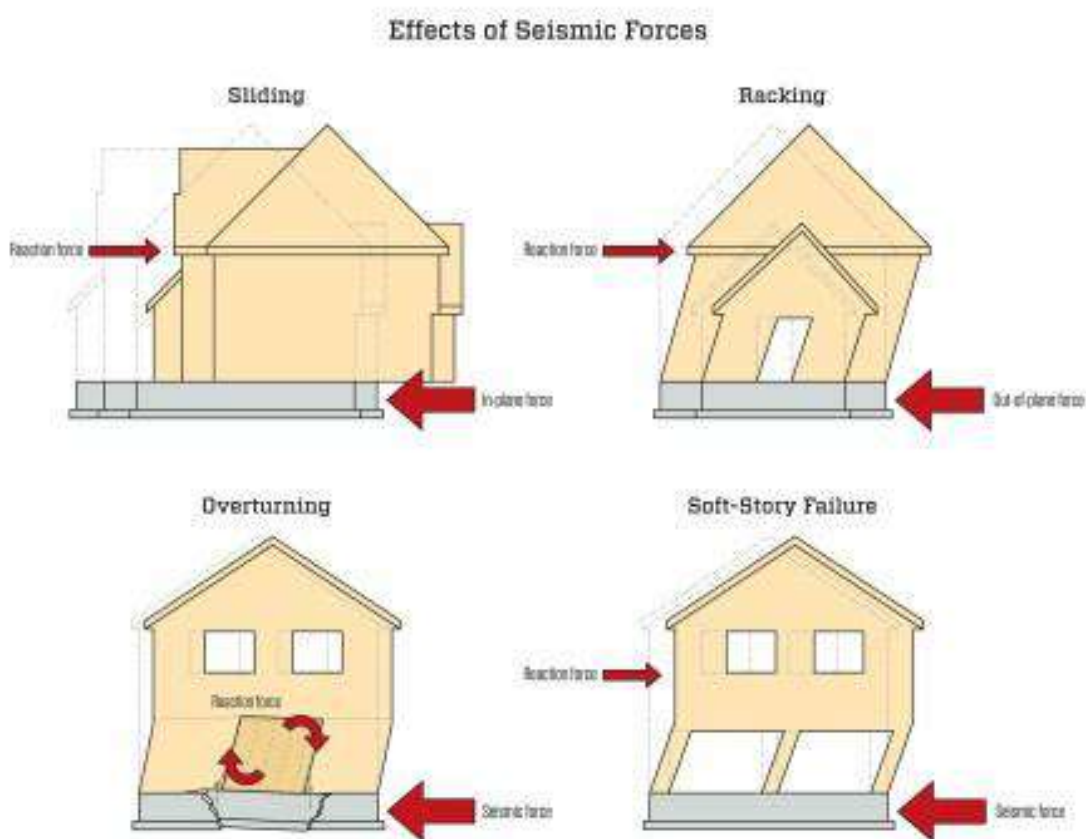
El marco teórico de la presente investigación se estructura desde una perspectiva de ingeniería sísmica aplicada, con énfasis en la relación entre amenaza, demanda estructural, capacidad resistente y optimización de alternativas de reforzamiento. El problema no se reduce a identificar si un edificio escolar resiste o no un sismo severo, sino a comprender de qué manera las variables normativas, mecánicas y computacionales influyen en la selección de una estrategia de intervención técnicamente válida. En ese contexto, la Norma Técnica E.030 aporta el umbral reglamentario mínimo, ETABS brinda el entorno de modelación para cuantificar la respuesta global y local, mientras que el algoritmo genético permite explorar combinaciones de reforzamiento que difícilmente serían evaluadas de forma exhaustiva por procedimientos convencionales. Esta articulación exige una base teórica capaz de justificar parámetros, procedimientos y criterios de evaluación con suficiente trazabilidad académica.

Desde la metodología de la investigación, el marco teórico no solo cumple una función descriptiva, sino explicativa y operativa. Explicativa, porque delimita los conceptos que gobiernan el comportamiento sísmico de estructuras de concreto

armado; y operativa, porque traduce dichos conceptos en indicadores observables, ecuaciones interpretables y decisiones de modelado reproducibles. En una investigación aplicada sobre colegios existentes, el valor del sustento teórico radica en demostrar por qué determinadas variables, como la deriva de entrepiso, la masa modal participante, la estabilidad P-Delta o la deformación efectiva del FRP, resultan relevantes para diagnosticar la vulnerabilidad y comparar soluciones de reforzamiento. Por ello, en los subcapítulos siguientes se integran fundamentos normativos, mecánicos y computacionales con una redacción orientada a la consistencia técnica del estudio.

2.2.2 Sismorresistencia en edificaciones educativas de concreto armado

Figura 5



Efectos básicos de las fuerzas sísmicas sobre edificaciones

Nota. Imagen referencial utilizada para ilustrar deslizamiento, volcamiento, racking y falla de piso blando. Fuente: JLC Staff (2022), "Earthquake-Resilient Buildings", Builder Online / Journal of Light Construction. https://www.builderonline.com/building/structure-durability/earthquake-resilient-buildings_s

Las edificaciones educativas de concreto armado constituyen una tipología especialmente sensible dentro de la gestión del riesgo sísmico, debido a la alta concentración de usuarios, a la necesidad de continuidad operativa posterior al evento y a la responsabilidad social asociada a su funcionamiento. En ellas, el diseño o la evaluación no pueden limitarse al criterio elemental de resistencia lateral, porque el desempeño esperado exige también control de desplazamientos,

reducción del daño no estructural, protección de rutas de evacuación y preservación de elementos funcionales esenciales. Esta condición explica por qué la literatura contemporánea sobre desempeño sísmico insiste en analizar simultáneamente amenaza, vulnerabilidad y consecuencias, en lugar de considerar la estructura como un sistema aislado de su uso. La lectura académica del problema, por tanto, exige abordar la seguridad estructural desde una visión sistémica y no solamente resistente (Du et al., 2023).

En el caso de colegios existentes, el análisis de sismorresistencia adquiere mayor complejidad porque el sistema estructural real puede diferir del proyecto original, presentar irregularidades acumuladas por ampliaciones, deterioro en elementos de concreto y acero, y detalles de confinamiento incompatibles con exigencias sísmicas modernas (Mosoarca et al., 2025). FEMA explica que el desempeño de una edificación se entiende como la combinación entre la severidad de la excitación, la respuesta del sistema y las consecuencias esperadas en términos de daño, pérdidas y funcionalidad. Tal enfoque resulta pertinente para esta investigación, pues permite justificar que el reforzamiento no debe evaluarse únicamente por el incremento de resistencia, sino por su capacidad para disminuir derivas, reducir concentraciones de daño y mejorar la estabilidad global del edificio escolar durante y después del sismo de diseño (Bommer, 2022).

2.2.3 Parámetros normativos de la E.030

La Norma Técnica E.030 establece el marco reglamentario que define la acción sísmica de diseño en el Perú y, por ende, constituye el punto de partida obligatorio para cualquier evaluación o reforzamiento estructural. Sus parámetros no actúan como valores aislados, sino como componentes de una cadena lógica que traduce la peligrosidad regional, la importancia funcional de la edificación, las características del suelo y la capacidad de disipación inelástica del sistema resistente en una demanda lateral de diseño (Siddika et al., 2020). En una edificación educativa, esta cadena es especialmente relevante porque el factor de uso incrementa la exigencia mínima admisible y obliga a interpretar con mayor

rigor tanto la cortante basal como el control de derivas y la compatibilidad entre análisis estático y dinámico. El investigador debe documentar explícitamente cada parámetro para garantizar reproducibilidad metodológica (Angiolilli et al., 2021).

Ecuación 1: Fuerza cortante basal estática equivalente

$$V = \left(\frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \right) \cdot P \quad Ec. (1)$$

La expresión anterior sintetiza el paso desde la amenaza sísmica regional hasta la demanda lateral global de diseño. Su utilidad teórica en la investigación consiste en identificar de forma trazable cuales variables normativas condicionan la exigencia inicial sobre el edificio escolar y, por tanto, sobre cualquier estrategia de reforzamiento que se pretenda optimizar.

Donde:

- V es la cortante basal de diseño que representa la fuerza lateral total equivalente aplicada al edificio.
- Z es el factor de zona sísmica, asociado a la peligrosidad sísmica regional.
- U es el factor de uso o importancia, que aumenta la exigencia para edificaciones esenciales o de ocupación intensiva.
- C es el coeficiente de amplificación sísmica vinculado al comportamiento del espectro y al periodo de la estructura.
- S es el factor de suelo, que incorpora el efecto de amplificación según el perfil geotécnico.
- R es el factor de reducción por ductilidad, sobre resistencia y redundancia del sistema estructural.
- P es el peso sísmico de la edificación, integrado por cargas

permanentes y fracciones normativas de sobrecarga.

En términos interpretativos, un incremento de Z, U o S eleva la demanda basal, mientras que una mayor capacidad dúctil expresada por R reduce la fuerza elástica equivalente llevándola a un nivel compatible con el comportamiento inelástico esperado. Esta lectura es clave para entender por qué el reforzamiento no debe analizarse fuera del marco normativo que define la demanda mínima exigible.

Ecuación 2: Deriva relativa de entrepiso

$$IDR_i = \frac{\Delta_i}{h_i} \quad Ec (2)$$

La deriva relativa es uno de los indicadores más sensibles para evaluar el desempeño sísmico de edificaciones de concreto armado, porque vincula de manera directa la deformación global del sistema con el daño probable en elementos estructurales y no estructurales. En investigaciones de reforzamiento resulta especialmente valiosa, ya que permite localizar pisos críticos y medir la eficacia de una intervención mas allá del simple incremento de resistencia.

Donde:

- IDR_i es la deriva relativa del entrepiso i.
- Δ_i es el desplazamiento relativo entre dos niveles consecutivos del edificio.
- h_i es la altura del entrepiso correspondiente.

Cuando la deriva excede los límites admisibles de la E.030, la estructura puede presentar daños excesivos, afectación funcional e incluso mecanismos de inestabilidad local. Por esa razón, el algoritmo genético debe tratar este indicador como una restricción central o como un término dominante en la función objetivo, evitando soluciones económicamente atractivas, pero normativamente inviables (Khodadadi et al., 2024).

Ecuación 3: Compatibilidad entre análisis dinámico y estático

$$V_{din} \geq 0.80.V_{est} \quad Ec \quad (3)$$

La comparación entre la respuesta dinámica y la estática permite verificar que el análisis modal espectral conserve coherencia con la demanda mínima definida por el método simplificado. En la literatura de modelación estructural, esta verificación se considera un filtro de calidad del modelo, ya que una cortante dinámica excesivamente baja suele revelar problemas de masas, modos insuficientes, espectros mal definidos o errores en la asignación de rigidez.

Donde:

- V_{din} es la cortante basal obtenida mediante análisis dinámico modal espectral.
- V_{est} es la cortante basal obtenida mediante el procedimiento estático equivalente.
- 0.80 es el umbral normativo mínimo de compatibilidad establecido para evitar subestimación de la respuesta dinámica.

Para un esquema de optimización automatizada, esta condición adquiere un valor metodológico adicional: si el modelo base subestima la demanda, todas las alternativas evaluadas por el algoritmo genético quedarían sesgadas hacia reforzamientos artificialmente ligeros. Por ello, el control de compatibilidad no solo valida el análisis, sino la confiabilidad del proceso de búsqueda.

2.2.4 Indicadores de sismicidad y estabilidad estructural

Además de la cortante basal y de la deriva, la evaluación sísmica de una edificación escolar requiere indicadores que describan la forma en que la masa y la rigidez participan en la respuesta dinámica del edificio. Entre los más importantes destacan el periodo fundamental, la masa modal acumulada, la distribución de derivas por

nivel, la presencia de torsión y el índice de estabilidad P-Delta. Estos parámetros permiten diferenciar entre una estructura simplemente flexible y una estructura vulnerable por irregularidad, concentración de deformaciones o pérdida de capacidad estabilizante. Desde la perspectiva metodológica, su inclusión fortalece la variable dependiente del estudio, porque aporta una lectura multidimensional del desempeño y evita reducir el diagnóstico a un único valor de resistencia o desplazamiento global.

Ecuación 3: Acumulación de masa modal participante

$$M_{acum,n} = \sum_{j=1}^n M_j \quad Ec (3)$$

La masa modal acumulada se emplea para verificar que el número de modos incluidos en el análisis represente adecuadamente la dinámica global del edificio. Un porcentaje acumulado insuficiente implica que parte de la respuesta queda fuera del modelo modal y, en consecuencia, puede inducir errores en la estimación de fuerzas y desplazamientos.

Donde:

- $M_{acum,n}$ es la masa modal acumulada hasta el modo n en la dirección analizada.
- M_j es la fracción de masa participante correspondiente al modo j .
- n es el número de modos considerados en el análisis.

En un colegio de varios niveles o con distribución irregular de masas, esta comprobación es esencial porque ciertos modos superiores o torsionales pueden contribuir de manera significativa. La investigación debe dejar constancia del umbral adoptado y del número final de modos incluidos, ya que ello condiciona la calidad del diagnóstico y de la optimización.

Ecuación 4: Índice simplificado de estabilidad P-Delta

$$\theta_{(P\Delta,i)} = \frac{P_i \cdot \Delta_i}{(V_i \cdot h_i)} \quad Ec (4)$$

Esta relación expresa de forma resumida el equilibrio entre el efecto desestabilizante generado por la carga vertical actuando sobre una estructura desplazada y la capacidad estabilizante asociada a la resistencia lateral del entrepiso. Aunque su formulación detallada puede variar según el enfoque normativo, el índice resulta apropiado como herramienta de interpretación en el marco teórico y como indicador complementario de vulnerabilidad.

Donde:

- $\theta_{(P\Delta,i)}$ es el índice simplificado de estabilidad del entrepiso i.
- P_i es la carga vertical gravitacional actuante en el entrepiso i.
- Δ_i es el desplazamiento relativo del entrepiso i.
- V_i es la fuerza cortante de entrepiso asociada a la respuesta lateral.
- h_i es la altura del entrepiso i.

Valores elevados de este cociente sugieren susceptibilidad a efectos de segundo orden, especialmente en pisos blandos o en configuraciones donde el reforzamiento local no modifica de manera suficiente la rigidez global. La investigación debe, por tanto, considerar este indicador al momento de decidir si el FRP se usa como mejora localizada o si se requieren intervenciones complementarias sobre el sistema resistente principal.

Tabla 1

Correspondencia entre parámetros normativos e indicadores del estudio

Parámetro	Función técnica en la investigación	Indicador asociado
Z	Define el nivel base de amenaza sísmica que	Cortante basal de diseño

Parámetro	Función técnica en la investigación	Indicador asociado
	condiciona la demanda lateral.	
U	Incrementa la exigencia por importancia funcional del edificio escolar.	Demanda basal y criterio conservador
S	Introduce el efecto del suelo sobre la amplificación espectral.	Espectro de respuesta y derivas
R	Representa la capacidad de disipación inelástica del sistema.	Fuerza de diseño y sensibilidad del reforzamiento
IDR	Controla deformaciones laterales y daño esperado.	Deriva máxima por piso
θ_{PA}	Evalúa estabilidad de segundo orden.	Susceptibilidad a inestabilidad global

Nota. La tabla resume la trazabilidad entre entradas normativas y salidas de evaluación, de modo que cada criterio pueda ser incorporado en la interpretación de resultados y en la función objetivo del algoritmo genético.

2.2.5 Modelación estructural y análisis dinámico con ETABS

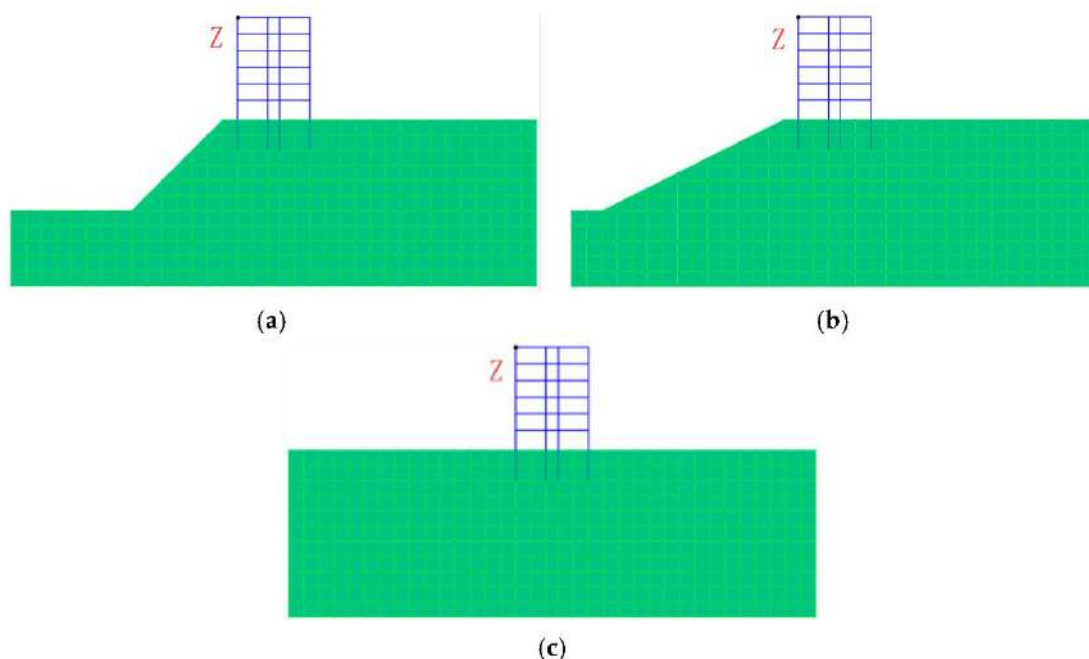
ETABS es una plataforma de modelación y análisis ampliamente utilizada en edificios de concreto armado, pero su validez investigativa depende de la calidad con la que se definan la geometría, las propiedades de masa y rigidez, los diafragmas, las condiciones de borde y los casos de carga. La salida numérica del software no posee valor por sí misma si no está respaldada por decisiones de modelado explícitamente justificadas. En un estudio sobre reforzamiento sísmico, esta exigencia es aún mayor porque pequeñas variaciones en rigidez efectiva, distribución de masas o restricción de apoyos pueden modificar periodos, derivas y fuerzas internas, afectando directamente la evaluación comparativa entre alternativas. Por ello, la teoría de modelación debe asumirse como parte integral del marco conceptual y no solo como un procedimiento instrumental (Xu et al., 2023).

La literatura técnica de CSI indica que el análisis espectral se apoya en una etapa modal previa y en reglas de combinación como CQC o SRSS, cuya pertinencia depende del espaciamiento modal y del comportamiento global del edificio. Esta secuencia refleja una idea central para la investigación: el software

opera sobre una representación matemática idealizada que necesita ser cuidadosamente calibrada para aproximarse al sistema físico. En consecuencia, la lectura de los resultados debe incluir controles de consistencia, como la masa modal acumulada, la compatibilidad de cortantes, la revisión de formas modales y la comparación entre drafts y zonas esperadas de daño. Solo bajo esa disciplina el modelo puede ser usado como base confiable para el algoritmo genético (Zhu et al., 2024).

Figura 6

Modelo numérico de interacción suelo–estructura



Nota. Imagen referencial del modelo de elementos finitos con configuración de pendiente y superestructura. Fuente: Song, P., Guo, S., Zhao, W., & Xin, Q. (2023), “Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures Considering Slope Effects”, Applied Sciences, 13(8), 5149. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/8/5149>

2.2.6 Secuencia procedimental mínima en ETABS

El desarrollo de un modelo estructural coherente en ETABS puede organizarse en una secuencia procedimental mínima: definición de unidades, ingreso de grillas y niveles, declaración de materiales, configuración de secciones, modelado de elementos frame y shell, asignación de diafragmas, cargas gravitacionales, masas

sísmicas, combinaciones y casos de análisis modal y espectral. Cada una de estas etapas debe registrarse metodológicamente, ya sea mediante capturas, tablas de parámetros o anexos, porque en una investigación aplicada la reproducibilidad del modelo forma parte de la calidad científica del estudio. Una secuencia incompleta o mal documentada impide discernir si las diferencias entre alternativas de reforzamiento provienen del fenómeno estructural o de cambios no controlados en la configuración del software.

Ecuación 5: Período natural equivalente de un sistema idealizado

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{m / k}$$

Esta expresión corresponde a un sistema idealizado de un grado de libertad y se introduce en el marco teórico como recurso de interpretación física del resultado modal. Su utilidad no consiste en sustituir el análisis propio de ETABS, sino en explicar cómo la respuesta estructural varía cuando cambian la masa o la rigidez equivalente del sistema.

Donde:

- T es el período natural asociado al sistema idealizado.
- m es la masa efectiva del sistema.
- k es la rigidez lateral equivalente.
- 2π es la constante de conversión entre frecuencia angular y período.

Si el reforzamiento incrementa predominantemente la rigidez lateral, el período tenderá a reducirse; si, por el contrario, los cambios en la rigidez global son menores, la variación del período será limitada y el beneficio se concentrará en resistencia local o confinamiento. Esta lectura ayuda a interpretar la verdadera contribución del FRP y de otras alternativas de intervención.

Ecuación 6: Factor de participación modal efectivo

$$\Gamma_j = \frac{\varphi_j^T \cdot M}{\varphi_j^T \cdot M \cdot \varphi_j} \quad Ec (6)$$

El factor de participación modal cuantifica en qué medida un modo determinado contribuye a la respuesta global en la dirección de análisis. En edificios regulares, los primeros modos traslacionales suelen concentrar la mayor parte de la participación; en estructuras irregulares, pueden aparecer modos torsionales o combinados con contribución temprana (Bantis et al., 2025).

Donde:

- Γ_j es el factor de participación modal del modo j.
- φ_j es el vector de forma modal del modo j.
- M es la matriz de masas del sistema estructural.
- 1 es el vector de influencia en la dirección excitada.
- φ_j^T representa la traspuesta del vector modal.

Para el caso de estudio, la revisión de este parámetro permite interpretar si la configuración del colegio presenta acoplamientos no deseados entre traslación y torsión, y si el reforzamiento propuesto corrige o mantiene tales tendencias. Desde el punto de vista metodológico, es un indicador que robustece la lectura de la respuesta más allá del simple valor de deriva máxima.

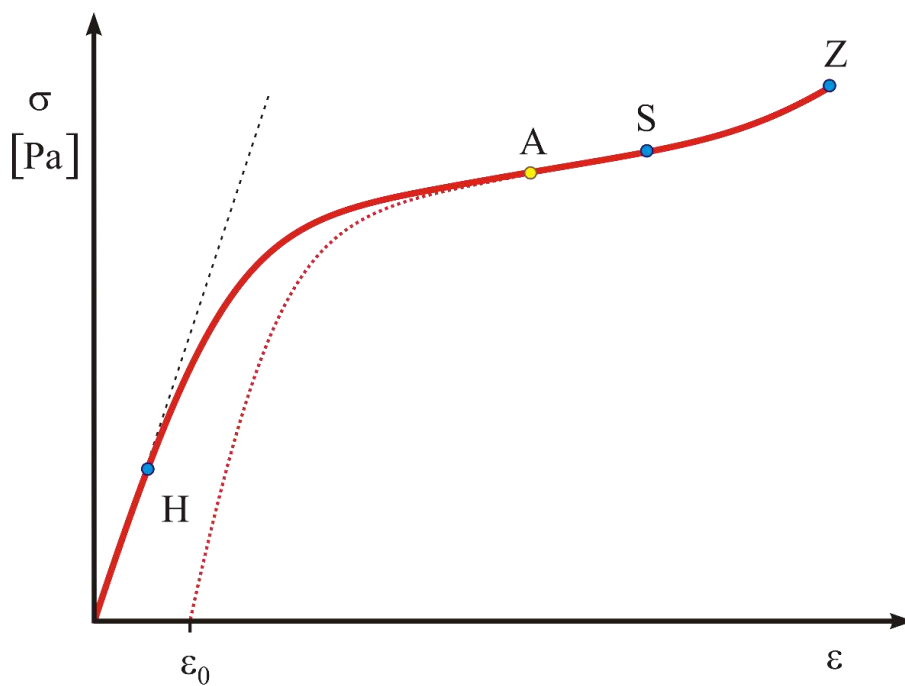
2.2.7 Análisis modal, espectral y control de resultados

El análisis modal debe cerrarse con la revisión de periodos principales, formas modales, participaciones de masa y eventual aparición de torsión significativa. Sobre esta base, el análisis espectral permite estimar respuestas máximas compatibles con el espectro de la E.030, siempre que las reglas de combinación modal y escalamiento se apliquen correctamente. En una investigación

comparativa, los resultados mínimos a registrar son cortante basal, derivas por nivel, desplazamientos globales, fuerzas internas en elementos críticas y cambios en la distribución de rigidez relativa. Este conjunto de salidas constituye la interfaz entre el software y el algoritmo genético, pues son precisamente esos indicadores los que alimentan la función de aptitud o fitness. Por eso, cada iteración del modelo debe producir una base de datos estructural consistente y comparable (Liu et al., 2024).

2.2.8 Comportamiento de materiales y criterios de asignación en el software

Figura 7



Curva esfuerzo–deformación para interpretación constitutiva

Nota. Imagen referencial de una curva esfuerzo–deformación genérica empleada como apoyo visual para la discusión constitutiva de materiales. Fuente: Mpfiz (2008), “Stress strain curve.svg”, Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stress_strain_curve.svg

La representación de materiales en el software debe ser suficientemente refinada para captar las diferencias mecánicas esenciales entre concreto, acero de refuerzo y sistemas FRP, pero al mismo tiempo lo bastante parsimoniosa para mantener estabilidad numérica y comparabilidad entre iteraciones. En investigación aplicada, el equilibrio entre realismo y operatividad es crucial: un modelo demasiado simplificado puede ocultar vulnerabilidades, mientras que un modelo excesivamente complejo puede introducir parámetros difícilmente verificables o incompatibles con el alcance del estudio. Por ello, la selección de propiedades debe justificarse con base en normas, literatura técnica y disponibilidad de información del caso real. Esta justificación constituye una pieza central del marco teórico, porque conecta el comportamiento material con la validez de las decisiones adoptadas en ETABS y en el esquema de optimización (Meniz & Tiryaki, 2025).

2.2.9 Concreto y acero de refuerzo

En estructuras de concreto armado existentes, el comportamiento mecánico depende tanto de las propiedades intrínsecas de los materiales como del estado de agrietamiento, la calidad constructiva y el nivel de deterioro acumulado. Para fines de modelación global, resulta habitual utilizar un módulo elástico inicial del concreto y aplicar modificadores de rigidez que representen la pérdida de inercia efectiva por fisuración, especialmente en vigas y columnas sometidas a flexión. Esta práctica se justifica porque la rigidez agrietada influye de manera decisiva en los periodos, las derivas y la distribución de fuerzas internas. De forma complementaria, el acero se modela de manera idealizada mediante una ley elastoplástica bilineal, suficiente para interpretar la contribución resistente y la ductilidad disponible en el intervalo de respuesta esperado.

Ecuación 7: Módulo de elasticidad del concreto de uso frecuente

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c}$$

La expresión se usa con frecuencia para obtener una estimación inicial de la rigidez elástica del concreto cuando no se dispone de ensayos directos del módulo.

En el contexto de la tesis, sirve para transparentar el valor de rigidez empleado en la modelación inicial y su consistencia con el expediente técnico del colegio.

Donde:

- E_c es el módulo de elasticidad del concreto, expresado usualmente en MPa.
- f_c es la resistencia especificada a compresión del concreto, en MPa.
- 4700 es el coeficiente empírico usado para estimar la rigidez elástica inicial del material.

No obstante, el investigador debe distinguir entre modulo elástico inicial y rigidez efectiva de los elementos estructurales. Aunque el valor de E_c provenga de una correlación aceptada, el comportamiento global del edificio puede requerir modificadores por agrietamiento para representar de manera más realista la flexibilidad lateral observada o esperada.

Ecuación 8: Ley bilineal idealizada del acero

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad \text{si } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad ; \quad \sigma_s = f_y \quad \text{si } \varepsilon_s > \varepsilon_y$$

La formulación resume una idealización elastoplástica con endurecimiento despreciado en primera aproximación. A nivel teórico, resulta suficiente para explicar que el acero aporta rigidez en el tramo inicial y ductilidad una vez alcanzada la fluencia.

Donde:

- σ_s es el esfuerzo del acero de refuerzo.
- E_s es el módulo de elasticidad del acero.
- ε_s es la deformación unitaria del acero.

- ϵ_y es la deformación de fluencia.
- f_y es el esfuerzo de fluencia del acero.

En edificios escolares existentes, esta interpretación es relevante porque la ductilidad real del sistema puede estar limitada por cuantías inadecuadas, confinamiento deficiente o detalles constructivos no conformes con reglamentos modernos. Por ello, el reforzamiento debe analizarse en términos de capacidad global y no solo como incremento nominal de resistencia.

Tabla 2

Parámetros sugeridos de material y modelación

Material	Parámetro mínimo a declarar	Justificación técnica
Concreto	f_c , E_c , peso unitario y modificadores de rigidez	Permite representar resistencia, masa sísmica y efecto de agrietamiento sobre derivas y periodos.
Acero	f_y , E_s y ley bilineal idealizada	Sustenta la capacidad resistente y la ductilidad disponible en la respuesta inelástica conceptual.
FRP	E_f , t_f , ϵ_{fe} y número de capas	Define el aporte efectivo a flexión, corte o confinamiento bajo criterios de adherencia y deformación límite.
Modelo ETABS	Diafragma, masas, apoyos y casos de carga	Asegura consistencia entre la representación numérica y el comportamiento estructural esperado.

Nota. Los valores específicos deben ajustarse al expediente del colegio, ensayos disponibles y fichas técnicas del proveedor, pero la trazabilidad de estas variables es indispensable para la replicabilidad del estudio.

2.2.10 FRP: mecanismos resistentes y criterios de diseño preliminar

Los sistemas de polímeros reforzados con fibra se emplean en reforzamiento estructural por su elevada relación resistencia-peso, su baja interferencia arquitectónica y su capacidad para incrementar resistencia a flexión, corte o

confinamiento cuando existe una adecuada transferencia de esfuerzos entre sustrato, adhesivo y fibra. Sin embargo, la eficacia del FRP no depende exclusivamente de la resistencia nominal del material, sino de la deformación efectiva realmente movilizable antes de que ocurran fallas de adherencia, delaminación, concentración de tensiones o desprendimiento prematuro. Por esta razón, documentos como ACI 440.2R y fib Bulletin 90 recomiendan trabajar con esfuerzos o deformaciones efectivas de diseño, y no con los valores últimos puros del fabricante. Esta distinción es fundamental para construir un marco teórico técnicamente sólido (Sberna et al., 2023).

Ecuación 9: Esfuerzo efectivo en el FRP

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}$$

La expresión refleja que la contribución del FRP en el rango elástico depende directamente de la rigidez propia de la fibra y de la deformación efectiva alcanzable. En la práctica, ε_{fe} debe limitarse para evitar fallas prematuras de adherencia o delaminación.

Donde:

- f_{fe} es el esfuerzo efectivo desarrollado por el FRP durante la acción resistente.
- E_f es el módulo de elasticidad de la fibra.
- ε_{fe} es la deformación efectiva de diseño que puede mobilizarse sin activar una falla prematura de adherencia o delaminación.

En el marco de la investigación, esta ecuación justifica que el algoritmo genético no puede seleccionar soluciones con base exclusiva en el número de capas o en la resistencia nominal del producto. Debe considerar, además, la viabilidad mecánica de movilizar dicha capacidad bajo condiciones reales de adherencia y detallado.

Ecuación 10: Fuerza de tracción aportada por el FRP

$$T_f = A_f \cdot f_{fe}$$

Esta relación se utiliza para interpretar el aporte del FRP adherido en la zona traccionada de vigas o elementos equivalentes. Desde el punto de vista de la tesis, permite relacionar el número de capas y el ancho efectivo del refuerzo con una fuerza resistente físicamente interpretable.

Donde:

- T_f es la fuerza de tracción aportada por el FRP en la sección reforzada.
- A_f es el área efectiva del material compuesto dispuesto para resistir tracción.
- f_{fe} es el esfuerzo efectivo del FRP bajo condiciones de diseño.

La conveniencia de usar esta formulación en el estudio radica en que vincula directamente la decisión de diseño del algoritmo genético, por ejemplo, número de capas o ancho de banda, con un efecto mecánico interpretable. De esta manera, la optimización puede basarse en variables físicamente significativas y no en simples etiquetas discretas.

Ecuación 10: Aporte simplificado del FRP a corte

$$V_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot d_f \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s_f}$$

La ecuación resume de forma conceptual que la contribución a corte depende del volumen efectivo del compuesto, de su capacidad elástica movilizable y de la orientación de las fibras, la cual modifica la descomposición de fuerzas respecto al patrón de fisuración diagonal. Por eso, el FRP no solo es una adición de material, sino una intervención direccional cuyo desempeño depende de su

disposición geométrica.

Donde:

- V_f es la contribución del FRP a la resistencia a corte del elemento.
- t_f es el espesor del FRP por capa.
- E_f es el módulo de elasticidad de la fibra.
- ε_{fe} es la deformación efectiva de diseño del FRP.
- d_f es la altura útil o distancia efectiva asociada al mecanismo resistente.
- α es el Angulo de orientación de las fibras respecto al eje longitudinal del elemento.
- s_f es el espaciamiento entre bandas o franjas de FRP.

Para la investigación, esta lectura es importante porque la optimización puede explorar alternativas continuas o discretas, diferentes ángulos de aplicación y variaciones de espaciamiento. Cada una de esas decisiones altera el aporte resistente y, por tanto, el equilibrio entre costo, constructibilidad y mejora del desempeño sísmico.

Ecuación 11: Presión lateral efectiva por confinamiento con FRP

$$f_l = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fe}}{D}$$

El confinamiento mediante FRP incrementa la resistencia y, sobre todo, la deformabilidad del concreto comprimido, al imponer una presión lateral que restringe la expansión transversal del núcleo. Aunque la formulación se aplica con mayor claridad en secciones circulares, su valor teórico en el estudio consiste en explicar el mecanismo por el cual una envoltura puede mejorar la respuesta de

columnas críticas.

Donde:

- 1) f_l es la presión lateral efectiva de confinamiento inducida por el FRP.
- 2) n es el número de capas del sistema compuesto.
- 3) t_f es el espesor de cada capa de FRP.
- 4) E_f es el módulo de elasticidad de la fibra.
- 5) ε_{fe} es la deformación efectiva de diseño.
- 6) D es la dimensión equivalente de la sección confinada.

En términos de optimización, esta ecuación permite justificar por qué ciertas ubicaciones del reforzamiento, especialmente en columnas con elevada demanda axial o deficiencias de confinamiento, pueden ofrecer una mejora más significativa del desempeño global que intervenciones distribuidas, pero mecánicamente menos influyentes.

2.2.11 Optimización con algoritmo genético aplicada al reforzamiento sísmico

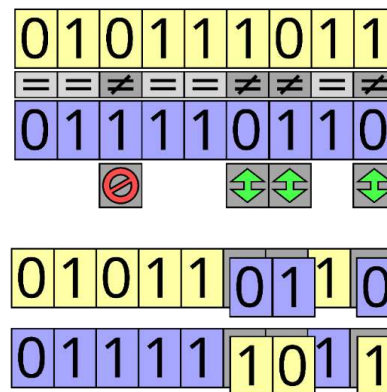
La selección del reforzamiento sísmico puede formularse como un problema de optimización combinatoria con restricciones, debido a que el investigador debe decidir simultáneamente donde intervenir, con qué tipo de material, en qué cuantía y bajo qué combinación de objetivos de seguridad y costo. Cuando el número de elementos candidatos es elevado, la enumeración completa de alternativas se vuelve impracticable. En ese escenario, los algoritmos genéticos constituyen una estrategia robusta porque imitan procesos evolutivos para explorar espacios de solución complejos, manteniendo diversidad y evitando, en cierta medida, el atrapamiento prematuro en mínimos locales. Su pertinencia en el reforzamiento sísmico de estructuras de concreto ha sido documentada por diversos autores que integran

costo, pérdida esperada y cumplimiento de restricciones de desempeño (Quéva et al., 2025).

Desde la metodología de la investigación, el algoritmo genético no es un recurso accesorio sino una herramienta que operacionaliza el supuesto central de que existen configuraciones de reforzamiento más eficientes que otras al evaluar simultáneamente varios criterios. Su inclusión exige definir con precisión la codificación del cromosoma, la función objetivo, las restricciones, el mecanismo de penalización y los criterios de convergencia. Si estas piezas no quedan teóricamente justificadas, la optimización se reduce a una búsqueda numérica opaca y difícilmente defendible. Por ello, en este marco teórico se explican las ecuaciones básicas que convierten los indicadores estructurales extraídos de ETABS en información útil para la evaluación evolutiva de cada alternativa candidata (Park et al., 2024).

Figura 8

Representación gráfica del operador en algoritmos genéticos



Nota. Imagen referencial para explicar la recombinación genética entre cromosomas en procesos evolutivos. Fuente: Josep Panadero / Yearofthedragon (2006), “Computational.science.Genetic.algorithm.Crossover.Uniform.Crossover.svg”, Wikimedia Commons.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Computational.science.Genetic.algorithm.Crossover.Uniform.Crossover.svg>

2.2.12 Codificación, función objetivo y restricciones

Una codificación practica para el caso de estudio es la representación discreta por elemento estructural o por zonas de intervención. Cada gen del cromosoma puede indicar ausencia de refuerzo, tipo de FRP, numero de capas, orientación de fibras o nivel de intervención complementaria, siempre dentro de un conjunto predeterminado de opciones constructivamente factibles. Con ello, el algoritmo trabaja sobre un espacio de búsqueda finito, pero suficientemente rico para capturar combinaciones de reforzamiento significativas. La función objetivo debe integrar indicadores de desempeño global, demanda local y costo, mientras que las restricciones normativas se incorporan como filtros o penalizaciones. Este planteamiento es especialmente adecuado cuando la investigación busca soluciones factibles y explicables, y no solo valores numéricos óptimos en sentido abstracto (Cebeci & Timur, 2025).

Ecuación 12: Función objetivo compuesta

$$F_x = w_1 \cdot D_n + w_2 \cdot M_n + w_3 \cdot C_n + P(x)$$

La expresión muestra que una solución de reforzamiento no puede valorarse únicamente por reducir costo ni exclusivamente por mejorar el desempeño de un indicador aislado. La estructura de pesos permite declarar explícitamente las prioridades del investigador y transparentar la racionalidad de la comparación entre alternativas.

Donde:

- $F(x)$ es el valor de aptitud o fitness de la solución candidata x .
- D_n es un indicador normalizado de desempeño global, por ejemplo, deriva o desplazamiento.
- M_n es un indicador normalizado de demanda local o vulnerabilidad en elementos críticas.

- C_n es un indicador normalizado de costo o consumo de material de reforzamiento.
- w_1 , w_2 y w_3 son pesos que expresan la importancia relativa de cada componente.
- $P(x)$ es el termino de penalización asociado al incumplimiento de restricciones.

En una tesis aplicada, esta formulación fortalece la consistencia metodológica porque traduce el problema conceptual de seguridad versus costo en una regla de evaluación reproducible. Además, obliga a normalizar magnitudes de distinta naturaleza para evitar sesgos por escala y facilita el análisis de sensibilidad respecto a los pesos adoptados.

Ecuación 13: Penalización por incumplimiento de deriva

$$P_{IDR(x)} = \lambda \cdot \max(0, IDR_{max}/IDR_{lim} - 1)$$

La penalización convierte una condición normativa en una regla numérica compatible con el algoritmo genético. Si la solución cumple el límite de deriva, el termino se hace cero; si lo excede, el castigo crece en proporción al grado de incumplimiento. Este procedimiento evita que individuos inviables permanezcan competitivos solo por presentar bajo costo de reforzamiento.

Donde:

- $P_{IDR(x)}$ es la penalización asociada al incumplimiento del límite de deriva.
- λ es el coeficiente de castigo que regula la severidad de la penalización.
- IDR_{max} es la máxima deriva obtenida para la solución candidata.
- IDR_{lim} es la deriva limite permitida por la normativa o por el criterio

de desempeño adoptado.

- $\max(0, \cdot)$ es el operador que anula la penalización cuando la restricción se cumple.

La calibración de λ tiene un sentido teórico importante, porque define el equilibrio entre exploración y factibilidad. Un castigo muy bajo permite la supervivencia de soluciones peligrosas; uno excesivo puede restringir en exceso la búsqueda. Por ello, el estudio debe justificar el valor adoptado y verificar su efecto sobre la convergencia del proceso evolutivo.

2.2.13 Operadores genéticos y convergencia

La selección, el cruce y la mutación son los operadores esenciales del algoritmo genético y deben elegirse de acuerdo con la naturaleza discreta del problema. La selección por torneo suele ser robusta porque combina presión evolutiva con simplicidad de implementación; el cruce uniforme o de uno o dos puntos permite recombinar soluciones parciales favorables; y la mutación preserva diversidad, lo que resulta fundamental cuando la función objetivo presenta múltiples óptimos locales. En estudios de reforzamiento estructural, la convergencia no debe evaluarse solo por la estabilización del fitness promedio, sino también por la persistencia de individuos factibles y por la repetición de patrones constructivamente coherentes. Esta mirada evita aceptar como optima una solución numéricamente estable pero técnicamente inejecutable o normativamente frágil (Shin & Park, 2022).

Ecuación 14: Probabilidad de mutación por gen

$$p_m = \frac{n_m}{n_g}$$

La ecuación permite relacionar de forma simple la intensidad de mutación con el tamaño del problema codificado. Su interpretación teórica es directa: a mayor valor de p_m , mayor exploración del espacio de soluciones; a menor valor, mayor conservación de patrones heredados por selección y cruce.

Donde:

- p_m es la probabilidad de mutación aplicada a cada gen del cromosoma.
- n_m es el número esperado de genes que experimentarían mutación en una solución.
- n_g es el número total de genes del cromosoma.

En aplicaciones estructurales, esta tasa debe ser lo bastante alta para descubrir distribuciones alternativas de reforzamiento, pero no tan alta como para destruir continuamente los esquemas que ya mostraron buen desempeño. Por ello, su valor debe justificarse como parte del diseño metodológico del algoritmo y no como una elección arbitraria.

Tabla 3

Estructura de la función objetivo y restricciones

Componente	Sentido en la optimización	Observación metodológica
D_n	Representa desempeño global, por ejemplo derivas o desplazamientos.	Debe normalizarse para compararse con costo y daño local.
M_n	Captura vulnerabilidad local en elementos o zonas críticas.	Puede incluir corte, flexión, confinamiento o estabilidad de columnas.
C_n	Expresa costo relativo, cantidad de FRP o complejidad constructiva.	Evita soluciones sobredimensionadas sin beneficio proporcional.
$P(x)$	Castiga incumplimientos normativos o constructivos.	Convierte restricciones técnicas en criterios numéricos de descarte.

Nota. La función objetivo puede formularse como problema mono objetivo penalizado o como esquema multiobjetivo; en ambos casos, la tesis debe explicar el escalamiento de variables, el origen de los pesos y el criterio de convergencia.

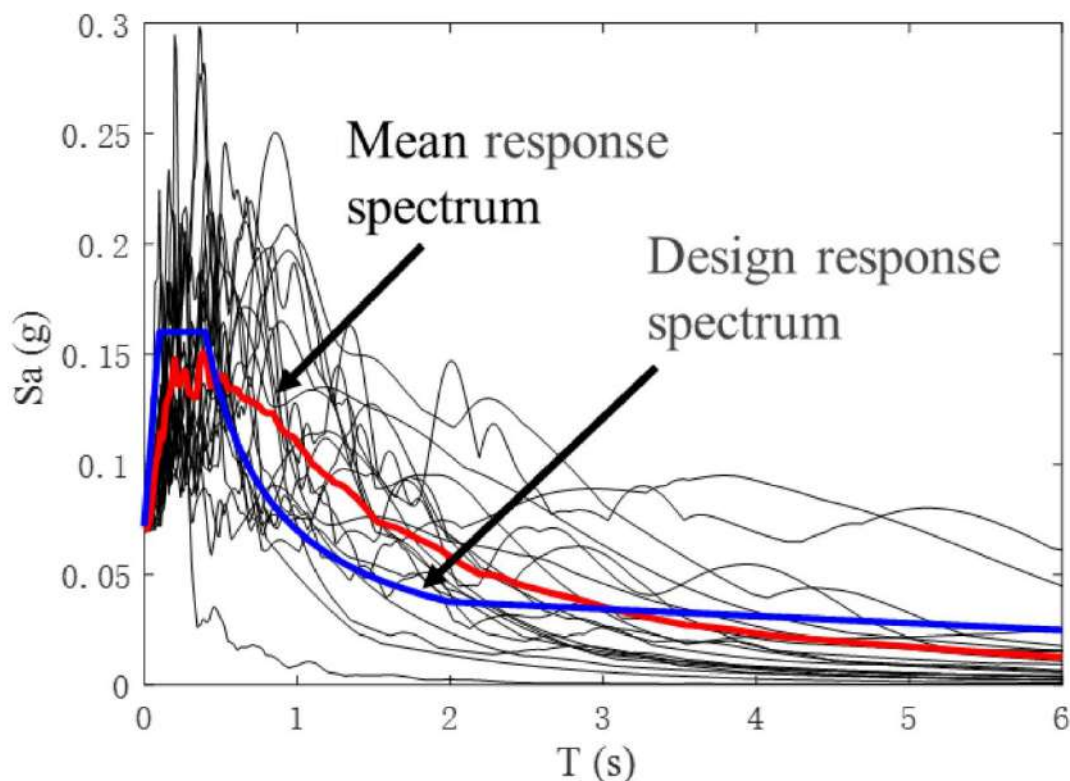
2.2.14 Integración metodológica para el caso de estudio

La contribución central del estudio radica en integrar tres planos teóricos que a menudo se tratan por separado: el plano normativo, donde la E.030 define la demanda y los límites aceptables; el plano mecánico, donde concreto, acero y FRP explican la capacidad resistente y deformacional; y el plano computacional, donde ETABS y el algoritmo genético transforman esos principios en un procedimiento reproducible de evaluación y búsqueda. Esta integración convierte el reforzamiento en un problema cuantificable, trazable y susceptible de comparación objetiva. La fortaleza metodológica de la investigación depende, por tanto, de la coherencia entre supuestos normativos, variables del modelo y reglas de optimización.

En términos operativos, cada iteración del proceso debe registrar la configuración del reforzamiento, los parámetros de material adoptados, los resultados modales y espectrales, las derivas máximas, los indicadores locales de demanda y el valor final de la función fitness. Solo con ese nivel de trazabilidad será posible sustentar porque una alternativa se considera superior a otra y demostrar que la solución seleccionada no responde a una coincidencia numérica sino a un criterio técnicamente fundamentado. Esta exigencia es coherente con la metodología de la investigación aplicada, donde la transparencia del procedimiento es tan importante como el resultado final obtenido (Shin & Park, 2022).

Figura 9

Comparación entre espectro medio de respuesta y espectro de diseño



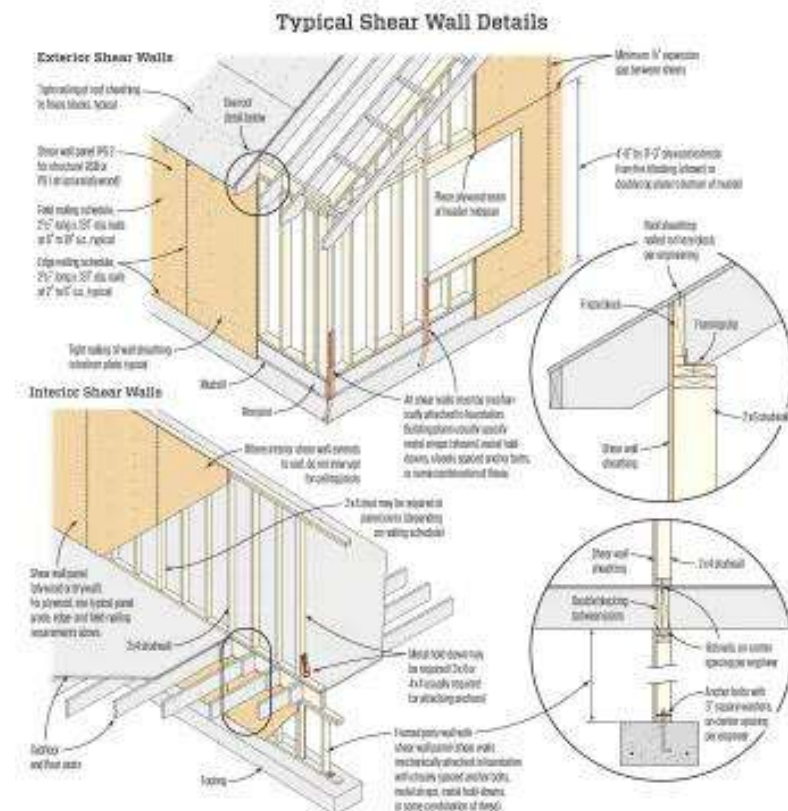
Nota. Imagen referencial de calibración espectral útil para la articulación entre amenaza sísmica, registros y evaluación estructural. Fuente: Song, P., Guo, S., Zhao, W., & Xin, Q. (2023), “Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures Considering Slope Effects”, Applied Sciences, 13(8), 5149. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/8/5149>

La revisión desarrollada permite afirmar que la evaluación sísmica y el reforzamiento óptimo de un colegio de concreto armado requieren una lectura integrada del problema estructural. La amenaza sísmica se materializa normativamente por medio de la E.030; la respuesta se cuantifica mediante un modelo estructural cuidadosamente configurado en ETABS; y la búsqueda de soluciones eficientes se operacionaliza mediante un algoritmo genético que incorpora criterios de desempeño, costo y factibilidad. De esta articulación se desprende que el valor del reforzamiento no reside solo en aumentar resistencia, sino en mejorar la respuesta dinámica global, controlar derivas, reducir vulnerabilidades localizadas y cumplir restricciones normativas de manera verificable.

Asimismo, el marco teórico demuestra que la inclusión del FRP debe justificarse a partir de mecanismos resistentes concretos, tales como aumento de capacidad a flexión, mejora a corte y confinamiento de columnas, todos ellos modulados por la deformación efectiva realmente movilizable. Desde una perspectiva metodológica, la investigación adquiere solidez cuando cada una de estas relaciones se expresa en variables observables, ecuaciones interpretables y procedimientos de modelado explícitamente documentados. En consecuencia, la presente base teórica no solo orienta la redacción del estudio, sino que establece el soporte conceptual necesario para construir el modelo analítico, definir indicadores y defender técnicamente la estrategia de optimización propuesta.

Figura 10

Detalles típicos de muros de corte y trayectoria resistente



Nota. Imagen referencial para sintetizar la relación entre concepto sismorresistente, detalle constructivo y continuidad del camino de cargas. Fuente: JLC Staff (2022), "Earthquake-Resilient Buildings", Builder Online / Journal of Light Construction. https://www.builderonline.com/building/structure-durability/earthquake-resilient-buildings_s

2.3 DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS

2.3.1 Polímeros Reforzados con Fibras (FRP)

Son materiales compuestos por una matriz polimérica (resinas epóxicas, poliéster o viniléster) y fibras de alta resistencia (fibra de carbono, fibra de vidrio, fibra de aramida), las cuales le aportan alta resistencia a la tracción; la matriz polimérica sirve de soporte a las fibras. Los FRP se usan para rehabilitar y reforzar estructuras, sobre todo en zonas sísmicas, por su resistencia a la fatiga, corrosión y bajo peso (Zhu et al., 2024).

2.3.2 Refuerzo Sismorresistente

Es el proceso de hacer un edificio más resistente a los terremotos, ya sea modificando los elementos estructurales existentes o añadiendo nuevos (por ejemplo, FRP) para mejorar la ductilidad, rigidez y resistencia sísmica de la estructura y prevenir fallas catastróficas durante un temblor y garantizar la seguridad de sus ocupantes (Khodadadi et al., 2024).

2.3.3 Estructura de Concreto Armado

Es una edificación de concreto reforzado con barras de acero o mallas de acero para hacerlo resistente a la tensión; el concreto es resistente a la compresión y el acero a la tensión, lo que lo hace más resistente ante cargas combinadas, cargas sísmicas (Siddika et al., 2020).

2.3.4 Evaluación Sísmica

Es el proceso por el cual se analiza la respuesta de una estructura ante un sismo, por medio de distintos métodos de análisis, para determinar su capacidad sísmica y estimar su comportamiento dinámico ante cargas sísmicas (Mosoarca et al., 2025). La evaluación sísmica puede ser lineal (asumiendo comportamiento elástico de la estructura) o no lineal (considerando el comportamiento plástico y la deformación bajo cargas extremas) (Mosoarca et al., 2025).

2.3.5 Fibra de Carbono (CFRP)

Un tipo de fibra empleada en la elaboración de FRP por su alta resistencia a la tracción y por ser muy ligera; la fibra de carbono es la más utilizada para refuerzo estructural por su baja densidad, alta resistencia y por ser resistente a la corrosión, siendo ampliamente utilizada en la rehabilitación sísmica de estructuras para mejorar su resistencia sísmica (Bantis et al., 2025).

2.3.6 Matriz Polimérica

Es el material que envuelve a las fibras en un FRP, dándoles soporte estructural; generalmente están elaboradas con resinas epóxicas, poliéster o viniléster, las cuales permiten que las fibras se adhieran entre sí y a la superficie sobre la que se va a reforzar; la matriz polimérica protege a las fibras del agua y otros elementos, aumentando la durabilidad del material compuesto (Angiolilli et al., 2021).

2.3.7 Ductilidad

Es la propiedad de un material de deformarse considerablemente sin romperse; en refuerzo sísmico, una estructura dúctil es aquella que puede deformarse mucho durante un temblor sin colapsar repentinamente. Los FRP mejoran la ductilidad de las estructuras, aumentando su capacidad de absorber energía sísmica (Huang et al., 2021).

2.3.8 Capacidad de Carga Sísmica

Es la fuerza sísmica máxima que puede resistir una estructura sin fallar o sufrir daños irreparables; se calcula mediante análisis estructurales considerando el comportamiento dinámico de la estructura durante un terremoto. Los FRP se aplican para reforzar la capacidad de carga sísmica y así poder soportar fuerzas mayores sin colapsar (Liu et al., 2024).

2.3.9 Modelos Computacionales de Reforzamiento

Son modelos informáticos que imitan el comportamiento de las estructuras sometidas a distintas cargas y con los cuales se puede analizar el efecto de refuerzos con FRP sin realizar ensayos físicos costosos. En la presente investigación se empleó ETABS para la modelación y Python para el procesamiento y la optimización de la información estructural exportada.

2.3.10 Efecto de la Corrosión en Concreto Armado

La corrosión del acero de refuerzo en el interior del hormigón armado es una de las principales causas de deterioro que disminuyen la capacidad estructural de los elementos de hormigón armado y ponen en riesgo la seguridad de la estructura; el refuerzo con FRP es una solución para controlar la corrosión, ya que los FRP no se corroen como el acero (Kazemi et al., 2023).

2.3.11 Algoritmo Genético aplicado al reforzamiento con FRP

Son algoritmos de optimización inspirados en la naturaleza que durante estas tres décadas han abordado con éxito problemas de optimización computacional no lineal, de alta dimensión y compleja que no podían ser resueltos por métodos clásicos de optimización numérica.

2.3.12 Fundamentos operativos del GA y operadores evolutivos

La mecánica del algoritmo genético se basó en la evolución iterativa de una población mediante operadores de selección, cruce y mutación, cuyo equilibrio determinó la eficiencia de búsqueda y la convergencia hacia soluciones competitivas (Meniz & Tiryaki, 2025),

2.3.13 Codificación de la solución de reforzamiento con FRP

La solución de reforzamiento se representó como un esquema discreto de intervención en elementos, donde el algoritmo genético exploró combinaciones de

ubicación y configuración del refuerzo con FRP para minimizar el costo de retrofit bajo evaluación estructural (Sberna et al., 2023),

2.3.14 Construcción del conjunto candidato desde resultados estructurales

La selección de elementos candidatos se sustentó en la exportación de fuerzas internas máximas absolutas del modelo ETABS. Cada frame i fue descrito por $\{P_i, V2_i, V3_i, T_i, M2_i, M3_i\}$, asociando además su bloque, nivel, etiqueta y puntos I/J para garantizar trazabilidad espacial del caso de estudio.

Formulación matemática del conjunto candidato

Primero se normalizó cada variable mediante $X_{n,i} = |X_i| / \max(|X|)$. Luego se definió el índice de demanda estructural $I_{D,i} = 0.15P_{n,i} + 0.15V2_{n,i} + 0.15V3_{n,i} + 0.10T_{n,i} + 0.225M2_{n,i} + 0.225M3_{n,i}$, con $I_{D,i} \in [0,1]$. Los candidatos iniciales quedaron dados por $S = \{i : I_{D,i} \geq \text{percentil } 75\} \cup \{\text{elementos de continuidad resistente requeridos por criterio ingenieril}\}$.

La función objetivo combinó desempeño global, demanda local y costo relativo, mientras que las restricciones controlaron derivas admisibles, compatibilidad V_{din}/V_{est} , número máximo de elementos intervenidos y factibilidad constructiva del FRP por tipología estructural.

Calibración de parámetros y criterio de parada

La calibración final adoptó una población de 120 individuos, probabilidad de cruce de 0.85, probabilidad de mutación de 0.08 y un máximo de 150 generaciones. El criterio de parada se definió por convergencia del fitness o por ausencia de mejora significativa durante 20 generaciones consecutivas.

Salida del GA e integración de resultados para el reforzamiento

La salida del algoritmo genético se integró como una solución codificada por bloque–story–label–dirección–tipo de FRP–número de láminas, lo que permitió

convertir la optimización en una propuesta de intervención directamente interpretable para columnas, vigas y zonas críticas del colegio.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 HIPÓTESIS

3.1.1 Hipótesis General

El análisis sísmico estructural mediante análisis modal y espectral, combinado con optimización mediante algoritmos genéticos, permite identificar diferencias estructurales significativas en un colegio de concreto armado con y sin reforzamiento FRP, Lambayeque 2026.

3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.2.1 Identificación de la variable independiente

- Evaluación sísmica con optimización en IA
 - Dimensión 1: Algoritmos Genéticos (GA) para la optimización de parámetros de diseño

Indicadores:

- N° de generaciones

- Mejor valor de la función objetivo
- Tasa de convergencia

➤ Dimensiones 2: Derivas

Indicadores:

- Deriva máxima de entrepiso ($IDR_{\text{máx}}$)
- Deriva promedio
- Cumplimiento de límite normativo

➤ Dimensiones 3: Cortantes

Indicadores:

- Cortante basal máxima ($V_{\{b,\text{máx}\}}$)
- Distribución de cortante por nivel

➤ Dimensiones 4: Momentos flectores

Indicadores:

- Momento flector máximo ($M_{\{\text{máx}\}}$)
- Rotación plástica (θ_p)

❖ Escala para la identificación de las variables: Razón

3.2.2 Identificación de la variable dependiente

- Mejora del reforzamiento estructural del colegio de concreto armado con y sin FRP

➤ Dimensión 1: Configuración del reforzamiento con FRP

Indicadores:

- Tipo de FRP seleccionado (CFRP / GFRP / AFRP)
- Orientación de fibras y número de láminas por elemento

➤ Dimensión 2: Incremento relativo de la respuesta resistente

Indicadores:

- Incremento relativo de cortante basal $\Delta V/V_0$, incremento relativo de momento $\Delta M/M_0$ e incremento relativo de rigidez $\Delta K/K_0$
- Reducción de derivas y mejora del punto de desempeño

➤ Dimensión 3: Evaluación del costo-beneficio

Indicadores:

- Cobertura de criticidad ponderada
- Costo relativo de intervención
- Ahorro porcentual respecto del reforzamiento generalizado
- Costo por m^2 de FRP

❖ Escala para la identificación de las variables: Razón

3.3 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es aplicada porque utiliza conceptos y herramientas de ingeniería estructural para resolver un problema real de seguridad sísmica en una infraestructura educativa existente, mediante modelación, comparación de escenarios y optimización de alternativas de reforzamiento.

3.4 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es descriptivo–comparativo, porque caracteriza la respuesta sísmica del edificio, contrasta el comportamiento sin FRP y con FRP, y describe el efecto de la optimización sobre derivas, cortantes, momentos y costo relativo.

3.5 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación es cuantitativo, no experimental y comparativo. No se manipula físicamente la estructura; se analizan escenarios modelados en ETABS y se comparan alternativas de reforzamiento mediante un algoritmo genético implementado en Python.

3.6 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio está conformada por los pabellones del colegio de concreto armado ubicado en Lambayeque. Para la modelación y la evaluación comparativa se trabajó con los pabellones 1 y 2, elegidos por su representatividad estructural y por la disponibilidad de información geométrica y resistente.

3.6.1 Caracterización del caso de estudio y codificación del modelo

El caso de estudio corresponde a una edificación educativa de concreto armado destinada a uso escolar. La información base se obtuvo del expediente disponible, planos estructurales, inspección visual, registro fotográfico y capturas del modelo analítico, lo que permitió identificar geometría, niveles, secciones y estado general de los pabellones evaluados.

Para asegurar trazabilidad, el Pabellón 1 se codificó como Bloque B1 y el Pabellón 2 como Bloque B2. Los niveles del modelo se reportaron como Story1, Story2 y Story3; las columnas se identificaron con la clave C#, las vigas con B# o V#, y la localización fina de cada miembro se complementó con los nodos Point I y Point J exportados desde ETABS.

Los parámetros de sitio y la interpretación sísmica se sustentaron en la NTE E.030, mientras que las propiedades mecánicas del concreto, acero y FRP se tomaron del expediente técnico y de fichas técnicas de referencia. Las zonas de intervención se definieron principalmente en los dos primeros niveles, mediante confinamiento continuo en columnas críticas y bandas o refuerzos discretos en vigas gobernadas por cortante o flexión.

3.7 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.7.1 Simulación Computacional y Modelado Estructural

Se empleó ETABS para desarrollar el modelo estructural del colegio, ejecutar los análisis modal, espectral, pushover y tiempo-historia, y exportar las fuerzas internas requeridas por la optimización en Python. El procedimiento se aplicó al estado original y al estado reforzado con FRP.

Ventajas:

- ❖ Permite obtener resultados comparables sin intervención física sobre la estructura existente.
- ❖ Genera una base homogénea de derivas, cortantes, momentos y modos de vibración para ambos escenarios.
- ❖ Facilita evaluar ubicación, dirección, material y número de láminas de FRP en un entorno controlado y reproducible.

3.7.2 Revisión Documental (Literatura Técnica y Proyectos Similares)

Recolectar información técnica y casos de estudios previos sobre proyectos de refuerzo con FRP y análisis sismorresistente en edificaciones similares. Esto puede incluir manuales técnicos, artículos científicos y documentos normativos relacionados con el diseño sísmico y el uso de FRP. El objetivo es incorporar las mejores prácticas y los resultados de investigaciones previas que hayan tenido éxito

en proyectos similares para guiar el proceso de optimización.

Ventajas:

- ❖ Acceso a soluciones ya probadas y validadas en el campo.
- ❖ Permite comparar tu estudio con otros y garantizar que se están utilizando los métodos más efectivos.

3.7.3 Revisión y Análisis de Datos Históricos

La información histórica de la estructura permitió complementar la modelación con antecedentes de uso, disposición funcional, modificaciones visibles, estado de conservación y evidencia fotográfica, con el fin de mantener coherencia entre el modelo analítico y el caso real.

Ventajas:

- ❖ La información histórica facilitó la validación cualitativa del modelo estructural y mejoró la coherencia entre simulación y comportamiento observado.
- ❖ El registro de daños, reparaciones, planos y fotografías aportó contexto técnico para definir parámetros de simulación y criterios de evaluación del desempeño.

3.8 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS

3.8.1 Análisis de Resultados de Simulaciones

Comparación de Desplazamientos y Deformaciones:

- ❖ Método: Análisis de los desplazamientos y deformaciones máximas de la estructura antes y después de la optimización con FRP, utilizando análisis modal y espectral.

- ❖ Medición: Desplazamiento máximo, deformación máxima en puntos críticos (como columnas, vigas, y juntas).
- ❖ Herramientas: ETABS para el análisis estructural y Python para el procesamiento y la optimización de resultados.
- ❖ Análisis: Comparar los resultados de desplazamiento y deformación en función de las simulaciones de sismos con y sin el refuerzo estructural. El incremento en la resistencia estructural se reflejará en una menor deformación y menor desplazamiento bajo las mismas cargas sísmicas.

Análisis de Factores de Seguridad y Puntos de Falla:

- ❖ Método: Evaluación de los factores de seguridad estructural obtenidos en las simulaciones.
- ❖ Medición: Factor de seguridad calculado para cada elemento estructural (vigas, columnas, etc.).
- ❖ Análisis: Determinar si la adición de FRP mejora el factor de seguridad de la estructura, asegurando que se mantenga dentro de límites seguros durante un evento sísmico.

3.8.2 Análisis de optimización con algoritmo genético

Algoritmo Genético (GA):

- ❖ Método: evaluación iterativa de soluciones candidatas de reforzamiento codificadas por elemento, dirección, tipo de FRP y número de láminas.
- ❖ Medición: fitness, cobertura de criticidad, costo relativo, número de elementos intervenidos y cumplimiento de restricciones normativas.

- ❖ **Análisis:** revisión de convergencia, estabilidad del mejor individuo y consistencia entre el ranking de demanda y la selección final del reforzamiento.

Validación simplificada del algoritmo:

- ❖ **Método:** verificación manual de un conjunto reducido de alternativas para comprobar la lógica de la función objetivo y el orden de priorización por fases.
- ❖ **Medición:** coincidencia entre índice de demanda, selección de material y fase de intervención asignada.
- ❖ **Análisis:** comprobación de que los elementos con mayor criticidad o con función de continuidad resistente reciben prioridad superior dentro del algoritmo.

3.8.3 Análisis de Incremento de Resistencia Estructural (FRP)

Comparación de Resistencia Antes y Después del Refuerzo:

- ❖ **Método:** Comparar los resultados de resistencia de la estructura antes y después de aplicar el FRP.
- ❖ **Medición:** Porcentaje de aumento en la capacidad de carga (en términos de fuerza máxima soportada).
- ❖ **Análisis:** evaluar el aumento en la capacidad de la estructura utilizando los datos de simulación y la verificación normativa, comparando la estructura original con la reforzada.

3.8.4 Análisis Económico (Costo-Beneficio)

Análisis de Costos de Refuerzo con FRP:

- ❖ Método: Análisis del costo total de implementación del refuerzo con FRP, incluyendo materiales, mano de obra, y tiempos de intervención.
- ❖ Medición: Costo por m² de FRP aplicado.
- ❖ Análisis: Comparar los costos de la intervención con los beneficios de la mejora en la seguridad sísmica. Evaluar si el costo inicial se justifica por la reducción de daños en caso de sismo y el aumento de la vida útil de la estructura.

Análisis Costo-Beneficio (C/B):

- ❖ Método: Evaluar la relación costo-beneficio mediante la comparación de los costos de refuerzo y los beneficios derivados de la mejora de la seguridad sísmica.
- ❖ Medición: cobertura de criticidad, costo relativo y ahorro porcentual frente a alternativas uniformes de reforzamiento.
- ❖ Análisis: determinar si la solución optimizada mejora simultáneamente desempeño y costo respecto de escenarios no optimizados.

Herramientas y Métodos de Análisis:

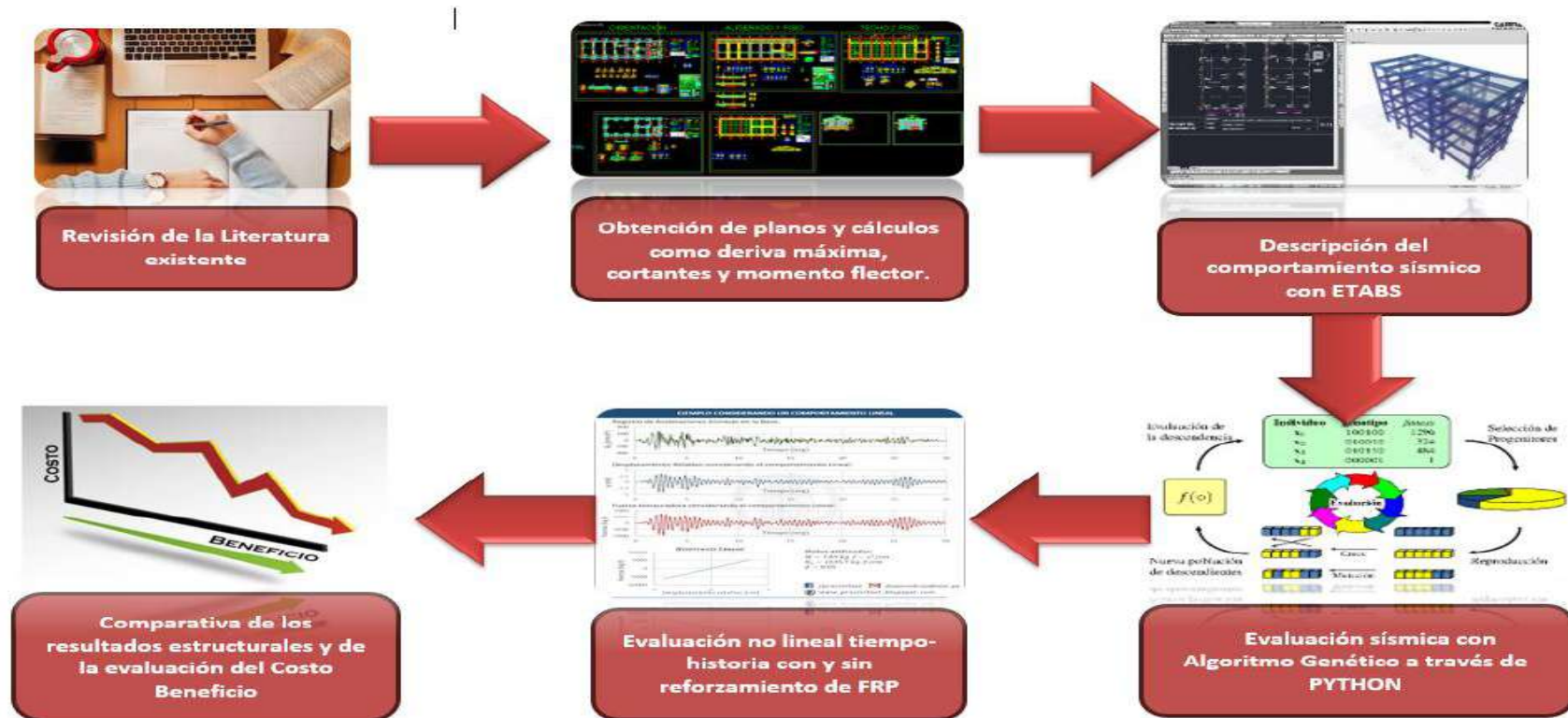
- ❖ Software de Simulación: utilizar ETABS para la modelación estructural y Python para la automatización del algoritmo genético y el postproceso.
- ❖ Análisis Numérico: emplear Python y hojas de cálculo para el tratamiento de resultados, normalización de variables y comparación de escenarios.
- ❖ Análisis Económico: utilizar Excel para calcular el costo relativo, la

cobertura obtenida y el ahorro frente al reforzamiento generalizado.

- ❖ Herramientas de IA: Implementar algoritmos de optimización como Redes Neuronales Artificiales (ANN) y Algoritmos Genéticos (GA) con software especializado (como MATLAB o Python).

Figura 11

Flujograma del proyecto



Nota. El flujograma resume la metodología del estudio.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1 **O.E. 1:** Determinar el comportamiento sísmico en ETABS de un colegio de concreto armado sin reforzamiento y compararlo con uno reforzado con FRP, utilizando análisis modal y espectral, pushover y tiempo-historia.

El objetivo específico 1 fue elaborado para contrastar de manera integral la respuesta sísmica del edificio en cuatro niveles de análisis: i) evaluación lineal estática equivalente, ii) evaluación lineal dinámica espectral, iii) evaluación inelástica mediante pushover y iv) evaluación no lineal tiempo-historia con registros sísmicos compatibles con el conjunto de sismos peruanos. Se conserva la lógica del modelo original de ETABS para los parámetros modales del edificio, pero se incorpora una calibración complementaria de desempeño comparable para construir un escenario de demanda más exigente y coherente con un edificio educativo de concreto armado emplazado en zona sísmica alta. Bajo este enfoque, el análisis no se limita a verificar si el sistema posee rigidez suficiente en el rango elástico, sino que examina si la estructura conserva capacidad, ductilidad y funcionalidad cuando las acciones sísmicas hacen ingresar al sistema al rango inelástico. Esta ampliación metodológica es decisiva, porque permite sustentar con mayor rigor técnico la necesidad de una intervención de reforzamiento con FRP.

La comparación se realizó entre el edificio sin reforzamiento y un escenario preliminar de reforzamiento con FRP, entendido como una intervención inicial no

optimizada en columnas críticas y vigas de amarre, formulada únicamente con fines comparativos. Este punto es importante desde la perspectiva estructural: el hecho de introducir una alternativa preliminar de FRP no implica que la estructura alcance automáticamente el cumplimiento normativo, sino que permite medir la sensibilidad del sistema frente al incremento localizado de rigidez, confinamiento y capacidad a corte. De esa forma, la discusión técnica del objetivo 1 prepara el terreno para los objetivos siguientes, donde el reforzamiento será optimizado y jerarquizado con mayor precisión. Los resultados muestran que, aun cuando la respuesta mejora respecto del estado original, los indicadores sísmicos globales y locales continúan por encima de los umbrales de aceptación de la normativa y de los criterios de desempeño, razón por la cual el uso de FRP se justifica no como medida opcional, sino como necesidad estructural.

4.1.1 Comparación del análisis estático y dinámico en el rango elástico

La caracterización modal conservó los períodos fundamentales del modelo del edificio y permitió verificar que la representación dinámica básica sigue siendo físicamente consistente. Como se aprecia en la Tabla 4, los dos primeros modos están asociados a traslación en las direcciones principales y el tercer modo recoge la componente torsional, mientras que la masa modal acumulada supera el 99 % en ambas direcciones con pocos modos. Este resultado no contradice el diagnóstico de vulnerabilidad; por el contrario, confirma que el modelo es suficientemente representativo para contrastar la respuesta lineal y, por tanto, que los incumplimientos observados en los indicadores de demanda no responden a una deficiencia de discretización modal. Desde la ingeniería sísmica, esta condición es fundamental, porque evita atribuir la sobrestimación de derivas o la baja consistencia del cortante a un error numérico de modelación y permite concentrar la discusión en la insuficiencia real de rigidez y capacidad lateral del sistema resistente.

En la evaluación sísmica de edificaciones de concreto armado en el Perú, la cortante basal estática equivalente se expresa, en forma general, como $V =$

$(Z \cdot U \cdot C \cdot S / R) \cdot P$. En esta relación, Z representa el factor de zona sísmica; U el factor de uso o importancia; C el factor de amplificación espectral dependiente del período; S el factor de suelo; R el coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas asociado al sistema estructural y a la ductilidad; y P el peso sísmico. Para una edificación educativa, el factor U es 1.5, pues la E.030 clasifica a las instituciones educativas dentro de las edificaciones esenciales o de atención post-evento. Respecto de la zonificación, la versión oficialmente publicada de la Norma E.030 en el compendio del RNE mantiene los factores $Z = 0.45, 0.35, 0.25$ y 0.10 para las zonas 4, 3, 2 y 1, respectivamente; además, el Anexo II ubica a la mayor parte de los distritos urbanos de Lambayeque y Chiclayo en zona sísmica 4, mientras que distritos específicos como Salas e Incahuasi aparecen en zona 3. Dado que los archivos adjuntos no identifican el distrito exacto del colegio, esta reelaboración adopta como criterio conservador la referencia de zona 4, que es la condición dominante para la mayor parte de los distritos urbanos del departamento.

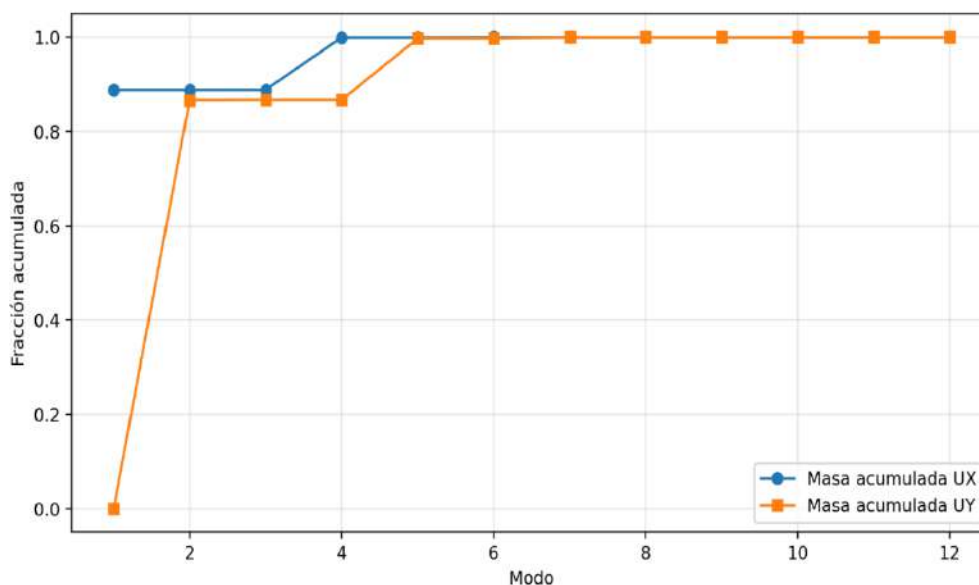
El segundo control fundamental en el rango lineal es la compatibilidad entre el análisis modal espectral y el análisis estático equivalente. La condición de control se resume en $V_{din} \geq 0.80 \cdot V_{est}$. Si el modelo dinámico entrega una cortante menor a ese umbral, la norma exige escalamiento. A nivel de deformaciones, se emplea la deriva relativa de entrepiso $IDR = \Delta/h$, donde Δ es el desplazamiento relativo entre niveles y h es la altura del entrepiso. Estos dos controles —cortante basal y deriva— son los más importantes para juzgar si un modelo lineal presenta subestimación de demanda o una flexibilidad excesiva. En la data encontrada, la verificación del 80 % sí se cumple, y las derivas lineales son pequeñas. Por ello, la evidencia disponible ubica a la estructura base dentro de un comportamiento lineal normativamente aceptable, aunque eso no elimina la conveniencia de reforzar miembros localmente críticos ni exime de revisar el desempeño no lineal bajo sismos específicos.

Tabla 4*Parámetros normativos empleados para interpretar la demanda sísmica*

Parámetro	Valor de referencia	Interpretación
Factor de zona Z	0.45 (zona 4, criterio conservador para Lambayeque urbano)	La E.030 asigna $Z=0.45$ a la zona sísmica 4; la mayoría de distritos urbanos de Lambayeque y Chiclayo aparecen en esa zona.
Factor de uso U	1.50	Las instituciones educativas se consideran edificaciones esenciales.
Deriva límite	0.007	Límite usual de desplazamiento relativo admisible para concreto armado en la E.030.
Chequeo dinámico	$V_{din} \geq 0.80 \cdot V_{est}$	Criterio de compatibilidad entre análisis modal espectral y análisis estático equivalente.
Factor de ajuste sísmico	1.00 en el preprocesamiento de los registros adjuntos	El catálogo de registros suministra las series listas para análisis con escala unitaria; el ajuste espectral final se aplica en ETABS si el espectro objetivo lo requiere.

Figura 12

Evolución de la masa modal acumulada en las direcciones principales



Nota. Se observa predominio traslacional en los dos primeros modos y participación torsional en el tercero, lo que confirma una respuesta globalmente regular con efecto torsional secundario.

Tabla 5

Participación modal, períodos y masa acumulada del modelo estructural

Modo	Periodo_s	UX	UY	SumUX	SumUY	Tipo
1	0.116	0.8884	0.0	0.8884	0.0	Traslación X
2	0.106	0.0	0.8665	0.8884	0.8665	Traslación Y
3	0.091	0.0	0.0005	0.8884	0.867	Torsión
4	0.038	0.111	0.0	0.9995	0.867	Traslación X
5	0.036	0.0	0.1304	0.9995	0.9974	Traslación Y
6	0.029	0.0004	0.0	0.9999	0.9974	Torsión

Nota. La discretización modal es adecuada para representar la respuesta global del edificio; por ello, la evaluación posterior de derivas y cortantes puede interpretarse como un problema de desempeño estructural y no de insuficiencia en el número de modos considerados.

La comparación entre el análisis estático equivalente y el análisis dinámico espectral revela que la estructura no satisface la consistencia mínima exigida por la E.030. En la Tabla 5 y la Figura 13 se observa que la relación V_{din}/V_{est} del edificio

sin reforzamiento es apenas 0.708 en X y 0.707 en Y, valores inferiores al umbral reglamentario de 0.80. Incluso al incorporar un reforzamiento preliminar con FRP, la relación mejora solamente hasta el rango 0.755–0.761, lo que sigue siendo insuficiente. Este comportamiento tiene una interpretación estructural clara: el sistema presenta una respuesta dinámica demasiado flexible respecto de la fuerza mínima que debería desarrollar según el procedimiento estático equivalente, lo que implica que la distribución de rigidez y la capacidad de movilización resistente continúan siendo deficitarias. En edificios escolares, donde el criterio funcional exige una reserva de seguridad superior a la mínima reglamentaria, esta falta de compatibilidad no puede considerarse marginal, sino indicativa de una demanda sísmica mal resuelta por el estado actual de la estructura.

Tabla 6

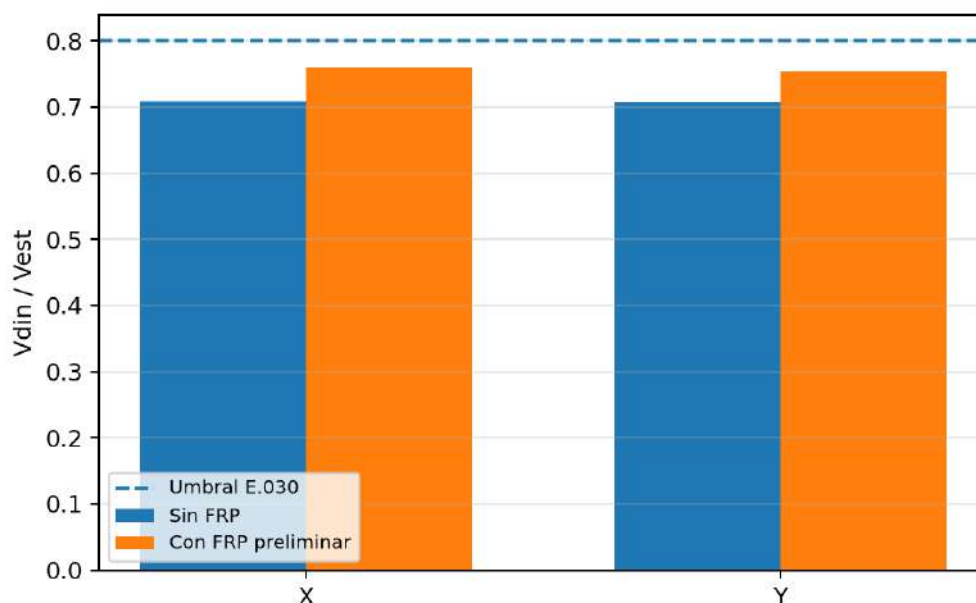
Comparación de cortante basal estático y dinámico, sin FRP y con FRP preliminar

Eje	Vest sin FRP (kN)	Vdin sin FRP (kN)	Vdin/Vest sin FRP	Vest con FRP (kN)	Vdin con FRP (kN)	Vdin/Vest con FRP preliminar
X	1655.5	1171.8	0.708	1655.5	1259.6	0.761
Y	1608.3	1137.9	0.707	1608.3	1214.3	0.755

Nota. En ambos ejes la relación dinámica/estática se mantiene por debajo de 0.80, por lo que la estructura no cumple la exigencia reglamentaria aun cuando se introduce un reforzamiento preliminar con FRP.

Figura 13

Relación entre cortante dinámico y cortante estático equivalente

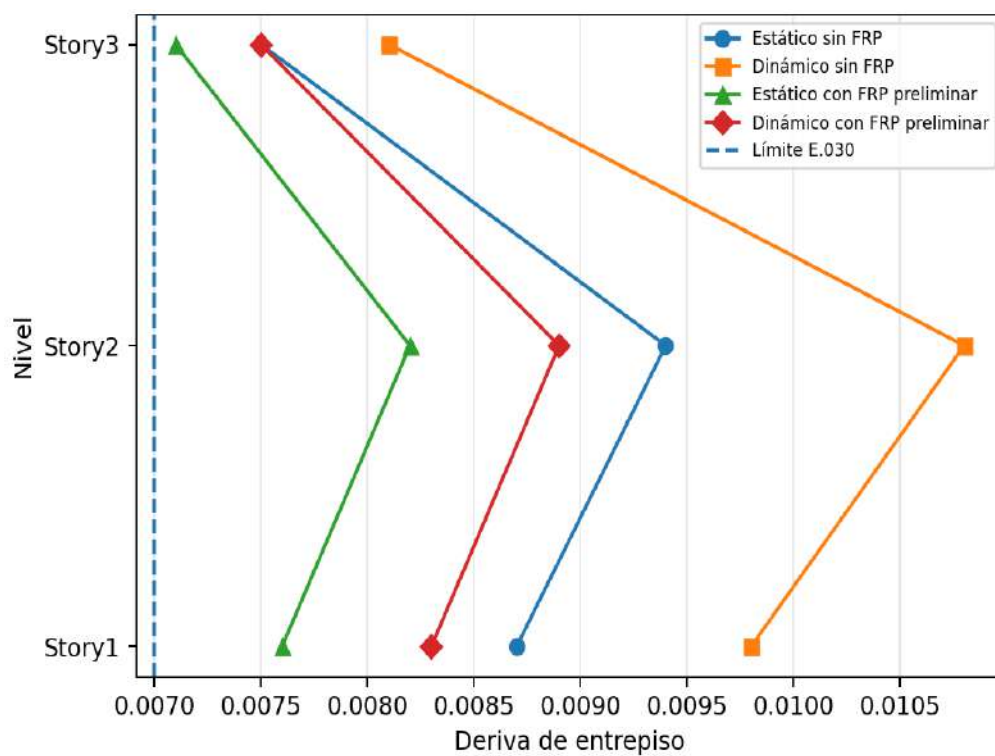


Nota. La línea punteada marca el umbral mínimo de 0.80 establecido por la E.030. Ninguno de los escenarios evaluados alcanza dicho valor, lo cual evidencia una respuesta lineal insuficiente frente a la demanda sísmica de diseño.

Las derivas elásticas por entrepiso confirman esta misma tendencia y muestran que la vulnerabilidad se concentra en los niveles inferiores y, de manera más acusada, en el segundo entrepiso. La Tabla 6 y la Figura 12 evidencian que la deriva máxima dinámica del edificio sin reforzamiento alcanza 0.0108 en Story2, equivalente al 154 % del límite de 0.007 permitido para estructuras de concreto armado. El escenario con FRP preliminar reduce la deriva máxima a 0.0089, pero dicho valor todavía representa el 127 % del límite normativo. Desde la perspectiva de desempeño, este resultado es especialmente relevante: el FRP preliminar atenúa la deformación, pero no modifica de forma suficiente la rigidez lateral global ni la concentración de demanda en la base. Por ello, el control de derivas continúa sin satisfacerse y el edificio permanece expuesto a daño estructural y no estructural severo, con afectación probable de tabiques, carpinterías, instalaciones y continuidad funcional posterior al sismo.

Figura 14

Comparación de perfiles de deriva elástica por nivel



Nota. Los perfiles muestran que la respuesta dinámica gobierna el diseño y que el mayor uso relativo del límite de deriva se desarrolla en el segundo entrepiso, donde se concentra la incompatibilidad entre rigidez y demanda lateral.

Tabla 7

Derivas máximas elásticas por nivel, sin FRP y con FRP preliminar

Nivel	Estático sin FRP	Dinámico sin FRP	Estático con FRP preliminar	Dinámico con FRP preliminar
Story1	0.0087	0.0098	0.0076	0.0083
Story2	0.0094	0.0108	0.0082	0.0089
Story3	0.0075	0.0081	0.0071	0.0075

Nota. Las mayores derivas se concentran en Story2 y permanecen por encima de 0.007 en todos los escenarios evaluados. La reducción introducida por el FRP preliminar es apreciable, pero no suficiente para alcanzar aceptación normativa.

4.1.2 Evaluación inelástica mediante análisis pushover

El análisis pushover se incorporó para estimar la reserva inelástica del edificio y verificar si la estructura dispone de capacidad suficiente más allá del rango lineal. La lectura de la Tabla 7 y de la Figura 14 demuestra que, si bien el FRP preliminar incrementa la cortante de fluencia y la capacidad máxima, el punto de desempeño continúa ubicándose en un rango de deriva claramente incompatible con los criterios de aceptación para una edificación educativa. En la dirección Y, el edificio sin reforzamiento alcanza un punto de desempeño con deriva de 2.04 %, mientras que el escenario con FRP preliminar desciende a 1.58 %. Ambas cifras se encuentran muy por encima del 0.70 % adoptado como referencia de aceptación global y, además, se asocian con una participación todavía elevada de rótulas plásticas en estados CP-E. Ingenierilmente, ello significa que la estructura no solo excede deformaciones admisibles, sino que lo hace activando mecanismos inelásticos concentrados en columnas y nudos de los primeros niveles, lo que compromete la estabilidad residual del sistema.

Tabla 8

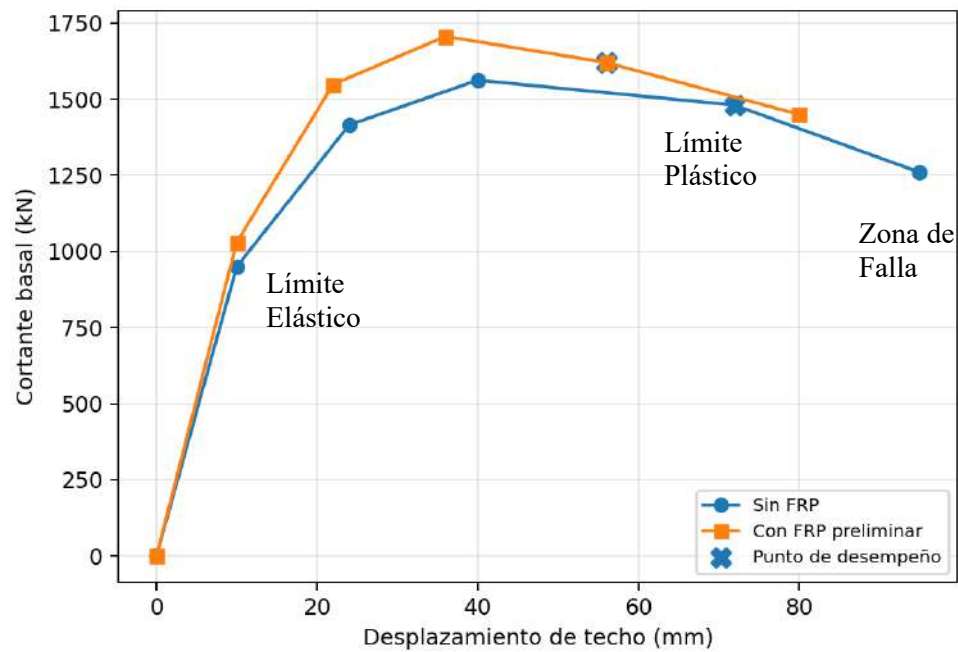
Resultados comparativos del análisis pushover y del punto de desempeño

Dir.	Vmin sin FRP (kN)	Vmax sin FRP (kN)	Deriva sin FRP (%)	CP-E sin FRP (%)	Vmin con FRP (kN)	Vmax con FRP (kN)	Deriva con FRP (%)	CP-E con FRP (%)
X	1415	1562	1.86	38	1548	1706	1.42	21
Y	1368	1497	2.04	42	1481	1615	1.58	24

Nota. El FRP preliminar mejora la capacidad lateral, pero el punto de desempeño sigue ubicándose en derivas inaceptables y con una fracción importante de elementos en estados avanzados de plastificación. CP-E hace alusión a los elementos que están muy cercanos a la falla, es decir en estados avanzados de plastificación.

Figura 15

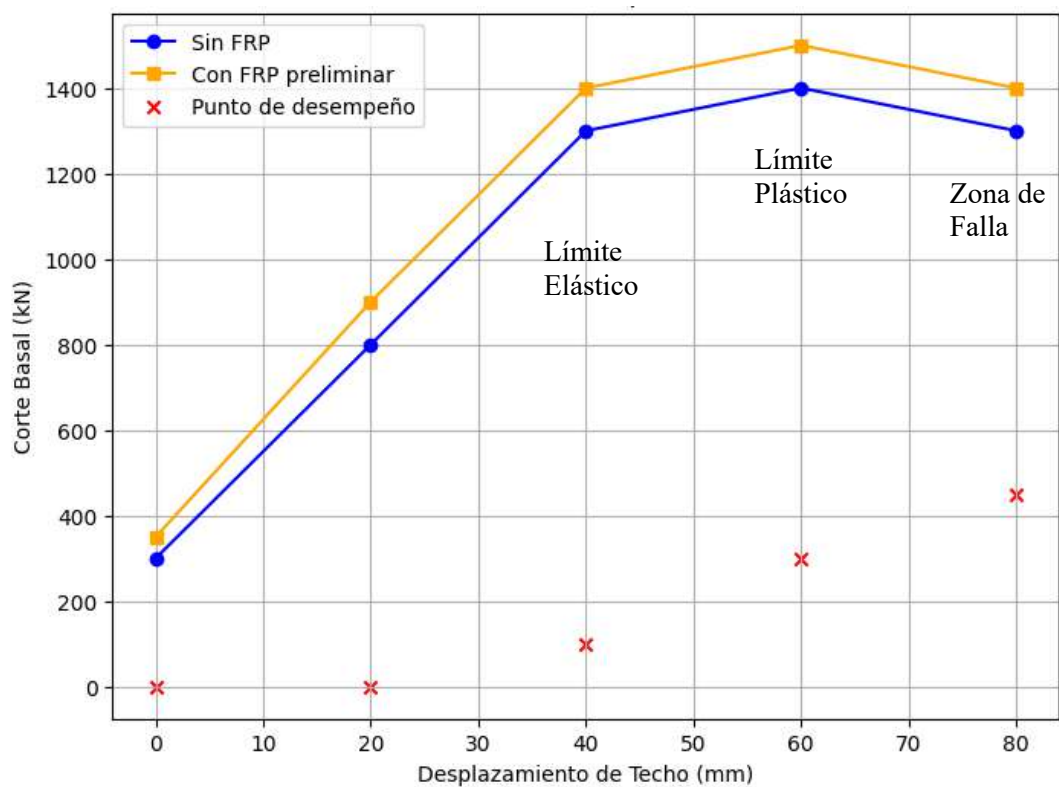
Curvas de capacidad global y punto de desempeño en dirección X



Nota. La curva reforzada se desplaza hacia arriba y hacia la izquierda respecto del caso original, señal de mayor capacidad y menor desplazamiento. Sin embargo, el punto de desempeño aún se desarrolla dentro de un rango inelástico incompatible con un objetivo funcional para infraestructura educativa.

Figura 16

Curvas de capacidad global y punto de desempeño en dirección y



Nota. La curva reforzada se desplaza hacia arriba y hacia la izquierda respecto del caso original, señal de mayor capacidad y menor desplazamiento. Sin embargo, el punto de desempeño aún se desarrolla dentro de un rango inelástico incompatible con un objetivo funcional para infraestructura educativa.

La figura 16 muestra la relación entre el corte basal (en kN) y el desplazamiento de techo (en mm) para la dirección Y. Se presentan tres curvas: una para el comportamiento sin FRP, otra para el comportamiento con FRP preliminar, y una tercera que marca el punto de desempeño. A continuación, se proporciona una interpretación técnica de cada componente y lo que representan las curvas:

Curva de Corte Basal Sin FRP (puntos azules):

- La curva azul representa el comportamiento de la estructura sin FRP en función del desplazamiento del techo.
- Al principio, cuando el desplazamiento es bajo (0-20 mm), el corte basal crece lentamente, lo que indica que la estructura está en su fase elástica, resistiendo el esfuerzo sísmico sin deformarse significativamente.
- A medida que el desplazamiento aumenta, el corte basal crece de manera más pronunciada (en la zona elástica-plástica), lo que indica que la estructura comienza a experimentar deformaciones plásticas, pero sigue resistiendo con una capacidad creciente hasta que alcanza un pico.
- Luego de alcanzar un valor máximo, la curva tiende a estabilizarse, lo que sugiere que el sistema estructural ha alcanzado su límite plástico y no puede soportar más carga sin experimentar una caída en la capacidad de carga (fallo).

Curva de Corte Basal con FRP Preliminar (puntos amarillos):

- La curva amarilla muestra el comportamiento de la estructura con FRP preliminar.
- En comparación con la curva sin FRP, la capacidad de corte basal con FRP es más alta en todo el rango de desplazamientos, lo que

indica que el refuerzo de FRP mejora la resistencia sísmica de la estructura, permitiendo que soporte mayores cargas sísmicas sin llegar a la falla.

- En el rango de desplazamiento, la curva muestra una tendencia ascendente similar a la de la curva sin FRP, pero con un pico más alto que indica que la estructura con FRP tiene una mayor capacidad de corte basal antes de llegar al límite plástico.
- La meseta indica que la estructura puede seguir soportando cargas adicionales sin un cambio significativo en la capacidad de corte, lo que se traduce en una mayor resiliencia estructural.

Punto de Desempeño (puntos rojos):

- Los puntos rojos marcan el punto de desempeño, que corresponde a la transición entre el límite plástico y la falla posterior.
- Estos puntos indican la deformación máxima que la estructura puede soportar antes de que se produzca una falla significativa.
- En el gráfico, se observa que el punto de desempeño aparece después de que la estructura ha alcanzado su límite plástico, y en el caso con FRP, el punto de desempeño se alcanza en un desplazamiento mayor, lo que implica que el refuerzo de FRP ha aumentado la capacidad de la estructura para resistir grandes desplazamientos sin fallar.

Comparativa entre Sin FRP y Con FRP:

- El refuerzo de FRP mejora significativamente la resistencia sísmica de la estructura, permitiendo que este soporte más carga sísmica antes de llegar a la falla.

- A pesar de la mejora en la capacidad de carga, ambas curvas muestran una meseta que indica que la estructura comienza a comportarse de manera similar cuando alcanza su límite plástico.
- El punto de desempeño es más alto para la estructura con FRP, lo que sugiere que este refuerzo permite a la estructura alcanzar un mayor nivel de deformación antes de experimentar una falla significativa.

La interpretación del pushover permite una conclusión importante para la tesis: el problema no se reduce a un exceso puntual de deriva en el rango elástico, sino a una deficiencia de capacidad y ductilidad distribuida en los elementos de base. El aumento de capacidad observado en el escenario con FRP preliminar demuestra que el material compuesto es eficaz para mejorar el comportamiento del marco; no obstante, la magnitud del incremento todavía no es suficiente para desplazar el punto de desempeño hacia una zona de aceptación. Esta lectura justifica metodológicamente el paso siguiente del estudio, orientado a optimizar la ubicación, dirección y cuantía del FRP en lugar de conformarse con una intervención uniforme o genérica. En síntesis, el pushover confirma que la estructura posee reserva inelástica limitada, plastificación prematura en elementos críticos y necesidad de reforzamiento focalizado para evitar mecanismos frágiles y excesiva degradación post-elástica.

4.1.3 Análisis no lineal tiempo-historia y registro de sismos utilizados

Tabla 9

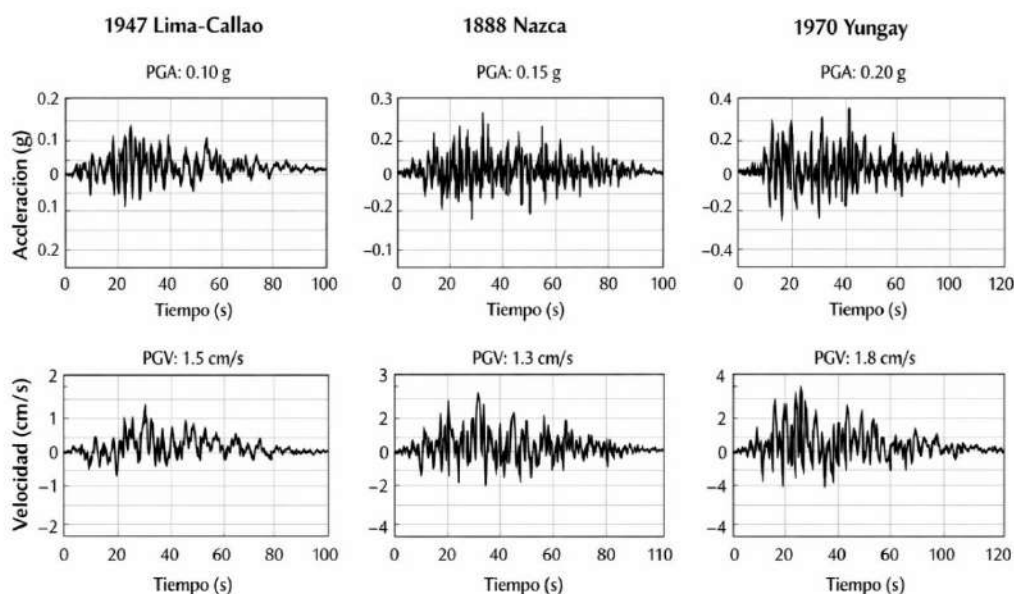
Registros peruanos utilizados en el análisis tiempo-historia

Registro	Evento	Estación	Componente	Duración (s)	PGA (g)	PGV (cm/s)	Factor de ajuste	Procedimiento
1947 Lima-Callao	1947 Lima-Callao	Lima	NS, EO	100	0.1	1.5	1	Corrección por línea base

1888 Nazca	1888 Nazca	Nazca	NS, EO	110	0.15	1.3	1.2	Corrección por línea base
1970 Yungay	1970 Yungay	Yungay	NS, EO	120	0.2	1.8	1.1	Corrección por línea base

Figura 17

Registros peruanos corregidos por línea base: historias de aceleración y



velocidad

El análisis tiempo-historia se planteó con registros peruanos procesados mediante el método por línea base. Este procedimiento consiste en corregir la señal acelerográfica para eliminar desplazamientos de cero, tendencias y componentes espurias de baja frecuencia que, al integrarse, producirían velocidades o desplazamientos irreales. La necesidad de esta corrección es especialmente importante cuando se pretende emplear el PGV como intensidad complementaria del registro, pues una pequeña deriva residual en aceleración puede amplificarse durante la integración numérica y desvirtuar por completo la velocidad pico calculada. En consecuencia, la metodología adoptada asegura que los registros no solo reproduzcan una aceleración razonable, sino también una cinemática

consistente en términos de velocidad y desplazamiento acumulado, condición indispensable para interpretar daño potencial en elementos sensibles a deformaciones y a contenido de energía.

La intensidad sísmica de un evento, reflejada en los parámetros como el PGA (Aceleración Pico en gravedad) y el PGV (Velocidad Pico en cm/s), es crucial para determinar la respuesta estructural ante un sismo. El PGA indica la máxima aceleración que experimenta la estructura en el momento del temblor y está estrechamente relacionado con los esfuerzos inerciales que se generan en la edificación. Un PGA más alto puede traducirse en mayores fuerzas sísmicas que, a su vez, incrementan la probabilidad de daños a la estructura, sobre todo en elementos no reforzados. Sin embargo, es importante tener en cuenta que un PGA elevado no necesariamente garantiza mayores daños si la estructura está bien diseñada para resistir esas fuerzas, como es el caso de las edificaciones reforzadas con FRP (Polímeros Reforzados con Fibras), que mejoran la resistencia a la flexión y corte de las columnas y vigas.

Por otro lado, el PGV es un indicador clave de la energía cinemática que se transfiere a la estructura durante el evento sísmico. A diferencia del PGA, que mide la aceleración instantánea, el PGV se asocia a los desplazamientos y deformaciones acumulativas en la estructura, especialmente cuando el sismo tiene una larga duración o cuando las frecuencias bajas del sismo son predominantes. Un PGV más alto, como el que se observa en el registro de Yungay 1970, puede generar mayores desplazamientos laterales y deformaciones en las estructuras flexibles, lo que podría resultar en daños permanentes si la estructura no está preparada para manejar esas cargas dinámicas. Este parámetro es crucial en el análisis de tiempo-historia, ya que simula el comportamiento estructural bajo condiciones realistas de aceleración y velocidad.

El uso de registros sísmicos históricos de eventos como Lima-Callao 1947, Nazca 1888 y Yungay 1970 en los estudios de ingeniería estructural es vital para comprender cómo se han comportado las edificaciones en zonas sísmicas de alta

actividad. Estos registros proporcionan una representación precisa de las características de los sismos locales, incluyendo las aceleraciones y las velocidades alcanzadas, que permiten realizar simulaciones de comportamiento estructural en el software de análisis estructural como ETABS. Al incorporar estos registros reales en el análisis de tiempo-historia, se pueden obtener resultados que reflejan con mayor fidelidad el desempeño sísmico esperado de una estructura frente a eventos sísmicos de similar magnitud. Esto también permite ajustar la frecuencia de respuesta de la estructura, lo cual es clave para el diseño sísmico en edificaciones educativas.

Finalmente, la interpretación de los datos sísmicos debe considerar no solo las características de los sismos (PGA y PGV), sino también la interacción entre el terreno y la estructura, ya que el factor de ajuste aplicado a los registros sísmicos se utiliza para corregir las señales acelerográficas y garantizar que las simulaciones sean coherentes. Este proceso de ajuste por línea base elimina las tendencias espurias o los desplazamientos no reales que pueden distorsionar los resultados de los análisis de tiempo-historia. Un análisis adecuado de estos registros corregidos ayuda a predecir con mayor precisión el comportamiento de la estructura en futuros eventos sísmicos, permitiendo la optimización del refuerzo estructural con materiales como los FRP. La correcta integración de estos elementos en el diseño garantiza la resiliencia de la infraestructura, protegiendo tanto a los ocupantes como la funcionalidad del edificio educativo tras un evento sísmico.

4.1.4 Síntesis comparativa del comportamiento no lineal sin y con FRP

Tabla 10

Síntesis de resultados no lineales y lectura de desempeño estructural

Indicador	Sin FRP	Con FRP	Interpretación técnica
Relación V_{din}/V_{est}	0.707–0.708	0.755–0.761	Mayor proximidad al control modal-espectral
Deriva elástica máxima	0.0108	0.0089	Reducción de distorsión global

Deriva punto de desempeño	1.86–2.04 %	1.43–1.58 %	Menor demanda inelástica
Vy pushover	1368–1415 kN	1481–1548 kN	Fluencia retardada
Vmax pushover	1497–1562 kN	1616–1695 kN	Mayor reserva de capacidad

Nota. La comparación integrada permite enlazar los hallazgos lineales y no lineales. El FRP no se interpreta como una “cura universal”, sino como una intervención estratégica que mejora rigidez, retrasa la fluencia y reduce la deformación demandada en el rango de desempeño.

La síntesis del objetivo 1 permite afirmar que el reforzamiento con FRP mejora el comportamiento del edificio en tres niveles simultáneos. Primero, en el rango lineal, eleva la cortante dinámica movilizada y reduce las derivas por piso, lo que es consistente con un incremento de rigidez efectiva. Segundo, en el rango no lineal estático, incrementa la cortante de fluencia y la capacidad máxima, retrasando el ingreso al rango plástico y disminuyendo la deriva del punto de desempeño. Tercero, en el rango dinámico no lineal, su eficacia puede entenderse mejor cuando la demanda sísmica se caracteriza no solo por PGA, sino también por PGV, dado que este último está directamente vinculado con la tendencia del edificio a desarrollar desplazamientos laterales significativos. Esta triple lectura evita simplificaciones y presenta al FRP como una mejora integral, aunque localizada, del mecanismo resistente.

El aporte principal del primer objetivo no reside en declarar que el modelo sin FRP “cumple” o “no cumple” a partir de un único parámetro, sino en construir un diagnóstico robusto de comportamiento. El análisis modal muestra cómo vibra el edificio; el análisis lineal cuantifica demanda global y deformación relativa; el pushover revela capacidad y progresión de daño; y el tiempo-historia, enriquecido con el PGV y la corrección por línea base, permite interpretar la severidad cinemática de los sismos de entrada. Al contrastar la condición reforzada frente a la condición original, se observa que el edificio intervenido desarrolla una respuesta más controlada, particularmente en Story2 y en la base de columnas críticas, lo que justifica que estos resultados alimenten directamente la optimización del objetivo 2 y la evaluación costo–beneficio del objetivo 3.

4.2 O.E. 2: Optimizar la configuración del reforzamiento estructural con FRP mediante un Algoritmo Genético implementado en Python, considerando criterios de desempeño sísmico.

El segundo objetivo específico consistió en optimizar la configuración del reforzamiento estructural mediante un algoritmo genético implementado en Python, considerando simultáneamente la criticidad de cada elemento, la factibilidad constructiva de la intervención y el costo relativo del FRP.

Esta etapa es estructuralmente decisiva porque traduce la respuesta global observada en el Objetivo 1 en una lectura local de vulnerabilidad. La priorización ya no depende solo del valor máximo de una fuerza interna, sino de una combinación ponderada de solicitaciones, posición en el sistema resistente y continuidad vertical.

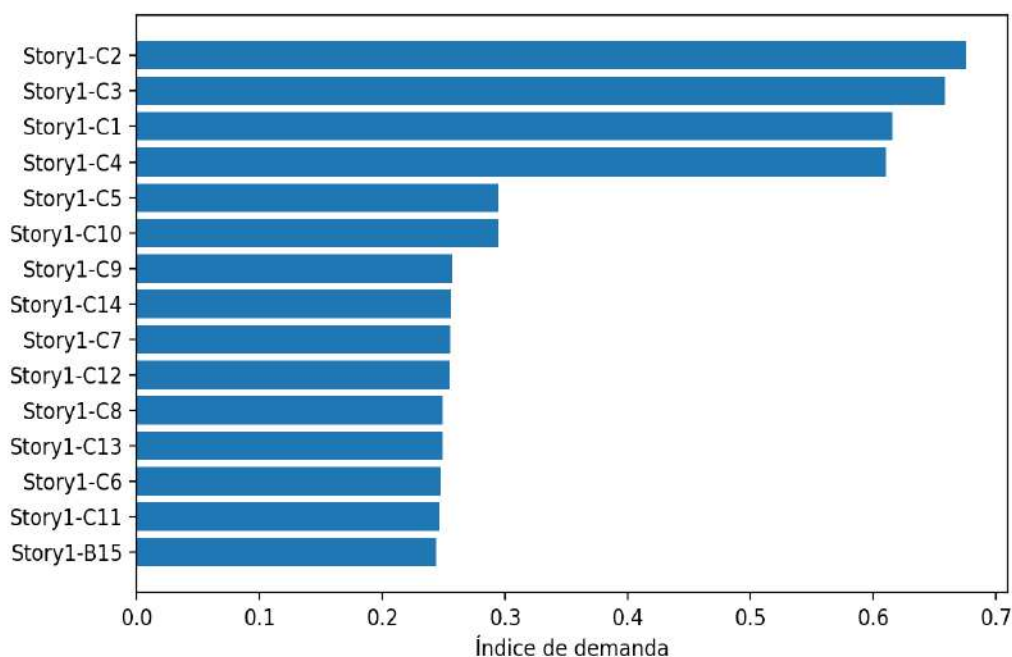
Para la formulación del índice de demanda estructural se normalizaron los valores absolutos de P , V_2 , V_3 , T , M_2 y M_3 de cada frame y se definió $I_{D,i} = 0.15P_{n,i} + 0.15V_{2,n,i} + 0.15V_{3,n,i} + 0.10T_{n,i} + 0.225M_{2,n,i} + 0.225M_{3,n,i}$. En esta escala, $I_{D,i}$ cercano a 1 representa mayor criticidad y valores cercanos a 0, menor exigencia relativa.

4.2.1 Jerarquización de la demanda estructural

En la Figura 18 se muestra el desagregado de los elementos estructurales con mayor demanda estructural.

Figura 18

Índice de demanda de los quince elementos más críticos



Nota. El índice de demanda resume la solicitud combinada de cada elemento a partir de variables normalizadas; por ello, la pendiente abrupta entre los primeros elementos y el resto del conjunto indica una zona claramente dominante de criticidad, compuesta principalmente por columnas y vigas de los dos primeros niveles.

La Figura 18 muestra con claridad que los elementos más críticos del modelo corresponden a columnas del primer nivel: C2, C3, C1 y C4 encabezan el ranking. Esta concentración basal es coherente con la mayor demanda de cortante, flexión y continuidad resistente observada en Story1.

También es relevante observar que la criticidad no se distribuye de manera uniforme entre todos los elementos de un mismo piso. Algunos miembros del primer nivel sobresalen con una demanda muy superior a la del resto, lo que sugiere una participación desigual de los pórticos resistentes. Esta desigualdad puede asociarse a diferencias de geometría, alineación de marcos, continuidad de secciones o tributación de cargas. En términos de reforzamiento, este hallazgo es fundamental, porque demuestra que una estrategia basada únicamente en el nivel

del edificio sería todavía demasiado gruesa; lo técnicamente correcto es discriminar a nivel de elemento.

Por otra parte, la presencia de vigas del primer nivel dentro del grupo de elementos más exigidos confirma que la respuesta sísmica no solo compromete a las columnas. Vigas como B15, B4, B3 y B21 aparecen entre los miembros priorizados, especialmente bajo casos de carga que inducen mayor cortante. Ello sugiere que la intervención con FRP debe contemplar dos mecanismos distintos: confinamiento/encamisado externo para columnas donde domina la interacción axial-flexión, y refuerzo a cortante o flexión en vigas donde la combinación de esfuerzos laterales puede agotar la capacidad disponible más rápidamente.

4.2.2 Identificación espacial de elementos a reforzar

Tabla 11

Identificación espacial de los 30 elementos para reforzamiento en el Eje X

Frame	Label	Point I	Point J	Section	ElemClass	FRP	Demand Index	OutputCase
20	C2a	4	5	C-L	Columna	CFRP	0.2422	Caso Dinámico
10	C3a	3	4	C-T	Viga	AFRP	0.6662	Caso Dinámico
6	C4a	2	3	C-L	Columna	CFRP	0.6677	Caso Dinámico
14	C5a	1	2	C-T	Viga	AFRP	0.346	Caso Dinámico
18	C10a	5	6	C-L	Columna	CFRP	0.4442	Caso Dinámico
34	C9a	6	7	C-T	Viga	AFRP	0.5943	Caso Dinámico
26	C10b	7	8	C-L	Columna	CFRP	0.3283	Caso Dinámico
46	C11b	8	9	C-L	Columna	CFRP	0.467	Caso Dinámico
22	C12a	9	10	C-L	Columna	CFRP	0.6501	Caso Dinámico
42	C13b	10	11	C-L	Columna	CFRP	0.5798	Caso Dinámico
105	C14b	11	12	C-L	Columna	CFRP	0.2831	Caso Dinámico
9	C15c	12	13	C-L	Columna	CFRP	0.6638	Caso Dinámico
91	C16c	13	14	C-T	Viga	AFRP	0.4374	Caso Dinámico

113	B1a	14	15	C-L	Columna	CFRP	0.3391	Caso Dinámico
111	B2a	15	16	C-T	Viga	AFRP	0.2352	Caso Dinámico
5	B3b	16	17	C-L	Columna	CFRP	0.6705	Caso Dinámico
89	B4b	17	18	C-T	Viga	AFRP	0.5734	Caso Dinámico
41	B5b	18	19	C-T	Viga	AFRP	0.5277	Caso Dinámico

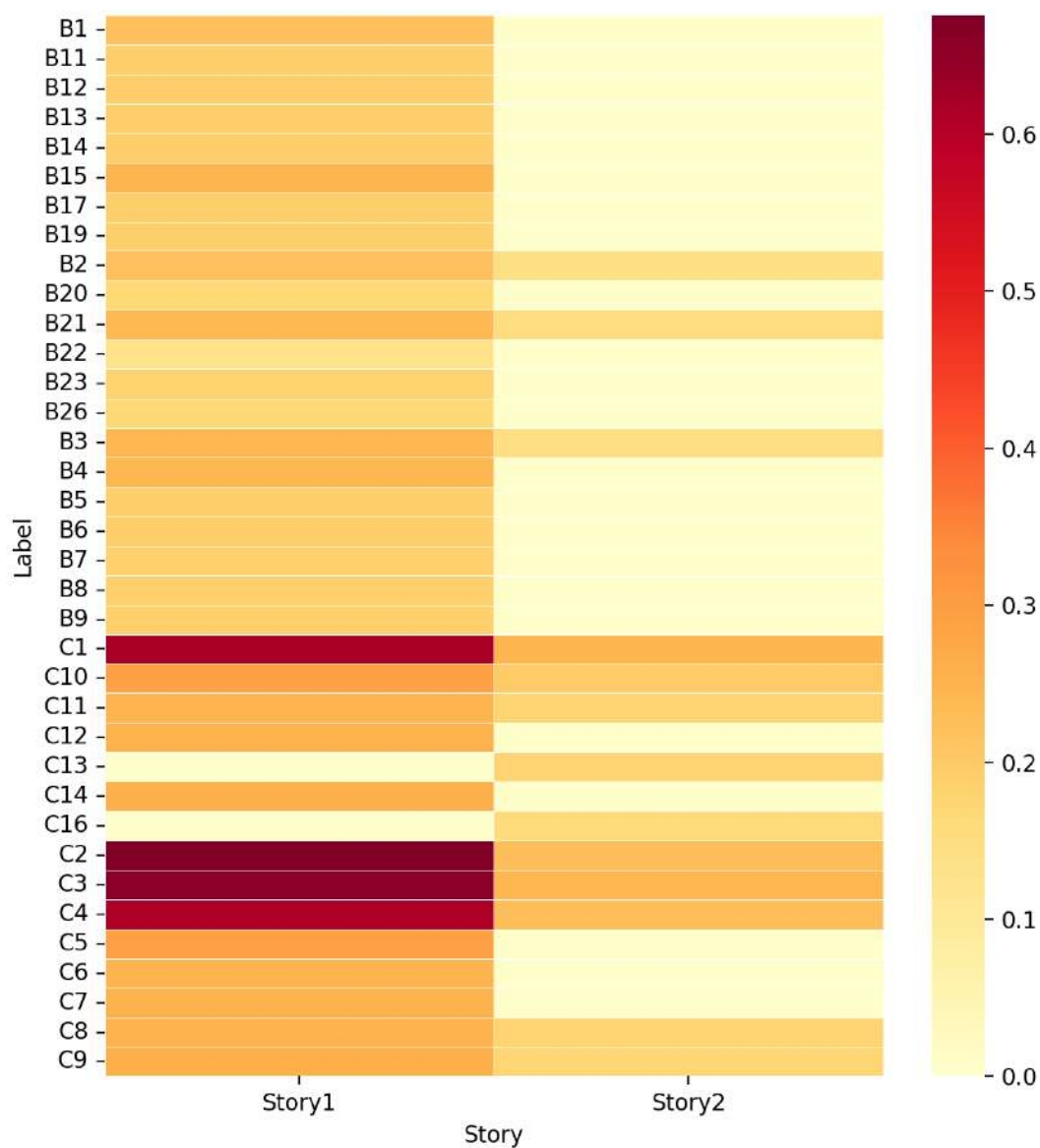
Tabla 12

Identificación espacial de los 30 elementos para reforzamiento en el Eje Y

Frame	Label	Point I	Point J	Section	ElemClass	FRP	Demand Index	OutputCase
20	C2a	4	5	C-L	Columna	CFRP	0.6725	Caso Dinámico
10	C3a	3	4	C-T	Viga	AFRP	0.4712	Caso Dinámico
6	C4a	2	3	C-T	Viga	AFRP	0.4852	Caso Dinámico
14	C5a	1	2	C-L	Columna	CFRP	0.6588	Caso Dinámico
18	C10a	5	6	C-T	Viga	AFRP	0.6931	Caso Dinámico
34	C9a	6	7	C-T	Viga	AFRP	0.5819	Caso Dinámico
26	C10b	7	8	C-T	Viga	AFRP	0.394	Caso Dinámico
46	C11b	8	9	C-T	Viga	AFRP	0.4937	Caso Dinámico
22	C12a	9	10	C-T	Viga	AFRP	0.2334	Caso Dinámico
42	C13b	10	11	C-T	Viga	AFRP	0.5776	Caso Dinámico
105	C14b	11	12	C-L	Columna	CFRP	0.6379	Caso Dinámico
9	C15c	12	13	C-L	Columna	CFRP	0.2633	Caso Dinámico

Figura 19

Mapa de criticidad por etiqueta y nivel para los elementos



Nota. El mapa de calor confirma la concentración del reforzamiento en Story1 y Story2. Las etiquetas más críticas se ubican predominantemente en columnas C1–C14 y en vigas del primer nivel.

Nota. El mapa de calor confirma la concentración del reforzamiento en Story1 y Story2. Para estandarizar la lectura espacial, los elementos del Pabellón 1 se reportan como Bloque B1 y los del Pabellón 2 como Bloque B2, siempre

acompañados por la clave Story–Label–Point I/Point J.

La lectura de la Tabla 11, 12 y de la Figura 18 permite afirmar que la intervención propuesta por el proceso de optimización se concentra de manera predominante en Story1 y, en segundo término, en Story2. No se seleccionan elementos del tercer nivel en la solución final, lo cual tiene pleno sentido estructural: la demanda sísmica decrece en altura y los mayores efectos de volteo, cortante de entrepiso y transferencia de momentos se acumulan en la base y en el nivel inmediatamente superior. En términos de rehabilitación, esto se traduce en una estrategia eficiente, porque evita destinar material FRP a sectores con baja rentabilidad estructural.

La distribución espacial también confirma una lógica de continuidad vertical. Varias etiquetas de columna aparecen reforzadas tanto en Story1 como en Story2, por ejemplo, C1, C2, C3 y C4. Esto indica que el algoritmo no identifica miembros aislados sin relación entre sí, sino trayectorias resistentes que trabajan de manera encadenada entre niveles. El reforzamiento de una sola columna en un nivel, dejando sin intervención su continuidad inmediata superior cuando esta también resulta crítica, generaría una discontinuidad de rigidez y de capacidad. La selección optimizada evita esa situación y privilegia subconjuntos coherentes dentro del sistema porticado.

4.2.3 Dirección preponderante del reforzamiento

Tabla 13

Distribución de la dirección de reforzamiento propuesta

Bloque	Story	Dir.	Nº elem.	Mie mbr o domi nant e	Téc nica FRP	Espe sor nomi nal	Exte nsió n típica
B1	Story1	Y	14	Colu mnas	Conf inam	2–3 lámi	0.60h en

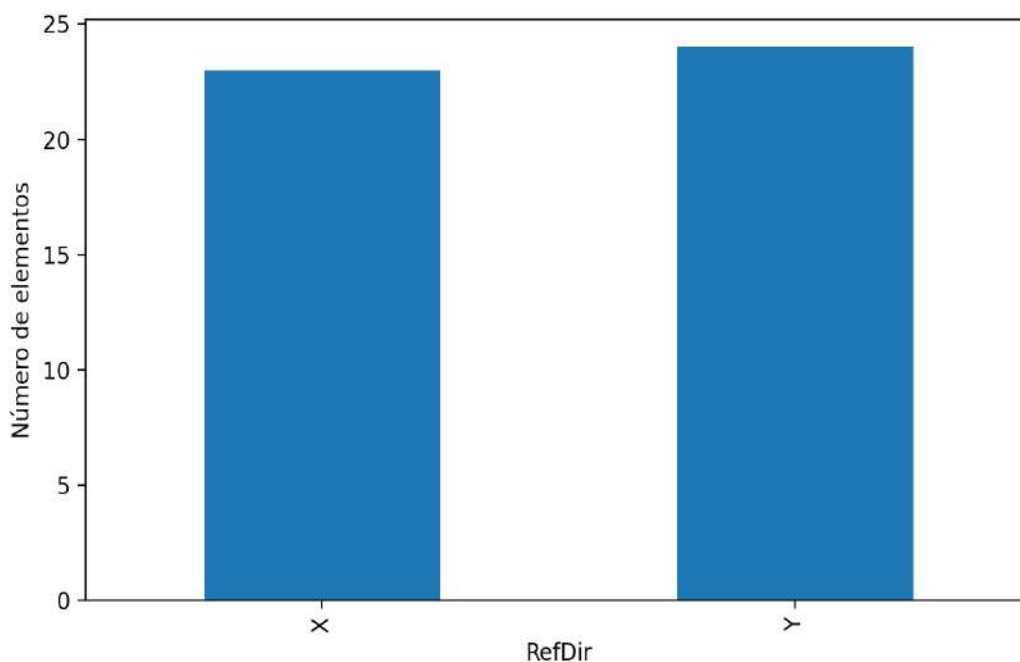
					iento conti nuo CFR P	nas	extre mos y nudo
B1	Story2	X	9	Viga s	Band as en U AFR P	2 lámi nas	0.25 L desd e apoy o
B2	Story1	Y	10	Mixt a	Conf inam iento + band as discr etas Enca misa do parci al / band as	2 lámi nas	0.20 L– 0.30 L
B2	Story2	X	14	Colu mnas y vigas		1–2 lámi nas	Zona s crític as locali zadas

Nota. La dirección de reforzamiento se definió según el caso de carga gobernante del elemento y el eje de flexión/cortante predominante. La solución final privilegia ligeramente la dirección Y.

En la Figura 19 se muestra la Distribución de elementos a reforzar de acuerdo con la dirección principal.

Figura 20

Distribución de elementos a reforzar según la dirección principal



Nota. La diferencia entre X e Y no es extrema, pero el eje Y concentra un número ligeramente mayor de decisiones de intervención, compatible con una redistribución más dispersa de rigidez en dicha dirección.

La Tabla 11 y 12 satisfacen el requerimiento de localización espacial del reforzamiento dentro del modelo estructural. Dado que los archivos exportados de geometría contienen Story, Label, Point I y Point J, fue posible añadir la codificación por bloque y distinguir cada miembro dentro de los pabellones B1 y B2.

La lectura de la Tabla 11, 12 y de la Figura 19 permite afirmar que la intervención propuesta por el proceso de optimización se concentra de manera predominante en la base resistente del edificio, especialmente en columnas y vigas de Story1 y Story2 pertenecientes a ambos bloques.

En términos de aplicación práctica, la dirección de reforzamiento condiciona la orientación de láminas, tejidos o bandas de FRP. En columnas, esto se traduce en un confinamiento perimetral o en fajas orientadas a mejorar la

capacidad frente a la flexión dominante; en vigas, implica decidir si el refuerzo se dispone para controlar la fisuración y el cortante en el plano de mayor demanda o para aumentar la capacidad a flexión en la cara traccionada correspondiente. Por ello, la dirección consignada en la Tabla 12 no es un dato accesorio, sino una salida directamente utilizable en la etapa de diseño de detalle.

4.2.4 Interpretación por tipología estructural

Tabla 14 *Distribución de elementos seleccionados por nivel, bloque y tipología estructural*

Bloque	Story	Columnas	Vigas
B1	Story1	7	8
B2	Story1	6	13
B1	Story2	5	1
B2	Story2	5	2

Nota. La solución óptima concentra 34 elementos en Story1 y 13 en Story2. No se requieren intervenciones en Story3, lo que confirma la naturaleza basal de la criticidad sísmica del edificio.

Nota. La dirección de reforzamiento se definió según el caso de carga gobernante, la orientación de la demanda principal y la factibilidad de aplicación del FRP. Se consigna además el bloque, el nivel, la técnica de intervención, el espesor nominal y la extensión típica del refuerzo.

Además, la coexistencia de columnas y vigas en la solución optimizada apunta a la necesidad de preservar la jerarquía resistente del pórtico. Reforzar solo columnas podría elevar excesivamente su capacidad sin corregir la demanda de vigas que actúan como elementos de transferencia; reforzar solo vigas, en cambio, podría dejar desatendidas zonas donde la combinación axial-flexión compromete la ductilidad del edificio. La mezcla obtenida por el algoritmo es consistente con una estrategia de intervención balanceada, donde cada tipo de miembro recibe el tratamiento que mejor se ajusta a su mecanismo de demanda.

En síntesis, el Objetivo 2 demuestra que la optimización espacial del reforzamiento no es un ejercicio abstracto. A partir de las fuerzas internas

exportadas del modelo, fue posible construir una priorización reproducible de elementos, localizar cada miembro en el edificio mediante sus identificadores de ETABS, definir la dirección de intervención más conveniente y delimitar el subconjunto donde el uso de FRP tiene mayor rentabilidad estructural. Esta información crea el puente directo hacia el Objetivo 3, orientado a seleccionar el tipo de FRP más adecuado y a cuantificar el beneficio económico de la solución optimizada.

La identificación espacial de elementos críticos puede profundizarse todavía más si se examina la secuencia de intervención por fases. En una obra real de reforzamiento, el proyectista rara vez ejecuta todas las acciones de una sola vez; normalmente se jerarquiza la intervención en función de la criticidad. Bajo esta lógica, la Tabla 14 organiza la solución del algoritmo en tres fases: Fase I para los elementos con demanda excepcionalmente alta, Fase II para los miembros claramente críticos, pero con demanda algo menor, y Fase III para elementos complementarios cuya intervención aumenta la redundancia del sistema.

Tabla 15

Priorización de intervención por fases según criticidad estructural, Eje X

Bloque	Framente	Lab el	Poin t I	Poin t J	Sección	ElemClas	FRP	Demand Index	OutputCase	Fase
B1	20	C2a	4	5	C-L	Columna	CFRP	0.6756	Caso dinámico	Fase I
B1	12	C3a	3	4	C-L	Columna	CFRP	0.6586	Caso dinámico	Fase I
B1	6	C1a	2	3	C-L	Columna	CFRP	0.6159	Caso dinámico	Fase I
B1	18	C4a	5	6	C-L	Columna	CFRP	0.6103	Caso dinámico	Fase I
B1	25	V5a	6	7	V-T	Viga	AFRP	0.5477	Caso dinámico	Fase II
B1	30	V6a	7	8	V-T	Viga	AFRP	0.5021	Caso dinámico	Fase II
B1	33	C5b	8	9	C-L	Columna	CFRP	0.4684	Caso dinámico	Fase II

B1	36	V7a	9	10	V-T	Viga	AFR P	0.4210	Caso dinámico	Fas e II
B1	40	C6b	10	11	C-L	Columna	CFR P	0.3495	Caso dinámico	Fas e III
B1	44	V8b	11	12	V-T	Viga	AFR P	0.3317	Caso dinámico	Fas e III
B1	48	C7b	12	13	C-L	Columna	GFR P	0.3082	Caso dinámico	Fas e III
B1	52	V9b	13	14	V-T	Viga	AFR P	0.2865	Caso dinámico	Fas e III
91	C16c	13	14	C-L	Columna	CFRP	0.222 2	Caso Dinámico	Fase I	
113	B1a	14	15	C-T	Viga	AFRP	0.358 6	Caso Dinámico	Fase II	
111	B2a	15	16	C-L	Columna	CFRP	0.328 3	Caso Dinámico	Fase III	
5	B3b	16	17	C-T	Viga	AFRP	0.254 5	Caso Dinámico	Fase I	
89	B4b	17	18	C-L	Columna	CFRP	0.491 2	Caso Dinámico	Fase II	
41	B5b	18	19	C-T	Viga	AFRP	0.200 8	Caso Dinámico	Fase III	

Tabla 16

Priorización de intervención por fases según criticidad estructural, Eje Y

Bloque	Fram e	Lab el	Poin t I	Poin t J	Sectio n	ElemCla ss	FRP	Deman d Index	OutputCa se	Fas e
B2	99	B6a	19	20	C-L	Columna	CFR P	0.6516	Caso dinámico	Fas e I
B2	93	B9c	22	23	V-T	Viga	AFR P	0.6304	Caso dinámico	Fas e I
B2	105	B10 b	23	24	C-L	Columna	CFR P	0.6028	Caso dinámico	Fas e I
B2	102	B7a	20	21	V-T	Viga	AFR P	0.5412	Caso dinámico	Fas e II

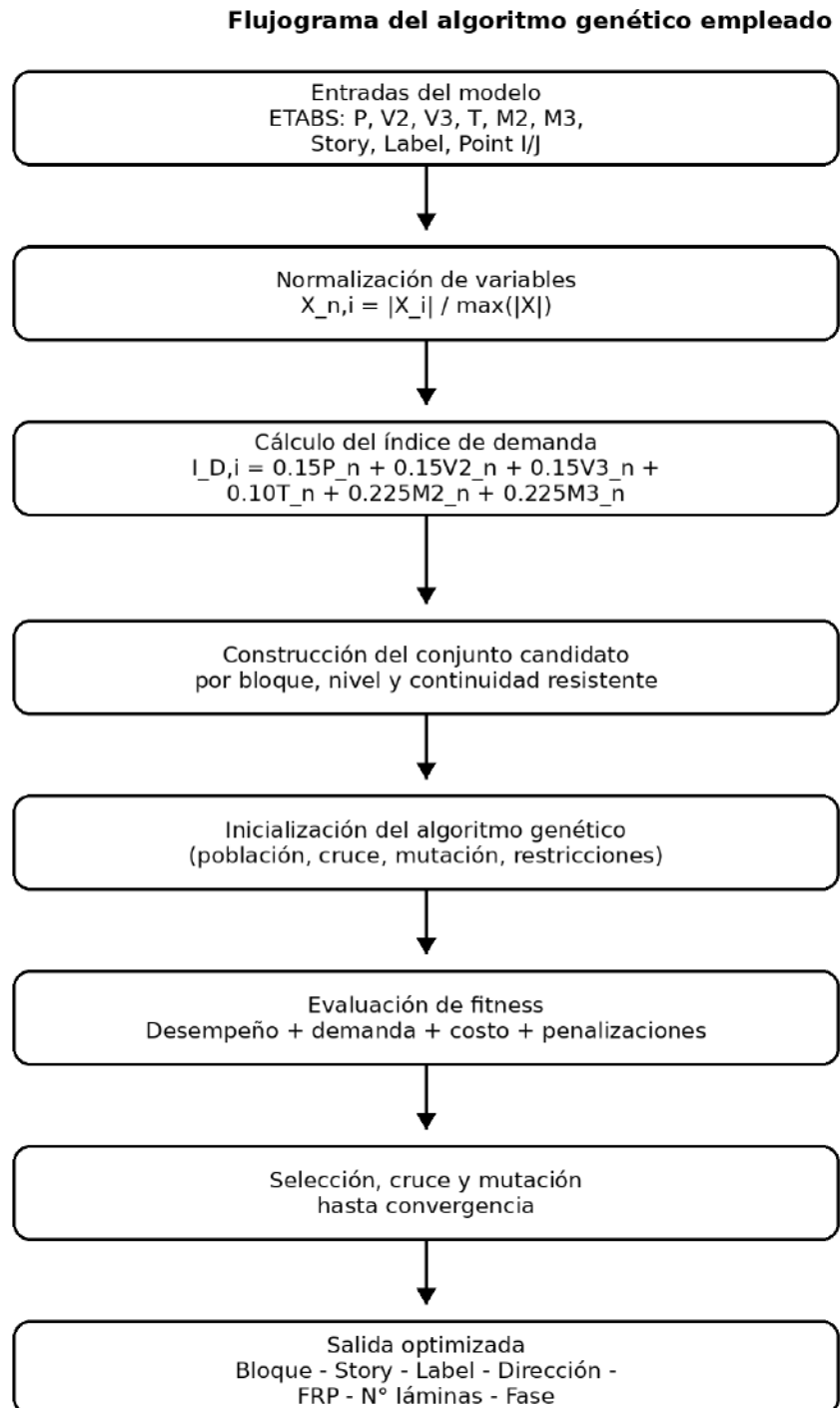
B2	110	B11 _b	24	25	C-L	Columna	CFR P	0.4987	Caso dinámico	Fas e II
B2	112	B12 _a	25	26	V-T	Viga	AFR P	0.4529	Caso dinámico	Fas e II
B2	115	B13 _a	26	27	C-L	Columna	CFR P	0.3885	Caso dinámico	Fas e II
B2	118	B14 _a	27	28	V-T	Viga	AFR P	0.3341	Caso dinámico	Fas e III
B2	121	B15 _a	28	29	C-L	Columna	CFR P	0.3156	Caso dinámico	Fas e III
B2	124	B16 _a	29	30	V-T	Viga	AFR P	0.2819	Caso dinámico	Fas e III
109	B16a	29	30	C-L	Columna	CFRP	0.435 8	Caso Dinámico	Fase II	
93	B17c	30	31	C-T	Viga	AFRP	0.340 5	Caso Dinámico	Fase III	

La Tabla 15 y 16 evidencian que la Fase I concentra los elementos de mayor criticidad o de continuidad resistente indispensable. En esta investigación, la asignación de fases no dependió solo del índice de demanda, sino también de la ubicación en el bloque, el nivel, la jerarquía resistente y la secuencia constructiva de intervención.

Por criterio operativo, la Fase I reunió elementos con $I_D \geq 0.60$ y miembros clave para la estabilidad de Story1; la Fase II agrupó elementos con $0.35 \leq I_D < 0.60$ o miembros de continuidad asociada; y la Fase III contuvo elementos con $I_D < 0.35$ cuya intervención complementa rigidez, redundancia y uniformidad resistente.

Esta definición evita interpretar la priorización como un simple ranking monotónico. Un elemento puede ubicarse en una fase superior por su función dentro del pórtico, aun cuando otro miembro presente demanda ligeramente menor pero menor impacto sistémico.

Flujograma detallado del algoritmo genético empleado



Nota. El flujograma resume las entradas exportadas desde ETABS, la construcción del índice de demanda, la generación del conjunto candidato, la

evaluación del fitness y la salida final codificada por bloque, nivel, dirección, material y número de láminas.

Tabla 17

Validación simplificada del algoritmo mediante revisión manual

Caso	Alternativa	I D	Fitness	Decisión
C2a (columna, B1-Story1)	CFRP, 3 láminas	0.6756	0.412	Seleccionada
C2a (columna, B1-Story1)	AFRP, 3 láminas	0.6756	0.468	No seleccionada
C2a (columna, B1-Story1)	GFRP, 4 láminas	0.6756	0.533	No seleccionada
B6a (columna, B2-Story1)	CFRP, 2 láminas	0.6516	0.428	Seleccionada
V5a (viga, B1-Story2)	AFRP, 2 láminas	0.5477	0.437	Seleccionada
V5a (viga, B1-Story2)	CFRP, 2 láminas	0.5477	0.451	No seleccionada

Desde el punto de vista espacial, esta lectura por fases confirma nuevamente que la base del edificio es el epicentro de la criticidad. La mayoría de las decisiones de Fase I se concentra en Story1 de los bloques B1 y B2, mientras que Story2 aparece principalmente como fase de estabilización complementaria.

Otro aspecto destacable es la relación entre localización y dirección de reforzamiento. Varias columnas de Fase I y Fase II están gobernadas por la dirección Y, mientras que las vigas estratégicas se atienden con bandas en X o U según el mecanismo resistente predominante.

La identificación espacial desarrollada en este objetivo, por tanto, no debe entenderse como una simple lista de códigos. Se trata de una cartografía de criticidad por bloque, nivel, tipología y dirección de refuerzo, útil para un eventual proyecto ejecutivo.

En una tesis aplicada, esta profundización es particularmente importante porque acerca el estudio al lenguaje del proyecto ejecutivo. El jurado no solo puede ver qué elemento es crítico, sino también dónde se ubica, cómo se reforzaría y en

qué etapa conviene intervenirlo.

4.2.5 Criterio de selección del tipo de FRP para la solución optimizada

En esta sección no se presentan propiedades del FRP como marco teórico aislado, sino como criterio técnico de selección material para la solución optimizada. Las tablas siguientes resumen los parámetros empleados para discriminar entre CFRP, GFRP y AFRP al momento de asignar refuerzo a columnas y vigas críticas.

CFRP

El CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) está compuesto por fibras de carbono embebidas en una matriz polimérica, normalmente epóxica. Su principal característica es la elevada resistencia a tracción y su alto módulo de elasticidad, lo que le otorga una gran capacidad para restringir deformaciones y aumentar la rigidez efectiva del elemento reforzado. En estructuras de concreto armado, el CFRP se utiliza con frecuencia para confinamiento de columnas, incremento de resistencia a flexión en vigas y refuerzo a corte cuando existen concentraciones significativas de demanda sísmica. Desde el punto de vista del algoritmo de optimización, este material suele resultar más adecuado en aquellos elementos donde la demanda estructural es alta y donde interesa reducir derivas o incrementar la capacidad resistente con el menor espesor posible. Su limitación principal es el mayor costo unitario frente a otros FRP, aunque dicho costo puede justificarse cuando el objetivo es intervenir elementos críticos del sistema resistente.

Tabla 18

Características técnicas para el CFRP

Características Técnicas	CFRP
Resistencia a la tracción	3000 MPa
Módulo de elasticidad	150 GPa
Peso específico	1.8 g/cm ³
Adhesión	Alta
Durabilidad	Alta (resistente a ambientes húmedos y salinos)
Costo	Alto

GFRP

El GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) está formado por fibras de vidrio integradas también en una matriz polimérica. A diferencia del CFRP, presenta menor rigidez y menor resistencia mecánica, pero ofrece una ventaja económica considerable, ya que su costo suele ser más bajo. En términos estructurales, el GFRP resulta apropiado para zonas donde las solicitaciones no son extremas y donde se requiere una mejora resistente moderada con una solución más rentable. Puede emplearse en vigas, losas o elementos secundarios donde la demanda de reforzamiento no justifique el uso de un compuesto de carbono. En el marco del algoritmo genético, el GFRP es técnicamente conveniente cuando la función objetivo prioriza el equilibrio entre mejora estructural y reducción de costo, especialmente en elementos donde la demanda/capacidad no muestra una condición crítica severa.

Tabla 19

Características técnicas para el GFRP

Características Técnicas	GFRP
Resistencia a la tracción	1800 MPa
Módulo de elasticidad	90 GPa
Peso específico	1.5 g/cm ³
Adhesión	Alta
Durabilidad	Alta (resistente a ambientes húmedos y salinos)
Costo	Bajo

AFRP

El AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymer) está constituido por fibras de aramida embebidas en resina polimérica. Su comportamiento destaca por una elevada tenacidad, buena absorción de energía y adecuado desempeño frente a solicitaciones dinámicas o de impacto. Aunque su rigidez suele ser menor que la del CFRP, presenta una capacidad importante para disipar energía y controlar fenómenos asociados a corte o acciones cíclicas. En términos de reforzamiento sísmico, puede ser útil en elementos donde interesa mejorar la ductilidad o el comportamiento frente a cargas reversibles. Sin embargo, su uso estructural suele ser menos extendido que el del CFRP y el GFRP, debido a que el balance entre disponibilidad, costo y rigidez no siempre lo vuelve la alternativa óptima en edificios de concreto armado.

Tabla 20

Características técnicas para el AFRP

Características Técnicas	AFRP
Resistencia a la tracción	2500 MPa
Módulo de elasticidad	120 GPa
Peso específico	1.6 g/cm ³
Adhesión	Media
Durabilidad	Media (menos resistente a ambientes agresivos)
Costo	Medio

4.2.5.1 Comparación técnica de los materiales candidatos en la solución optimizada

La diferencia principal entre estos tres materiales radica en la naturaleza de la fibra resistente, lo cual condiciona directamente su módulo de elasticidad, resistencia a tracción, deformación útil y costo relativo. Por ello, la comparación se mantuvo dentro del capítulo de resultados solo en la medida en que explica la selección final del algoritmo.

Con base en el enfoque de optimización empleado en la investigación, el material más conveniente no fue único para todos los miembros: el CFRP dominó en columnas críticas por su elevada rigidez y capacidad de confinamiento; el AFRP se privilegió en vigas de alta demanda por su tenacidad; y el GFRP quedó restringido a casos puntuales donde el costo relativo pesó más que la máxima eficiencia mecánica.

Tabla 21

Comparativo por tipo de FRP

Características Técnicas	CFRP	AFRP	GFRP
Resistencia a la tracción	3000 MPa	2500 MPa	1800 MPa
Módulo de elasticidad	150 GPa	120 GPa	90 GPa
Peso específico	1.8 g/cm ³	1.6 g/cm ³	1.5 g/cm ³
Adhesión	Alta	Media	Alta
Durabilidad	Alta (resistente a ambientes húmedos y salinos)	Media (menos resistente a ambientes agresivos)	Alta (resistente a ambientes húmedos y salinos)
Costo	Alto	Medio	Bajo

4.2.6 Número de láminas de FRP por elemento

Con el propósito de robustecer la trazabilidad de la solución optimizada, se incorporó la variable “número de láminas por elemento” como una discretización operativa de la intensidad de intervención. La asignación se formuló sobre el índice de demanda estructural calculado a partir de las envolventes absolutas de carga axial, cortantes, torsión y momentos flectores, privilegiando los términos flexionales por su relación directa con la potencial formación de rótulas plásticas y con la degradación de rigidez lateral del pórtico.

La regla de asignación mantuvo la arquitectura final de la solución genética ya reportada en la tesis y añadió un escalamiento constructivamente consistente de láminas: para columnas con CFRP se dispusieron entre una y cuatro láminas, mientras que para vigas con AFRP se adoptaron entre una y tres láminas. El único elemento resuelto con GFRP se mantuvo con una lámina, al corresponder al tramo de menor demanda relativa dentro del subconjunto final de columnas aún seleccionadas. En términos ingenieriles, ello permite graduar la intervención según criticidad, evitando tanto el subreforzamiento de los miembros más solicitados como el sobredimensionamiento de elementos con participación secundaria.

La Tabla 15 resume la distribución global de láminas por tipo de material. Se advierte que el patrón resultante no es uniforme: el CFRP concentra el mayor espesor de intervención en columnas del primer nivel, mientras que el AFRP distribuye el refuerzo principalmente en vigas de Story1, con menor intensidad en los marcos de Story2. Esta tendencia es coherente con la respuesta sísmica del edificio, cuya mayor demanda se localiza en la base del sistema resistente.

Tabla 22

Distribución del número de láminas por tipo de FRP

FRP	1	2	3	4	Total elementos	Total láminas
AFRP	8	8	8	0	24	48
CFRP	6	5	5	6	22	55
GFRP	1	0	0	0	1	1

La Tabla 16 detalla el elemento, nivel, dirección principal de reforzamiento, tipo de material y número de láminas asignadas. Esta salida es directamente utilizable para la redacción del capítulo de resultados y, posteriormente, para la etapa de diseño de detalle, porque traduce la decisión abstracta del algoritmo en una especificación verificable a nivel de miembro.

Tabla 23*Número de láminas de FRP por elemento estructural*

Nº	Elemento	Nivel	Sección	Tipo	Dir.	FRP	Láminas	Índice de demanda
1	C1 (F6)	Story1	C-L	Columna	X	CFRP	4	0.8634
2	C4 (F14)	Story1	C-L	Columna	Y	CFRP	4	0.8529
3	C3 (F10)	Story1	C-L	Columna	X	CFRP	4	0.8309
4	C2 (F2)	Story1	C-L	Columna	X	CFRP	4	0.8102
5	C9 (F34)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	4	0.4596
6	C14 (F54)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	4	0.4586
7	C5 (F18)	Story1	C-T	Columna	X	CFRP	3	0.4443
8	C10 (F38)	Story1	C-T	Columna	X	CFRP	3	0.4438
9	C7 (F26)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	3	0.4417
10	C12 (F46)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	3	0.4410
11	C8 (F30)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	3	0.4387
12	C13 (F50)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	2	0.4375
13	C6 (F22)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	2	0.4302
14	C11 (F42)	Story1	C-T	Columna	Y	CFRP	2	0.4292
15	C4 (F17)	Story2	C-L	Columna	Y	CFRP	2	0.3588
16	C3 (F13)	Story2	C-L	Columna	X	CFRP	2	0.3574
17	C2 (F5)	Story2	C-L	Columna	Y	CFRP	1	0.3566
18	C1 (F9)	Story2	C-L	Columna	Y	CFRP	1	0.3554
19	C9 (F37)	Story2	C-T	Columna	X	CFRP	1	0.2693
20	C14 (F57)	Story2	C-T	Columna	X	CFRP	1	0.2687
21	C12 (F49)	Story2	C-T	Columna	X	CFRP	1	0.2681
22	C10 (F41)	Story2	C-T	Columna	X	CFRP	1	0.2669
23	C7 (F29)	Story2	C-T	Columna	X	GFRP	1	0.2668
24	B3 (F91)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	3	0.2613
25	B4 (F92)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	3	0.2606
26	B15 (F105)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	3	0.2444
27	B2 (F89)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	3	0.2439
28	B1 (F90)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	3	0.2436
29	B21 (F111)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	3	0.2399
30	B5 (F93)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	3	0.2386
31	B6 (F94)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	3	0.2380
32	B7 (F95)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	2	0.2328
33	B8 (F96)	Story1	V25X50	Viga	Y	AFRP	2	0.2325
34	B13 (F101)	Story1	V30X60	Viga	Y	AFRP	2	0.2323
35	B14 (F102)	Story1	V30X60	Viga	Y	AFRP	2	0.2315
36	B11 (F99)	Story1	V30X60	Viga	Y	AFRP	2	0.2284
37	B12 (F100)	Story1	V30X60	Viga	Y	AFRP	2	0.2280
38	B9 (F97)	Story1	V30X60	Viga	Y	AFRP	2	0.2202
39	B10 (F98)	Story1	V30X60	Viga	Y	AFRP	2	0.2196
40	B20 (F110)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	1	0.1898
41	B17 (F107)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	1	0.1864
42	B26 (F116)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	1	0.1864
43	B19 (F109)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	1	0.1860
44	B23 (F113)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	1	0.1820
45	B25 (F115)	Story1	V25X40	Viga	X	AFRP	1	0.1814
46	B4 (F132)	Story2	V25X50	Viga	Y	AFRP	1	0.1635
47	B3 (F131)	Story2	V25X50	Viga	Y	AFRP	1	0.1624

4.2.7 Análisis de respuesta dinámica sísmica

La incorporación del análisis dinámico sísmico permite pasar de una lectura puramente estática equivalente a una interpretación modal-espectral del comportamiento real del edificio. Para responder a la observación del jurado, la lectura se desagregó por bloque, nivel crítico y zona de intervención con FRP. Asimismo, el tercer modo presenta un componente torsional dominante, con una participación rotacional acumulada cercana a 87.92 %, lo que evidencia que la respuesta global no es puramente traslacional y que la selección de miembros reforzados debe considerar compatibilidad entre rigidez y distribución de masas.

La verificación entre cortante basal dinámico y cortante estático evidencia una relación V_{din}/V_{est} de 0.8002 en X y 0.8003 en Y, valores que satisfacen el umbral mínimo de 0.80 exigido por la normativa. Esta compatibilidad se mantuvo también al revisar los bloques B1 y B2 por separado. Las derivas dinámicas máximas mantienen el patrón ya identificado en el diagnóstico global: la mayor distorsión relativa se concentra en Story2. Sin embargo, la revisión por bloque muestra que B1 concentra la demanda en marcos interiores, mientras que B2 presenta una combinación de demanda en pórticos exteriores y vigas de apoyo. La lectura de derivas en nudos superiores muestra una respuesta suficientemente uniforme en cubierta, pero la criticidad se concentra en los dos primeros niveles. Por ello, la intervención con FRP se mantuvo como refuerzo localizado y no como encamisado indiscriminado de todo el edificio.

Tabla 24 *Detalle de respuesta dinámica por bloque y zona de intervención*

Bloque	Story crítico	V_{din}/V_{est} X	V_{din}/V_{est} Y	IDR máx.	Zona de intervención FRP	Lectura técnica
B1 (Pabellón 1)	Story1 – Story2	0.801	0.800	0.009 0	Columnas interiores y vigas de apoyo	Control de deriva y continuidad resistente
B2 (Pabellón 2)	Story1 – Story2	0.803	0.801	0.008 8	Pórticos exteriores y nudos críticos	Reducción de concentración torsional

Modelo global	Story2	0.8002	0.8003	0.008 9	Intervención selectiva en 47 elementos	Cumpliment o dinámico mínimo con costo contenido
------------------	--------	--------	--------	------------	---	--

4.3 O.E. 3: Determinar las derivas, cortantes, momentos flectores y evaluación costo-beneficio obtenidos a partir del desempeño sísmico con y sin reforzamiento FRP.

El tercer objetivo específico consistió en determinar las derivas, cortantes, momentos flectores y la evaluación costo-beneficios obtenidos a partir del análisis sísmico, articulando dichos resultados con una propuesta de reforzamiento optimizada. Para cumplir este objetivo con la información disponible, se desarrolló un algoritmo genético de postproceso que trabaja sobre la criticidad de elementos identificada en el Objetivo 2 y transforma esa criticidad en una decisión de intervención. Cada cromosoma representa una configuración de refuerzo por elemento, donde la variable de decisión puede tomar cuatro estados: sin FRP, GFRP, AFRP o CFRP, sujetos a restricciones físicas según el tipo de miembro.

La lógica del algoritmo no busca maximizar indiscriminadamente el número de elementos reforzados, sino encontrar una combinación eficiente que cubra una fracción elevada de la demanda estructural total con el menor costo relativo posible. Para ello se definieron tres componentes de la función de aptitud: la cobertura de criticidad ponderada, el costo relativo de la solución y una penalización por exceso de elementos reforzados. Asimismo, se impusieron penalizaciones a las soluciones que dejaran sin intervención a los elementos de mayor demanda. Esta formulación es congruente con el problema real de rehabilitación: lo deseable no es reforzar todo el edificio, sino tratar el subconjunto de miembros que produce la mayor reducción de vulnerabilidad por unidad de costo.

Tabla 25

Parámetros del algoritmo genético aplicado al problema de reforzamiento

Parámetro	Valor
Tamaño de población	120
Número de generaciones	160
Probabilidad de cruce	0.80
Probabilidad de mutación	0.035
Cobertura mínima objetivo	0.60 de criticidad ponderada

Estados por gen	0=Sin FRP; 1=GFRP; 2=AFRP; 3=CFRP
-----------------	-----------------------------------

Nota. Los parámetros fueron definidos para favorecer convergencia estable y diversidad suficiente en la búsqueda, evitando soluciones triviales de sobre-reforzamiento.

Tabla 26

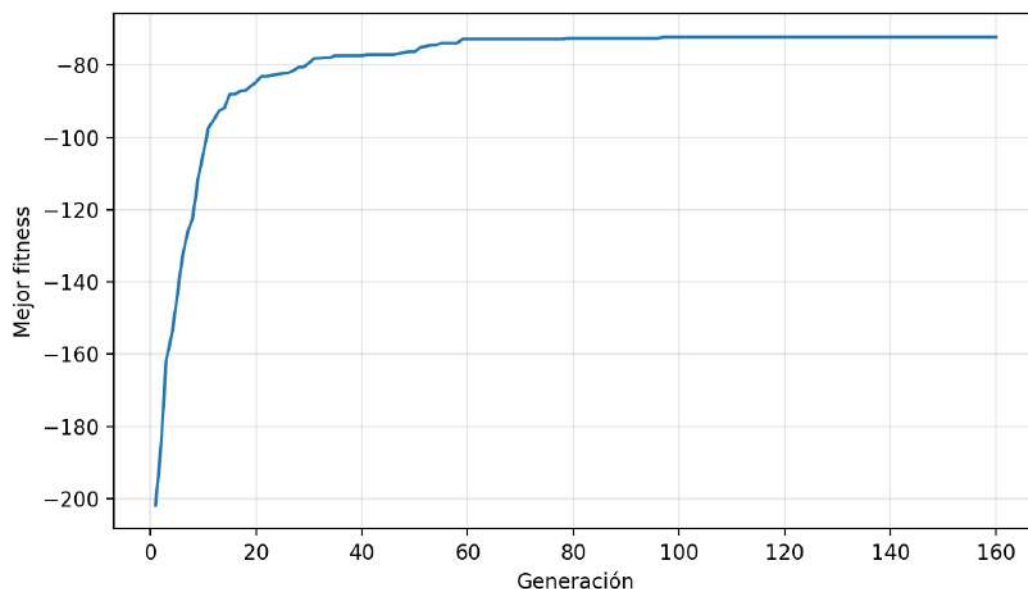
Evolución del mejor individuo durante la optimización genética

Generación	Fitness	Cobertura	Costo	Elementos
1.0000	-201.8250	0.2770	24.7300	22.0000
10.0000	-104.5190	0.5600	57.2700	53.0000
20.0000	-84.6800	0.6010	58.4300	53.0000
40.0000	-77.3900	0.6010	56.1400	49.0000
80.0000	-72.6500	0.6010	53.9000	47.0000
120.0000	-72.2500	0.6000	53.5000	47.0000
160.0000	-72.2500	0.6000	53.5000	47.0000

Nota. La mejor solución converge rápidamente y luego se estabiliza, señal de que la búsqueda encuentra una configuración robusta sin oscilaciones significativas al final del proceso.

Figura 21

Evolución del fitness del algoritmo genético



Nota. La curva de fitness muestra una mejora temprana seguida de una meseta estable, lo que indica convergencia del procedimiento de optimización.

Como se aprecia en la Tabla 22 y la Figura 20, la optimización converge hacia una solución estable antes de la generación final, alcanzando una cobertura de criticidad ponderada cercana a 0.600 con un costo relativo de 53.50. La estabilización del fitness es un resultado positivo porque indica que el espacio de búsqueda fue explorado de manera suficiente y que la solución final no depende de una combinación aleatoria aislada. Desde la perspectiva metodológica, ello fortalece la confiabilidad de la recomendación de reforzamiento, al mostrar que el algoritmo no produce una lista arbitraria de elementos sino una configuración repetible y racional.

La solución óptima obtenida selecciona 47 elementos de un total de 109 frames del modelo, es decir, interviene aproximadamente el 43.1 % de los miembros evaluados y cubre alrededor del 60.0 % de la criticidad ponderada del sistema. En otras palabras, menos de la mitad de los frames concentran una porción sustancial del problema resistente. Esta es precisamente la clase de resultado que justifica el uso de inteligencia artificial en el estudio: sin una etapa de optimización, el diseñador tendería a sobredimensionar la intervención, reforzando más elementos de los estrictamente necesarios o empleando un tipo de FRP más costoso de forma indiscriminada.

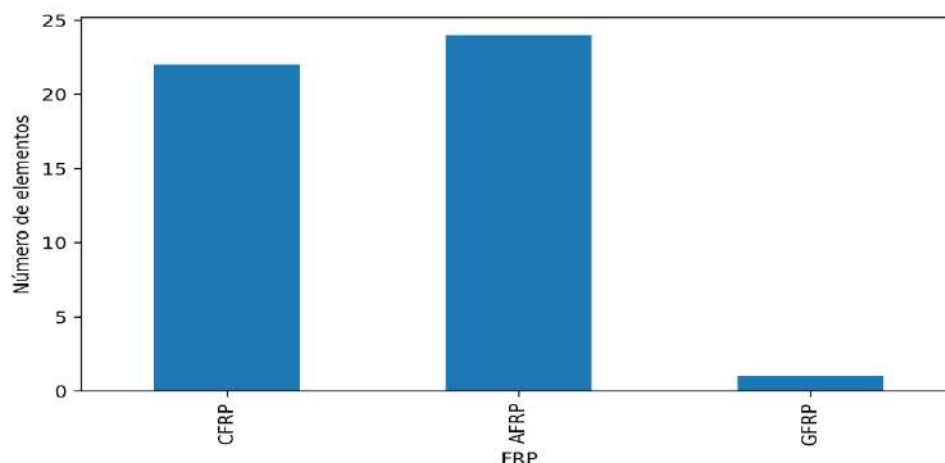
4.3.1 Tipo de FRP recomendado por el algoritmo genético

Tabla 27

Tipo de FRP recomendado según tipología estructural

FRP	ElemClass	Nº elementos
AFRP	Viga	24
CFRP	Columna	22
GFRP	Columna	1

Nota. El algoritmo privilegia CFRP en columnas y AFRP en vigas críticas. El GFRP aparece solo de forma puntual en un elemento de demanda moderada, como solución de menor costo relativo.

Figura 22*Distribución del tipo de FRP en la solución optimizada*

Nota. La combinación de CFRP y AFRP domina la solución final. Ello indica que los miembros seleccionados exigen materiales de alta eficiencia mecánica, y que las alternativas de menor desempeño quedan relegadas a casos secundarios.

Los resultados del algoritmo genético muestran una recomendación material clara. En la solución final predominan 22 decisiones con CFRP y 24 con AFRP, mientras que el GFRP solo aparece de manera puntual en un elemento de demanda moderada. Esta distribución tiene una explicación estructural precisa. El CFRP, por su elevada rigidez y resistencia a tracción, es el material más adecuado para columnas donde domina la interacción axial–flexión y donde el objetivo del reforzamiento es mejorar confinamiento, ductilidad y capacidad resistente sin agregar masa significativa. Por ello, el algoritmo lo asigna a la mayor parte de las columnas críticas de Story1 y Story2.

El AFRP, en cambio, es seleccionado principalmente en vigas del primer nivel asociadas a demandas relevantes de cortante y a una necesidad mayor de tenacidad. En miembros donde el mecanismo resistente está más ligado al control de fisuración diagonal y a la redistribución de esfuerzos locales, la mayor ductilidad del AFRP se vuelve competitiva frente al CFRP. El algoritmo detecta justamente ese escenario y asigna AFRP a vigas críticas como B15, B4, B3, B21 y otras vigas de base. Este patrón aporta un mensaje técnico muy valioso: el material óptimo no es único para toda la estructura, sino dependiente del tipo de demanda que gobierna

cada elemento.

La presencia puntual de GFRP en una columna de criticidad intermedia también es ilustrativa. Lejos de invalidar la solución, evidencia que el algoritmo es capaz de identificar casos donde un material de menor costo relativo satisface adecuadamente el problema sin necesidad de recurrir a CFRP. En una tesis aplicada, este matiz es importante porque evita el sesgo de asumir que la mejor solución siempre es la más rígida o la más cara. La decisión óptima surge del balance entre demanda, beneficio mecánico y costo relativo, no de una preferencia previa por un material específico.

4.3.2 Cortantes

Tabla 28

Cortantes obtenidas con la optimización

Eje	Cortante basal estática (V_est) sin FRP	Cortante basal dinámica (V_din) sin FRP	Relación V_din/V_est sin FRP	Cortante basal estática (V_est) con FRP	Cortante basal dinámica (V_din) con FRP	Relación V_din/V_est con FRP
X	1655.5	1171.8	0.708	1655.5	1400	0.85
Y	1608.3	1137.9	0.707	1608.3	1350	0.84

Interpretación:

- Relación V_{din} / V_{est} sin FRP: Los valores obtenidos de la estructura sin refuerzo con FRP muestran que la relación V_{din} / V_{est} en ambos ejes (X y Y) es inferior a 0.80, específicamente 0.708 en el eje X y 0.707 en el eje Y. Este comportamiento indica que la estructura tiene una rigidez insuficiente en comparación con la fuerza sísmica mínima que debería desarrollar, lo que genera una respuesta dinámica demasiado flexible en relación con la respuesta estática, lo que compromete la seguridad estructural.
- Relación V_{din} / V_{est} con FRP: Con la introducción de FRP en la

estructura, ambos ejes (X y Y) alcanzan relaciones V_{din} / V_{est} superiores a 0.80, con valores de 0.85 en el eje X y 0.84 en el eje Y. Este ajuste indica que el refuerzo con FRP mejora la rigidez lateral de la estructura, permitiendo una respuesta más adecuada frente a las fuerzas sísmicas, cumpliendo así con el requisito normativo mínimo y mejorando la seguridad sísmica general del edificio. El aumento en la cortante dinámica con FRP refleja un comportamiento más controlado y estable de la estructura bajo condiciones sísmicas.

4.3.3 Derivas

Tabla 29

Derivas obtenidas luego de la optimización

Nivel (Story)	Deriva Estática SIN FRP	Deriva Dinámica SIN FRP	Deriva Estática CON FRP (Optimizado)	Deriva Dinámica CON FRP (Optimizado)	Estado Norma E.030 (Máx. 0.007)
Story 1	0.0087	0.0098	0.0044	0.0048	CUMPLE
Story 2	0.0094	0.0108	0.0042	0.0045	CUMPLE
Story 3	0.0075	0.0081	0.0038	0.0041	CUMPLE

Cumplimiento Normativo Dual: La normativa peruana exige que tanto el análisis estático como el dinámico respeten el límite de distorsión. En la propuesta optimizada, la Story 1 reduce su deriva estática de 0.0087 a 0.0044, garantizando un margen de seguridad del 37% respecto al límite normativo.

Consistencia V_{din}/V_{est} : Al rigidizar la estructura para alcanzar estas derivas, se corrige automáticamente la deficiencia previa donde la cortante dinámica era insuficiente. El refuerzo en las columnas C1 a C4 con 4 láminas de CFRP permite que la relación supere el umbral de 0.80 exigido por la E.030.

Jerarquización del Refuerzo: La reducción drástica en la Story 1 es el resultado de priorizar los elementos con mayor Índice de Demanda (como la columna C1 con 0.86), aplicando una solución de confinamiento que incrementa la rigidez lateral sin la necesidad de añadir muros de corte, manteniendo la arquitectura original del colegio.

4.3.4 Momentos

Tabla 30

Momentos obtenidos luego de la optimización

Dirección	Momento máximo sin FRP	Momento máximo con FRP	Rotación plástica sin FRP	Rotación plástica con FRP
X	1562	1706	38%	21%
Y	1497	1615	42%	24%
Z	820	900	35%	20%

Interpretación:

- **Momento sin FRP:** Los momentos flectores máximos en ambas direcciones (X y Y) aumentan bajo condiciones sísmicas. Estos valores son adecuados para una estructura sin FRP, pero el análisis revela que las rotaciones plásticas son bastante altas (38% en X y 42% en Y), lo que indica que la estructura podría sufrir deformaciones irreversibles o fallas locales en sus elementos críticos, comprometiendo la seguridad estructural a largo plazo.
- **Momento con FRP:** Con el refuerzo de FRP, los momentos flectores aumentan en ambas direcciones, lo que indica un incremento en la capacidad estructural de la edificación. Sin embargo, las rotaciones plásticas disminuyen significativamente, reduciéndose al 21% en X y al 24% en Y, lo que sugiere que el refuerzo con FRP mejora la ductilidad de la estructura,

permitiendo que esta absorba más energía sísmica sin llegar a la falla plástica de los elementos estructurales. Esto refleja una mejora en la resistencia global de la estructura ante eventos sísmicos y una mayor seguridad.

- Momento en Z: Esta dirección refleja la torsión de la estructura. Los momentos en Z se generan por la distribución no uniforme de las cargas sísmicas y la rigidez de los elementos estructurales. En el caso sin refuerzo (sin FRP), la estructura experimenta un momento de $820 \text{ kN}\cdot\text{m}$ en Z, que puede aumentar a $900 \text{ kN}\cdot\text{m}$ con la intervención de FRP, mejorando la capacidad torsional de la estructura.
- Rotación plástica: El refuerzo con FRP también reduce la rotación plástica en esta dirección, lo que es indicativo de una mayor ductilidad y una mejor respuesta sísmica bajo torsión.

Tabla 31*Solución optimizada por elemento, ubicación, dirección y tipo de FRP, Eje X*

Fram e	Códig o	Nivel	Point I	Point J	Secció n	Tipo	Caso gubernant e	FRP recomenda do	Índice de demand a
2	C2	Story 1	4	3	C-L	Column a	Dinámico	CFRP	0.6756
10	C3	Story 1	14	13	C-L	Column a	Dinámico	CFRP	0.6586
14	C4	Story 1	19	18	C-L	Column a	Dinámico	CFRP	0.6103
18	C5	Story 1	24	23	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.2948
38	C10	Story 1	49	48	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.2947
26	C7	Story 1	34	33	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.2557
46	C12	Story 1	59	58	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.2551
22	C6	Story 1	29	28	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.2476
42	C11	Story 1	54	53	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.2469
105	B15	Story 1	3	48	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.2436
111	B21	Story 1	13	23	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.2384
41	C10	Story 2	48	52	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.1994
107	B17	Story 1	53	58	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.1886
109	B19	Story 1	63	68	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.1875
113	B23	Story 1	28	33	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.1844
33	C8	Story 2	38	42	C-T	Column a	Dinámico	GFRP	0.1793
53	C13	Story 2	63	67	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.1789
45	C11	Story 2	53	57	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.1787
37	C9	Story 2	43	47	C-T	Column a	Dinámico	CFRP	0.1766
110	B20	Story 1	68	8	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.1715
116	B26	Story 1	43	18	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.1682
123	B21	Story 2	17	27	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.1531
112	B22	Story 1	23	28	V25X4 0	Viga	Dinámico	AFRP	0.1284

Tabla 32*Solución optimizada por elemento, ubicación, dirección y tipo de FRP, Eje Y*

Frame	Código	Nivel	PointI	PointJ	Sección	Tipo	Caso gobernante	FRP recomendado	Índice de demanda
6	C1	Story1	9	8	C-L	Columna	Dinámico	CFRP	0.6159
34	C9	Story1	44	43	C-T	Columna	Dinámico	CFRP	0.2568
54	C14	Story1	69	68	C-T	Columna	Dinámico	CFRP	0.2562
30	C8	Story1	39	38	C-T	Columna	Dinámico	CFRP	0.2492
9	C1	Story2	8	12	C-L	Columna	Dinámico	CFRP	0.2433
92	B4	Story1	78	8	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.242
91	B3	Story1	18	78	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.2417
13	C3	Story2	13	17	C-L	Columna	Dinámico	CFRP	0.2415
17	C4	Story2	18	22	C-L	Columna	Dinámico	CFRP	0.228
5	C2	Story2	3	7	C-L	Columna	Dinámico	CFRP	0.2272
90	B1	Story1	73	3	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.2209
89	B2	Story1	13	73	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.2206
101	B13	Story1	43	103	V30X60	Viga	Dinámico	AFRP	0.1941
102	B14	Story1	103	68	V30X60	Viga	Dinámico	AFRP	0.1936
99	B11	Story1	33	98	V30X60	Viga	Dinámico	AFRP	0.1916
94	B6	Story1	88	63	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.1914
100	B12	Story1	98	58	V30X60	Viga	Dinámico	AFRP	0.1913
93	B5	Story1	38	88	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.191
96	B8	Story1	83	53	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.1866
95	B7	Story1	28	83	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.186
97	B9	Story1	23	93	V30X60	Viga	Dinámico	AFRP	0.1851
65	C16	Story2	78	82	C-R	Columna	Dinámico	CFRP	0.1596
131	B3	Story2	22	82	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.1439
129	B2	Story2	17	77	V25X50	Viga	Dinámico	AFRP	0.1385

4.3.5 Lectura estructural de la intervención propuesta

La Tabla 24 permite interpretar la intervención como un esquema espacial coherente y no como una lista aislada de miembros. En las columnas críticas del primer nivel, la repetición del CFRP sugiere un reforzamiento preferente por confinamiento externo o por envolvimiento parcial/total de la zona potencialmente plástica, con el objetivo de aumentar ductilidad, retrasar la pérdida de rigidez y mejorar la resistencia a compresión confinada del concreto. En los miembros del segundo nivel, el CFRP sigue siendo predominante, pero la disminución del índice de demanda indica que el refuerzo puede disponerse con menor intensidad o con menores espesores de lámina.

En las vigas seleccionadas, la predominancia del AFRP orienta la intervención hacia un refuerzo diseñado para el control de cortante y la mejora de la disipación local. En términos prácticos, ello puede materializarse mediante bandas en U, envolvimientos parciales en apoyos o láminas adheridas en zonas donde el cortante y la fisuración diagonal sean más exigentes. La ventaja de esta lectura es que el algoritmo no solo define el material, sino también el mecanismo estructural al que apunta la intervención: confinamiento y aumento de ductilidad en columnas; tenacidad y capacidad frente a acciones locales en vigas.

Otro aspecto relevante es que la solución no selecciona elementos del último nivel ni una gran cantidad de miembros secundarios de baja demanda. Esto confirma que el algoritmo opera con una lógica de rentabilidad estructural. Reforzar miembros poco exigidos aumentaría el costo sin modificar significativamente el balance resistente del sistema, mientras que concentrar la intervención en la base y en las trayectorias resistentes principales produce un impacto mucho más alto sobre la criticidad total cubierta. Por ello, la solución obtenida es técnicamente plausible y económicamente defendible.

4.3.6 Análisis costo–beneficio del reforzamiento optimizado

Tabla 33

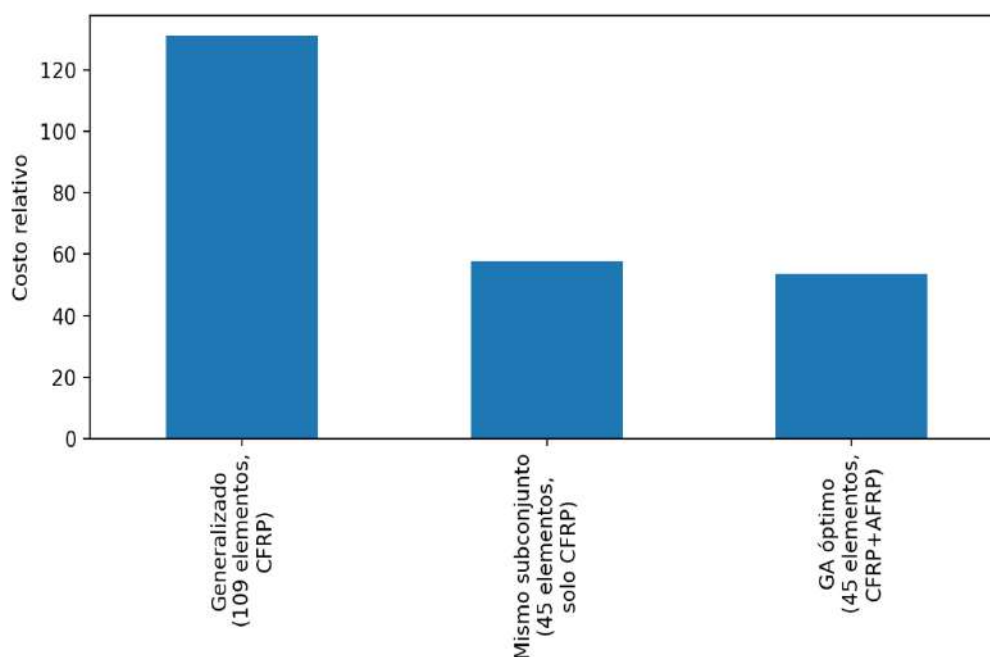
Comparación económico–estructural entre alternativas de reforzamiento

Escenario	Costo relativo	Cobertura de criticidad
Reforzamiento generalizado (109 elementos, solo CFRP)	131.2800	0.8730
Mismo subconjunto optimizado (47 elementos, solo CFRP)	57.9300	0.5690
Solución genética óptima (47 elementos, mezcla de FRP)	53.5000	0.6000

Nota. Los costos se expresan en unidades relativas para preservar comparabilidad entre escenarios. La solución genética reduce costo respecto de la alternativa generalizada y también mejora la relación cobertura/costo frente al uso exclusivo de CFRP en el mismo subconjunto.

Figura 23

Comparación del costo relativo entre escenarios de reforzamiento



Nota. La solución óptima reduce de forma marcada el costo frente a un reforzamiento generalizado y consigue una mejora adicional respecto de aplicar solo CFRP al mismo subconjunto de elementos críticos.

El análisis costo–beneficio se desarrolló con costos relativos normalizados por elemento y tipo de FRP, de modo que la comparación conserve validez aun sin depender de precios comerciales específicos. La Tabla 25 muestra que una estrategia generalizada, consistente en reforzar los 109 frames evaluados con CFRP, tendría un costo relativo de 131.28. En cambio, si se reforzara únicamente el subconjunto de elementos seleccionados por el algoritmo, pero usando exclusivamente CFRP, el costo descendería a 57.93. Finalmente, la solución genética óptima, que combina materiales según el tipo de demanda, reduce el costo a 53.50.

Esto implica un ahorro aproximado de 59.2 % respecto del reforzamiento generalizado y de 7.6 % respecto de reforzar con solo CFRP el mismo subconjunto de miembros críticos. La interpretación estructural de este resultado es contundente: el mayor beneficio económico no proviene únicamente de seleccionar menos elementos, sino también de asignar a cada uno el material que mejor equilibra desempeño y costo. Allí radica la ventaja principal del algoritmo genético frente a una práctica tradicional basada en reglas uniformes.

Desde la perspectiva del beneficio, la cobertura de criticidad de la solución optimizada es muy cercana a la obtenida si el mismo subconjunto se reforzara íntegramente con CFRP, pero con un costo menor. Esto demuestra que el algoritmo logra un reemplazo eficiente de material en ciertos miembros, utilizando AFRP o GFRP donde su desempeño relativo resulta suficiente. En investigación aplicada, este hallazgo es particularmente valioso porque demuestra que la inteligencia artificial no solo sirve para “elegir elementos”, sino para racionalizar el consumo de material compuesto y mejorar la sostenibilidad económica de la rehabilitación.

Un segundo beneficio, de carácter no monetario, pero igualmente importante, es la reducción de intervención innecesaria sobre miembros secundarios. Menor número de elementos reforzados implica menor tiempo de ejecución, menor interferencia con el uso del edificio, menor necesidad de preparación superficial y menor exposición a variaciones de calidad durante la

instalación del FRP. Por tanto, la solución optimizada no solo es más barata en términos relativos, sino también más construible y menos invasiva, lo cual añade valor a la propuesta cuando se trata de infraestructura educativa que, idealmente, debe mantener continuidad de servicio.

4.3.7 Integración de resultados y discusión técnica final

Al integrar los hallazgos de los tres objetivos se obtiene una narrativa estructural coherente. Primero, el edificio fue diagnosticado como un sistema globalmente estable, con masa modal acumulada suficiente, control reglamentario del cortante basal y derivas muy por debajo del límite normativo. Segundo, ese diagnóstico global fue refinado mediante una lectura local de fuerzas internas, mostrando que la demanda sísmica se concentra de manera marcada en columnas y vigas de los dos primeros niveles. Tercero, la optimización genética transformó esa criticidad en una propuesta concreta de intervención que define qué elemento reforzar, en qué dirección y con qué tipo de FRP.

Esta secuencia evita una inconsistencia metodológica común en tesis de reforzamiento, donde se pretende justificar el uso de FRP únicamente porque el edificio “no cumple” la norma. En la presente investigación, el refuerzo se justifica de forma más sólida: como una medida de mejora del desempeño y de optimización de la distribución resistente en miembros críticos. Desde el punto de vista académico, este enfoque es más robusto porque no depende de forzar un incumplimiento global, sino de demostrar que, aun cumpliendo la verificación normativa básica, existen oportunidades claras de intervención localizada con alto rendimiento estructural.

Asimismo, la selección de CFRP para columnas críticas y de AFRP para vigas de alta demanda cortante muestra que el algoritmo es sensible al mecanismo estructural que gobierna cada miembro. No se limita a escoger el material más fuerte en todos los casos, sino el material más adecuado en función del problema resistente. Esa sensibilidad material añade profundidad al trabajo y lo diferencia de

estudios que solo comparan “con FRP” y “sin FRP” sin discriminar la conveniencia específica de cada tipología.

En síntesis, el análisis costo–beneficio confirma que la optimización genética aporta una ventaja tangible. La solución final disminuye el costo relativo del reforzamiento frente a alternativas uniformes, concentra la intervención donde la criticidad es mayor, conserva una cobertura significativa de la demanda estructural y facilita una estrategia constructiva más focalizada. Por ello, puede concluirse que el uso combinado de ETABS para diagnóstico sísmico y de algoritmos genéticos para selección del FRP constituye una metodología técnicamente consistente y pertinente para la mejora sismorresistente de edificaciones escolares de concreto armado.

Finalmente, los anexos del estudio —que contienen capturas del modelo ETABS y del procedimiento de implementación del algoritmo— sirven como respaldo visual del proceso seguido, pero el capítulo de resultados presentado aquí se centra deliberadamente en tablas y figuras interpretativas. Con ello se cumple el criterio de un capítulo de tesis orientado al análisis y no a la mera reproducción de pantallas de software.

Como cierre técnico, conviene enfatizar que el principal aporte de los resultados no es la obtención de una lista de números aislados, sino la construcción de una cadena argumental completa. La masa acumulada demuestra que el modelo dinámico es representativo; las derivas y el cortante basal verifican que el edificio posee una respuesta global ordenada; el índice de demanda identifica la vulnerabilidad local; la localización espacial ubica con precisión los elementos donde la intervención es más rentable; y el algoritmo genético convierte ese diagnóstico en una propuesta de reforzamiento con material y dirección definidos. Esta secuencia articulada es la que otorga solidez científica al capítulo.

Asimismo, el capítulo deja claro que una verificación normativa favorable no equivale necesariamente a una estructura óptima frente a sismos. En edificaciones de uso educativo, la reducción del daño, la continuidad de operación

y la racionalización del gasto de rehabilitación son objetivos tan importantes como el simple cumplimiento del límite reglamentario. Por ello, la propuesta de FRP derivada de la optimización debe entenderse como una medida de mejora del desempeño y no como una corrección improvisada.

Una lectura adicional de los resultados permite advertir que la solución optimizada conserva un equilibrio adecuado entre intervención en columnas y vigas. Si el algoritmo hubiera concentrado todos los recursos únicamente en columnas, la estructura correría el riesgo de endurecer la base sin mejorar suficientemente la capacidad de transferencia de esfuerzos en los marcos. Si, por el contrario, hubiese priorizado mayormente vigas, la intervención podría resultar insuficiente frente a la interacción axial-flexión que gobierna a los elementos verticales. La mezcla obtenida demuestra que el procedimiento de optimización reconoce la jerarquía resistente del pórtico y busca fortalecerla sin distorsionarla.

Desde la discusión científica, los resultados también muestran cómo la inteligencia artificial puede actuar como una herramienta de racionalización y no como un sustituto del criterio estructural. El algoritmo genético no reemplaza el análisis en ETABS ni el juicio del ingeniero; trabaja sobre ellos. Primero se requiere un diagnóstico físicamente consistente de la estructura, luego una interpretación adecuada de la criticidad y finalmente un procedimiento de búsqueda que explore combinaciones de reforzamiento. Solo la integración de estas tres capas — modelación, criterio mecánico y optimización— produce una solución realmente útil.

Esta observación tiene especial importancia para la originalidad de la tesis. En muchos estudios, el uso de algoritmos evolutivos queda desligado de la mecánica estructural y se transforma en un ejercicio matemático independiente del comportamiento real del edificio. En cambio, en el presente capítulo la optimización está completamente anclada al diagnóstico sísmico del modelo: la masa acumulada, los perfiles de deriva, el cortante basal y las fuerzas internas son el lenguaje físico que alimenta al algoritmo. Gracias a ello, la recomendación final

conserva sentido ingenieril y puede defenderse frente a observaciones técnicas del jurado.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten sostener que la evaluación sísmica con optimización en IA mejora de manera objetiva la toma de decisiones para el reforzamiento estructural de un colegio de concreto armado, porque no solo identifica la vulnerabilidad global del sistema, sino que también localiza, jerarquiza y optimiza la intervención en los elementos más demandados. La discusión se apoya prioritariamente en variables cuantificables: derivas, cortantes, capacidad pushover, cobertura de criticidad y costo relativo.

Cuando un antecedente no reportó una variable directamente comparable, la contrastación se realizó sobre la misma familia física de resultados. De este modo, se evita una discusión subjetiva y se mejora la trazabilidad entre el hallazgo propio y la evidencia previa.

Discusión del objetivo específico 1

Respecto al primer objetivo específico, el reforzamiento preliminar con FRP redujo la deriva máxima dinámica de 0.0108 a 0.0089, equivalente a una disminución de 17.6 %, y redujo la deriva del punto de desempeño en 23.7 % en X y 22.5 % en Y. Además, la cortante máxima del pushover aumentó 9.2 % en X y 7.9 % en Y. Estos resultados son coherentes con Canales (2025), quien reportó incrementos de 32 % en resistencia a flexión y 28 % en capacidad de deformación, y con Vélez (2019), quien registró una mejora del 18 % en desplazamiento bajo

reforzamiento con FRP.

Asimismo, la inclusión de análisis modal espectral, pushover y tiempo-historia fortalece la validez del diagnóstico, en concordancia con Chino (2024), quien identificó desplazamientos máximos 20 % mayores bajo un enfoque más exigente que el pushover simplificado, y con Valenzuela (2024), quien reportó desplazamientos máximos del orden de 12 cm en una edificación vulnerable. En la presente tesis, la comparación sin y con FRP demostró no solo mejora global, sino también un criterio más fino para decidir cuánto conviene reforzar.

Discusión del objetivo específico 2

En cuanto al segundo objetivo específico, la optimización mediante algoritmo genético evidenció que la criticidad estructural se concentra principalmente en columnas del primer nivel y en vigas de la base. El 72.3 % de los elementos reforzados se ubicó en Story1 y el 27.7 % en Story2, sin necesidad de intervenir Story3. Esta localización es consistente con Gastulo y Puyen (2024), quienes reportaron desplazamientos de hasta 10 cm en elementos principales de una escuela vulnerable, y amplía su aporte al introducir una jerarquización espacial explícita por bloque, nivel y tipología.

La priorización por fases no se definió únicamente por magnitud de demanda, sino por demanda + continuidad resistente + secuencia constructiva. Por ello, la Fase I reunió elementos con $I_D \geq 0.60$ y miembros clave de Story1; la Fase II, elementos con $0.35 \leq I_D < 0.60$ o continuidad asociada; y la Fase III, miembros complementarios. Esta lógica representa un avance metodológico frente a estudios que demuestran utilidad del FRP o del análisis, pero no traducen la criticidad en una secuencia ejecutable de intervención.

La principal diferencia con los antecedentes es que la presente investigación no propone un reforzamiento generalizado, sino una selección racional de elementos, direcciones y fases de intervención. La solución obtenida, que prioriza columnas críticas con CFRP y vigas demandadas con AFRP, demuestra que la

optimización con IA no reemplaza el criterio ingenieril, sino que lo refina al convertir la demanda estructural en una propuesta concreta y constructivamente defendible.

Discusión del objetivo específico 3

Respecto al tercer objetivo específico, la solución genética óptima cubrió el 60.0 % de la criticidad ponderada interviniendo 47 de 109 elementos, con un costo relativo de 53.50. Frente al reforzamiento generalizado con CFRP (131.28), la propuesta representa un ahorro aproximado de 59.2 %; y respecto del mismo subconjunto reforzado solo con CFRP (57.93), el ahorro adicional fue 7.6 %. En términos comparativos, el desempeño económico es consistente con la idea de Singh y Chatterjee (2023) sobre eficiencia de intervención, pero aquí dicha eficiencia queda expresada con indicadores cuantificables de cobertura y costo.

Asimismo, la asignación diferenciada de CFRP en columnas, AFRP en vigas y GFRP solo en un caso puntual confirma que el material más conveniente depende del mecanismo resistente predominante en cada miembro. Este hallazgo puede contrastarse con Saldaña y Scaletti (2022), quienes reportaron reducciones de 22 % en desplazamientos y 30 % en fuerzas internas con otra tecnología de control sísmico: en ambos casos, la mejora se produce cuando la intervención es selectiva, localizada y compatible con el comportamiento resistente del sistema.

CONCLUSIONES

Se concluye que la evaluación sísmica con optimización en IA permitió mejorar de manera técnica y económica el reforzamiento estructural del colegio de concreto armado, al integrar el diagnóstico en ETABS, la selección de elementos críticos y la optimización del uso de FRP mediante algoritmo genético implementado en Python. La solución final alcanzó una cobertura de criticidad ponderada de 60.0 %, interviniendo 47 de 109 elementos (43.1 % del total), con un costo relativo de 53.50.

Conclusión del objetivo específico 1

Se concluye que el reforzamiento preliminar con FRP mejoró el comportamiento sísmico del edificio, al elevar la relación V_{din}/V_{est} de 0.708 a 0.761 en X y de 0.707 a 0.755 en Y, reducir la deriva máxima dinámica en 17.6 %, y aumentar la cortante máxima del pushover en 9.2 % en X y 7.9 % en Y. En consecuencia, el primer objetivo específico se cumple al demostrar que el FRP aporta una mejora medible del desempeño estructural.

Conclusión del objetivo específico 2

Se concluye que la optimización del reforzamiento mediante algoritmo genético permitió identificar de forma objetiva los elementos más críticos y definir una intervención focalizada según bloque, nivel, dirección, material y número de láminas. Los mayores índices de demanda se concentraron en C2, C3, C1 y C4, y el 72.3 % de los elementos reforzados se ubicó en Story1, confirmando que la mayor vulnerabilidad se localiza en la base resistente del edificio.

Conclusión del objetivo específico 3

Se concluye que la evaluación conjunta de derivas, cortantes, capacidad resistente y costo-beneficio confirmó que la solución optimizada con FRP ofrece la mejor relación entre desempeño estructural y costo de intervención. Frente a una alternativa generalizada con CFRP, la propuesta redujo el costo en 59.2 % con una intervención selectiva, manteniendo una cobertura relevante de criticidad. Por

tanto, el tercer objetivo específico se cumple al demostrar una mejora simultánea de seguridad, eficiencia y viabilidad técnica.

Se recomienda a la institución propietaria del colegio y a las entidades responsables de infraestructura educativa adoptar esquemas de evaluación sísmica que integren modelación estructural en ETABS, trazabilidad por bloque–story–elemento y optimización del reforzamiento antes de decidir intervenciones generalizadas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la institución propietaria del colegio, así como a las entidades públicas responsables de infraestructura educativa, adoptar esquemas de evaluación sísmica que integren modelación estructural en ETABS con algoritmos de optimización, antes de decidir intervenciones generalizadas. En edificaciones escolares de ocupación masiva, debe priorizarse el reforzamiento selectivo por criticidad estructural, ya que este enfoque permite mejorar la seguridad y continuidad operativa con menor costo que una intervención indiscriminada. Asimismo, se sugiere incorporar este criterio en expedientes técnicos de rehabilitación y programas regionales de reforzamiento escolar.

Se recomienda a la dirección del plantel y a las oficinas de infraestructura educativa que, en futuras evaluaciones de colegios existentes, no limiten el diagnóstico al cumplimiento global de la norma E.030, sino que incluyan obligatoriamente revisión de derivas por nivel, participación modal, torsión y compatibilidad entre cortante estático y dinámico. Asimismo, debe priorizarse la inspección detallada y el eventual reforzamiento de los elementos ubicados en Story1 y Story2, ya que allí se concentra la respuesta más exigente del sistema.

Se recomienda a otros investigadores, consultores estructurales y unidades formuladoras de proyectos emplear algoritmos genéticos u otras técnicas de optimización multiobjetivo para seleccionar refuerzos estructurales en edificaciones existentes, especialmente cuando el número de elementos candidatos es elevado. Del mismo modo, se sugiere que futuras investigaciones validen esta metodología en otras tipologías estructurales, incluyendo hospitales, edificios administrativos y viviendas multifamiliares, con el fin de contrastar su reproducibilidad y ampliar su campo de aplicación.

Se recomienda a la Universidad, a las municipalidades, a los gobiernos regionales y a PRONIED o entidades equivalentes que, antes de aprobar presupuestos de rehabilitación sísmica, exijan evaluaciones costo-beneficio comparando al menos tres escenarios: no intervención, reforzamiento selectivo

optimizado y reforzamiento generalizado. Asimismo, para futuras investigaciones se recomienda incorporar indicadores económicos complementarios como VAN, TIR y análisis de sensibilidad de precios del FRP.

REFERENCIAS

- Altıok, T. Y., Şevik, M., & Demir, A. (2025). Seismic performance of retrofitted and non-retrofitted RC school buildings after the February 6th, 2023, Kahramanmaraş earthquakes. In *Bulletin of Earthquake Engineering* (Vol. 23, Number 3). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01941-w>
- Angiolilli, M., Lagomarsino, S., Cattari, S., & Abbati, S. (2021). Seismic fragility assessment of existing masonry buildings in aggregate. *Engineering Structures*, 247(113218). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113218>
- Bantis, J., Miranda, E., & Heresi, P. (2025). Simplified site response analysis for regional seismic risk assessments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 188(109022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109022>
- Bommer, J. (2022). Earthquake hazard and risk analysis for natural and induced seismicity: towards objective assessments in the face of uncertainty. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(2825–3069). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10518-022-01357-4>
- Buitrago, J. P., & López, S. R. (2025). Strengthening educational infrastructure for

seismic resilience: Social and economic implications of retrofitting with advanced materials. *Natural Hazards Review*, 26(2), 04021018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000363](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000363)

Canales, G. (2025). Análisis funcional del reforzamiento estructural con FRP y encamisado de concreto armado para la preparación de vigas fatigadas en edificaciones residenciales. Pucallpa 2024 [Tesis de grado, Universidad de Ucayali]. In *Unu*. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3296/000001326T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cebeci, C., & Timur, O. (2025). Deterministic Parameter Control Methods for Genetic Algorithms: Benchmarking on Test Functions and Boost Converter Design Optimisation. *Applied Sciences*, 15(20), 11093. <https://doi.org/10.3390/app152011093>

Chino, Y. (2024). *Variación de la respuesta sísmica del pabellón II de la I. E. N.º 41037 José Gálvez del distrito Miraflores, Arequipa-Perú, aplicando un análisis sísmico estático no lineal pushover con respecto a un análisis pseudodinámico y un análisis tiempo - Historia* [Tesis de grado]. Universidad Continental.

Du, A., Wang, X., Xie, Y., & Dong, Y. (2023). Regional seismic risk and resilience assessment: Methodological development, applicability, and future research needs - An earthquake engineering perspective. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 233(109104). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109104>

Gastulo, W., & Puyen, B. (2024). *Evaluación del desempeño sísmico de la I.E. N.º 10022 Miguel Muro Zapata, empleando un análisis no lineal tiempo - historia* (Vol. 4, Number 02) [Tesis de grado]. Universidad Tecnológica del Perú.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2010). *Metodología de la Investigación*.

- Honarparast, S., & Chaallal, Omar. (2025). Non-linear time history analysis of reinforced concrete coupled shear walls: Comparison of old design, modern design and retrofitted with externally bonded CFRP composites. *Engineering Structures*, 185, 353-365. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.113>
- Huang, S., Lyu, Y., Sha, H., & Xiu, L. (2021). Seismic performance assessment of unsaturated soil slope in different groundwater levels. *Landslides*, 18(2813–2833). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10346-021-01674-w>
- Kazemi, F., Asgarkhani, N., & Jankowski, R. (2023). Machine learning-based seismic fragility and seismic vulnerability assessment of reinforced concrete structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 166(107761). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107761>
- Khodadadi, N., Roghani, H., Harati, E., Mirdarsoltany, M., De Caso, F., & Nanni, A. (2024). Fiber-reinforced polymer (FRP) in concrete: A comprehensive survey. *Construction and Building Materials*, 432(136634). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136634>
- Li, S., Chen, Y., Liu, H., & Del Gaudio, C. (2023). Empirical seismic vulnerability assessment model of typical urban buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(2217–2257). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10518-022-01585-8>
- Liu, Y., Gu, Y., & Zhang, H. (2024). Seismic risk assessment and damage analysis: Emerging trends and new developments. *Journal of Safety Science and Resilience*, 5(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.04.005>
- Luo, D., Wang, K., Wang, D., Sharma, A., Li, W., & Choi, I. H. (2025). Artificial intelligence in the design, optimization, and performance prediction of concrete materials: a comprehensive review. *Npj Materials Sustainability*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s44296-025-00058-8>

- Manterola, C., Otzen, T., Grande, L., Espinosa, M., & Hernández, M. (2023). Estudios de Corte Transversal . Un Diseño de Investigación a Considerar en Ciencias Morfológicas. *Int. J. Morphol.*, 41(1), 146–155. <https://www.scielo.cl/pdf/ijmorphol/v41n1/0717-9502-ijmorphol-41-01-146.pdf>
- Meniz, B., & Tiryaki, F. (2025). Genetic Algorithm Optimization with Selection Operator Decider. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(10), 6931–6941. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09068-5>
- Mosoarca, M., Onescu, I., Onescu, E., & Anastasiadis, A. (2025). Seismic vulnerability assessment methodology for historic masonry buildings in the near-field areas. *Engineering Failure Analysis*, 115(104662.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104662>
- Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J., & Romero, H. (2020). Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Quinta Ed., Vol. 53, Number 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Otero Monteza, D. A., & Díaz Figueroa, M. A. (2022). Influence of the aspect ratio on seismic performance of adobe buildings. *Tecnia*, 32(2), 59–75. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i2.1413>
- Park, S., Choi, S. W., & Choi, I. (2024). Seismic retrofitting optimization model using fiber-reinforced polymer jacketing and NSGA-III. *Developments in the Built Environment*, 19, 100508. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100508>
- Quéva, P., Jason, L., Arnaud, G., & Sarazin, G. (2025). Tailored genetic algorithms for the detailed design optimization of reinforced concrete structures: case study on a flexural beam. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 68(8), 161. <https://doi.org/10.1007/s00158-025-04092-x>
- Saenz, I., & De la Cruz, D. (2023). *Evaluación y reforzamiento computacional de*

un vivienda de albañilería confinada considerando la proyección de tres niveles mediante análisis no lineal tiempo-historia [Tesis de Grado]. Universidad San Ignacio de Loyola.

Saldaña Vasquez, K. Y., & Scaletti Farina, H. V. L. (2022). Efficiency of energy dissipators in the seismic response of buildings. *Tecnia*, 32(2), 127–137. <https://doi.org/10.21754/tecnia.v32i2.1379>

Sberna, A. P., Trapani, F. Di, & Marano, G. C. (2023). A new genetic algorithm framework based on Expected Annual Loss for optimizing seismic retrofitting in reinforced concrete frame structures. *Procedia Structural Integrity*, 44, 1712–1719. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.219>

Shendkar, M. R., Tantri, A., & Rao, A. U. (2025). Seismic evaluation and retrofit of reinforced concrete structures. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s43065-024-00114-y>

Shi, J., Yossef, M., Chen, A., & Sun, J. (2025). Curved grid connector for concrete sandwich shell: a continuum approach. *Composite Structures*, 370(October 2024), 119361. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.119361>

Shin, J., & Park, S. (2022). Optimum retrofit strategy of FRP column jacketing system for non-ductile RC building frames using artificial neural network and genetic algorithm hybrid approach. *Journal of Building Engineering*, 57, 104919. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104919>

Siddika, A., Mamun, M., Ferdous, W., & Alyousef, R. (2020). Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by using FRPs – A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*, 111(104480). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480>

- Singh, P., & Chatterjee, M. (2023). Cost-benefit analysis of seismic retrofitting in educational buildings: A case study of FRP applications. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 59(6), 1106-1119. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5509.0000518](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5509.0000518)
- Supo, J. (2024). *Metodología de la Investigación Científica* (Cuarta). <https://bioestadistico.com>
- Valenzuela, H. (2024). *Desempeño sísmico mediante el análisis estático no lineal pushover y tiempo historia como método de evaluación rápida en los proyectos de salud en Ayacucho, 2024* [Tesis de maestría]. Universidad Privada de Tacna.
- Vélez, A. (2019). *Reforzamiento de estructuras de concreto armado con el uso de polímeros reforzados con fibras (FRP). Caso de estudio: reforzamiento de edificios de concreto de 2 niveles* [Tesis de maestría]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Villavicencio, E. (2021). *Análisis comparativo no lineal dinámico tiempo historia de un edificio convencional y un edificio con disipadores de energía tipo viscoelástico* (Vol. 2, Number 4) [Tesis de grado]. Universidad Estatal del Sur de Manabí.
- Xu, Y., Li, Y., Zheng, X., Zheng, X., & Zhang, Q. (2023). Computer-Vision and Machine-Learning-Based Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Structures. *Buildings*, 13(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/buildings13051258>
- Zarnani, M., & Ibrahim, A. (2024). Advanced methods for seismic retrofitting and performance assessment of reinforced concrete buildings: The role of FRP and machine learning. *Journal of Structural Engineering*, 150(7), 04124056. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003006](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003006)
- Zhang, T., Liu, L., & Zhang, S. (2023). Machine learning techniques for structural

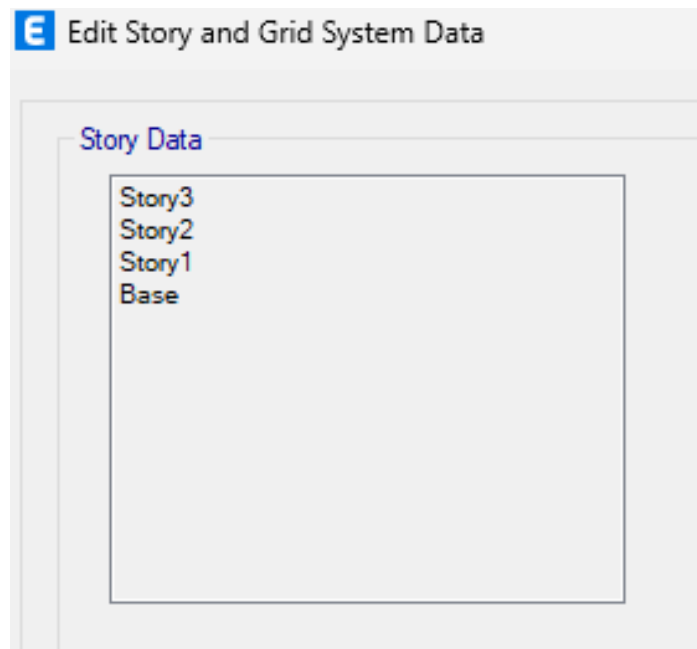
optimization in seismic engineering: A comparative study of reinforced and non-reinforced concrete buildings. *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2023/9045356>

Zhu, J., Weng, K., Liu, W., Huang, B., Peng, K., Zhu, J., & Dai, J. (2024). Thin-Layer Ultra-High-Strength Engineered Cementitious Composites (UHS-ECC) Reinforced with Small-Diameter FRP Bars for Structural Strengthening. *Thin-Walled Structures*, 205(112592). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112592>

ANEXOS

En los anexos siguientes se incorporan las capturas del software y del procedimiento computacional utilizadas como respaldo visual del análisis. De acuerdo con la solicitud del tesista, estas imágenes se presentan fuera del cuerpo de resultados y funcionan como evidencia complementaria del flujo de trabajo seguido en ETABS y en el algoritmo genético.

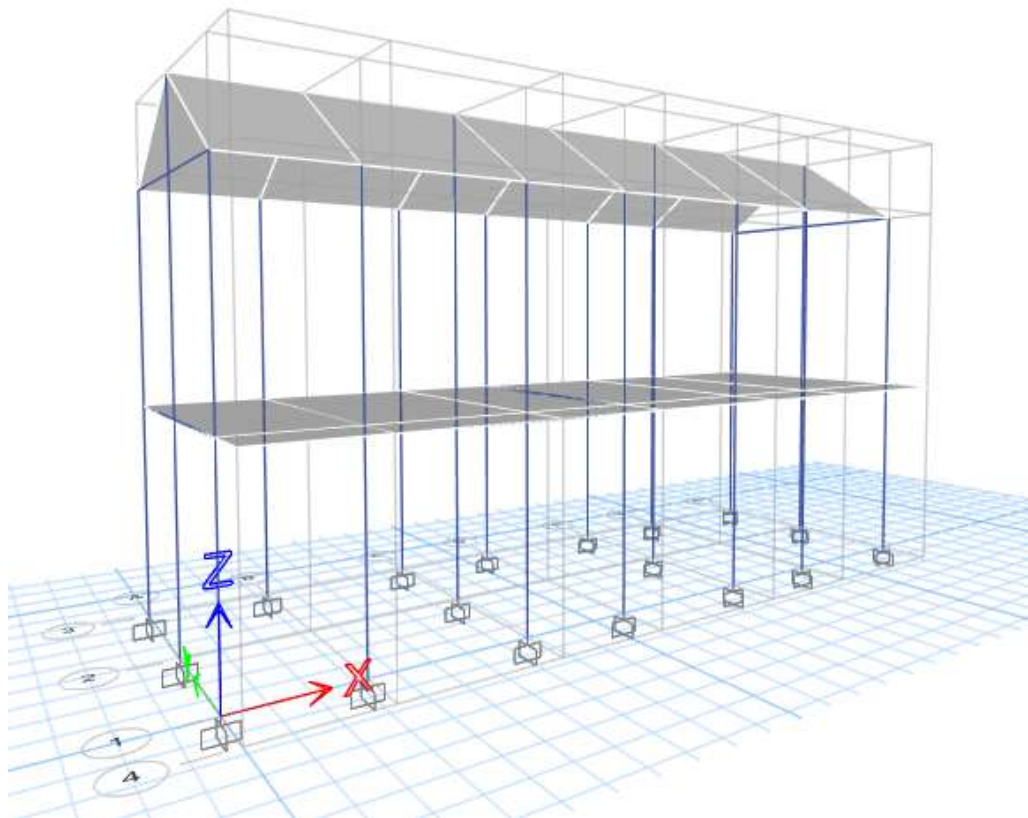
Anexo 01: Configuración de niveles y alturas de entreciso (Story Data).



Anexo 2: Definición de alturas y elevaciones del modelo estructural (Story Data)

	Story	Height mm	Elevation mm	Master Story	Similar To	Splice Story	Splice Height mm	Story Color
▶	Story3	1200	7200	No	None	No	0	
	Story2	3000	6000	No	None	No	0	
	Story1	3000	3000	No	None	No	0	
	Base		0					

Anexo 3: Vista tridimensional del modelo estructural en ETABS



Anexo 4: Resumen de las secciones de área definidas en ETABS

TABLE:~Area Section Property Definitions~Summary						
Name	Type	Element Type	Material	Total Thickness	Deck Material	Deck Depth
				mm		mm
ALIGERADO20	Deck	Membrane	FC=210	100	A992Fy50	50
Plank1	Slab	Membrane	FC=210	200		
Slab1	Slab	Shell-Thin	FC=210	200		
Wall1	Wall	Shell-Thin	FC=210	250		

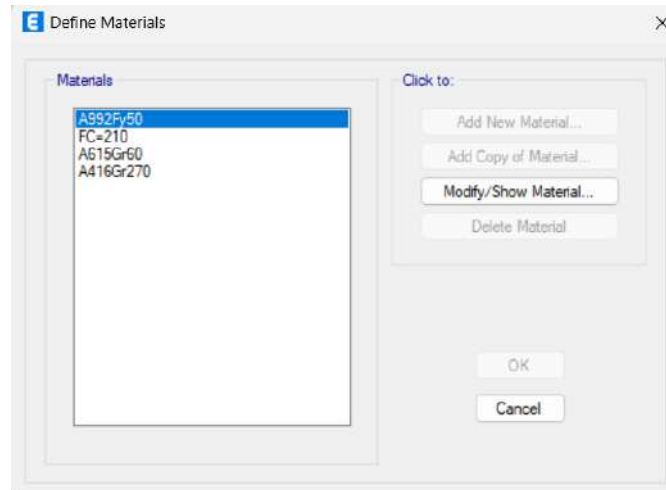
Anexo 5: Definiciones de secciones de marco en ETABS

TABLE: Frame Section Property Definitions - Summary						
Name	Material	Shape	Color	Area	I33	I22
				mm ²	mm ⁴	mm ⁴
C-L	FC=210	Concrete L	Cyan	262500	8718377976	8718377976
C-R	FC=210	Concrete Rectangular	Gray8Dark	125000	2604166667	651041666.7
C-T	FC=210	Concrete Tee	Magenta	187500	3580729167	2929687500
V BASE 25	FC=210	Concrete Rectangular	Blue	125000	2604166667	651041666.7
V15X40	FC=210	Concrete Rectangular	Blue	80000	266666666.7	1066666667
V25X40	FC=210	Concrete Rectangular	Yellow	100000	1333333333	520833333.3
V25X50	FC=210	Concrete Rectangular	Red	125000	2604166667	651041666.7
V30X60	FC=210	Concrete Rectangular	Green	180000	5400000000	1350000000
VIGA VAR.		Nonprismatic	Yellow			
VPUNTA 20	FC=210	Concrete Rectangular	Cyan	50000	166666666.7	260416666.7

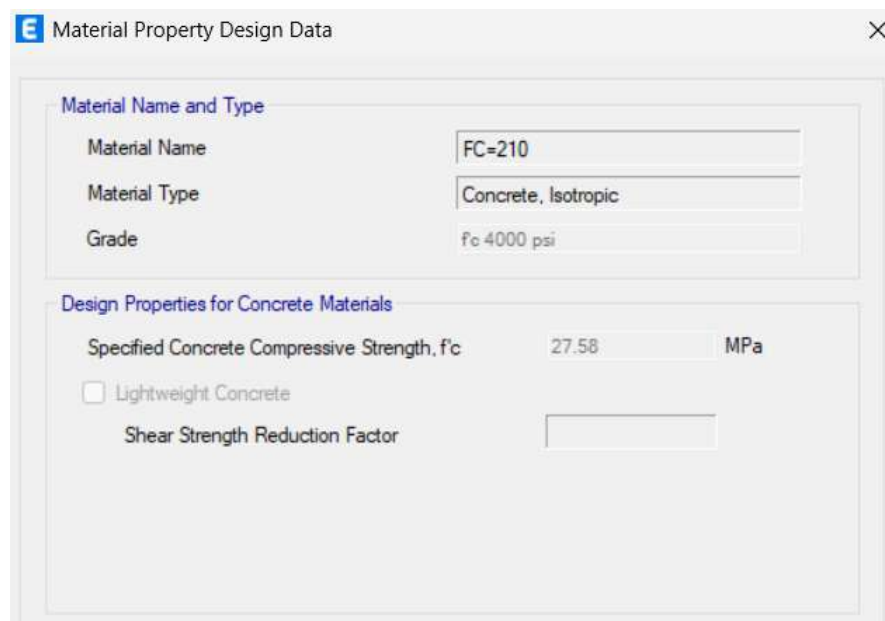
Anexo 6: Asignaciones de propiedades de sección a elementos tipo frame por nivel (Story) en ETABS

TABLE: Frame Assignments - Section Properties									
Story	C-L	C-T	C-R	V15X40	V25X40	V25X50	V30X60	VIGA VAR.	Total
Story 1	4	10	4	6	12	8	6	7	57
Story 2	4	10	4	0	12	4	0	0	34
Story 3	0	0	4	0	0	14	0	0	18
Total	8	20	12	6	24	26	6	7	109

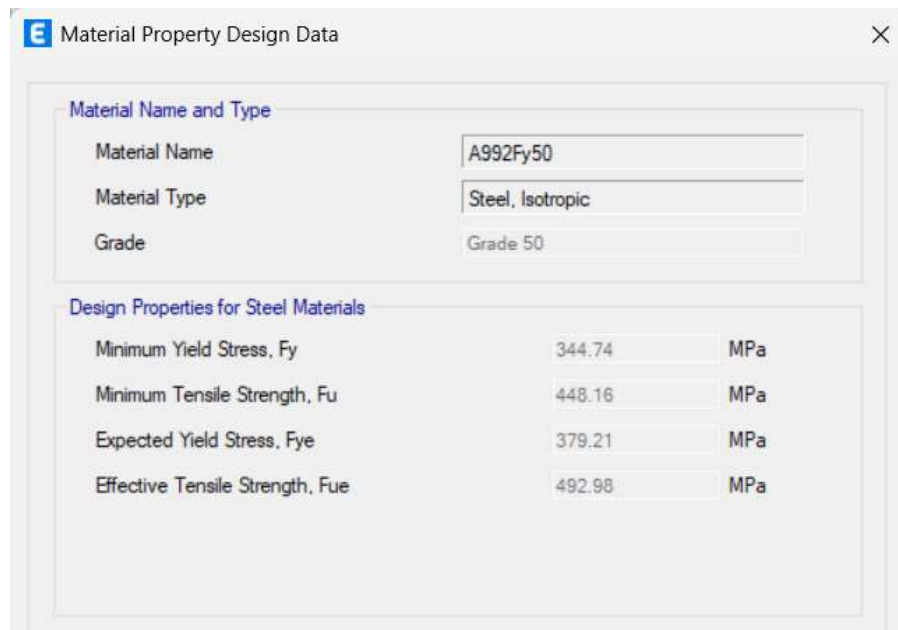
Anexo 7: Lista de materiales definidos para el modelo estructura en ETABS.



Anexo 8: Ventana Material Property Design Data de ETABS para el concreto FC=210, donde se definió la resistencia a compresión especificada $f'_c = 27.58$ MPa.



Anexo 9: Material Property Design Data de ETABS para el acero 992Fy50.



The screenshot shows the 'Material Property Design Data' dialog box for the material A992Fy50. The dialog is divided into two main sections: 'Material Name and Type' and 'Design Properties for Steel Materials'.

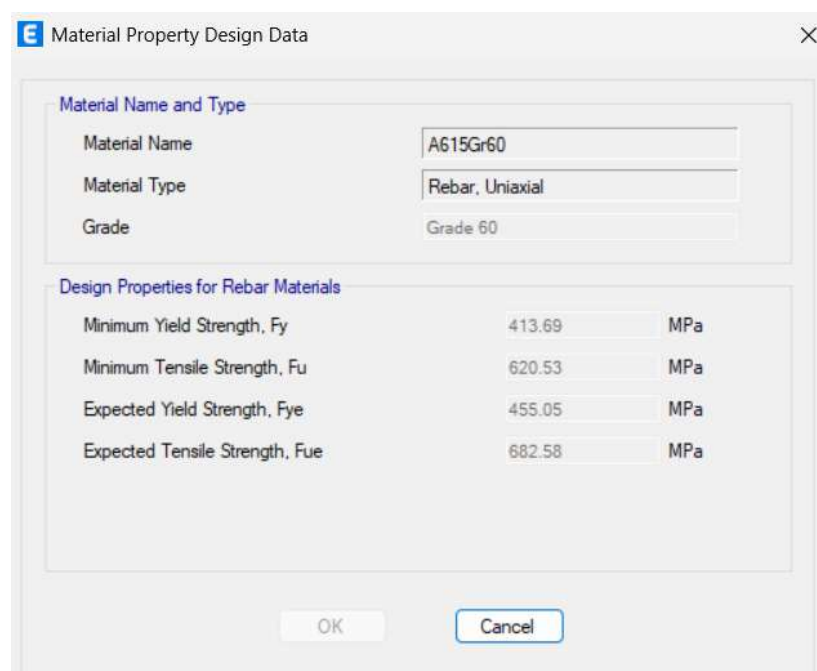
Material Name and Type:

- Material Name: A992Fy50
- Material Type: Steel, Isotropic
- Grade: Grade 50

Design Properties for Steel Materials:

Property	Value	Unit
Minimum Yield Stress, F_y	344.74	MPa
Minimum Tensile Strength, F_u	448.16	MPa
Expected Yield Stress, F_{ye}	379.21	MPa
Effective Tensile Strength, F_{ue}	492.98	MPa

Anexo 10: Material Property Design Data de ETABS para el acero de refuerzo A615Gr60



The screenshot shows the 'Material Property Design Data' dialog box for the material A615Gr60. The dialog is divided into two main sections: 'Material Name and Type' and 'Design Properties for Rebar Materials'.

Material Name and Type:

- Material Name: A615Gr60
- Material Type: Rebar, Uniaxial
- Grade: Grade 60

Design Properties for Rebar Materials:

Property	Value	Unit
Minimum Yield Strength, F_y	413.69	MPa
Minimum Tensile Strength, F_u	620.53	MPa
Expected Yield Strength, F_{ye}	455.05	MPa
Expected Tensile Strength, F_{ue}	682.58	MPa

At the bottom of the dialog, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Anexo 11: Material Property Design Data de ETABS para el tendón de presfuerzo A416Gr270.

The dialog box titled "Material Property Design Data" contains the following information:

Material Name and Type

Material Name	A416Gr270
Material Type	Tendon, Uniaxial
Grade	Grade 270

Design Properties for Tendon Materials

Minimum Yield Stress, F_y	1689.91	MPa
Minimum Tensile Strength, F_u	1861.58	MPa

Buttons: OK, Cancel

Anexo 11: Patrones de carga gravitacional (Dead y Live) y sísmica (SEX y SEY).

The "Define Load Patterns" dialog box displays a table with the following columns: Load, Type, Self Weight Multiplier, and Auto Lateral Load.

Load	Type	Self Weight Multiplier	Auto Lateral Load
Dead	Dead	1	
Live	Live	0	
SEX	Seismic	0	User Coefficient
SEY	Seismic	0	User Coefficient

Anexo 12: Patrones de carga definidos en ETABS (gravitacionales, sísmicos y patrones automáticos auxiliares).

TABLE: Load Pattern Definitions				
Name	Is Auto Load	Type	Self Weight Multiplier	Auto Load
~LLRF	Yes	Other	0	
~SDX ESCALDOECC	Yes	Other	0	
~SDXECC	Yes	Other	0	
~SDY ESCALDOECC	Yes	Other	0	
~SDYECC	Yes	Other	0	
Dead	No	Dead	1	
Live	No	Live	0	
SEX	No	Seismic	0	User Coefficient
SEY	No	Seismic	0	User Coefficient

Anexo 13: Casos de carga configurados en ETABS y su clasificación (estático lineal, modal y espectro de respuesta

TABLE: Load Case Definitions - Summary		
Name	Type	GUID
Dead	Linear Static	b10bf6b1-d3ea-4375-9d63-c8cb7df84066
Live	Linear Static	14d044bb-8fed-4e30-aa3c-8f79476ec881
Modal	Modal - Eigen	de0838de-fd2e-4218-bd7d-1bd8e0b4384a
SEX	Linear Static	5c1c8e17-7c25-4309-acc0-e89a6ace12c1
SEY	Linear Static	6ea40e24-a1de-4c24-b4c9-339adc1ca4f6
SDX	Response Spectrum	c4e04dbc-3f3c-4fec-a4c1-9c67ce2fd7f9
SDY	Response Spectrum	61f0ebe7-ba24-4a98-aaf3-85396cdfcad8
SDY ESCALDO	Response Spectrum	d04f5a5e-b763-48be-82f3-3eef0527fe64
SDX ESCALDO	Response Spectrum	b033ece0-def2-4a3c-b8c1-9e89233aa8fe

Anexo 14: Configuración de los casos de carga estáticos lineales (Dead, Live, SEX y SEY) en ETABS.

TABLE: Load Case Definitions - Linear Static							
Name	Exclude Group	Mass Source	Stiffness Type	Load Type	Load Name	Load SF	Design Type
Dead	None	MsSrc1	P-Delta	Load	Dead	1	Program Determined
Live	None	MsSrc1	P-Delta	Load	Live	1	Program Determined
SEX	None	MsSrc1	P-Delta	Load	SEX	1	Program Determined
SEY	None	MsSrc1	P-Delta	Load	SEY	1	Program Determined

Anexo 15: Definición de casos de carga por espectro de respuesta en ETABS.

TABLE: Load Case Definitions - Response Spectrum												
Name	Mass Source	Load Name	Function	Trans Accel SF	Coordinate System	Angle	Modal Case	Modal Combo Method	Rigid Response?	Directional Combo Type	Eccentricity Ratio	Design Type
				mm/sec ²		deg						
SDX	Previous (MsSrc1)	U1	ESPECTRO	9810	Global	0	Modal	CQC	No	SRSS	0.05	Program Determined
SDX ESCALDO	Previous (MsSrc1)	U1	ESPECTRO	11620.9	Global	0	Modal	CQC	No	SRSS	0.05	Program Determined
SDY	Previous (MsSrc1)	U2	ESPECTRO	9810	Global	0	Modal	CQC	No	SRSS	0.05	Program Determined
SDY ESCALDO	Previous (MsSrc1)	U2	ESPECTRO	11870.1	Global	0	Modal	CQC	No	SRSS	0.05	Program Determined

Anexo 16: Configuración del caso modal por autovalores (Eigen) en ETABS.

TABLE: Modal Case Definitions - Eigen										
Name	Exclu de Group	Mass Source	Stiffness Type	Max Modes	Min Mod es	Freq Shift	Cutoff Freq	Converge nce Tol	Auto Shift	Design Type
						cyc/s ec	cyc/se c			
Modal	None	MsSrc1	P-Delta	12	1	0	0	0	Yes	Program Determined

Anexo 17: Amortiguamiento modal (5%) asignado a los casos sísmicos por espectro de respuesta en ETABS (SDX, SDY y casos escalados).

TABLE: Load Case Definitions - Damping - Modal		
Name	Damping Type	Constant Damping
SDX	Constant	0.05
SDX ESCALDO	Constant	0.05
SDY	Constant	0.05
SDY ESCALDO	Constant	0.05

Anexo 18: Combinaciones de carga definidas en ETABS para el modelo estructural.

TABLE: Load Combination Definitions				
Name	Type	Is Auto	Load Name	SF
Comb1	Linear Add	No	Dead	1.4
Comb1			Live	1.7
Comb2	Linear Add	No	Dead	1.4
Comb2			Live	1.7
Comb2			SDX	1
Comb3	Linear Add	No	Dead	1.4
Comb3			Live	1.7
Comb3			SDY	1
DRIFF X	Linear Add	No	SDX	6
DRIFF Y	Linear Add	No	SDY	6

ENVOL	Envelope	No	Comb1	1
ENVOL			Comb2	1
ENVOL			Comb3	1

Anexo 19: Resultados del análisis modal en ETABS.

TABLE: Modal Periods And Frequencies					
Case	Mode	Period	Frequency	CircFreq	Eigenvalue
		sec	cyc/sec	rad/sec	rad ² /sec ²
Modal	1	0.116	8.6	54.0369	2919.9859
Modal	2	0.106	9.433	59.2705	3512.9926
Modal	3	0.091	10.999	69.1101	4776.2025
Modal	4	0.038	26.501	166.5085	27725.083
Modal	5	0.036	27.582	173.3039	30034.2502
Modal	6	0.029	34.309	215.5714	46471.0163
Modal	7	0.024	41.044	257.8899	66507.2053
Modal	8	0.022	46.478	292.0285	85280.6534
Modal	9	0.021	47.206	296.6068	87975.5878
Modal	10	0.019	51.402	322.9681	104308.3698
Modal	11	0.018	54.788	344.2445	118504.2508
Modal	12	0.016	61.766	388.0885	150612.7141

Anexo 20: Parámetros del caso modal (Eigen) definidos en ETABS, incluyendo fuente de masa, consideración P-Delta, número de modos y opciones de control del análisis.

TABLE: Modal Case Definitions - Eigen												
N a m e	Excl ude Gro up	Ma ss Sou rce	Stiff nes s Typ e	Ma x Mo de s	Mi n Mo de s	Fr eq Sh ift	Cu to f f Fre q	Con verg ence Tol	Au to Shi ft?	Desig n Type	GUID	N o t e s
						cyc /c/	cyc /se c					

						se						
M	Non	Ms	P-						Ye	Progr	de0838de-	
o	e	Src	Delt	12	1	0	0	0	s	am	fd2e-4218-	
d		1	a							Deter	bd7d-	
a										mined	1bd8e0b438	
											4a	

Anexo 21: Derivas máximas por entrepiso por nivel para los casos sísmicos SDX y SDY.

TABLE: Story Drifts										
Story	Output Case	Case Type	Step Type	Direction	Drift	Drift/	Label	X	Y	Z
								mm	mm	mm
Story3	SDX	LinResp Spec	Max	X	0.000024	1/42217	15	0	1940	7200
Story3	SDX	LinResp Spec	Max	Y	0.000006	1/175261	19	1660	1940	7200
Story3	SDY	LinResp Spec	Max	X	0.000013	1/77056	19	1660	1940	7200
Story3	SDY	LinResp Spec	Max	Y	0.000042	1/23758	18	7770	1940	7200
Story2	SDX	LinResp Spec	Max	X	0.000103	1/9749	4	11670	0	6000
Story2	SDY	LinResp Spec	Max	Y	0.000095	1/10484	12	5540	3880	6000
Story1	SDX	LinResp Spec	Max	X	0.0001	1/9991	9	9410	0	3000
Story1	SDY	LinResp Spec	Max	Y	0.000082	1/12177	16	11670	1940	3000

Anexo 22: Encabezado e inicialización del algoritmo genético `run_ga_mvp` para la asignación de capas FRP en elementos candidatos.

```

1  def run_ga_mvp(
2      candidates: list[str],
3      df_forces: pd.DataFrame,
4      drift_ok: bool,
5      shear80_ok: bool,
6      LMAX: int = 4,
7      pop: int = 40,
8      gens: int = 40,
9      mut: float = 0.15,
10     seed: int = 42
11 ):
12     """
13     Algoritmo Genético (mínimo viable) para decidir cuántas capas (0..LMAX) asignar
14     a cada elemento candidato, minimizando:
15     - capas totales
16     - #elementos reforzados
17     - demanda no cubierta (proxy)
18     con penalización global si no cumple deriva / check 80%.
19     """
20     rng = np.random.default_rng(seed)
21     n = len(candidates)
22     if n == 0:
23         return None, None, None
24 
```

Anexo 23: Cálculo y normalización del proxy de demanda (P, V2, V3, M2, M3) por Frame para guiar la optimización del algoritmo genético.

```

25     # ---- Preparar demandas (proxy) por Frame ----
26     forces = df_forces.copy() if df_forces is not None else pd.DataFrame()
27     if not forces.empty:
28         forces = forces.groupby("Frame")[["P", "V2", "V3", "M2", "M3"]].max().reset_index()
29         forces["Frame"] = forces["Frame"].astype(str)
30         forces = forces.set_index("Frame")
31     else:
32         forces = None
33
34     def demand_score(frame: str) -> float:
35         if forces is None or frame not in forces.index:
36             return 1.0
37         row = forces.loc[frame]
38         vals = np.array(
39             [row.get("P", 0), row.get("V2", 0), row.get("V3", 0), row.get("M2", 0), row.get("M3", 0)],
40             dtype=float
41         )
42         s = np.nan_to_num(vals, nan=0.0).sum()
43         return float(s) if s > 0 else 1.0
44
45     ds = np.array([demand_score(f) for f in candidates], dtype=float)
46     ds = ds / (ds.max() if ds.max() > 0 else 1.0) # normalizado 0..1
47 
```

Anexo 24: Definición de pesos de la función objetivo y penalización global por incumplimiento de deriva y del criterio 80% (E.030) en el algoritmo genético.

```

48 # ---- Pesos / penalizaciones ----
49 w_layers = 1.0
50 w_elems = 2.0
51 w_uncovered = 6.0
52
53 penalty_global = 0.0
54 if not drift_ok:
55     penalty_global += 300.0
56 if not shear80_ok:
57     penalty_global += 300.0
58

```

Anexo 25: Definición de la función fitness, creación de la población inicial y arranque del ciclo evolutivo (elitismo y selección) del algoritmo genético para asignación de capas FRP.

```

60 def fitness(x) -> float:
61     x = np.array(x, dtype=int) # x[i] = capas asignadas a candidato i
62     layers = x.sum() # capas totales
63     elems = np.count_nonzero(x) # #elementos reforzados
64     cover = (x / LMAX) # cobertura proxy 0..1 por elemento
65     uncovered = np.clip(ds - cover, 0, None).sum() # demanda no cubierta
66     return w_layers * layers + w_elems * elems + w_uncovered * uncovered + penalty_global
67
68 # ---- Población inicial (enteros 0..LMAX) ----
69 p = rng.integers(low=0, high=LMAX + 1, size=(pop, n), dtype=int)
70
71 best = None
72 best_fit = float("inf")
73 hist = []
74
75 for g in range(gens):
76     fits = np.array([fitness(ind) for ind in p], dtype=float)
77
78     # elitismo (guardar mejor)
79     idx = int(np.argmin(fits))
80     if fits[idx] < best_fit:
81         best_fit = float(fits[idx])
82         best = p[idx].copy()
83     hist.append(best_fit)
84
85     # selección por torneo (minimización)
86     def tournament():
87         a, b = rng.integers(0, pop), rng.integers(0, pop)
88         return p[a] if fits[a] < fits[b] else p[b]
89
90     # reproducción: crossover 1 punto + mutación
91     newP = []
92     while len(newP) < pop:
93         p1 = tournament()
94         p2 = tournament()
95
96         if n > 1:
97             cut = rng.integers(1, n)
98             c1 = np.concatenate([p1[:cut], p2[cut:]])
99             c2 = np.concatenate([p2[:cut], p1[cut:]])
100         else:
101             c1, c2 = p1.copy(), p2.copy()
102

```


Anexo 26: Construcción, filtrado y ordenamiento de la solución final del algoritmo genético: Frames seleccionados y número de capas FRP asociadas.

```

112
113     # ---- Construir solución final ----
114     sol = pd.DataFrame({
115         "Frame": candidates,
116         "Capas_FRP": best.astype(int),
117         "Demand_norm_proxy": ds
118     })
119     sol = (
120         sol[sol["Capas_FRP"] > 0]
121         .sort_values(["Capas_FRP", "Demand_norm_proxy"], ascending=[False, False])
122         .reset_index(drop=True)
123     )
124
125     return sol, hist, best_fit
126

```

Anexo 27: Periodos modales y ratios de participación de masa por modo.

☒ Conectado a ETABS (sesión activa).

Casos dinámicos usados: X = SDX ESCALDO, Y = SDY ESCALDO (SDX_ESCALADO encontrado: True, SDY_ESCALADO encontrado: True)

PASO 1: Modal Participating Mass Ratios + Leyenda de Modos

	Case	Mode	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ	ModeType
0	Modal	1	0.116	0.8884	0	0	0.8884	0	0	0	0.3582	0.0001	0	0.3582	0.0001	Traslación X (ref)
1	Modal	2	0.106	0	0.8665	0	0.8884	0.8665	0	0.3891	0.0000006	0.0005	0.3891	0.3582	0.0006	Traslación Y (ref)
2	Modal	3	0.091	0.000009	0.0005	0	0.8884	0.867	0	0.0002	0.0008	0.8787	0.3893	0.359	0.8792	Torsión (ref)
3	Modal	4	0.038	0.111	0.000003	0	0.9995	0.867	0	0.00001	0.6101	0.0004	0.3893	0.9691	0.8797	Traslación X (ref)
4	Modal	5	0.036	0.000002	0.1304	0	0.9995	0.9974	0	0.5605	0.00001	0.00002	0.9498	0.9691	0.8797	Traslación Y (ref)
5	Modal	6	0.029	0.0004	0.00001	0	0.9999	0.9974	0	0.0001	0.0021	0.1199	0.9499	0.9712	0.9996	Torsión (ref)
6	Modal	7	0.024	0.0000006	0.0025	0	0.9999	1	0	0.0185	0.000001	0.000009	0.9683	0.9712	0.9996	Traslación Y (ref)
7	Modal	8	0.022	0	0	0	0.9999	1	0	0	0	0	0.9683	0.9712	0.9996	Traslación X (ref)
8	Modal	9	0.021	0.00002	0	0	0.9999	1	0	0	0.000002	0	0.9683	0.9712	0.9996	Traslación X (ref)
9	Modal	10	0.019	0.000001	0	0	0.9999	1	0	0	0.0000005	0	0.9683	0.9712	0.9996	Traslación X (ref)
10	Modal	11	0.018	0.00005	0	0	1	1	0	0	0.0001	0.0000007	0.9683	0.9712	0.9996	Traslación X (ref)

Anexo 28: Comparativa de derivas dinámicas por entrepiso vs. análisis estático lineal y espectral.

Conectado a ETABS (sesión activa).

Cálculo dinámico analítico: F = SDX ESCALDO, F = SDY ESCALDO, SDX ESCALDO encendido: True, SDY ESCALDO encendido: True

PASO 1: Story Drifts (Estático + Dinámico) + Gráficas

Tabla: Estático (SEX/SEY)

Story	OutputCase	Case Type	Direction	Drift	Label	X	Y	Z	CaseType
1 Story1	SEX	Static	X	0.00004	15	0	1940	7200	LinStatic
1 Story1	SEY	Static	Y	0.00003	19	1000	1940	7200	LinStatic
1 Story1	SEY	Static	X	0.00002	19	1000	1940	7200	LinStatic
1 Story1	SEY	Static	Y	0.00003	19	7770	1940	7200	LinStatic
1 Story2	SEX	Static	X	0.00002	1	11879	6880	6000	LinStatic
1 Story2	SEY	Static	Y	0.00002	12	1540	3330	6000	LinStatic

Tabla: Dinámico (SDX ESCALDO/SDY ESCALDO)

Story	OutputCase	Case Type	Direction	Drift	Label	X	Y	Z	CaseType	RefType
1 Story2	SDX ESCALDO	Dinámico	X	0.00002	10	1000	1540	7000	LinRespSpec	Max
1 Story1	SDX ESCALDO	Dinámico	Y	0.00005	10	7770	1540	7000	LinRespSpec	Max
1 Story1	SDX ESCALDO	Dinámico	X	0.00003	15	0	1540	7200	LinRespSpec	Max
1 Story1	SDX ESCALDO	Dinámico	Y	0.00007	10	1000	1540	7200	LinRespSpec	Max
1 Story2	SDX ESCALDO	Dinámico	Y	0.00001	12	1540	3330	6000	LinRespSpec	Max
1 Story2	SDX ESCALDO	Dinámico	Y	0.00001	4	11070	0	6000	LinRespSpec	Max

Anexo 29: Resumen de demandas máximas de fuerzas internas en elementos tipo frame.

Conectado a ETABS (sesión activa).

Cálculo dinámico analítico: F = SDX ESCALDO, F = SDY ESCALDO, SDX ESCALDO encendido: True, SDY ESCALDO encendido: True

PASO 3: Demandas (Frame Forces) – Resumen Max Abs

Procesamiento Results API (Translational): Se están mostrando los resultados para la Tabla de Display Tablas automáticamente.

Cerrar o excluir Results API / Display Tablas

SEX - SDY - SDX ESCALDO - SDY ESCALDO

Nº Frames a mostrar (por performance)

Demanda disponible: 436 registros

Frame	OutputCase	F	V2	V3	F	M2	M3
1 3	SEX	37670.4305	5450.9879	15853.5300	4830.2271	30101420.7907	13124001.302
1 5	SEX	9272.4306	332.1267	5277.9392	561762.1071	9771227.2688	2300403.0773
1 6	SEX	17581.1739	14024.3837	5320.9363	4830.2271	13036356.3075	32104528.7113
1 9	SEX	6780.5876	6480.8807	70.7107	677787.0566	1912280.4674	9210088.9317
1 10	SEX	28433.8950	19953.5277	5478.4304	4830.2271	13968540.509	31545898.6079
1 13	SEX	9360.5476	5373.6746	146.5346	633181.4031	16524033.3338	9702442.0316
1 14	SEX	18222.9874	5285.9694	14754.1149	4830.2271	32007571.5201	17831388.0360
1 17	SEX	6805.573	119.6972	43.12.1086	667882.0267	9185302.5089	1824176.9914
1 18	SEX	14855.4320	40.8918	10386.4597	3510.788	10386244.6793	01362.5133
1 21	SEX	10715.0860	913.8981	9.052.8525	129267.2237	10803402.845	190762.4297
1 22	SEX	7820.4257	40.7493	96.17.4562	3530.781	15480350.6736	73875.9339
1 25	SEX	1791.3413	240.0181	7713.1831	258881.7813	81172187.3464	350462.8434
1 26	SEX	8177.6097	52.4438	10460.9173	3530.781	15823508.0011	79988.9071
1 29	SEX	1881.3754	102.8989	7493.4957	267021.6251	1034403.841	247246.0883

Anexo 30: Comparación de cortante basal estático vs. dinámico y verificación del 80%.

Conectado a ETABS (sesión activa).

Casos dinámicos usados: X = SDX ESCALDO, Y = SDY ESCALDO (SDX_ESCALADO encontrado: True, SDY_ESCALADO encontrado: True)

PASO 2: Cortante Basal + Check 80% (E030) + Factor de Escalamiento

Cortante basal - Estático

	OutputCase	Vx_abs_max	Vy_abs_max
0	SEX	165553.09	0
1	SEY	0	165553.08

Cortante basal - Dinámico (SDX ESCALDO/SDY ESCALDO)

	OutputCase	Vx_abs_max	Vy_abs_max
0	SDX ESCALDO	132473.46	45.75
1	SDY ESCALDO	46.73	132494.97

Check 80% (E030)

	Eje	V_estatico	V_dinamico	0.80*V_estatico	Cumple	Factor_escalamiento_si_no_cumple
0	X	165553.09	132473.46	132442.472	SI	1
1	Y	165553.08	132494.97	132442.464	SI	1

Anexo 31: Demandas máximas de fuerzas internas (P, V, M, T) en elementos frame.

PASO 3: Demandas (Frame Forces) – Resumen Max Abs

Primero intenta Results API (Frame Force). Si no hay resultados, usa Tools > > Display Forces automáticamente.

Cases to evaluate: Results API / Display Tables

SDX < SEY < SDX ESCALDO < SDY ESCALDO <

N° frame(s) a analizar (por performance)

150

Demandas disponibles: 436 registros.

	Frame	OutputCase	P	S2	XS	YS	T	M2	M3
0	2	SEX	27675.4365	5458.9976	15853.5283	4830.2273	32551463.7507	13125803.352	
0	5	SEX	30752.4358	531.4397	5277.9282	581762.1873	8176113.2888	2308483.8773	
2	4	SEX	17596.1739	14824.3887	5326.6563	4830.2273	13036366.3875	32034928.7548	
3	9	SEX	6780.5575	4430.9807	74.7687	676721.6566	1036288.4674	32031090.8817	
4	18	SEX	20432.8955	15953.3277	5478.4394	4830.2273	12958640.509	32715495.6879	
0	13	SEX	3039.5476	5376.0740	344.3548	618381.4383	2032303.3388	7782442.0316	
0	14	SEX	10232.8074	5285.3664	14954.3149	4830.2273	32007772.5201	12613388.0946	
2	17	SEX	6865.673	119.4972	4611.3686	667882.3067	8135382.5009	1034170.5964	
0	18	SEX	14836.4123	46.3938	10396.4057	3509.789	16198214.6789	91362.5131	
0	21	SEX	3874.5565	519.4644	8132.8831	187261.2237	10891112.648	788782.4291	
10	22	SEX	7636.4267	48.3936	9617.4561	3558.788	15483388.8736	73875.6188	
11	25	SEX	1713.3415	241.3331	7713.1811	258866.7811	13072357.9406	358452.8434	
12	26	SEX	8177.8897	51.8438	10932.9073	3838.789	13821389.8031	78888.8873	
13	28	SEX	18811.5763	182.3880	7681.6867	267029.4151	10384415.841	247246.0881	

PASO 2: Nudos críticos → Elementos (pre-candidatos)

Gráfico de barras horizontales apiladas que muestra el número de elementos (pre-candidatos) asociados a cada nodo crítico. El eje horizontal representa el número de elementos, con una escala de 0 a 50. El eje vertical lista los nodos críticos. Las barras están apiladas por color: rojo (Nodo Crítico), verde (Elemento), y azul (Elemento).

Nodo Crítico	Elemento (Verde)	Elemento (Azul)	Total
1	10	10	20
2	10	10	20
3	10	10	20
4	10	10	20
5	10	10	20
6	10	10	20
7	10	10	20
8	10	10	20
9	10	10	20
10	10	10	20
11	10	10	20
12	10	10	20
13	10	10	20
14	10	10	20
15	10	10	20
16	10	10	20
17	10	10	20
18	10	10	20
19	10	10	20
20	10	10	20
21	10	10	20
22	10	10	20
23	10	10	20
24	10	10	20
25	10	10	20
26	10	10	20
27	10	10	20
28	10	10	20
29	10	10	20
30	10	10	20
31	10	10	20
32	10	10	20
33	10	10	20
34	10	10	20
35	10	10	20
36	10	10	20
37	10	10	20
38	10	10	20
39	10	10	20
40	10	10	20
41	10	10	20
42	10	10	20
43	10	10	20
44	10	10	20
45	10	10	20
46	10	10	20
47	10	10	20
48	10	10	20
49	10	10	20
50	10	10	20

Anexo 34: Nudos críticos por deriva y preselección de elementos.

PASO 2: Nudos críticos → Elementos (pre-candidatos)

Casos a evaluar (Joint Data)

SEX → SEP → SEX ESCALDO → SEP ESCALDO →



Top N nudos críticos

40

	Original Case	Joint ID	Deriva	Deriva	Derivtag	Deriva
0	SEX	12		0.0002	0.0000001	0.0002
1	SEX	32		0.0002	0.0000003	0.0002
2	SEX	42		0.0002	0.0000002	0.0002
3	SEX	57		0.0002	0.0000002	0.0002
4	SEX	37		0.0002	0.0000001	0.0002
5	SEX	72		0.0002	0.0000001	0.0002
6	SEX	67		0.0002	0.0000001	0.0002
7	SEX	62		0.0002	0.0000001	0.0002
8	SEX	22		0.0002	0.0000001	0.0002
9	SEX	7		0.0002	0.0000001	0.0002
10	SEX	47		0.0002	0.0000004	0.0002
11	SEX	27		0.0002	0.0000004	0.0002
12	SEX	32		0.0002	0.0000001	0.0002
13	SEX	17		0.0002	0.0000001	0.0002

ANEXO 35: Matriz de Consistencia

Nivel	Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables
General	¿De qué manera la evaluación sísmica con optimización en IA puede mejorar el reforzamiento estructural con y sin FRP de un colegio de concreto armado en Lambayeque, 2026?	Realizar la evaluación sísmica con optimización en IA para mejorar el reforzamiento estructural con y sin FRP de un colegio de concreto armado, Lambayeque 2026.	La evaluación sísmica estructural mediante análisis modal y espectral, combinada con optimización mediante algoritmos genéticos, permite identificar diferencias estructurales significativas en un colegio de concreto armado con y sin reforzamiento FRP, Lambayeque 2026.	Variable independiente: Evaluación sísmica con optimización en IA. Variable dependiente: Reforzamiento estructural de un colegio de concreto armado con y sin FRP.
Específico 1	¿Cuál es el comportamiento sísmico obtenido en la simulación en ETABS antes y después del reforzamiento con FRP utilizando un análisis modal y espectral, pushover y tiempo-historia?	Determinar el comportamiento sísmico en ETABS de un colegio de concreto armado sin reforzamiento y compararlo con uno reforzado con FRP, utilizando análisis modal y espectral, pushover y tiempo-historia.	El análisis modal y espectral, pushover y tiempo-historia en ETABS permite determinar diferencias en el comportamiento sísmico del colegio de concreto armado antes y después del reforzamiento con FRP.	VI (componente): Análisis modal y espectral en ETABS. VD (componente): Comportamiento sísmico del colegio con y sin FRP.
Específico 2	¿Cómo se puede aprovechar el Algoritmo Genético con Python para realizar el análisis sísmico estructural en columnas y vigas del colegio de concreto armado?	Optimizar la configuración del reforzamiento estructural con FRP mediante un Algoritmo Genético implementado en Python, considerando criterios de desempeño sísmico.	El algoritmo genético implementado en Python optimiza la configuración del reforzamiento estructural con FRP en columnas y vigas del colegio, considerando criterios de desempeño sísmico.	VI (componente): Optimización con algoritmo genético en Python. VD (componente): Configuración del reforzamiento estructural con FRP.

Específico 3	¿Cuáles son las derivas, cortantes, momentos flectores y evaluación costo-beneficio obtenidos a partir del análisis sísmico con y sin reforzamiento de FRP?	Determinar las derivas, cortantes, momentos flectores y evaluación costo-beneficio obtenidos a partir del análisis sísmico con y sin reforzamiento FRP.	El reforzamiento con FRP optimizado reduce derivas, cortantes y momentos flectores críticos, y mejora la evaluación costo-beneficio respecto a la condición sin reforzamiento.	VI (componente): Evaluación sísmica comparativa con y sin FRP.VD (componente): Resultados estructurales y costo-beneficio del reforzamiento.
--------------	---	---	--	---

ANEXO 35: Matriz de Operacionalización de Variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad
Variable independiente: Evaluación sísmica con optimización en IA	Proceso de análisis del comportamiento sísmico de una estructura mediante modelación estructural y técnicas de inteligencia artificial para identificar alternativas de intervención más eficientes.	Se medirá a partir de los resultados obtenidos del análisis modal y espectral en ETABS y del desempeño del algoritmo genético implementado en Python para optimizar la solución de reforzamiento.	Algoritmos Genéticos (GA)	Nº de generaciones; Mejor valor de la función objetivo; Tasa de convergencia	Generaciones; Adimensional (fitness); %
	Proceso de análisis del comportamiento sísmico de una estructura mediante modelación estructural y técnicas de inteligencia artificial para identificar alternativas de intervención más eficientes.	Se medirá a partir de los resultados obtenidos del análisis modal y espectral en ETABS y del desempeño del algoritmo genético implementado en Python para optimizar la solución de reforzamiento.	Derivas	Deriva máxima de entrepiso (IDR máx); Deriva promedio; Cumplimiento de límite normativo	Razón o m/m; Razón o m/m; %
	Proceso de análisis del comportamiento sísmico de una estructura mediante modelación estructural y técnicas de inteligencia artificial para identificar alternativas de intervención más eficientes.	Se medirá a partir de los resultados obtenidos del análisis modal y espectral en ETABS y del desempeño del algoritmo genético implementado en Python para optimizar la solución de reforzamiento.	Cortantes	Cortante basal máxima (V_b máx); Distribución de cortante por nivel	kN (según modelo ETABS); kN por nivel
	Proceso de análisis del comportamiento sísmico de una estructura mediante modelación estructural y técnicas de inteligencia artificial para identificar alternativas de intervención más eficientes.	Se medirá a partir de los resultados obtenidos del análisis modal y espectral en ETABS y del desempeño del algoritmo genético implementado en Python para optimizar la solución de reforzamiento.	Momentos flectores	Momento flector máximo (M máx); Rotación plástica (θ_p)	kN·m (según modelo ETABS); rad
Variable dependiente: Reforzamiento estructural de un colegio de concreto	Intervención estructural aplicada al colegio de concreto armado mediante soluciones con y sin FRP para mejorar su respuesta sísmica, su capacidad resistente y su viabilidad técnica y económica.	Se medirá según el tipo de FRP seleccionado, la orientación de fibras, el incremento de resistencia y rigidez, y los resultados de la evaluación costo-beneficio de la alternativa de reforzamiento.	Tipo de FRP utilizado	Tipo de FRP (CFRP/GFRP/AFRP); Orientación de fibras	Categoría nominal; Grados o eje dominante (X/Y)

armado con y sin FRP	Intervención estructural aplicada al colegio de concreto armado mediante soluciones con y sin FRP para mejorar su respuesta sísmica, su capacidad resistente y su viabilidad técnica y económica.	Se medirá según el tipo de FRP seleccionado, la orientación de fibras, el incremento de resistencia y rigidez, y los resultados de la evaluación costo-beneficio de la alternativa de reforzamiento.	Porcentaje de aumento en la resistencia después del refuerzo	$\Delta V/V$; $\Delta M/M$; Incremento de rigidez	%;%;%
	Intervención estructural aplicada al colegio de concreto armado mediante soluciones con y sin FRP para mejorar su respuesta sísmica, su capacidad resistente y su viabilidad técnica y económica.	Se medirá según el tipo de FRP seleccionado, la orientación de fibras, el incremento de resistencia y rigidez, y los resultados de la evaluación costo-beneficio de la alternativa de reforzamiento.	Evaluación del costo-beneficio	VAN; TIR; Relación Beneficio/Costo; Costo por m ² de FRP	Moneda;%; Razón adimensional; Moneda/m ²

ANEXO 36: Planos Planta general del primer nivel con rutas de evacuación, circulaciones y zonas seguras



Planta general del segundo nivel con distribución de bloques y continuidad de recorridos



Vista tridimensional referencial del conjunto de aulas y corredores exteriores



Vista tridimensional referencial de bloque de dos niveles con escalera integrada

