UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

COMPARACIÓN DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTRUCTURALES DE LOS MÓDULOS E Y F DE LA I.E. Nº 82319 PAMPA COCHABAMBA, CONSIDERANDO Y OBVIANDO LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Bach. Oscar Alexander Ramirez Llanos.

ASESOR:

Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA –

1. **Investigador:** OSCAR ALEXANDER RAMIREZ LLANOS
   DNI: 48001781
   Escuela Profesional: INGENIERÍA CIVIL

2. **Asesor:** Dr. Ing. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO
   Facultad: DE INGENIERÍA

3. **Grado académico o título profesional**

   ☐Bachiller ■Título profesional ☐Segunda especialidad

   ☐Maestro ☐Doctor

4. **Tipo de Investigación:**

   ■ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional

   ☐ Trabajo académico

5. **Título de Trabajo de Investigación:**

   COMPARACIÓN DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTRUCTURALES DE LOS MÓDULOS E Y F DE LA I.E. Nº 82319 PAMPA COCHABAMBA, CONSIDERANDO Y OBVIANDO LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA

6. **Fecha de evaluación:** 09/08/2025
7. **Software antiplagio:** ■ **TURNITIN** ☐ **URKUND (OURIGINAL)** ***(*)***
8. **Porcentaje de Informe de Similitud: 21%**
9. **Código Documento: Oid: 3117:480349700**
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**

    ■ **APROBADO** ☐ **PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO**

Fecha Emisión: 12/08/2025

FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft
Motivo: En señal de conformidad
Fecha: 12/08/2025 10:27:09-0500

FIRMA DEL ASESOR
Dr. Ing. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO
DNI: 26733060

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130

ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : *COMPARACIÓN DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTRUCTURALES DE LOS MÓDULOS E Y F DE LA I.E. Nº 82319 PAMPA COCHABAMBA, CONSIDERANDO Y OBVIANDO LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA*

ASESOR : *Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno.*

.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple Nº 00494-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 18 de agosto de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los ***veintisiete días del mes de agosto de 2025***, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A – Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Vocal : M.Cs. Ing. Marco Antonio Silva Silva.
Secretario : M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *COMPARACIÓN DE LOS COMPORTAMIENTOS ESTRUCTURALES DE LOS MÓDULOS E Y F DE LA I.E. Nº 82319 PAMPA COCHABAMBA, CONSIDERANDO Y OBVIANDO LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA*, presentado por el Bachiller en Ingeniería Civil ***OSCAR ALEXANDER RAMIREZ LLANOS***, asesorado por el Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : ..07.. PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : ..11.. PTS.
EVALUACIÓN FINAL : ..18.. PTS ..Dieciocho.. (En letras)

En consecuencia, se lo declara ..APROBADO.. con el calificativo de ..18..(Dieciocho). acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las ..10:00 a.m.. horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Presidente

M.Cs. Ing. Marco Antonio Silva Silva.
Vocal

M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.
Secretario

Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno.
Asesor

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por iluminar mi camino durante el desarrollo de esta investigación.

A mis padres: Candelaria y Julio, y a mi hermana Silvia, por su apoyo incondicional, su formación basada en la disciplina y valores sólidos que me han guiado siempre.

A mi esposa Pilar y a mi hija Ariana, gracias por ser fuente constante de motivación y acompañarme en mi camino hacia la superación personal y profesional.

A mi asesor Dr. Miguel Angel Mosqueira Moreno, asesor de esta tesis, por su invalorable apoyo, sus conocimientos compartidos y la dedicación brindada durante todo el proceso de investigación.

A la empresa Projekting por facilitarme el expediente técnico de la I.E. 82319 Pampa Cochabamba, para la elaboración de este trabajo de investigación.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, por brindarme las bases fundamentales de la Ingeniería Civil, así como por su guía, enseñanza y compromiso en mi formación profesional.

DEDICATORIA

Dedico esta investigación, con todo mi amor y cariño, a mi madre Candelaria, a mi padre Julio, y a mi hermana Silvia, por su constante apoyo y ejemplo.

A mi abuelita Julia, por su sabiduría y ternura.

A mi esposa Pilar y a mi hija Ariana, por ser mi mayor fuente de inspiración.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO II

DEDICATORIA III

ÍNDICE DE TABLAS VIII

ÍNDICE DE FIGURAS X

RESUMEN XV

ABSTRACT XVI

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN 1

1.1. Contexto 1

1.2. Planteamiento del problema 2

1.3. Formulación del problema 3

1.4. Hipótesis 3

1.5. Variables 4

1.5.1. Variable Independiente 4

1.5.2. Variable dependiente 4

1.6. Justificación de la investigación 4

1.7. Alcances y delimitaciones de la investigación 5

1.7.1. Delimitación de la investigación 6

1.8. Limitaciones de la investigación 8

1.9. Objetivos de la investigación 8

1.9.1. Objetivo general 8

1.9.2. Objetivos específicos 9

1.10. Descripción de los contenidos de los capítulos 9

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 11

2.1. Antecedentes teóricos de la investigación 11

2.1.1. Antecedentes internacionales 11
2.1.2. Antecedentes nacionales 12
2.1.3. Antecedentes locales 13
2.2. Bases teóricas 13
2.2.1. Fundamentos de la Interacción suelo-estructura (ISE) 13
2.2.2. Componentes principales del sistema suelo-estructura 14
A. La estructura 15
B. Cimentación 15
C. Suelo 15
2.2.3. Modelos matemáticos para la simulación de la interacción suelo–estructura 16
2.2.4. Efectos de la ISE en el comportamiento estructural 23
2.2.5. Aplicación de software RFEM en el análisis con ISE 24
2.2.6. Normativa relacionada con la interacción suelo estructura 25
2.2.7. Justificación del uso de los cinco modelos estructurales comparativos . 25
2.2.8. Fundamentos teóricos del del análisis dinámico estructural 27
A. Tipos de perfiles de suelos 29
2.2.9. Herramientas computacionales en la simulación estructural 31
2.2.10. Aplicaciones prácticas de la ISE en edificaciones educativas 31
2.3. Definición de términos básicos 31
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS 34
3.1. Ubicación geográfica de la investigación 34
3.2. Periodo de estudio 35
3.3. Tipo, nivel, diseño y método de la investigación 36
3.4. Población de estudio 36

3.5. Muestra 37
3.6. Unidad de análisis 37
3.7. Análisis e interpretación de datos 37
3.7.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 37
3.7.2. Técnicas de procesamiento de datos 37
3.7.3. Técnicas de análisis e interpretación de resultados 38
3.8. Procedimiento 39
3.8.1. Datos preliminares de los módulos E y F 41
3.8.2. Estructuración de los módulos 45
3.8.3. Dimensiones estructurales utilizadas en los módulos E y F 54
3.8.4. Metrado de cargas 55
3.8.5. Análisis sísmico considerando la base empotrada 56
3.8.6. Análisis sísmico considerando la Interacción suelo-estructura (ISE). 84
3.8.7. Desplazamientos laterales (Norma Técnica E.030-2018, Art.31) 90
3.9. Presentación de resultados 92
3.9.1. Resultados de los periodos de vibración del módulo E 92
3.9.2. Resultados de los periodos de vibración del módulo F 98
3.9.3. Fuerzas internas y momentos flectores del módulo E 103
3.9.4. Fuerzas internas y momentos flectores Módulo F 114
3.9.5. Derivas laterales del Módulo E 125
3.9.6. Derivas laterales del Módulo F 134
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 143
4.1. Análisis y discusión 143
4.2. Contrastación de la Hipótesis 145
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 146

5.1. Conclusiones 146

5.2. Recomendaciones 147

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 148

ANEXOS……..…152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores del suelo “S” 29

Tabla 2. Tipo de suelo y periodos característicos 30

Tabla 3. Coordenadas geográficas de los módulos E y F de la I.E. N°82319 35

Tabla 4. Descripción de las características estructurales de los módulos E y F. 42

Tabla 5. Especificaciones técnicas del concreto 43

Tabla 6. Especificaciones técnicas de la albañilería 43

Tabla 7. Condiciones de la cimentación 44

Tabla 8. Cargas permanentes adoptadas en el diseño estructural 55

Tabla 9. Cargas vivas consideradas según el uso del ambiente 56

Tabla 10. Parámetros de diseño estructural 77

Tabla 11. Espectro de pseudo-aceleraciones según la Norma E.030 78

Tabla 12. Comparación de los períodos de vibración obtenidos del análisis modal en los diferentes modelos estructurales del módulo E 95

Tabla 13. Comparación de los períodos de vibración obtenidos del análisis modal en los diferentes modelos estructurales del módulo F 100

Tabla 14. Comparación de los esfuerzos axiales de los modelos del módulo E 106

Tabla 15. Comparación de los esfuerzos cortantes en placas y vigas según los modelos estructurales del módulo E 109

Tabla 16. Comparación de los momentos flectores de los modelos del módulo E 111

Tabla 17. Comparación de los esfuerzos axiales de los modelos del módulo F 117

Tabla 18. Comparación de los esfuerzos cortantes en placas y vigas según los modelos del módulo F 120

Tabla 19. Comparación de los momentos flectores de los modelos del módulo F. 123

Tabla 20. Derivas de entrepiso en el eje X para los modelos estructurales del módulo E 128
Tabla 21. Derivas de entrepiso en el eje Y para los modelos estructurales del módulo E 131
Tabla 22. Derivas de entrepiso en el eje X para los modelos estructurales del módulo F 137
Tabla 23. Derivas de entrepiso en el eje Y para los modelos estructurales del módulo F 139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Módulos E y F de la institución educativa N° 82319 Pampa Cochabamba. 7

Figura 2. Representación gráfica del modelo de cimentación de Winkler 17

Figura 3. Representación gráfica del modelo de cimentación de Pasternak 19

Figura 4. Discretización para análisis por elementos finitos 21

Figura 5. Dimensiones de sección del suelo para el modelo Medio Espacio 3D. 21

Figura 6. Condiciones de apoyo del modelo de Medio Espacio 3D. 22

Figura 7. Zonificación sísmica del Perú 30

Figura 8. Ubicación de la Institución educativa Nº 82319 Pampa Cochabamba 34

Figura 9. Ubicación de los módulos E y F de la I.E. Nº 82319 35

Figura 10. Plano de arquitectura en planta del primer piso del módulo E 46

Figura 11. Plano de arquitectura en planta del segundo piso del módulo E 47

Figura 12. Vista de la elevación lateral izquierda del módulo E 48

Figura 13. Vista de la elevación frontal del módulo E 49

Figura 14. Plano de arquitectura de la planta del primer piso del módulo F 50

Figura 15. Plano de arquitectura de la planta del segundo piso del módulo F 51

Figura 16. Vista de la elevación frontal del módulo F 52

Figura 17. Vista de elevación lateral derecha del módulo F 53

Figura 18. Modelamiento de la rejilla de construcción en RFEM 6 61

Figura 19. Propiedades básicas del concreto 210 kg/cm2 en RFEM 6 62

Figura 20. Propiedades básicas del muro estructural en RFEM 6 63

Figura 21. Modelamiento de columnas rectangulares en RFEM 6 64

Figura 22. Modelamiento de columnas tipo T en RFEM 6 65

Figura 23. Modelamiento de columnas tipo L en RFEM 6 66

Figura 24. Modelamiento de muros estructurales y losas aligeradas en RFEM 6 67

Figura 25. Modelamiento de secciones utilizadas en el modelamiento estructural de los módulos E y F en RFEM 6 68
Figura 26. Modelo estructural 3D del Módulo E en RFEM 6 69
Figura 27. Modelo estructural 3D del Módulo F en RFEM 6. 70
Figura 28. Asignación de restricciones en la base – Modelo 1 en RFEM 6 71
Figura 29. Asignación de apoyos de empotramiento perfecto en la base – Modelo 1 – 3D 72
Figura 30. Asignación de apoyos de empotramiento perfecto en la base – Modelo 2 – 3D 73
Figura 31. Asignación de diafragma rígido en entrepiso 74
Figura 32. Definición de los casos de carga para el análisis estructural 75
Figura 33. Modelado de sobrecarga muerta en la estructura 75
Figura 34. Definición del análisis modal 76
Figura 35. Espectro de Respuesta en la dirección X según Norma E.030-2018..... 79
Figura 36. Espectro de Respuesta en la dirección Y según Norma E.030-2018..... 80
Figura 37. Asignación del espectro de respuesta sísmica en la dirección X en RFEM 6 81
Figura 38. Asignación del espectro de respuesta sísmica en la dirección Y en RFEM 6 82
Figura 39. Asignación de casos de carga para el análisis modal 83
Figura 40. Asignación de restricciones en la base – Modelo 3 – Constantes elásticas 85
Figura 41. Asignación de restricciones en la base – Modelo 3 – 3D 86
Figura 42. Asignación de restricciones en la base – Modelo 4 – Constantes elásticas 88

Figura 43. Asignación de restricciones en la base – Modelo 4 – 3D 88
Figura 44. Asignación de restricciones en la base – Modelo 5 89
Figura 45. Asignación de restricciones en la base – Modelo 5 - 3D en RFEM 6..... 90
Figura 46. Derivas de entrepiso (mm) – Sismo X – Modelo 3 - Módulo E..... 91
Figura 47. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 1, Módulo E)..... 93
Figura 48. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 2, Módulo E)..... 93
Figura 49. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 3, Módulo E)..... 93
Figura 50. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 4, Módulo E)..... 94
Figura 51. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 5, Módulo E)..... 94
Figura 52. Comparación modal de los periodos de vibración obtenidos para el módulo E en los cinco modelos estructurales analizados 96
Figura 53. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 1, Módulo F)..... 98
Figura 54. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 2, Módulo F)..... 99
Figura 55. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 3, Módulo F)..... 99
Figura 56. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 4, Módulo F)..... 99
Figura 57. Resultados de los periodos de vibración (Modelo 5, Módulo F)..... 100
Figura 58. Comparación modal de los periodos de vibración obtenidos para el módulo F en los cinco modelos estructurales analizados 101
Figura 59. Diagrama de fuerzas axiales en placas Eje A (Tn) (Modelo 1, Módulo E) 104
Figura 60. Diagrama de fuerzas cortantes Eje A en placas (Tn) (Modelo 1, Módulo E)..... 104
Figura 61. Diagrama de fuerzas cortantes Eje A en columnas (Tn) (Modelo 1, Módulo E)..... 105

Figura 62. Diagrama de momentos flectores Eje A en columnas (Tn) (Modelo 1, Módulo E)..... 105
Figura 63. Diagrama de momentos flectores en placas del Eje A (Tn) (Modelo 1, Módulo E)..... 106
Figura 64. Gráfico comparativo de los esfuerzos axiales en placas y vigas del módulo E según el modelo estructural 107
Figura 65. Gráfico comparativo de los esfuerzos cortantes en placas y vigas del módulo E según el modelo estructural 109
Figura 66. Gráfico de barras - Comparación de los momentos flectores del módulo E 112
Figura 67. Diagrama de fuerzas axiales Eje A (Tn)(Modelo 1, Módulo F)..... 114
Figura 68. Diagrama de fuerzas cortantes en placas del Eje A (Tn)(Modelo 1, Módulo F)..... 115
Figura 69. Diagrama de fuerzas cortantes en columnas del Eje A (Tn)(Modelo 1, Módulo F)..... 115
Figura 70. Diagrama de momentos flectores Eje A en columnas (Tn)(Modelo 1, Módulo F)..... 116
Figura 71. Diagrama de momentos flectores en placas del Eje A (Tn) (Modelo 1, Módulo F)..... 116
Figura 72. Gráfico comparativo de los esfuerzos axiales en placas y vigas del módulo F según el modelo estructural 118
Figura 73. Gráfico comparativo de los esfuerzos cortantes en placas y vigas del módulo F según el modelo estructural 121
Figura 74. Gráfico comparativo de los momentos flectores en placas y vigas del módulo F según el modelo estructural 123

Figura 75. Desplazamientos máximos (mm) en dirección X (Modelo 1, Módulo E) en RFEM 6 126
Figura 76. Desplazamientos máximos (mm) en dirección Y (Modelo 1, Módulo E) en RFEM 6 127
Figura 77. Gráfico de las derivas laterales en el eje X del módulo E según modelo estructural 129
Figura 78. Gráfico de las derivas laterales en el eje Y del módulo E según modelo estructural 132
Figura 79. Desplazamientos máximos (mm) en dirección X(Modelo 1, Módulo F) en RFEM 6 135
Figura 80. Desplazamientos máximos (mm) en dirección Y (Modelo 1, Módulo F) en RFEM 6 136
Figura 81. Gráfico de las derivas laterales en el eje X del módulo F según modelo estructural 137
Figura 82. Gráfico de las derivas laterales en el eje Y del módulo F según modelo estructural 140

RESUMEN

Durante los sismos de febrero de 2023 en Turquía, se evidenció que omitir la interacción suelo-estructura en edificaciones sobre suelos blandos provocó errores en el análisis sísmico, ya que el uso de modelos con base rígida resultó en diseños inadecuados que afectaron negativamente la seguridad estructural. Por ello, esta investigación tuvo como objetivo comparar los comportamientos estructurales de los módulos E y F de la I.E. N.º 82319 – Pampa Cochabamba, tanto considerando una base rígida como incorporando los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE), para lo cual se empleó una metodología cuantitativa, de tipo descriptivo y diseño no experimental transversal, utilizando planos estructurales, estudios de suelos y un análisis modal espectral conforme a la norma técnica E.030. Se realizó el modelamiento en el software RFEM 6, mediante los modelos de base rígida, Winkler, Pasternak y medio espacio 3D, basados en el método de elementos finitos. Donde se verificó que los resultados indicaron que al considerar la ISE, los periodos de vibración se incrementaron hasta 4.3 veces en el módulo E y 4.5 veces en el módulo F; los esfuerzos internos aumentaron hasta 3.4 y 3.6 veces respectivamente; y las derivas laterales alcanzaron valores de 0.0386 mm (módulo E) y 0.0408 mm (módulo F), superando los valores del modelo con base rígida. En consecuencia, se concluye que los comportamientos estructurales de los módulos estructurales E y F son mayores en un 20% cuando se considera la interacción suelo-estructura en la fundación, en comparación con los modelos que no la consideran.

Palabras clave: Interacción suelo-estructura, modelamiento estructural, análisis sísmico, periodos de vibración, deriva de entrepiso, modelos de fundación, instituciones educativas.

ABSTRACT

The seismic events of February 2023 in Turkey highlighted the structural vulnerability of buildings erected on soft soils, where the omission of soil–structure interaction (SSI) led to inaccurate seismic analyses and inadequate designs. In response, this research aimed to compare the structural behaviors of Modules E and F of the I.E. N.º 82319 – Pampa Cochabamba, considering both rigid-base models and those incorporating SSI effects. A quantitative methodology with a descriptive scope and non-experimental cross-sectional design was used, applying structural plans, soil studies, and modal spectral analysis in accordance with Peruvian Standard E.030. The modeling was conducted in RFEM 6 software using rigid base, Winkler, Pasternak, and 3D half-space models based on the finite element method. The results showed that when SSI was considered, the fundamental periods of vibration increased up to 4.3 times for Module E and 4.5 times for Module F; internal forces increased by up to 3.4 and 3.6 times, respectively; and interstory drifts reached 0.0386 mm (Module E) and 0.0408 mm (Module F), exceeding the values obtained under rigid-base assumptions. It is concluded that the structural demands of Modules E and F increase by approximately 20% when SSI is included, reaffirming the importance of considering soil flexibility in seismic design, particularly in essential facilities located in high-seismicity regions.

Keywords: Soil-structure interaction, structural modeling, seismic analysis, vibration periods, interstory drift, foundation models, educational buildings.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

Tradicionalmente, el análisis estructural de edificaciones ha asumido que la cimentación actúa como una base rígida. Sin embargo, esta simplificación omite los efectos reales de la interacción suelo–estructura (ISE), especialmente en edificaciones ubicadas sobre suelos blandos o altamente saturados. Diversas investigaciones recientes han demostrado que esta interacción puede modificar significativamente la respuesta sísmica, alterando parámetros clave como los desplazamientos laterales, derivas y periodos fundamentales de vibración. Por ello, la consideración de la ISE es esencial para obtener una representación más realista del comportamiento estructural ante eventos sísmicos, particularmente en zonas con alta peligrosidad sísmica como el territorio peruano **(Bapir et al., 2023).**No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

En el contexto peruano, la aplicación de la interacción suelo-estructura (ISE) en el diseño estructural aún es limitada, a pesar de que el país presenta regiones con condiciones geotécnicas complejas, como Cajamarca, Arequipa y Lima. La ciudad de Cajamarca, en particular, posee suelos de origen volcánico con propiedades geomecánicas desfavorables, lo que incrementa los riesgos estructurales ante un evento sísmico. Aunque en las últimas décadas no se han registrado sismos de gran magnitud en la región, esta ha sido clasificada como una zona de silencio sísmico, lo que refuerza la necesidad de aplicar enfoques estructurales más realistas, que incluyan los efectos de la ISE **(López & Ocas, 2021).**

La interacción suelo-estructura es un fenómeno interdisciplinario que integra la ingeniería estructural, la dinámica de suelos, la geofísica, los métodos numéricos y la

ingeniería sísmica. Su correcta incorporación permite estimar con mayor precisión los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos reales de una estructura frente a movimientos sísmicos **(Serrano et al., 2022).** Ignorarla puede derivar en diseños no conservadores, especialmente en edificaciones esenciales como instituciones educativas, donde la seguridad debe ser prioritaria **(López, 2023).**

1.2. Planteamiento del problema

Durante los terremotos de magnitud Mw 7.8 y Mw 7.5 ocurridos el 6 de febrero de 2023 en la región de Hatay, Turquía, se registraron pérdidas humanas y daños estructurales, en edificaciones situadas sobre suelos blandos. Un estudio utilizó simulaciones tridimensionales para evaluar la interacción suelo-estructura (SSI) en edificios de mediana altura. Los resultados indicaron que el uso de un modelo de base rígida sin considerar ISE condujo a estimaciones erróneas del comportamiento dinámico **(Güllü & Natur, 2025).**

Estudios recientes han demostrado que la ISE afecta parámetros dinámicos como el período fundamental de vibración, las derivas de piso y las fuerzas internas en los elementos estructurales. Por ejemplo, investigaciones han evidenciado que considerar la ISE puede aumentar los períodos de vibración hasta en un 57% en edificaciones de 14 pisos, lo que implica una modificación significativa en la demanda sísmica **(Hinostroza Rosales, 2021).**

En el contexto peruano, la Norma Técnica E.030 Diseño sismoresistente establece la necesidad de considerar la ISE en el diseño sismorresistente, especialmente en edificaciones con cimentaciones profundas o ubicadas en suelos blandos. Sin embargo, en la práctica, muchos diseños aún asumen una base rígida, omitiendo los efectos de la interacción dinámica entre el suelo y la estructura **(Villarreal Castro & Aguila Gómez, 2021).**

Diversos investigadores han recomendado el uso de herramientas de modelado por elementos finitos como una alternativa eficaz para simular con mayor precisión el comportamiento de la interacción dinámica entre el suelo y la estructura **(Hearn & Dutta, 2020). Gómez y Martínez (2022)** analizaron módulos escolares con distintas configuraciones de cimentación y concluyeron que la ISE modifica sustancialmente la respuesta estructural, especialmente en edificaciones con bases flexibles. Asimismo, **Alvarado y Quiroz (2023)** señalaron que, en edificaciones sobre suelos blandos, la ISE genera incrementos importantes en los periodos y derivas de entrepiso, lo cual puede comprometer la seguridad estructural si se omite en el diseño.

En función de lo expuesto, la presente investigación analizó la influencia de la interacción suelo-estructura (ISE) en los módulos E y F de la institución educativa N.º 82319 – Pampa Cochabamba. El objetivo fue evaluar cómo varía el comportamiento estructural al considerar y omitir la ISE, utilizando modelos analíticos avanzados. Se compararon parámetros clave como los periodos de vibración, los esfuerzos internos y las derivas de entrepisos.

1.3. Formulación del problema

¿Cuánto varía el comportamiento estructural de los módulos E y F de la institución educativa Nº 82319 Pampa Cochabamba al considerar y omitir los efectos de la Interacción suelo–estructura en la cimentación, en el año 2024?

1.4. Hipótesis

Los comportamientos estructurales de los módulos E y F de la institución educativa Nº 82319 – Pampa Cochabamba son mayores en un 20 % al considerar la interacción suelo–estructura (ISE) en la fundación, en comparación con los modelos que no la consideran.

1.5. Variables

1.5.1. Variable Independiente

Modelamiento de la fundación.

1.5.2. Variable dependiente

Comportamiento estructural.

1.6. Justificación de la investigación

La presente investigación se justifica en la necesidad de incorporar la interacción suelo–estructura (ISE) en el análisis sísmico de edificaciones, dado que este fenómeno tiene una influencia significativa en la respuesta dinámica y estructural de los edificios. Ignorar esta interacción puede conducir a resultados poco realistas, que subestiman los desplazamientos, las derivas de entrepiso y los esfuerzos internos, comprometiendo la seguridad estructural.

En la práctica convencional, los análisis estructurales para el diseño sísmico se realizan bajo la suposición de un empotramiento perfecto en la base, lo cual restringe todos los grados de libertad de la cimentación. Sin embargo, esta suposición no representa adecuadamente el comportamiento real del suelo, que posee propiedades elásticas y deformables. En consecuencia, es necesario implementar modelos más representativos, como aquellos que consideran la interacción suelo–estructura mediante aproximaciones como los modelos de Winkler, Pasternak o medio espacio 3D.

La importancia de esta investigación radica en proporcionar una comparación técnica entre el enfoque tradicional, basado en la Norma Técnica E.030 del Reglamento Nacional de Edificaciones, y enfoques que consideran la ISE. Esta comparación se aplica a edificaciones de alta relevancia social como las instituciones educativas, donde la seguridad estructural debe ser una prioridad.

Al utilizar modelos más realistas, se evidencian incrementos en los desplazamientos laterales y en las derivas de entrepiso, lo cual obliga a reconsiderar el diseño estructural para garantizar un desempeño sísmico seguro y eficiente. Por tanto, esta investigación busca contribuir a la mejora de los criterios de análisis estructural en zonas sísmicas, promoviendo una cultura de prevención basada en evidencia técnica y modelamiento avanzado.

1.7. Alcances y delimitaciones de la investigación

La presente investigación tuvo como alcance principal comparar los comportamientos estructurales de los módulos E y F de la institución educativa N° 82319 Pampa Cochabamba, ubicada en el centro poblado de Algamarca, distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca. Estas edificaciones corresponden a instituciones educativas de categoría esencial (A2), las cuales tienen el siguiente tipo de estructura y sistema estructural:

- Tipo de estructura: Concreto armado y albañilería confinada.
- Sistema estructural: Muro estructural y albañilería confinada.

La cimentación considerada es del tipo zapata corrida, apoyada sobre suelos clasificados como blandos.

Este análisis consideró y obvió los efectos de la Interacción Suelo–Estructura (ISE), utilizando metodologías avanzadas de modelamiento estructural desarrollados en el software RFEM 6 (software de análisis estructural por elementos finitos).

Este alcance incluyó el uso de modelos estructurales con empotramiento perfecto y con interacción suelo–estructura, lo que permitió realizar una comparación detallada entre ambos enfoques.

El estudio se enfocó en determinar las variaciones en los periodos de vibración, los esfuerzos internos, y las derivas de entrepiso de los módulos mencionados, bajo diferentes enfoques de análisis.

1.7.1. Delimitación de la investigación

Esta investigación se delimitó a la evaluación estructural comparativa de los módulos (estructuras con muros estructurales y albañilería confinada) E y F de la institución educativa N° 82319 Pampa Cochabamba, ubicada en el centro poblado de Algamarca, distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca, durante el año 2024.

El estudio se centró exclusivamente en el análisis sísmico lineal elástico y no lineal mediante modelos estructurales tridimensionales, con y sin la consideración de los efectos de la Interacción Suelo–Estructura (ISE).

El modelamiento estructural se realizó empleando exclusivamente el software RFEM 6, y se aplicaron cinco tipos de modelos: empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación, modelo de Winkler, modelo de Pasternak y medio espacio tridimensional 3D. No se incluyó en esta investigación el análisis del comportamiento post-elástico, ni la evaluación del daño acumulado en los elementos estructurales tras un evento sísmico.

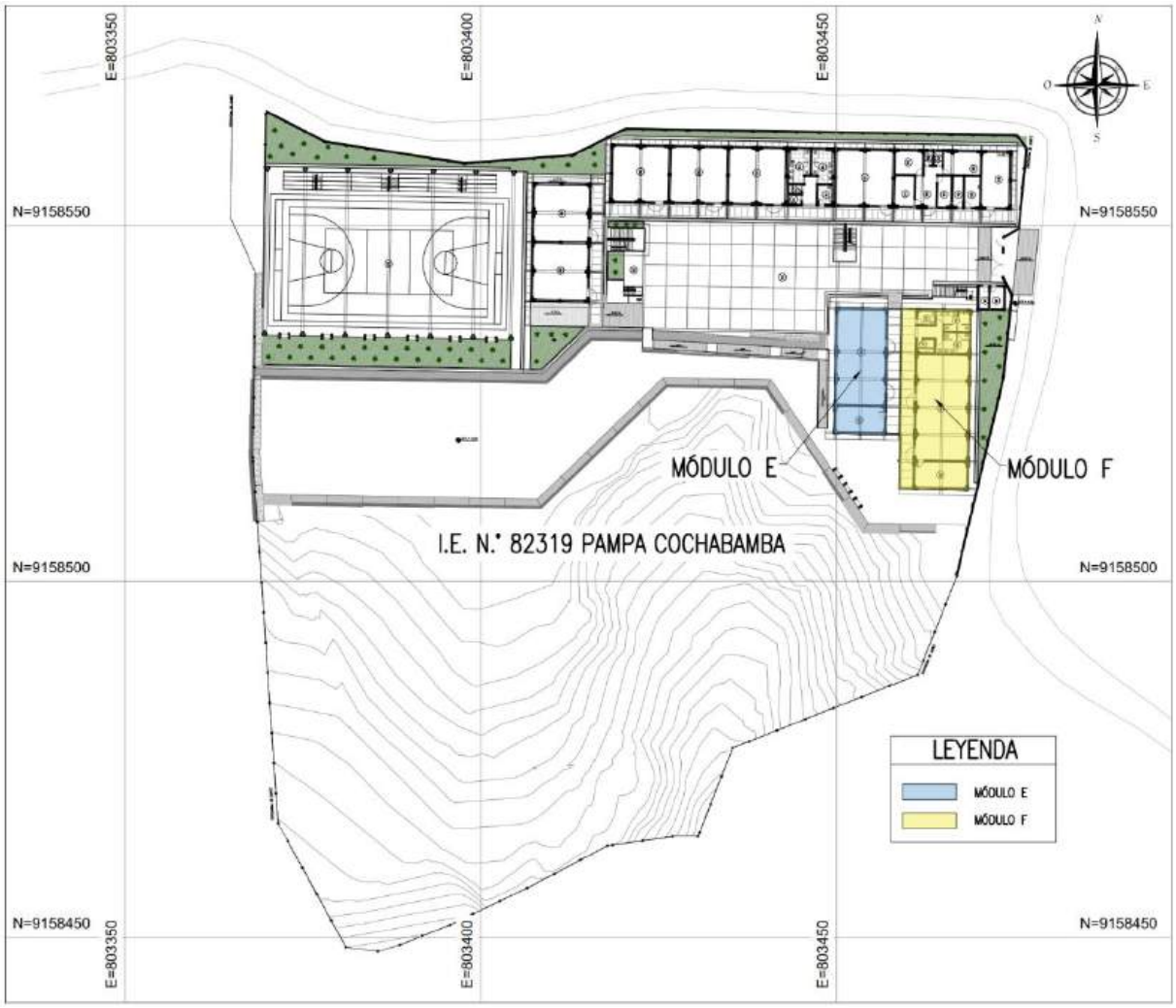
Los parámetros evaluados fueron los periodos de vibración, esfuerzos internos (axiales, cortantes y flectores) y desplazamientos laterales, incluyendo las derivas de entrepiso, considerando las especificaciones establecidas en la Norma Técnica Peruana E.030. El estudio no abarca aspectos constructivos, económicos, ni el análisis del comportamiento de materiales no estructurales.

La investigación se delimitó al uso de los estudios de mecánica de suelos disponibles en el expediente técnico del proyecto de inversión de la institución educativa N.° 82319, sin realizar exploraciones geotécnicas adicionales.

En la Figura 1 se muestran los módulos E y F de la institución educativa Nº 82319 – Pampa Cochabamba, los cuales fueron seleccionados para el análisis estructural comparativo.

Figura 1

Módulos E y F de la institución educativa N° 82319 Pampa Cochabamba



Se utilizaron cargas gravitacionales y sísmicas estáticas equivalentes, definidas según la Norma Técnica Peruana E.030, sin evaluar combinaciones con otras acciones como viento, temperatura o asentamientos diferenciales.

Los modelos de interacción suelo-estructura (Winkler, Pasternak y medio espacio 3D) fueron aplicados idealizando propiedades del suelo con base en valores obtenidos del expediente técnico. No se consideró variabilidad espacial del terreno ni anisotropía del suelo.

El análisis se centró únicamente en los módulos E y F de la institución educativa N° 82319 Pampa Cochabamba, por lo que los resultados no son directamente extrapolables a otras instituciones educativas con distinta geometría, configuración estructural o condiciones geotécnicas.

1.8. Limitaciones de la investigación

La limitación de la investigación es la precisión de los parámetros geotécnicos (módulo de elasticidad, coeficientes de reacción, parámetros dinámicos), que fueron tomados de estudios de suelos disponibles y no de pruebas dinámicas específicas para la zona.

1.9. Objetivos de la investigación

1.9.1. Objetivo general

- Comparar los comportamientos estructurales de los módulos E y F de la institución educativa Nº 82319 Pampa Cochabamba considerando y obviando los efectos de interacción suelo-estructura, mediante análisis dinámico en modelos tridimensionales estructurales.

1.9.2. Objetivos específicos

- Comparar los **periodos fundamentales de vibración** de los módulos E y F de la institución educativa N° 82319, considerando fundaciones modeladas con y sin interacción suelo-estructura (ISE), mediante un análisis sísmico dinámico modal espectral.
- Comparar los **esfuerzos internos máximos** (axiales, cortantes y momentos flectores) en los módulos E y F, obtenidos a partir de modelos estructurales con y sin interacción suelo-estructura (ISE).
- Comparar las **derivas de entrepiso** de los módulos E y F de la institución educativa N° 82319 a partir de modelos con fundaciones que consideran y obvian la interacción suelo-estructura, aplicando un análisis sísmico dinámico.

1.10. Descripción de los contenidos de los capítulos

La presente investigación se estructura en cinco capítulos.

Capítulo I – Introducción: Presenté el contexto y la problemática de mi investigación, formulando el problema, la hipótesis, los objetivos, las variables, la justificación, el alcance y las limitaciones del estudio.

Capítulo II – Marco Teórico: Presenté los antecedentes internacionales, nacionales y locales, así como las bases teóricas y definiciones clave que sustentan el estudio, delimitando su enfoque y fundamentación conceptual.

Capítulo III – Materiales y Métodos: Describí la metodología empleada, la población, la unidad de análisis, los instrumentos y el proceso de análisis sísmico aplicado a cinco modelos estructurales: empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación, Winkler, Pasternak y medio espacio 3D, para los módulos E y F.

Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados: Analicé e interpreté los datos obtenidos, evaluando la validez de la hipótesis.

Capítulo V – Conclusiones y Recomendaciones: Se sintetizan las conclusiones basadas en los objetivos del estudio y se brindan recomendaciones para futuras investigaciones sobre la interacción suelo-estructura.

Se presentaron **las referencias bibliográficas** utilizadas para sustentar los fundamentos teóricos y metodológicos de esta investigación, con el propósito de respaldar y validar cada uno de los argumentos expuestos.

Finalmente presenté los **anexos**, que contiene los estudios de suelos del proyecto.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Dhadse, Ramtekkar y Bhatt (2021) señalan que la interacción suelo-estructura (ISE) implica el comportamiento conjunto de tres componentes esenciales: la estructura, la cimentación y el suelo que la rodea. En su revisión, se subraya la importancia de aplicar modelos de elementos finitos que consideren adecuadamente la rigidez vertical, la rigidez de corte y las propiedades dinámicas del terreno. Estas consideraciones son cruciales para obtener predicciones más precisas del desempeño estructural ante acciones sísmicas, especialmente en edificaciones emplazadas sobre suelos blandos o irregulares.

De acuerdo con la **American Society of Civil Engineers (ASCE)**, los modelos con bases rígidas tienden a subestimar la respuesta estructural real, mientras que la ISE introduce condiciones más realistas. Por lo tanto, es esencial integrar estos modelos en el diseño sísmico para mitigar riesgos en edificaciones críticas **(*ASCE*, 2020).**

Según **Hidalgo de la Cruz (2023)** en su tesis titulada “Interacción suelo-estructura en el diseño de losas de cimentación” destacó que las propiedades geotécnicas del terreno, como la rigidez y las características del material, influyen directamente en las tensiones y deformaciones de los elementos estructurales. Este análisis también evidenció que los modelos de Winkler y Pasternak son herramientas eficaces para modelar la interacción suelo-estructura en estructuras medianas.

González y Martínez (2020) realizaron simulaciones con software avanzado y confirmaron que los modelos que incorporan ISE reflejan un incremento en los

periodos de vibración y desplazamientos laterales. Estos resultados son particularmente relevantes para edificaciones en zonas con suelos blandos o intermedios.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Según **Garro Manayay et al. (2020)** en su trabajo de investigación titulado "Análisis estructural considerando interacción suelo – estructura en centro educativo Puente Piedra" la incorporación de ISE en edificios escolares de Puente Piedra demostró un aumento en los desplazamientos laterales de entrepiso, periodos de vibración más prolongados y una mayor incidencia en las fuerzas de diseño. Estos resultados destacan la necesidad de considerar la flexibilidad del suelo en el análisis estructural.

Según **Arquiñego Laulate & Velásquez Barrios (2020**) en su tesis titulada "Evaluación de la interacción suelo – estructura en una edificación de 4 pisos, en el distrito de cercado de Lima" concluyeron que la ISE incrementa las derivas de entrepiso y los desplazamientos laterales en un promedio del 21.75 %. Estos efectos, aunque aumentan el periodo de vibración, reducen los esfuerzos cortantes y de momentos en los elementos estructurales.

En su tesis titulada "Análisis de interacción sísmica suelo-estructura para edificaciones con zapatas aisladas", **López Sotelo (2020)** concluyó que la flexibilidad de la base de cimentación genera un incremento en los desplazamientos y en los períodos de vibración, al mismo tiempo que produce una reducción en las fuerzas internas de las edificaciones regulares. Este hallazgo subraya la necesidad de considerar detalladamente la rigidez del suelo en el diseño estructural, ya que puede influir significativamente en la respuesta sísmica de la edificación.

2.1.3. Antecedentes locales

Ocas Llanos & López Campos (2021) en su tesis: “Comportamiento estructural al incorporar la interacción suelo-estructura de una edificación de cuatro niveles en la Molina – Cajamarca”, describe que los resultados que muestran el efecto de la interacción suelo estructura, permiten determinar con mayor precisión el comportamiento real de una edificación durante un movimiento sísmico, ya que al incorporar todas las características de la estructura y de la demanda sísmica, el efecto interacción suelo estructura produce que los edificios presenten mejor respuesta estructural siempre y cuando cumplan con los requisitos de la Norma Sismorresistente E.0.30.

Garay Chávez (2019) en su tesis: Influencia de la interacción suelo-estructura en el comportamiento sísmico de un edificio de 7 niveles del proyecto “Multifamiliar los Balcones del Valle” Barrio Columbo – Cajamarca; analizó un edificio multifamiliar en Cajamarca y reportó un incremento del 23.78 % en los periodos de vibración y una disminución del 37.18 % en las fuerzas internas al comparar modelos con y sin ISE. Estos resultados evidencian la relevancia de la interacción suelo-estructura en zonas de alta sismicidad.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Fundamentos de la Interacción suelo-estructura (ISE)

La interacción suelo-estructura (ISE) es un fenómeno complejo que describe el comportamiento conjunto de la estructura, su cimentación y el suelo de apoyo ante cargas estáticas o dinámicas. En los análisis estructurales tradicionales, se suele asumir que la base de la estructura está empotrada, es decir, que no presenta desplazamientos ni rotaciones. Sin embargo, esta idealización ignora las propiedades

elásticas del suelo, lo que puede llevar a una representación irreal del comportamiento sísmico real del sistema estructural **(Chopra, 2020).**

Kausel (2022) resalta que la ISE se vuelve crítica en edificaciones situadas sobre suelos blandos, donde la rigidez de la base de cimentación no puede considerarse infinita. Este efecto se manifiesta principalmente en el aumento del periodo fundamental de la estructura, incremento en los desplazamientos laterales y variaciones significativas en los esfuerzos internos. La **interacción suelo-estructura (ISE)** es un fenómeno que se presenta cuando la deformabilidad del terreno influye en la respuesta estructural de una edificación. A diferencia del análisis tradicional con base rígida, donde se asume un empotramiento perfecto en la cimentación, la ISE considera el comportamiento conjunto del sistema suelo-cimentación-estructura, generando una respuesta más realista ante cargas dinámicas como los sismos **(Kramer, 2020).**

Según la **Norma Técnica Peruana E.030 (RNE, 2018)**, la ISE cobra especial relevancia en edificaciones sobre suelos blandos o en zonas de alta sismicidad, ya que la flexibilidad del terreno puede alterar significativamente los periodos de vibración, esfuerzos internos y desplazamientos laterales.

2.2.2. Componentes principales del sistema suelo-estructura

La interacción suelo–estructura (ISE) comprende tres componentes fundamentales: la estructura, la cimentación y el suelo. El análisis conjunto de estos elementos permite evaluar la respuesta realista de una edificación frente a cargas estáticas o dinámicas, en especial, ante eventos sísmicos **(Gazetas, 2021)**.

La ISE involucra tres componentes fundamentales:

A. La estructura

Es el conjunto de elementos que recibe y transfiere las cargas. Sus características más relevantes son:

- **Masa estructural**: Determina la magnitud de la inercia durante movimientos sísmicos o vibraciones.
- **Geometría y dimensiones**: Influyen en la distribución de esfuerzos y la forma de propagación de la energía.
- **Rigidez**: Capacidad de la estructura para oponerse a deformaciones.

B. Cimentación

Constituye la base que transfiere las cargas de la superestructura al terreno. Sus propiedades dependen de:

- **Tipo de cimentación:** Aislada, corrida, losa, etc.
- **Rigidez de la cimentación:** Condiciona la transmisión de esfuerzos al suelo.
- **Condiciones de apoyo:** Pueden ser flexibles o rígidas, dependiendo del suelo subyacente.

C. Suelo

Es el medio de apoyo continuo o discretizado que reacciona ante las cargas. Sus principales propiedades son:

- **Tipología del suelo:** Suelos granulares, cohesivos o mixtos, con diferente comportamiento elástico y plástico.

- **Módulo de elasticidad:** Capacidad del suelo para resistir deformaciones elásticas.
- **Coeficiente de Poisson:** Relación entre deformación transversal y longitudinal.
- **Profundidad y estratigrafía:** Afectan la propagación de ondas y la respuesta dinámica.
- **Ubicación geográfica:** Condiciona la exposición sísmica, la microzonificación y otros factores geológicos.

2.2.3. Modelos matemáticos para la simulación de la interacción suelo–estructura

Según **Hidalgo de la Cruz (2024)**, el análisis del comportamiento estructural en interacción con el suelo ha experimentado un notable avance, lo que ha conducido al desarrollo de múltiples modelos matemáticos orientados a representar con mayor precisión la complejidad de este fenómeno. Estos modelos han surgido, en parte, como respuesta a la necesidad de perfeccionar el modelo original propuesto por Winkler en 1867, permitiendo abordar con mayor eficacia los desafíos propios de la ingeniería civil y geotécnica.

Hoy en día, existe una amplia variedad de métodos para analizar la interacción suelo-estructura, que van desde modelos estáticos simplificados hasta complejos análisis tridimensionales mediante elementos finitos. Estos enfoques buscan integrar aspectos fundamentales como la no linealidad del terreno, la variabilidad de sus propiedades geotécnicas y otros factores que inciden en la respuesta estructural. **(Hidalgo de la Cruz, 2024, p. 25).**

Existen diferentes modelos teóricos para representar la interacción suelo-estructura, entre ellos destacan:

2.2.3.1. Modelo de Winkler

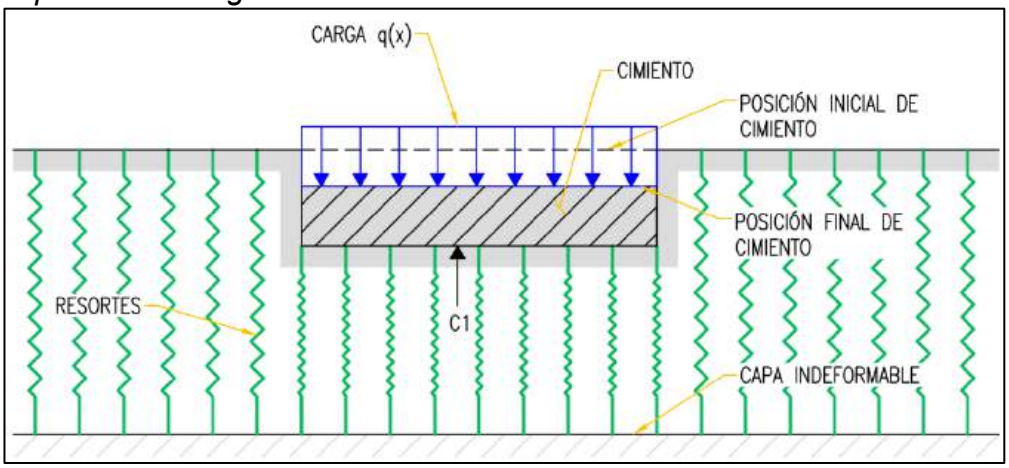
El modelo de Winkler simula el terreno como una serie de resortes independientes. Es un modelo simple, útil para cimentaciones superficiales, aunque no considera la interacción entre puntos adyacentes **(Gazetas, 2021).**

Este modelo representa al suelo como una serie de resortes independientes, donde la reacción del suelo es proporcional al asentamiento local. A pesar de su simplicidad, el modelo no considera la interacción entre puntos adyacentes del terreno, por lo que su uso está limitado a cimentaciones poco profundas **(Kramer, 2020).**

El modelo de Winkler también conocido como módulo de reacción de la subrasante, se define como la relación lineal entre las presiones transmitidas al terreno y el asiento experimentado por la estructura, denominado también como el coeficiente de balasto. **(Hidalgo de la Cruz, 2024).**

Figura 2

Representación gráfica del modelo de cimentación de Winkler



Ecuación 1. Coeficiente de Winkler (C)

$$C_1 = \frac{\mathrm{E}_1}{h1(1 - 2{\mu_1}^2)}$$

Donde:

C_1=Coeficiente de interacción C de Winkler

E_1= Modulo de elasticidad del estrato(ton/m2)

h_1=Espesor de estrato(m)

μ_1=Modulo de poisson del suelo.

2.2.3.2. Modelo de Pasternak: Simulación de interacción lateral del terreno

El modelo de Pasternak representa una evolución del modelo de Winkler, al introducir un sistema de dos parámetros que permite una simulación más realista de la rigidez del suelo. A diferencia de Winkler, que considera únicamente la respuesta vertical del suelo mediante resortes independientes, Pasternak incorpora un **elemento de corte** que conecta los resortes adyacentes, permitiendo simular la interacción lateral entre puntos del terreno **(Gazetas, 2021).**

Según **Hidalgo de la Cruz (2024),** este modelo fue desarrollado en 1954 y se caracteriza por incluir una capa de elementos verticales incompresibles que se deforman exclusivamente por corte transversal. Esta capa actúa fuera de la cimentación, permitiendo capturar no solo la deformabilidad vertical, sino también la resistencia al corte del suelo, lo que resulta especialmente útil en análisis de cimentaciones sobre suelos blandos.

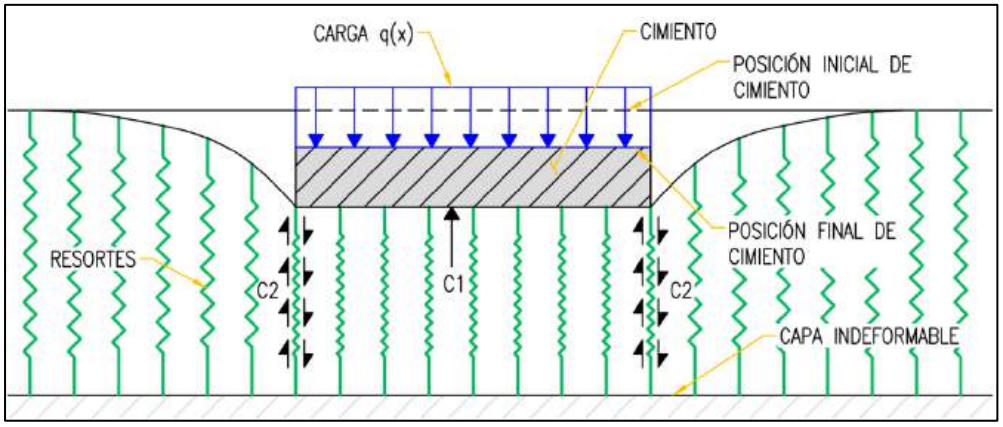
En resumen, el modelo de Pasternak ofrece una mejora sustancial frente al modelo de un solo parámetro, al considerar tanto la **elasticidad** como la **resistencia**

al corte del suelo, lo que permite representar con mayor fidelidad la interacción suelo-estructura.

A continuación, se muestra el modelo de la cimentación de Pasternak para una cimentación de contorno libre-libre.

Figura 3

Representación gráfica del modelo de cimentación de Pasternak



Además del coeficiente C1 (Ecuación 1 Coeficiente de Winkler o balasto vertical) se adiciona un segundo coeficiente para la resistencia al corte y se muestra como C2:

Ecuación 2. Coeficiente de balasto horizontal

$$C_2 = \frac{\mathrm{E}_1 . h_1}{6(1+\mu_1)}$$

Donde:

C_2=Coeficiente de balasto horizontal($\mathrm{ton/m^3}$).

E_1= Modulo de elasticidad del estrato($\mathrm{ton/m^2}$).

h_1=Espesor de estrato(m).

μ_1=Modulo de poisson del suelo.

2.2.3.3. Modelo de Medio Espacio 3D

El modelo de medio espacio 3D representa el terreno como un volumen continuo tridimensional con propiedades elásticas, permitiendo capturar de manera precisa la respuesta del suelo frente a cargas dinámicas. A diferencia de los modelos simplificados, este enfoque considera el terreno como un medio elástico semiinfinito, lo cual permite simular con mayor fidelidad la interacción suelo-estructura (ISE) en todas las direcciones **(Kausel, 2022).**

Este modelo es especialmente recomendado para edificaciones ubicadas en suelos blandos o con geometrías estructurales complejas, ya que permite incorporar la variabilidad de materiales y condiciones geotécnicas mediante herramientas numéricas avanzadas. Su implementación requiere del uso de software especializado basado en elementos finitos, como RFEM 6.

Según **Dlubal (2024)**, la simulación más realista de la ISE puede lograrse mediante un análisis tridimensional por elementos finitos, donde se incorporan las condiciones del suelo, las propiedades del material y la geometría real de la cimentación. En este contexto, se puede utilizar el módulo adicional de análisis geotécnico, el cual calcula parámetros de cimentación no lineales a partir de los datos del estudio de suelos, como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, la densidad y el espesor de capas. Estos parámetros, al integrarse mediante un proceso iterativo, permiten estimar asentamientos más realistas y fuerzas internas más precisas en la estructura.

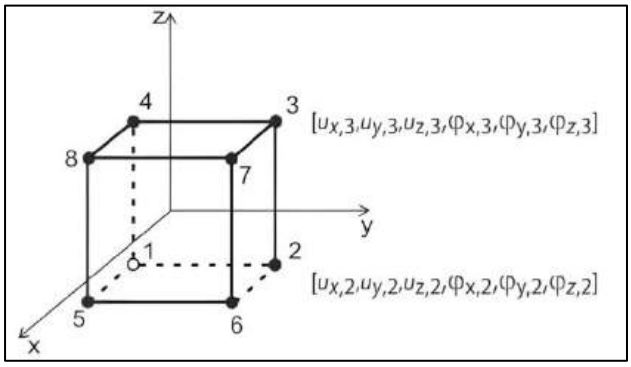
- **Discretización en RFEM 6**

En el contexto del análisis mediante el método de elementos finitos, el volumen del suelo se discretiza en un número finito de elementos. En el software RFEM 6, esta

discretización se realiza utilizando elementos tridimensionales de tipo tetraedro, pentaedro y hexaedro **(Dlubal, 2024).**

Figura 4

Discretización para análisis por elementos finitos



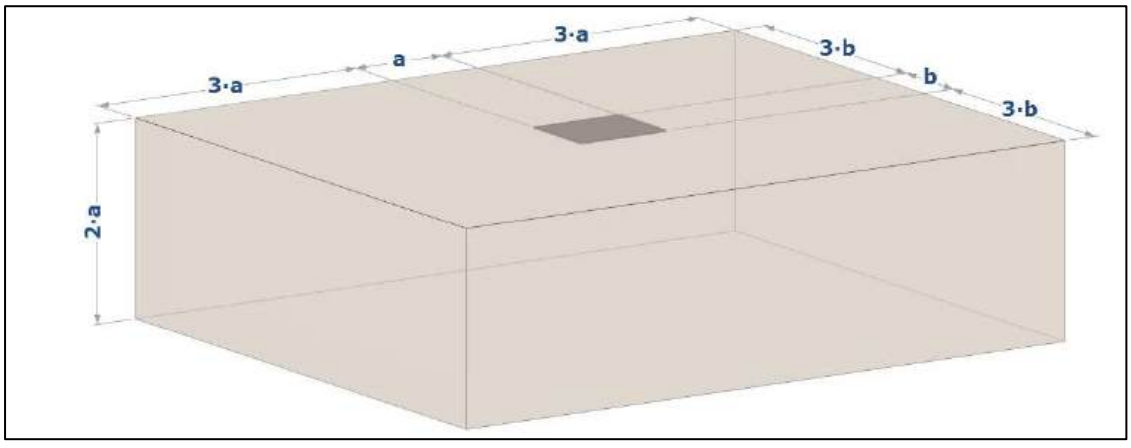
Fuente. Dlubal.com (2024). Discretización – Elemento sólido (hexaedro).

- **Sección de cálculo**

A diferencia del suelo real, la malla utilizada para el modelamiento tiene una extensión limitada. Para evitar que los bordes de la malla influyan significativamente en los resultados, estos deben ubicarse a una distancia suficiente de la estructura modelada. A continuación, se presentan dimensiones de referencia recomendadas para la sección del suelo en análisis con el modelo de medio espacio 3D.

Figura 5

Dimensiones de sección del suelo para el modelo Medio Espacio 3D.



Fuente. Dlubal.com (2024). Recomendaciones para cimentaciones superficiales.

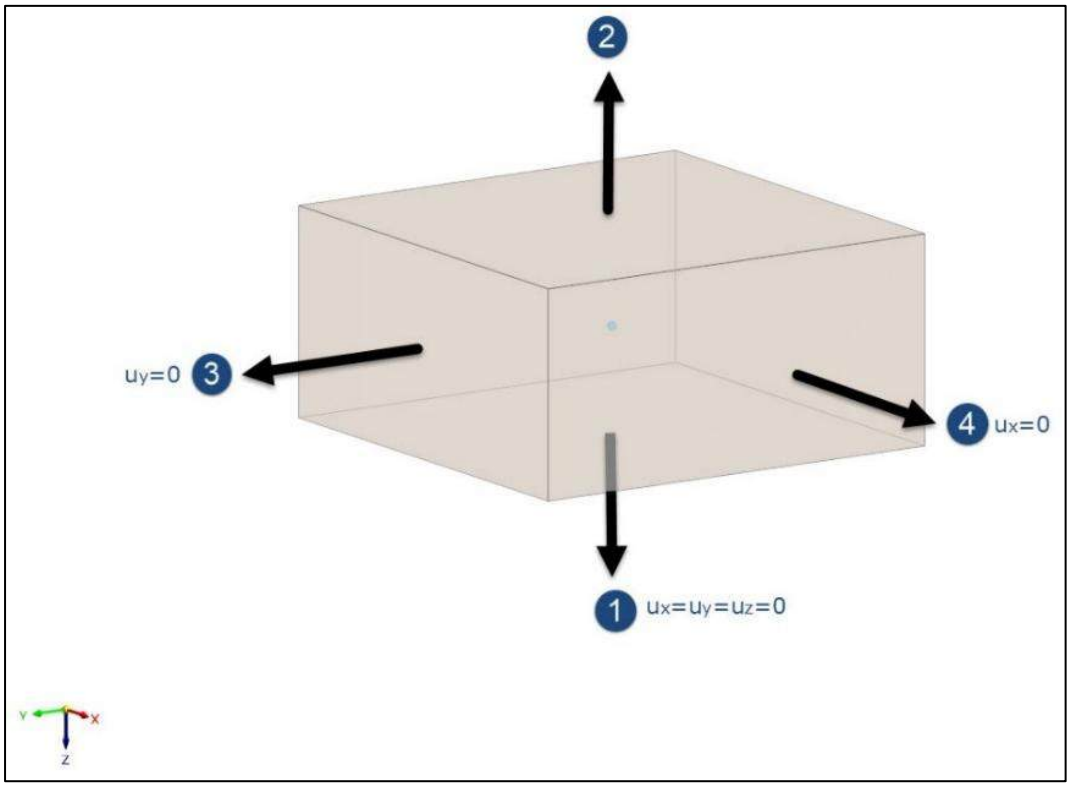
- **Condiciones de contorno geométricas**

En los límites del dominio de cálculo es necesario definir condiciones de contorno tanto de fuerza como de desplazamiento, con el fin de simular adecuadamente el comportamiento del terreno más allá de la zona inmediata a la cimentación.

En general, se recomienda restringir los desplazamientos en las superficies de contorno para eliminar influencias externas no deseadas.

Figura 6

Condiciones de apoyo del modelo de Medio Espacio 3D.



Fuente. Dlubal.com (2024).

- **Condiciones de contorno para las superficies del modelo de suelo**

Las condiciones de contorno de desplazamiento aplicadas en RFEM 6 se definen de la siguiente manera:

1. Área de la base: apoyo fijo con ux = uy = uz = 0.

2. Superficie: área de borde libre.
3. Superficie de contorno en el plano xz: Apoyo plano con uy = 0, ux ≠ 0 & uz = 0.
4. Superficie de contorno en el plano yz: Apoyo plano con ux = 0, uy ≠ 0 & uz = 0.

Estas condiciones buscan representar con precisión la interacción del volumen de suelo con la estructura modelada, limitando el efecto de los bordes del dominio de cálculo.

2.2.4. Efectos de la ISE en el comportamiento estructural

- **Periodo de vibración**

El **periodo de vibración** es un parámetro clave que define la respuesta dinámica de una estructura. La ISE tiende a aumentar este valor debido a la flexibilidad del suelo, lo cual puede influir en la demanda sísmica **(Chopra, 2020).** Según la norma E.030, el periodo se debe calcular considerando la altura de la estructura y la rigidez del sistema estructural, pero puede ajustarse si se integra la interacción suelo-estructura.

Uno de los efectos más notorios de la ISE es el aumento del periodo fundamental de vibración de la estructura. La mayor flexibilidad del sistema suelo-cimentación estructura hace que la estructura oscile con mayor amplitud y a menor frecuencia. Esto puede afectar la demanda sísmica y las fuerzas de diseño **(Chopra, 2020).**

- **Distribución de esfuerzos internos**

La distribución de fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores también se ve modificada al considerar la ISE. Por ejemplo, las cargas axiales en columnas

tienden a disminuir, mientras que los esfuerzos en vigas pueden aumentar debido a la redistribución de rigideces **(Kausel, 2022).**

- **Deriva de entrepiso**

La **deriva de entrepiso** representa la diferencia de desplazamientos entre dos niveles consecutivos, dividida por la altura del entrepiso. Es un indicador importante de deformación estructural y se usa para verificar el cumplimiento de la normativa. Al considerar la ISE, las derivas suelen incrementarse, lo cual puede llevar a un rediseño de los elementos estructurales para evitar daños excesivos **(MVCS, 2018).**

2.2.5. Aplicación de software RFEM en el análisis con ISE

Las siglas RFEM no tienen un significado específico como acrónimo, pero se refieren al software de análisis estructural desarrollado por Dlubal Software. RFEM es una herramienta avanzada para el análisis por elementos finitos (AEF) que permite definir y calcular estructuras planas y espaciales compuestas por placas, muros, láminas, barras, elementos sólidos y de contacto. Es la base de un sistema modular que incluye complementos para análisis adicionales y específicos.

RFEM 6 permite entre otras cosas un modelado tridimensional, la gestión de cargas y sus combinaciones, así como la integración con normativas y códigos de diseño internacionales, diversas ventajas que lo destacan como una opción preferida por ingenieros y diseñadores en este campo, pero una de las razones principales, es que hace uso del método de elementos finitos y los modelos estructurales 1: Empotramiento perfecto, modelo 2: Empotramiento con cimentación, modelo 3: Winkler, modelo 4: Pasternak y modelo 5: Medio espacio 3D, tanto para el módulo E como para el módulo F.

2.2.6. Normativa relacionada con la interacción suelo estructura

La norma E.030 "Diseño sismorresistente" del Reglamento Nacional de Edificaciones en el Perú establece que en zonas sísmicas 3 y para edificaciones esenciales (categoría A2), se debe realizar un análisis dinámico modal espectral que considere las condiciones del terreno. Aunque la norma no exige explícitamente la modelación de la ISE, su consideración mejora la confiabilidad del diseño **(MVCS, 2018).**

2.2.7. Justificación del uso de los cinco modelos estructurales comparativos

La selección de los cinco modelos estructurales en esta investigación responde a la necesidad de evaluar comparativamente el efecto de la interacción suelo-estructura (ISE) sobre el comportamiento sísmico de edificaciones esenciales. Cada modelo representa un nivel distinto de idealización del sistema suelo–estructura, lo que permite obtener una visión integral del impacto de la flexibilidad del terreno en la respuesta estructural. A continuación, se detalla la justificación de cada uno:

1. **Modelo con empotramiento perfecto**

   Se empleó como caso base o de referencia. Representa una condición idealizada común en la práctica estructural, donde se asume que la estructura está completamente rígida en su base. Aunque simplificado, este modelo permite contrastar los efectos de la ISE con un escenario sin deformabilidad del suelo, facilitando la cuantificación de la subestimación en la demanda estructural.

2. **Modelo con cimentación empotrada (rigidez de suelo incluida como masa nodal)**

   Introduce parcialmente la influencia del suelo mediante la incorporación de masas de cimentación. Representa una condición más cercana a la realidad que el empotramiento perfecto, pero sin la complejidad de modelos más avanzados. Su inclusión permite observar la transición entre un modelo idealizado y uno con condiciones más realistas.

3. **Modelo de Winkler**

   Incluido por ser ampliamente utilizado en la ingeniería estructural debido a su sencillez y bajo costo computacional. Representa al suelo mediante resortes verticales independientes, simulando la interacción local sin considerar acoplamiento entre puntos. Su comparación con modelos más complejos permite identificar sus limitaciones y su aplicabilidad en escenarios prácticos.

4. **Modelo de Pasternak**

   Representa una mejora respecto al de Winkler al incluir rigidez de corte entre resortes, permitiendo una representación más realista de la continuidad del suelo. Este modelo ofrece una visión más precisa del comportamiento estructural, especialmente en lo que respecta a la distribución de esfuerzos y desplazamientos.

5. **Modelo de medio espacio tridimensional (3D)**

   Es el modelo más avanzado y preciso del estudio. Considera al suelo como un medio continuo tridimensional con propiedades elásticas, incluyendo condiciones de frontera, anisotropía y comportamiento no lineal. Su aplicación

mediante software especializado como RFEM 6 permite una representación rigurosa de la interacción suelo-estructura.

En conjunto, la comparación de estos cinco modelos permite determinar con mayor exactitud el grado de influencia de la ISE sobre los módulos E y F, aportando evidencia técnica para optimizar los criterios de diseño estructural en edificaciones ubicadas en zonas de alta sismicidad.

2.2.8. Fundamentos teóricos del del análisis dinámico estructural

El análisis sísmico estructural es un procedimiento esencial para evaluar el comportamiento dinámico de una edificación frente a una excitación sísmica. Existen dos enfoques principales: el análisis estático (basado en fuerzas equivalentes) y el análisis dinámico modal espectral. Este último proporciona mayor precisión, especialmente en edificaciones con geometrías irregulares o ubicadas en suelos con alta variabilidad, donde la interacción suelo-estructura (ISE) ejerce una influencia considerable **(Chopra, 2020).**

Según lo establecido por la Norma Técnica Peruana E.030, toda edificación situada en la Zona Sísmica 3, como es el caso de Cajamarca, debe ser evaluada mediante un análisis dinámico que contemple la distribución de masas, rigideces y modos de vibración **(Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2018).**

2.2.8.1. Norma Técnica de Edificaciones E.030 “Diseño Sismorresistente”

Según lo establecido por la Norma Técnica E.030, toda edificación y cada una de sus partes deben ser diseñadas y construidas para resistir las solicitaciones sísmicas indicadas en la norma, de acuerdo con las especificaciones técnicas de las normas aplicables según los materiales estructurales utilizados (MVCS, 2019, p. 9).

2.2.8.2. Norma Técnica de Edificaciones E.020 “Cargas”

La Norma Técnica E.020 establece que las edificaciones, así como todas sus partes, deben ser capaces de resistir las cargas resultantes del uso previsto. Estas cargas deben considerarse en las combinaciones especificadas y no deben generar esfuerzos ni deformaciones que excedan los límites establecidos para cada material estructural, según su norma de diseño correspondiente. En ningún caso, las cargas consideradas serán menores a los valores mínimos estipulados por esta norma, los cuales se expresan en condiciones de servicio. Esta norma se complementa con la N.T.E.030 “Diseño Sismorresistente” y con las normas específicas de diseño de los distintos materiales estructurales **(Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2006, p. 11).**

2.2.8.3. Norma Técnica de Edificaciones E.060 “Concreto Armado”

Esta norma específica los requisitos y exigencias mínimas para el análisis, diseño, materiales, construcción, control de calidad y supervisión de estructuras de concreto armado, preesforzado y simple. Los planos y especificaciones técnicas del proyecto estructural deben cumplir con esta norma, la cual prevalece sobre otras en caso de discrepancia con las disposiciones a las que hace referencia **(MVCS, 2009, p. 13).**

2.2.8.4. Norma Técnica de Edificaciones E.070 “Albañilería”

La N.T.E.070 establece los requisitos mínimos para el análisis, diseño, materiales, construcción, control de calidad e inspección de edificaciones estructuradas principalmente con muros de albañilería confinada o muros armados. En el caso de estructuras especiales de albañilería, como arcos, chimeneas, muros de contención y reservorios, se deben aplicar las disposiciones pertinentes en la medida en que resulten aplicables. Para sistemas constructivos fuera del alcance de

esta norma, será necesaria su aprobación mediante Resolución del MVCS, previa evaluación por SENCICO (MVCS, 2006, p. 13).

2.2.8.5. Norma Técnica de Edificaciones E.050 “Suelos y Cimentaciones”

La N.T.E.050 tiene como objetivo definir los requisitos mínimos para la realización de Estudios de Mecánica de Suelos (EMS) con fines de cimentación en edificaciones u otras obras contempladas por la norma. Los EMS deben ejecutarse con el propósito de asegurar la estabilidad y durabilidad de las estructuras, promoviendo además el uso racional de los recursos disponibles **(MVCS, 2018, p. 7).**

2.2.8.6. Parámetros del suelo

A. Tipos de perfiles de suelos

De acuerdo con la normativa peruana E.030, los factores de suelo y los periodos característicos de vibración del terreno que deben considerarse para el diseño sismorresistente se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 1

Factores del suelo “S”

Tabla N° 3 FACTOR DE SUELO “S”				
SUELO / ZONA	S_0	S_1	S_2	S_3
Z_4	0,80	1,00	1,05	1,10
Z_3	0,80	1,00	1,15	1,20
Z_2	0,80	1,00	1,20	1,40
Z_1	0,80	1,00	1,60	2,00

Fuente. Norma E.030 Diseño Sismorresistente, MVCS y SENCICO (2018).

Tabla 2

Tipo de suelo y periodos característicos

Tabla N° 4 PERÍODOS "T_P" Y "T_L"				
	Perfil de suelo			
	S_0	S_1	S_2	S_3
T_P (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T_L (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

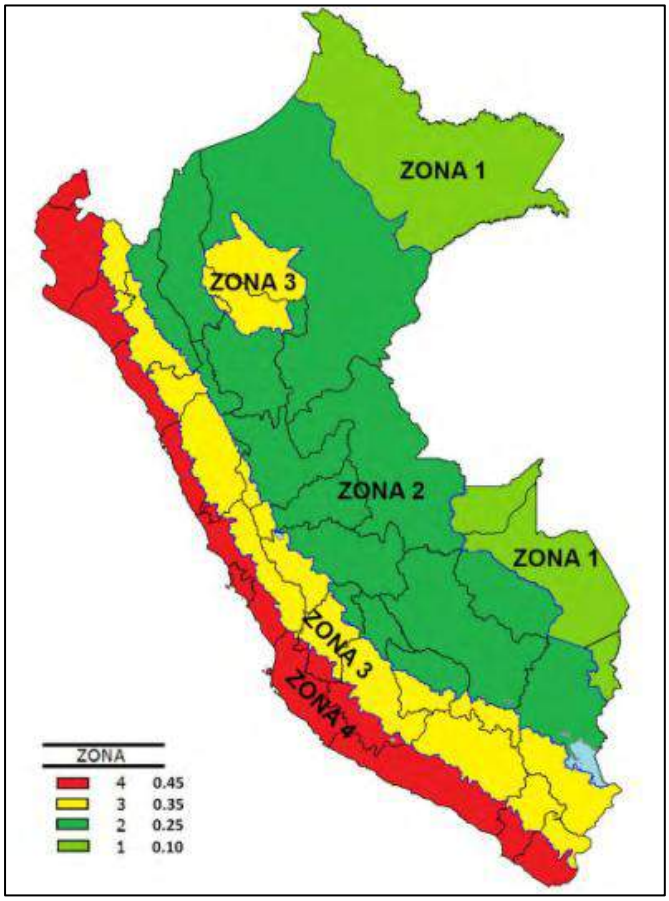
Fuente. Norma E.030 Diseño Sismorresistente, MVCS y SENCICO (2018).

2.2.8.7. Zonificación sísmica

La zonificación sísmica del territorio peruano, establecida en la Norma E.030, está basada en un periodo de retorno de 475 años (equivalente a una probabilidad de excedencia del 10 % en 50 años).

Figura 7

Zonificación sísmica del Perú



Fuente. Norma E.030 Diseño Sismorresistente, MVCS y SENCICO (2018).

2.2.9. Herramientas computacionales en la simulación estructural

La simulación de la interacción suelo-estructura (ISE) se ha beneficiado notablemente del avance de herramientas computacionales basadas en el método de elementos finitos, volúmenes finitos y técnicas mixtas. Programa como **RFEM 6** es ampliamente utilizado tanto en la investigación como en la práctica profesional. Esta plataforma permite modelar la flexibilidad de la cimentación, las propiedades no lineales del suelo y las condiciones tridimensionales de la interacción, brindando un análisis más realista y preciso del comportamiento estructural ante eventos sísmicos **(Gazetas, 2021).**

2.2.10. Aplicaciones prácticas de la ISE en edificaciones educativas

Las instituciones educativas están clasificadas como **edificaciones esenciales**, lo que implica la necesidad de garantizar su operatividad después de un sismo severo. En este contexto, la incorporación de la interacción suelo-estructura en el análisis estructural permite obtener una representación más fiel del comportamiento dinámico de la edificación. Esta consideración mejora la toma de decisiones en el diseño, incrementa la seguridad de los usuarios y optimiza los costos constructivos al evitar sobredimensionamientos innecesarios **(Ministerio de Educación [MINEDU], 2021).**

2.3. Definición de términos básicos

- **Ingeniería sísmica:** Rama de la ingeniería civil que aplica los principios de la dinámica estructural y geotecnia para diseñar estructuras capaces de resistir movimientos sísmicos, protegiendo vidas humanas y bienes materiales **(Chopra, 2020).**

- **Sismicidad:** Actividad sísmica en una región determinada, medida por la frecuencia y magnitud de los eventos sísmicos ocurridos **(Gazetas, 2021).**
- **Coeficiente de Poisson:** Relación entre la deformación transversal y longitudinal de un material sometido a carga uniaxial (Kramer, 2020).
- **Elementos estructurales:** Componentes como columnas, vigas, muros y losas que conforman la estructura resistente de una edificación.
- **Periodo de vibración:** Tiempo que tarda una estructura en completar un ciclo completo de oscilación libre **(Chopra, 2020).**
- **Esfuerzos:** En esta investigación, se refiere a fuerzas internas como carga axial, fuerza cortante y momento flector.
- **Rigidez:** Resistencia de un elemento o estructura a la deformación cuando es sometido a cargas externas **(Kausel, 2022).**
- **Diafragmas rígidos:** Elementos planos, como losas de entrepiso, que distribuyen las fuerzas horizontales de manera uniforme a los elementos verticales resistentes **(MVCS, 2018).**
- **Desplazamientos laterales:** Movimiento horizontal de los pisos superiores de una edificación frente a cargas sísmicas.
- **Derivas laterales:** La deriva lateral se define como el desplazamiento relativo entre dos niveles consecutivos de una edificación, dividido entre la altura del entrepiso correspondiente.

- **Espectro de respuesta elástica:** Curva que representa la máxima respuesta (aceleración, velocidad o desplazamiento) de un oscilador lineal ante un sismo.
- **Espectro de respuesta inelástica:** Representación de la respuesta máxima de sistemas estructurales que experimentan deformaciones plásticas bajo carga sísmica **(Gazetas, 2021).**
- **Coeficiente de balasto:** Medida de la rigidez del suelo que relaciona la presión aplicada con la deformación vertical resultante **(Kramer, 2020).**
- **Suelo de fundación:** Capa de terreno sobre la cual se apoya una cimentación estructural.
- **Suelos blandos:** Suelos con baja resistencia al corte, como arcillas con baja densidad o alta humedad **(MINEDU, 2021).**
- **Cimentación:** Sistema estructural que transfiere las cargas de una edificación al suelo **(Jines Cabezas, 2017).**
- **Cimentación corrida:** Es un tipo de cimentación superficial que consiste en una zapata continua de concreto armado o simple, dispuesta bajo muros portantes para distribuir uniformemente las cargas hacia el suelo.

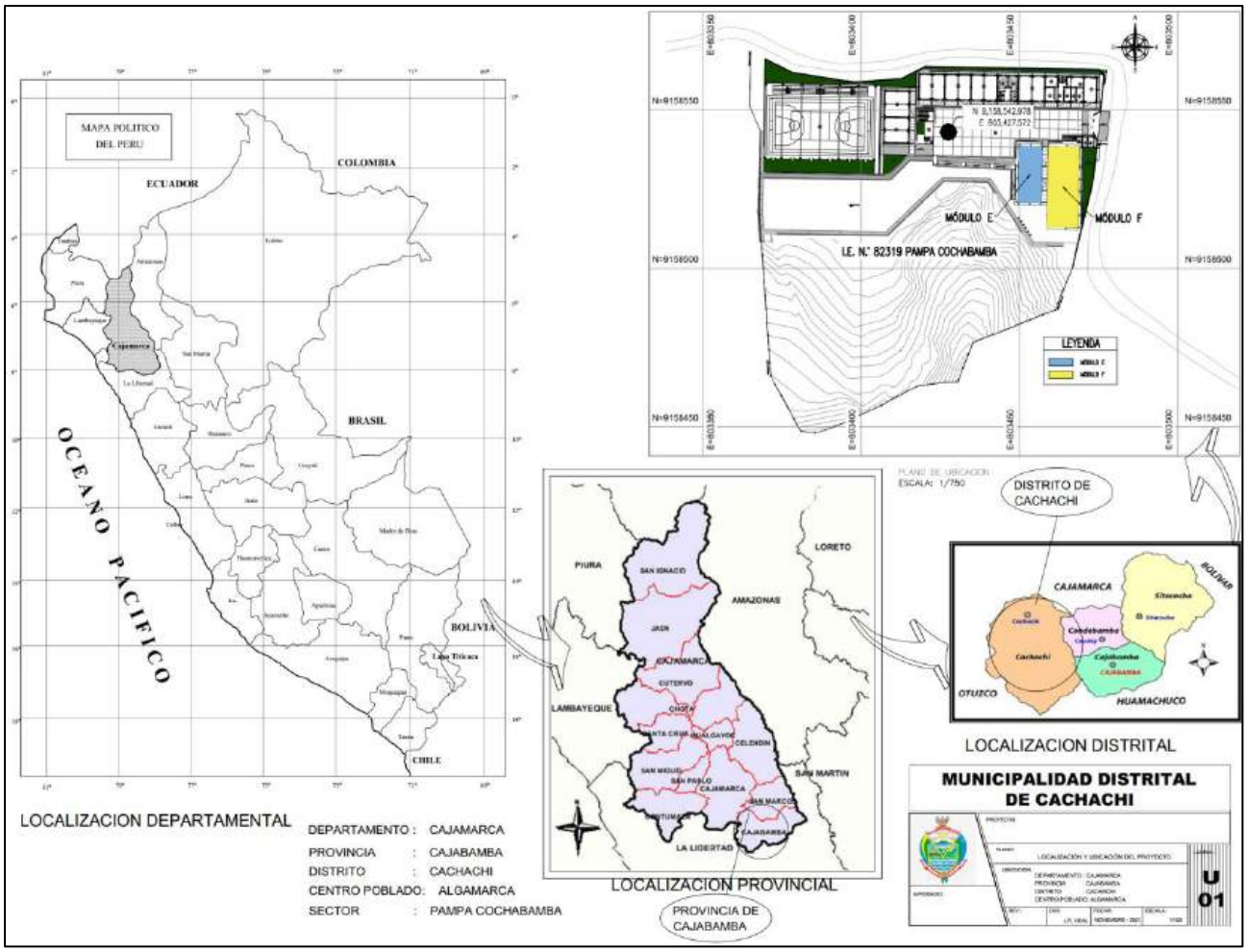
CAPÍTULO III
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica de la investigación

Los módulos E y F, objeto de estudio, se encuentran ubicados en la Institución Educativa Nº 82319 Pampa Cochabamba, situada en el centro poblado de Algamarca, distrito de Cachachi, provincia de Cajabamba, departamento de Cajamarca. La ubicación exacta de dichos módulos se presenta en las Figuras 8 y 9 (Anexo Nº 01), cuyas coordenadas están referidas al sistema UTM, DATUM WGS 84, zona 17S.

Figura 8

Ubicación de la Institución educativa Nº 82319 Pampa Cochabamba



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

Figura 9

Ubicación de los módulos E y F de la I.E. Nº 82319

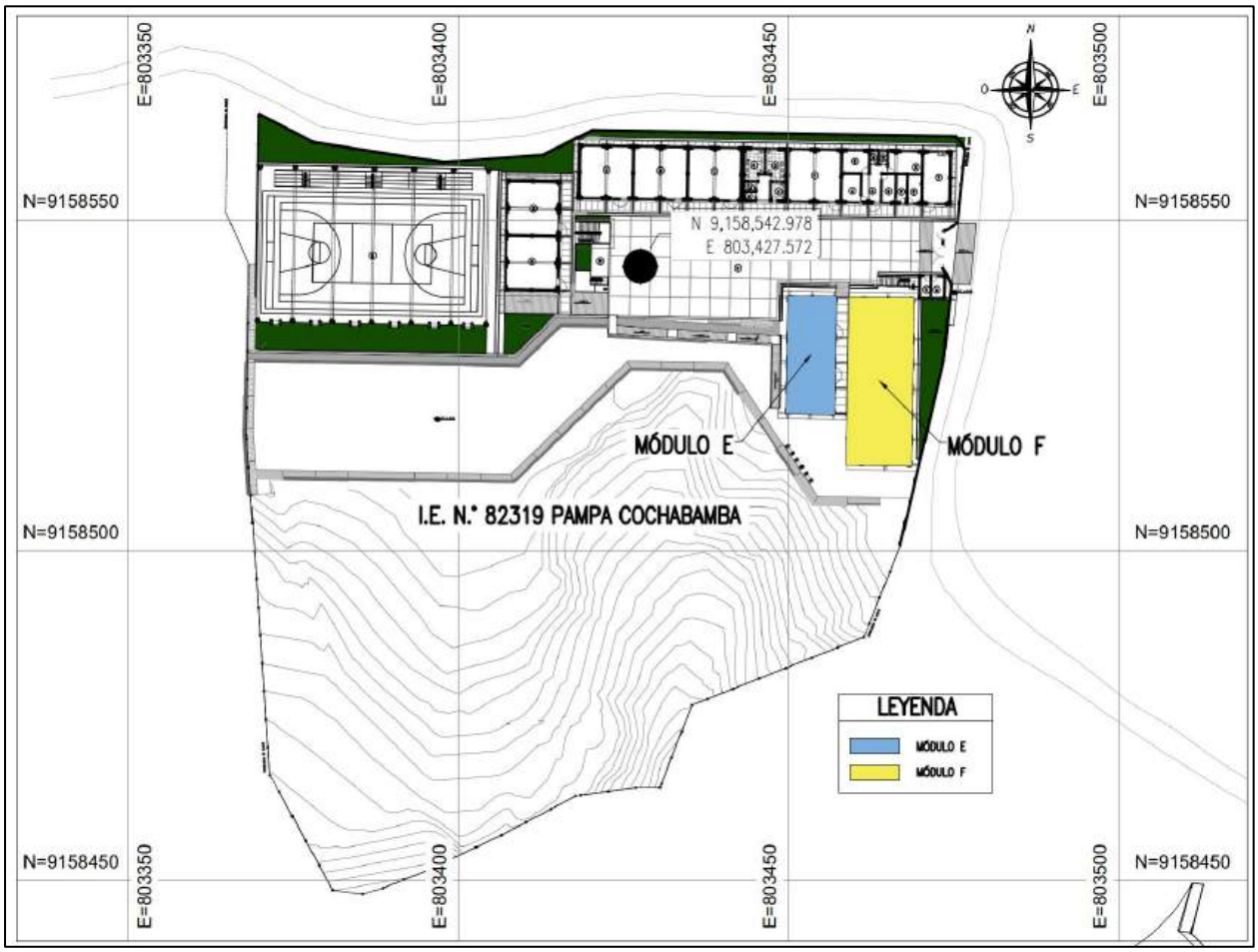


Tabla 3

Coordenadas geográficas de los módulos E y F de la I.E. N°82319

ESTE	NORTE	COTA (m.s.n.m.)
803427.572	9158542.978	2970.76

Fuente. Expediente técnico del proyecto.

3.2. Periodo de estudio

La presente investigación se desarrolló durante los años 2024 y 2025, abarcando desde la recopilación de información técnica y normativa, la elaboración de modelos estructurales, hasta el análisis y discusión de resultados.

3.3. Tipo, nivel, diseño y método de la investigación

- **Tipo de investigación**

El tipo de estudio realizado en esta investigación es **aplicativo-descriptivo**, ya que busca describir el comportamiento estructural de elementos como vigas, columnas y cimentaciones de los módulos E y F, considerando dos condiciones de apoyo: base empotrada y base flexible, mediante el método de elementos finitos.

- **Nivel de investigación**

El nivel de investigación es **descriptivo**, pues se enfoca en observar, caracterizar y analizar comparativamente los comportamientos estructurales de los módulos ante la acción sísmica.

- **Diseño de investigación**

El diseño adoptado es de tipo **no experimental y transversal**, ya que no se manipulan variables directamente y los datos se recolectan en un solo momento temporal.

- **Método de investigación**

Se utilizó un **método cuantitativo**, dado que los resultados se obtienen a partir de mediciones numéricas y análisis comparativos sobre el comportamiento estructural bajo diferentes condiciones.

3.4. Población de estudio

La población de estudio está conformada por los **todos los módulos estructurales** de la Institución Educativa N.° 82319 Pampa Cochabamba.

3.5. Muestra

La técnica de muestreo empleada en esta investigación fue de tipo no probabilístico. Se seleccionaron **dos módulos estructurales**: el Módulo E y el Módulo F de la Institución Educativa N° 82319 Pampa Cochabamba.

3.6. Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde a los **comportamientos estructurales** (periodos de vibración, esfuerzos internos y las derivas laterales) de los módulos E y F de una edificación esencial (institución educativa), evaluados considerando y obviando los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE).

3.7. Análisis e interpretación de datos

3.7.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se emplearon técnicas de análisis documental y observación técnica especializada. Como instrumentos, se utilizaron los planos estructurales y arquitectónicos de la Institución Educativa Nº 82319 Pampa Cochabamba (Anexo Nº 02), así como el estudio de mecánica de suelos (Anexo Nº 03) proporcionado por la entidad responsable. Estos documentos permitieron definir las características geométricas, estructurales y geotécnicas necesarias para el modelamiento.

3.7.2. Técnicas de procesamiento de datos

Para el desarrollo del modelamiento y análisis estructural de los módulos E y F, se utilizaron diversas herramientas informáticas especializadas que permitieron procesar, organizar e interpretar los datos de manera precisa y sistemática:

Excel 2021: Se utilizó para la elaboración de hojas de cálculo relacionadas al metrado de cargas gravitacionales y dinámicas, verificación de ecuaciones estructurales, así como para la generación de cuadros resumen y gráficos analíticos.

AutoCAD 2024: Este software fue empleado para la revisión de los planos arquitectónicos y estructurales, permitiendo determinar con precisión longitudes, áreas tributarias, ejes de referencia y geometría de los elementos estructurales.

RFEM 6: Constituyó la herramienta principal para el modelamiento tridimensional y el análisis estructural mediante el método de elementos finitos. Se aplicó conforme a los lineamientos de la norma técnica peruana E.030 para análisis sísmico modal espectral. El programa permitió generar diferentes modelos: con base empotrada, con empotramiento considerando cimentación, con modelos de suelo tipo Winkler, Pasternak y medio espacio 3D.

3.7.3. Técnicas de análisis e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación corresponden a los diferentes escenarios de modelamiento estructural bajo análisis sísmico dinámico modal espectral, aplicados a los módulos E y F de la I.E. N.° 82319 Pampa Cochabamba. Estos escenarios incluyen:

1. Análisis sísmico dinámico modal espectral con base empotrada **(Modelo 1).**
2. Análisis sísmico dinámico modal espectral con base empotrada incluyendo la cimentación **(Modelo 2).**
3. Análisis sísmico dinámico modal espectral considerando interacción suelo-estructura mediante el modelo de Winkler **(Modelo 3).**
4. Análisis sísmico dinámico modal espectral considerando interacción suelo-estructura mediante el modelo de Pasternak **(Modelo 4).**
5. Análisis sísmico dinámico modal espectral considerando interacción suelo-estructura mediante el modelo de medio espacio 3D **(Modelo 5).**

Los datos obtenidos fueron analizados e interpretados conforme a lo establecido en la Norma Técnica Peruana E.030 “Diseño Sismorresistente”, especialmente en lo relativo al control de desplazamientos laterales y derivas de entrepiso permitidas.

Asimismo, se elaboraron cuadros comparativos y gráficos que resumen los resultados obtenidos en cada modelo estructural en función de las siguientes variables: periodos de vibración, fuerzas internas (axiales, cortantes y flectores) y derivas de entrepiso. Esta comparación permitió evaluar cuantitativamente la influencia de la interacción suelo-estructura en la respuesta sísmica global de los módulos analizados.

3.8. Procedimiento

Para alcanzar los objetivos planteados en esta investigación, se desarrollaron las siguientes etapas metodológicas:

Etapa 01 – Recopilación de información general de los módulos

Se describieron los módulos E y F a partir del expediente técnico del proyecto. Esta etapa incluyó un resumen general de sus características arquitectónicas y estructurales, especificaciones técnicas de los materiales (concreto y albañilería), así como los datos geotécnicos del suelo de cimentación, nivel freático y posibles condiciones problemáticas.

Etapa 02 – Estructuración de los módulos

Se definió la configuración estructural de los módulos E y F con base en los planos del expediente técnico, determinando la ubicación y distribución de columnas, vigas, losas, muros y cimentaciones.

Etapa 03 – Dimensiones de elementos estructurales

Se llevo a cabo el proceso de recopilación de dimensiones de los elementos estructurales de los módulos E y F basándose en los planos incluidos en el expediente técnico.

Etapa 04 – Metrado de cargas

Se efectuó la estimación de cargas actuantes en los módulos E y F, incluyendo las cargas permanentes y variables, con base en la Norma Técnica E.020, así como la combinación de cargas según la Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”.

Etapa 05 – Análisis sísmico con base empotrada

Se ejecutó el análisis sísmico dinámico modal espectral para los modelos estructurales 1 y 2, considerando empotramiento perfecto en la base y empotramiento con cimentación, respectivamente. Ambos modelos fueron desarrollados en el software RFEM 6.

Etapa 06 – Análisis sísmico con interacción suelo-estructura (ISE)

Se elaboró el análisis sísmico dinámico modal espectral para los modelos 3 (Winkler), 4 (Pasternak) y 5 (Medio Espacio 3D), integrando la interacción suelo-estructura en la modelación estructural mediante el programa RFEM 6.

Etapa 07 – Evaluación de los periodos de vibración, esfuerzos internos y derivas

A partir de los resultados de los análisis sísmicos, se calcularon y compararon los periodos de vibración, esfuerzos internos y las derivas de entrepiso de los módulos E y F, tanto considerando como obviando los efectos de la interacción suelo-estructura, según los límites establecidos en la normativa E.030.

3.8.1. Datos preliminares de los módulos E y F

En esta primera etapa, se procedió a la recopilación y análisis de la información general correspondiente a los módulos E y F de la Institución Educativa N.º 82319 – Pampa Cochabamba, a partir del expediente técnico oficial del proyecto. Esta labor permitió comprender integralmente las condiciones iniciales del diseño arquitectónico y estructural.

Se identificaron y documentaron aspectos arquitectónicos clave, como la distribución de ambientes, cantidad de niveles, accesos y uso funcional de los espacios. Del mismo modo, se precisaron las características estructurales, incluyendo el sistema predominante, el tipo de losas, y la disposición de columnas y muros portantes.

También se analizaron las especificaciones técnicas de los materiales empleados, destacando las propiedades mecánicas del concreto armado (como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad) y de la albañilería confinada.

Finalmente, se revisó la información geotécnica del terreno, considerando la estratigrafía, el nivel freático, el tipo de suelo de fundación y la existencia de condiciones problemáticas tales como suelos expansivos, susceptibilidad a licuación o rellenos antrópicos. Estos factores fueron determinantes para la selección de los modelos de interacción suelo-estructura en las siguientes etapas del análisis.

3.8.1.1. Descripción de los módulos E y F

Los módulos E y F forman parte de la infraestructura básica y complementaria destinada al funcionamiento de instituciones educativas de nivel primario.

El módulo E alberga ambientes como los servicios higiénicos, almacén general, maestranza, aula de innovación pedagógica y cuarto de carga. En cambio, el módulo

F está destinado a funciones complementarias, incluyendo la cocina, el comedor, servicios higiénicos y un salón de usos múltiples.

A continuación, se presentó la Tabla 4, donde se resumieron las principales especificaciones estructurales de los módulos E y F, según el expediente técnico del proyecto. Esta información fue fundamental para el modelamiento estructural y el análisis sísmico-realizados. Se incluyeron aspectos como los sistemas constructivos, dimensiones relevantes, tipo de cimentación y otros parámetros esenciales para la simulación estructural bajo distintos modelos de interacción suelo-estructura.

Tabla 4

Descripción de las características estructurales de los módulos E y F.

Descripción de los módulos E y F	
Uso	Infraestructura básica y complementaria para instituciones educativas primarias
Sistema estructural	Concreto armado (muros estructurales) y albañilería confinada
Espesor de losas	Losas unidireccionales de 20 cm y losas bidireccionales de 25cm
Columnas	0.30 x 0.30 m, 0.50 x 0.50 m y 0.50 x 1.10 m
Altura de entrepiso	3.30 m
Peralte de vigas principales	0.65 m, 0.55 m y 0.40 m
Peralte de vigas secundarias	0.30 m
Desplante	2.50 m
Cimentación	Zapatas corridas de 2.80 m x 2.40 m

Fuente. Información obtenida del expediente técnico.

En el proceso de modelamiento y análisis estructural de los módulos E y F, se consideraron las propiedades mecánicas del concreto empleadas en los elementos estructurales, tales como zapatas, vigas, columnas, placas y losas, según lo especificado en el expediente técnico. Estas propiedades fueron fundamentales, ya que influyeron directamente en la rigidez, la resistencia y el comportamiento dinámico de la edificación. A continuación, en la Tabla 5, se presentan las especificaciones técnicas del concreto utilizadas en el proyecto.

3.8.1.2. Especificaciones técnicas de los materiales

Los módulos fueron construidos con concreto armado y muros de albañilería confinada, cuyas propiedades mecánicas se detallan a continuación:

Tabla 5

Especificaciones técnicas del concreto

Especificaciones técnicas del concreto		
1	Resistencia (f´c)	210 kg/cm2 (zapatas, vigas, columnas, placas y losas)
2	Módulo de Elasticidad (E)	15000√f'c = 217,370.65 Kg/cm2 (f´c = 210 kg/cm2)
3	Módulo de Poisson (u)	0.15
4	Peso Específico (γ)	2300 kg/m3 (concreto simple); 2400 kg/m3 (concreto armado)

Fuente. Descripciones obtenidas del expediente técnico.

Para representar de manera precisa el comportamiento de los muros estructurales en el análisis, se consideraron las propiedades físicas y mecánicas de la albañilería utilizadas en los módulos E y F de la I.E. N.º 82319 – Pampa Cochabamba. Estas especificaciones fueron obtenidas directamente del expediente técnico del proyecto y son fundamentales para definir la rigidez, resistencia y deformabilidad de los elementos no lineales que componen las edificaciones. A continuación, se detallan dichas propiedades en la Tabla 6.

Tabla 6

Especificaciones técnicas de la albañilería

Especificaciones técnicas de la albañilería		
1	Ladrillos clase IV sólidos (30% de huecos), tipo King Kong de arcilla	t=13 cm, f´b = 145 kg/cm
2	Mortero tipo P2	cemento-arena 1: 4
3	Resistencia a la compresión (f'm)	65 kg/cm2
4	Resistencia al corte puro (v´m)	8.1 kg/cm2
5	Módulo de elasticidad (Em)	500 f'm 32500 Kg/cm2
6	Módulo de Corte (Gm)	0.4 Em = 13000 kg/cm2
7	Resistencia al Corte diagonal (Vm)	80.62 ton/m2
8	Relación de Poisson (μ)	0.25
9	Peso Unitario	1800 kg/cm3

Fuente. Elaboración propia basada en el expediente técnico del proyecto.

3.8.1.3. Condiciones de la cimentación

Asimismo, se incluye una tabla que resume las condiciones de la cimentación, detallando las características del suelo y los parámetros de cimentación obtenidos del estudio de suelos adjunto en el expediente técnico de los módulos E y F. Estos parámetros fueron calculados y elaborados por el Laboratorio de Suelos GUERSAN INGENIEROS SRL (Ing. Johnny Vásquez Torres, CIP: 255746), y se presentan a continuación:

Tabla 7

Condiciones de la cimentación

	Condiciones de la cimentación de los módulos E y F	
1	Microzonificación sísmica	Perfil de Suelo Tipo S3 (Suelos blandos)
2	Clasificación SUCS	Suelos arcillosos de baja plasticidad del Tipo CL
3	Capacidad portante del suelo para zapata	0.9057 kg/cm2 = 9.057 Tn/m2
4	Módulo de elasticidad (E_1)	280 Tonf/m2
5	Perfil del suelo(h_1)	2.50 m (Ver anexos)
6	Coeficiente de Poisson(μ_1)	0.4
7	Profundidad de cimentación mínima	-1.50 m
8	Coeficiente de Balasto (k)	1.71 kg/cm3 = 1710.00 Tn/m3
9	Angulo de fricción interna del suelo (f)	14.89°
10	Cohesión (C)	0.172 kg/cm2 = 1.72 Tn/m2
11	Peso específico del suelo	1.623 g/cm3 = 1.623 Tn/m3
12	Factor de amplificación del suelo (S)	1.20
13	Periodo TP	1.00 s
14	Periodo TL	1.60 s

Fuente. Resumen de las condiciones de la cimentación - Estudio de mecánica de suelos.

3.8.1.4. Condiciones geotécnicas y nivel freático del terreno

Un aspecto fundamental en el análisis de la interacción suelo–estructura es la identificación del nivel freático, ya que este influye en la rigidez del suelo y en el comportamiento dinámico de la cimentación. Según el estudio de mecánica de suelos empleado en la presente investigación, no se detectó la presencia de nivel freático (NAF) dentro del rango de exploración realizado. Además, el informe geotécnico indica que el terreno no presenta susceptibilidad a fenómenos de licuación ni colapsabilidad, y que su grado de expansión es bajo.

3.8.2. Estructuración de los módulos

Posteriormente, en una segunda etapa, se recopiló la información correspondiente al sistema estructural de los módulos, obtenida del expediente técnico del proyecto.

Para la configuración estructural, se estableció un sistema de ejes globales en las direcciones X e Y, conformado principalmente por elementos de albañilería confinada y muros estructurales de concreto armado.

En términos generales, el esquema estructural adoptado para cada módulo se organizó de la siguiente manera:

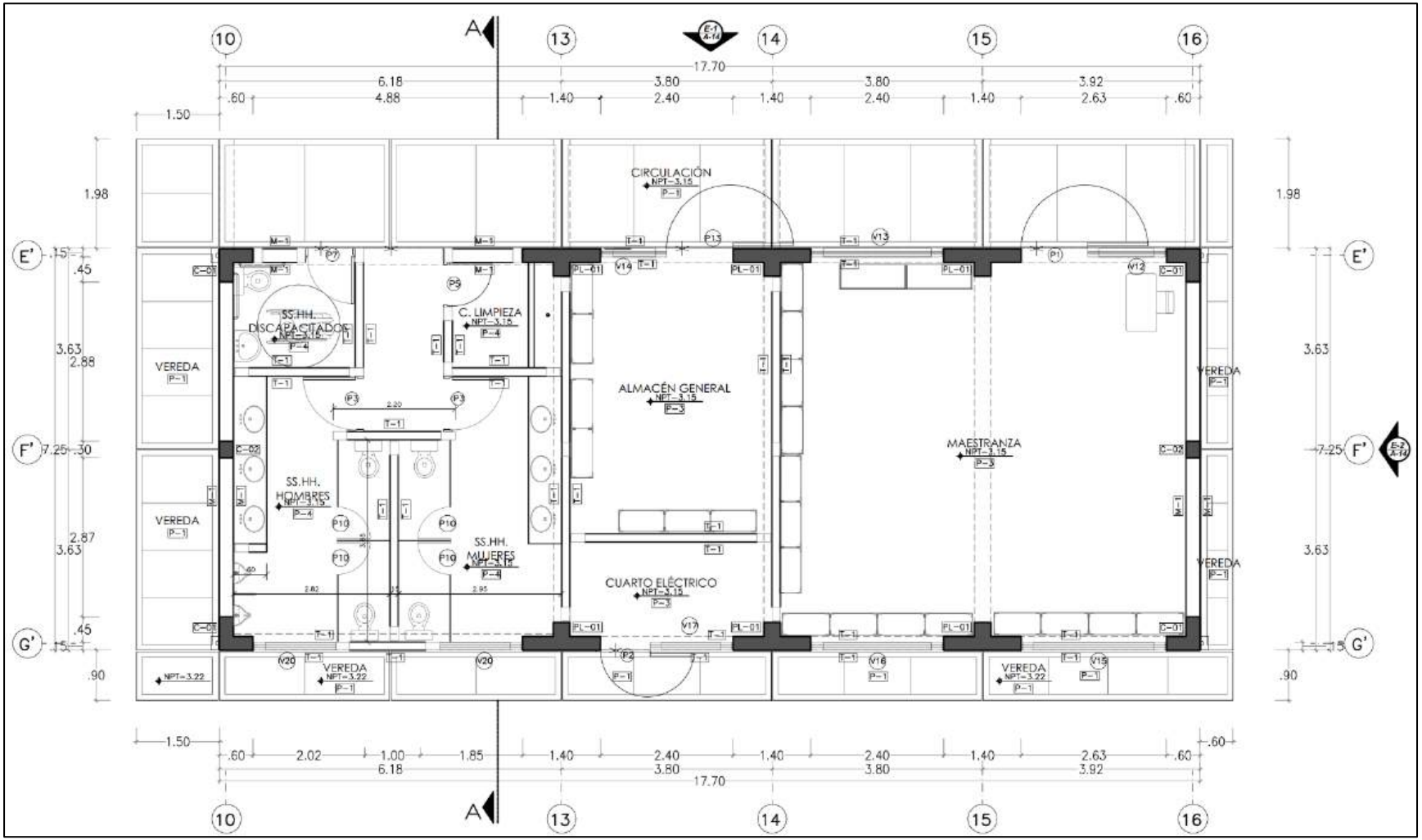
- **Eje X**: Conformado por elementos de albañilería, con un factor de reducción de respuesta sísmica R=3.
- **Eje Y**: Compuesto por muros estructurales de concreto armado, con un factor de reducción sísmica R=6.

3.8.2.1. Arquitectura del módulo educativo E

A continuación, se presentan las imágenes arquitectónicas correspondientes al módulo educativo E, las cuales incluyen vistas en planta, secciones transversales y elevaciones. Estas representaciones permiten visualizar la distribución espacial y las características constructivas del módulo para el modelamiento estructural.

Figura 10

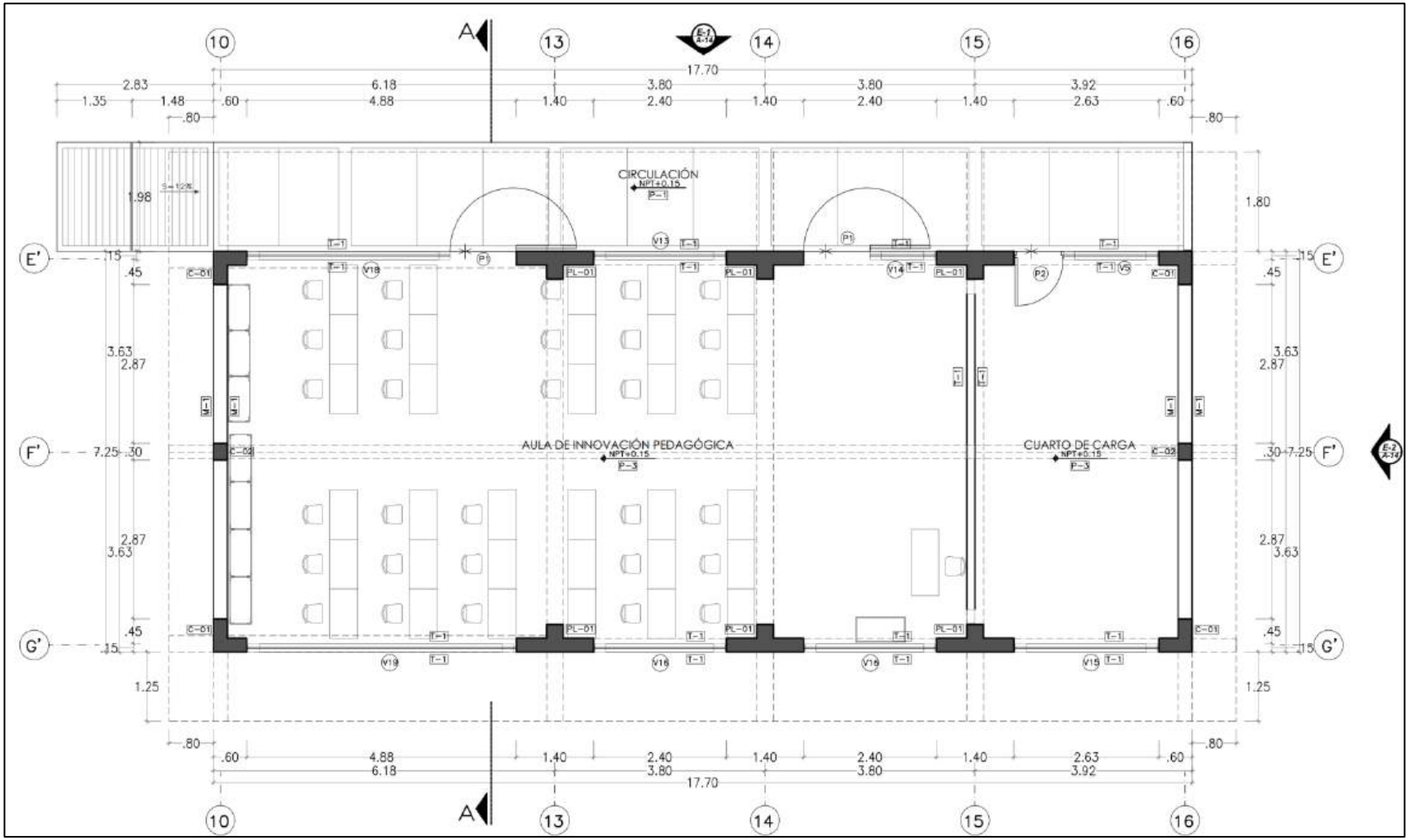
Plano de arquitectura en planta del primer piso del módulo E



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

Figura 11

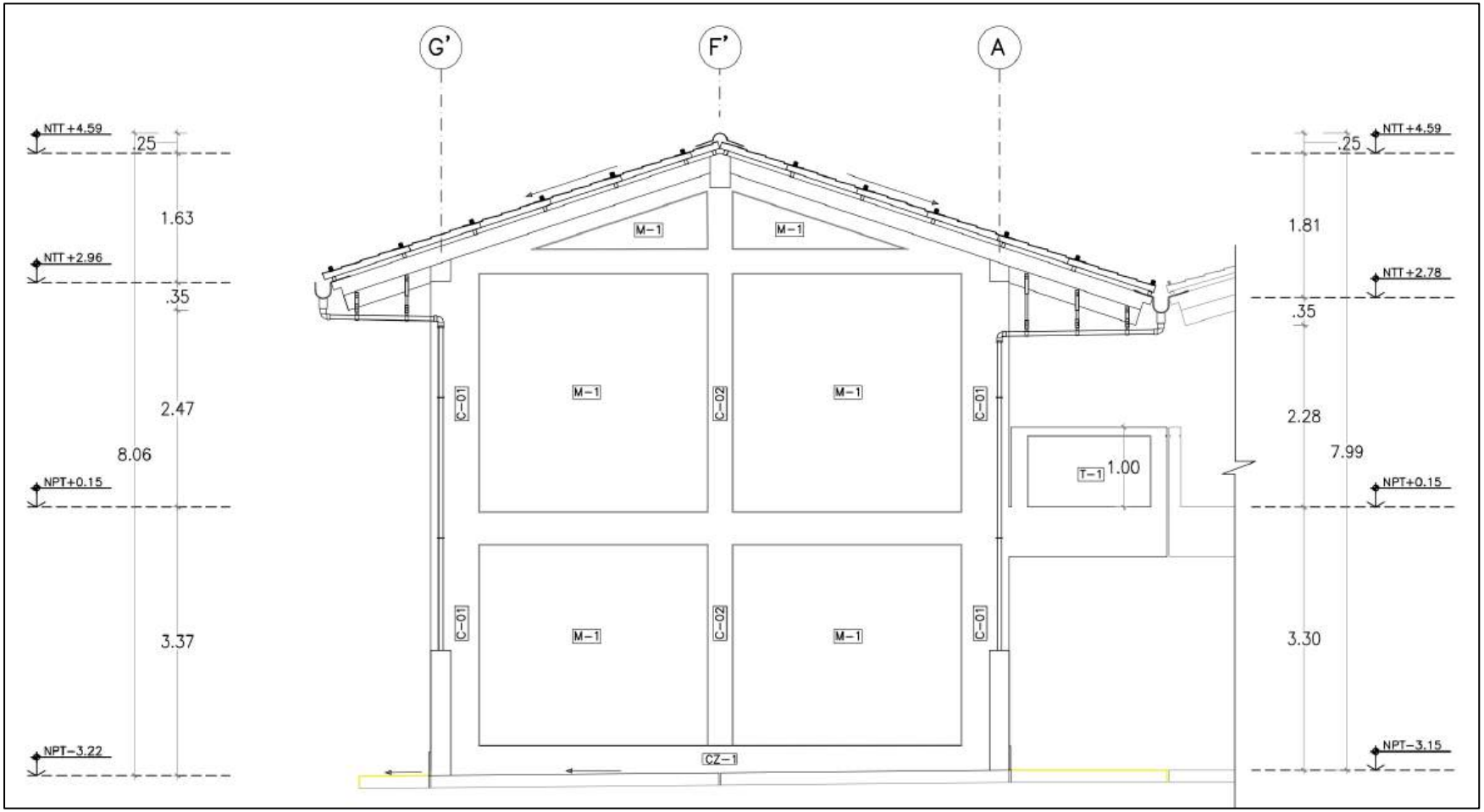
Plano de arquitectura en planta del segundo piso del módulo E



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

Figura 12

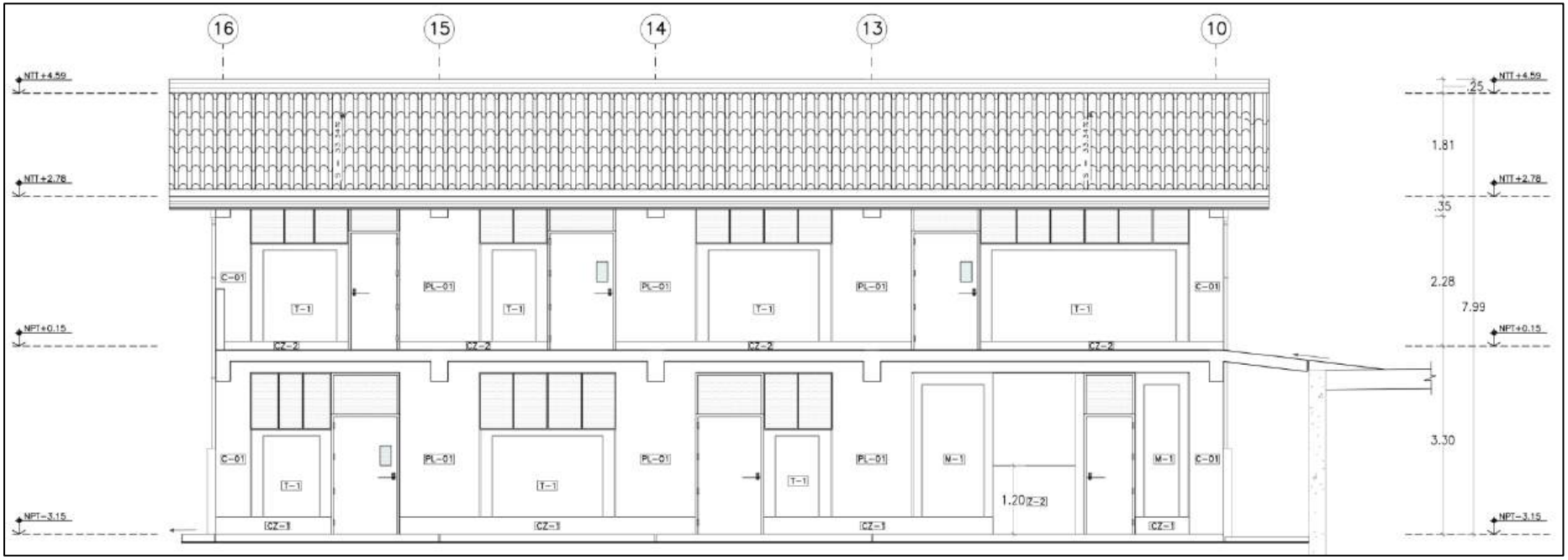
Vista de la elevación lateral izquierda del módulo E



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

Figura 13

Vista de la elevación frontal del módulo E



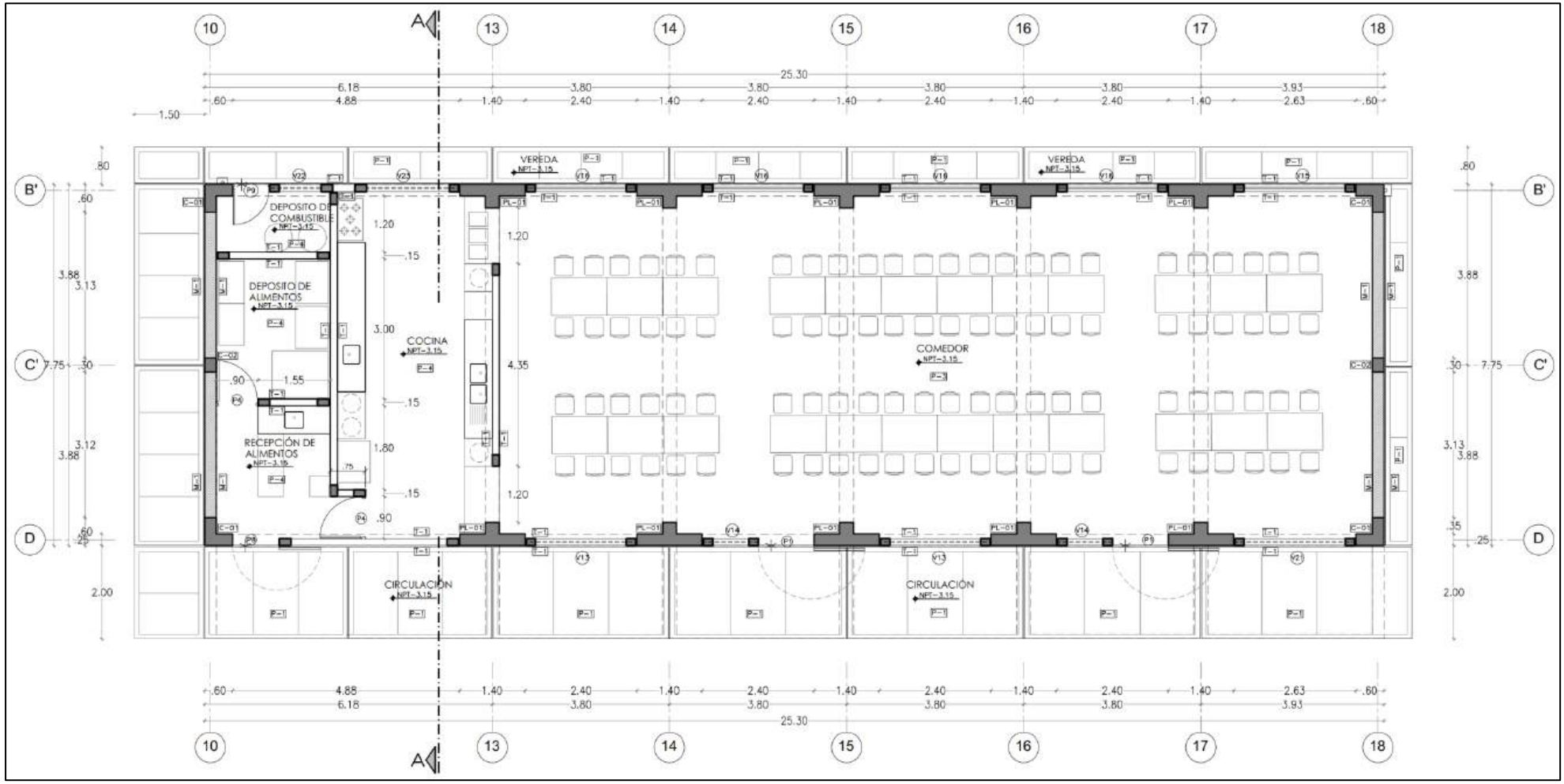
Fuente. Expediente técnico del proyecto.

3.8.2.2. Arquitectura del módulo educativo F

Al igual que en el módulo educativo E, a continuación, se presentan las vistas arquitectónicas del módulo F, que incluyen plantas, secciones y elevaciones. Estas imágenes, extraídas del expediente técnico, permiten visualizar la distribución espacial y características constructivas necesarias para el análisis estructural y sísmico del módulo.

Figura 14

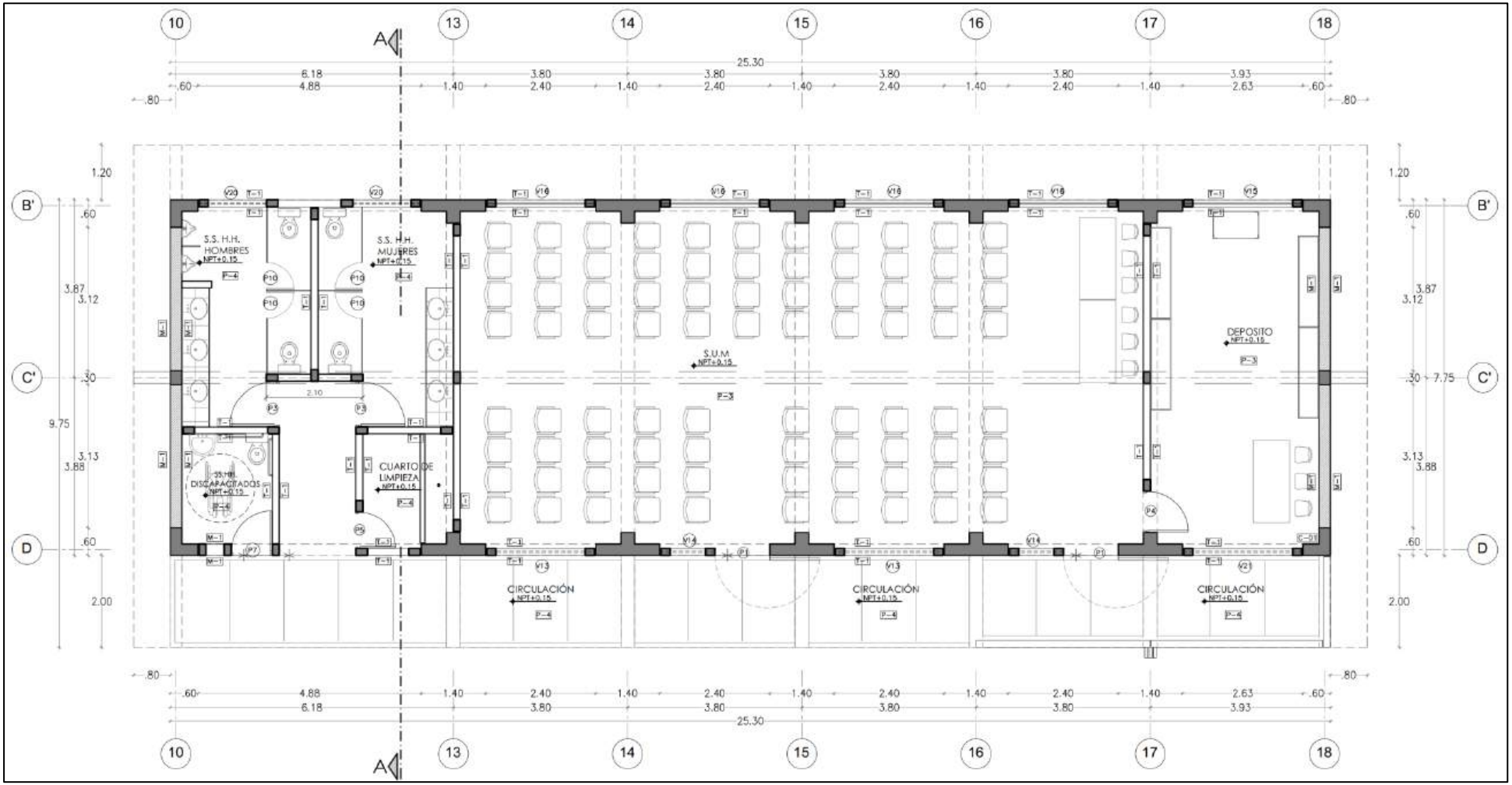
Plano de arquitectura de la planta del primer piso del módulo F



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

Figura 15

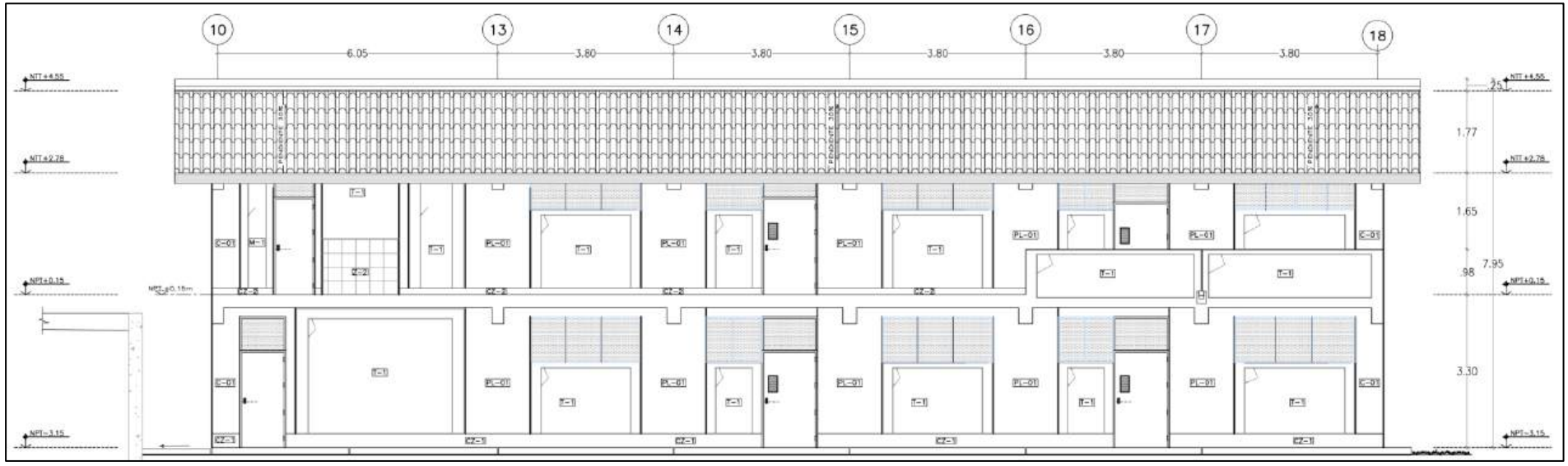
Plano de arquitectura de la planta del segundo piso del módulo F



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

Figura 16

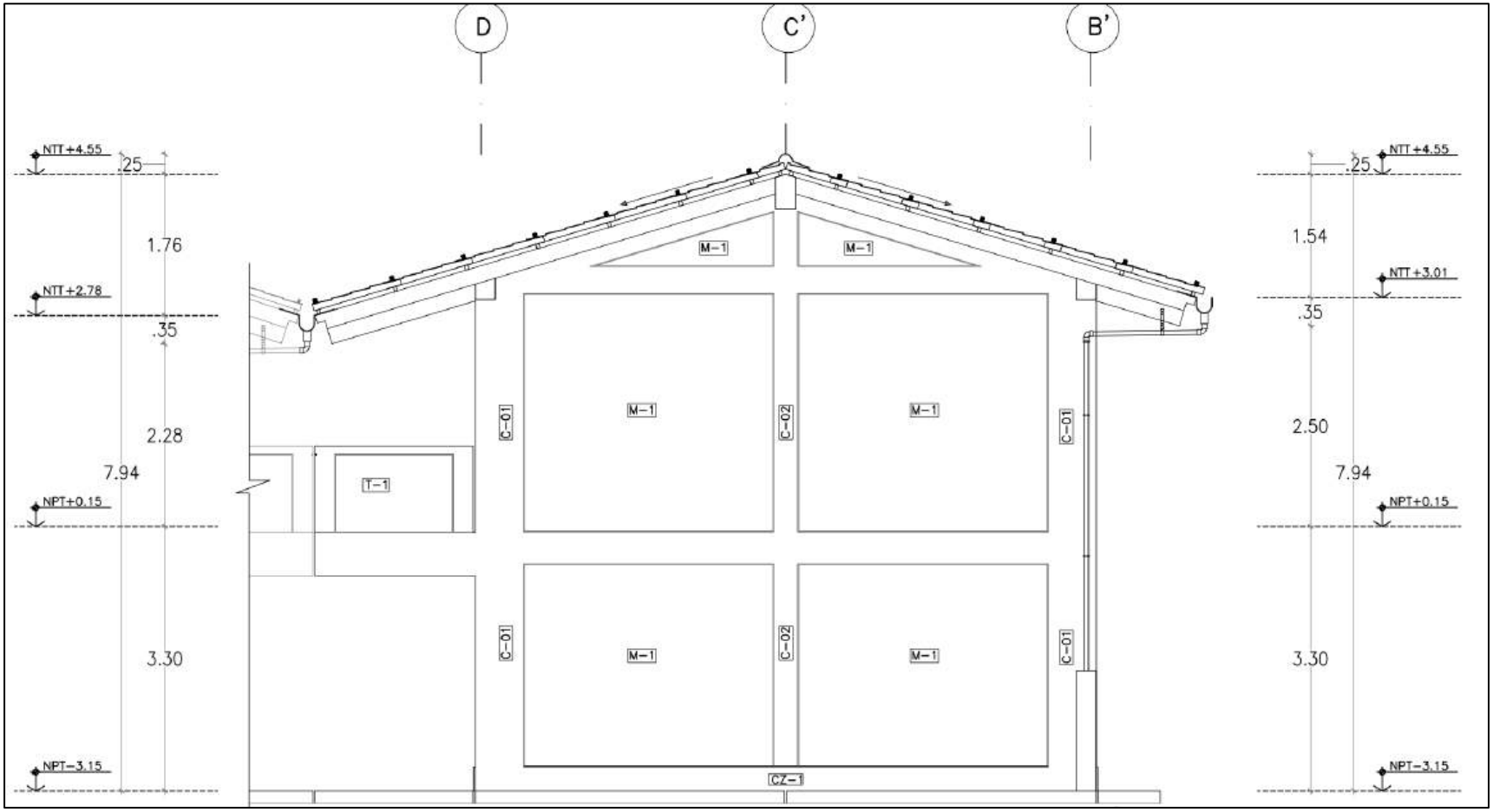
Vista de la elevación frontal del módulo F



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

Figura 17

Vista de elevación lateral derecha del módulo F



Fuente. Expediente técnico del proyecto.

3.8.3. Dimensiones estructurales utilizadas en los módulos E y F

En la tercera etapa, se recopiló un conjunto de dimensiones estructurales de los módulos E y F de la I.E. N.° 82319 – Pampa Cochabamba, a partir del expediente técnico del proyecto. Estas dimensiones fueron fundamentales para definir la geometría del modelo estructural en el software de análisis RFEM 6, las cuales son las siguientes y se han clasificado de acuerdo con el elemento estructural:

3.8.3.1. Losas

- Losas unidireccionales: Espesor adoptado: 20 cm. Utilizadas en entrepisos y techo inclinado.
- Losas bidireccionales: Espesor adoptado: 25 cm. Utilizadas en zonas de luces mayores o iguales a 7 m.

3.8.3.2. Vigas

- Principales sobre muros de albañilería: Sección: 0.25 × 0.40 m
- Principales de luces libres mayores: Sección: 0.30 × 0.65 m
- En voladizo: Secciones: 0.30 × 0.55 m y 0.25 × 0.55 m
- Secundarias: Sección: 0.25 × 0.40 m
- En techos inclinados: Secciones: 0.25 × 0.40 m y 0.30 × 0.40 m
- De amarre: Sección: 0.25 × 0.30 m

3.8.3.3. Columnas

Las columnas se clasificaron según con su ubicación y función estructural:

Interiores (tipo C1 y PL): Secciones entre 0.50 × 0.50 m y 0.50 × 1.10 m, según la carga tributaria.

Extremas de pórticos (tipo C2 y C3): Sección promedio: 0.50 × 0.50 m

En esquinas (tipo C4): Secciones mínimas desde 0.30 × 0.30 m.

3.8.3.4. Zapatas

La zapata de mayor exigencia estructural presentó:

- Área requerida: 6.682 m²
- Dimensiones: 2.80 m × 2.40 m.

3.8.4. Metrado de cargas

En la cuarta etapa se realizó el metrado de cargas en el presente diseño, el cual se basó en los valores establecidos por la Norma Técnica de Edificación E.020 “Cargas”. A continuación, se detallan las cargas permanentes y cargas vivas consideradas:

3.8.4.1. Cargas permanentes o muertas

En el presente estudio se consideraron las cargas muertas correspondientes al peso propio de los elementos estructurales, así como los aportes adicionales generados por los acabados, tabiquería interior, coberturas y demás componentes permanentes de la edificación. Estas cargas fueron tomadas en cuenta durante el modelamiento en el software RFEM 6, a fin de representar de manera realista las condiciones gravitacionales que inciden de forma continua sobre la estructura a lo largo de su vida útil.

Tabla 8

Cargas permanentes adoptadas en el diseño estructural

Carga permanente	Valor (kg/m^2)
Techos de losas aligeradas (espesor=20 cm)	300
Elementos de concreto armado	2400
Tabiquería de ladrillo	1800
Acabados	100
Teja andina (1.14 x 0.72 x 0.005 m incluye accesorios	20

3.8.4.2. Carga viva o sobrecarga

Durante el análisis estructural, se incorporaron las cargas vivas asociadas al uso funcional de los diferentes ambientes del proyecto educativo, considerando la ocupación por personas, el mobiliario y otros elementos móviles que podrían presentarse en condiciones de uso habitual. Estas cargas fueron asignadas conforme a los valores estipulados por la Norma Técnica de Edificaciones E.020 “Cargas”, garantizando que la estructura sea evaluada frente a solicitaciones gravitacionales variables que podrían actuar de manera transitoria o eventual.

Tabla 9

Cargas vivas consideradas según el uso del ambiente

Ambiente	Carga viva (kg/cm^2)
Aulas	250
Talleres	350
Bibliotecas	300
Oficinas	250
Salas de almacenaje con estantes fijos	750
Salas de archivos	500
Salas de computación	250
Salón de usos múltiples (SUM)	400
Almacenaje	500
Corredores y Escaleras	400
Tabiquería móvil	100
Techo inclinado i=30°	50

3.8.5. Análisis sísmico considerando la base empotrada

Para la quinta etapa, el análisis sísmico de los módulos E y F se realizó mediante un modelo tridimensional utilizando el software RFEM 6, con un enfoque dinámico modal espectral conforme a lo establecido en la Norma Técnica Peruana E.030-2018.

3.8.5.1. Análisis dinámico con base empotrada (Norma técnica E.030-2018)

Conforme a lo dispuesto en el ítem 4.6 de la norma E.030, se aplicó el método de superposición modal espectral para ambos módulos. Se emplearon los métodos

de combinación CQC (*Complete Quadratic Combination*) y SRSS (*Square Root of the Sum of the Squares*) para la combinación modal y direccional, respectivamente, dada la ubicación geográfica, la configuración estructural y el nivel de complejidad de las edificaciones.

A. Parámetros iniciales para el análisis sísmico dinámico

Los parámetros utilizados para el desarrollo del espectro de diseño se determinaron a partir del expediente técnico del proyecto, el estudio de mecánica de suelos y la norma E.030. Estos fueron:

- **Zona sísmica**: Z = 0.35 (Zona sísmica 3 – Cajabamba, Cajamarca)
- **Uso de la edificación**: U = 1.5 (Categoría A2 – Edificaciones esenciales)
- **Perfil de suelo**: Tipo S3 – Suelos blandos
- **Factor de suelo**: S = 1.20
- **Periodos del suelo**: TP = 1.0 s; TL = 1.6 s
- **Factores de reducción sísmica (R):**
  - **Dirección X (albañilería confinada)**: R = 3.00 (R_0 = 3, I_a = 1.0, I_p = 1.0)
  - **Dirección Y (muros estructurales)**: R = 6.00 (R_0 = 6, I_a = 1.0, I_p = 1.0)

B. Espectro de pseudo-aceleraciones

El espectro inelástico de pseudo-aceleraciones se definió por:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} g$$

C. Cálculo del periodo fundamental de la estructura (T)

El período fundamental T se estimó con la siguiente expresión:

Ecuación 3. Periodo fundamental

$$T_x = \frac{h_n}{C_{Tx}} \qquad y \qquad T_y = \frac{h_n}{C_{Ty}}$$

Donde:

h_n = 7.9 m (altura total de la edificación).

C_T = 60 (estructura de mampostería).

C_T = 60 Para estructuras de mampostería y para todos los edificios de concreto armado cuyos elementos sismorresistentes sean fundamentalmente muros de corte.

Reemplazando los valores correspondientes a los módulos en la ecuación 3, se obtiene:

$$T_x = \frac{H_n}{C_{Tx}} = \frac{7.90}{60} = 0.132\ s \quad \leq \quad 0.5s, \text{No se plica fuerza adicional}$$

$$T_y = \frac{H_n}{C_{Ty}} = 0.132\ s \quad \leq \quad 0.5s, \text{No se plica fuerza adicional}$$

D. Evaluación de irregularidad estructurales en planta y altura

Se verificó la presencia de irregularidades, concluyéndose que ambos módulos presentan configuración **regular**, dado que no presentan:

- Piso blando o débil, irregularidad de masa, discontinuidades geométricas o del diafragma, irregularidad torsional, sistemas no paralelos.

E. Consideración de masas para análisis dinámico

Las masas se calcularon considerando:

- 100% de carga permanente
- 50% de sobrecarga en entrepisos
- 25% de sobrecarga en techos (según Artículo 16, NTE E.030)

F. Modos de Vibración

El análisis modal permitió obtener los periodos naturales y modos de vibración de los modelos. Se consideró la rigidez y distribución de masas en tres dimensiones, modelando elementos estructurales como:

- **Barras**: para vigas y columnas (considerando flexión, axial, cortante y torsión)
- **Superficies**: para muros estructurales y losas (membrana + flexión)

G. Modelo estructural

El análisis estructural fue desarrollado conforme a los lineamientos de la Norma Técnica Peruana E.030 – Diseño Sismorresistente (2018), establecida en el Reglamento Nacional de Edificaciones. Para tal fin, se utilizó el software especializado RFEM 6, el cual se basa en el método matricial de rigidez y en el método de los elementos finitos.

Se procedió a modelar la geometría tridimensional de la edificación, así como las cargas gravitacionales y sísmicas correspondientes. Este modelo permitió incorporar de manera precisa el efecto espacial de rigidez aportado por cada componente estructural.

Las vigas y columnas fueron representadas mediante elementos tipo barra con eje recto, capaces de simular deformaciones por flexión, carga axial, fuerza cortante

y torsión. En el caso de los muros estructurales y losas, se emplearon elementos tipo superficie que capturan tanto los efectos de membrana como los de flexión.

Este enfoque integral permitió evaluar con mayor realismo el comportamiento estructural frente a acciones sísmicas, asegurando una adecuada representación de la interacción entre los elementos que conforman el sistema resistente de los módulos educativos.

3.8.5.2. Procedimiento de modelación

Una vez establecidas las definiciones básicas e iniciales, se procedió a modelar los edificios utilizando software RFEM 6, el cual permite realizar un análisis estructural eficiente. Para ello, se ingresaron las características específicas de las edificaciones, tales como longitudes, alturas, material, secciones, entre otras.

A continuación, se detallan los pasos seguidos durante la modelación de las edificaciones, considerando los modelos estructurales con y sin interacción suelo estructura.

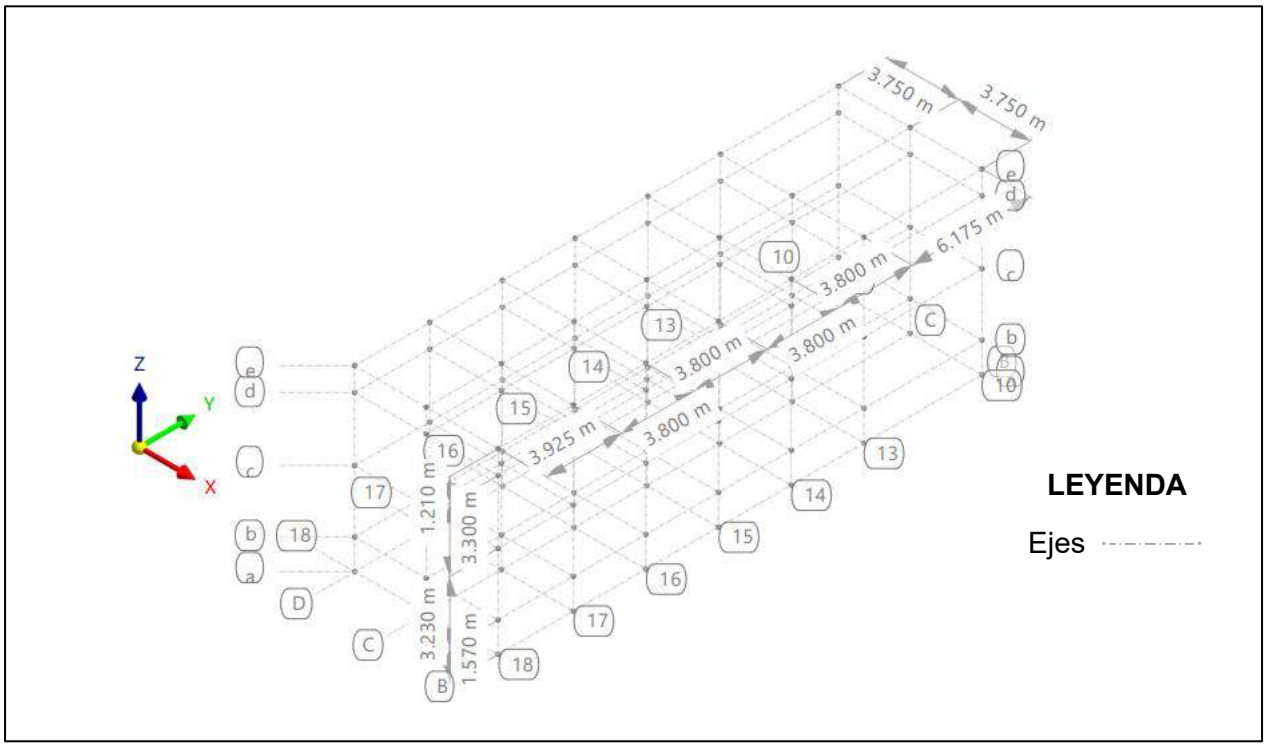
1. **Geometría de la Edificación**

Para iniciar la modelación en el software RFEM 6, se emplearon las dimensiones descritas previamente. En primer lugar, se definieron las unidades de trabajo correspondientes, siendo estas toneladas para cargas y metros para longitudes.

Posteriormente, se procedió al modelado de la rejilla de construcción, tras lo cual se ingresaron las longitudes de las luces, las alturas entre niveles y el número de pisos. Este procedimiento se aplicó de manera independiente para los módulos E y F, garantizando una representación geométrica precisa conforme al expediente técnico.

Figura 18

Modelamiento de la rejilla de construcción en RFEM 6



2. Definición de material y secciones

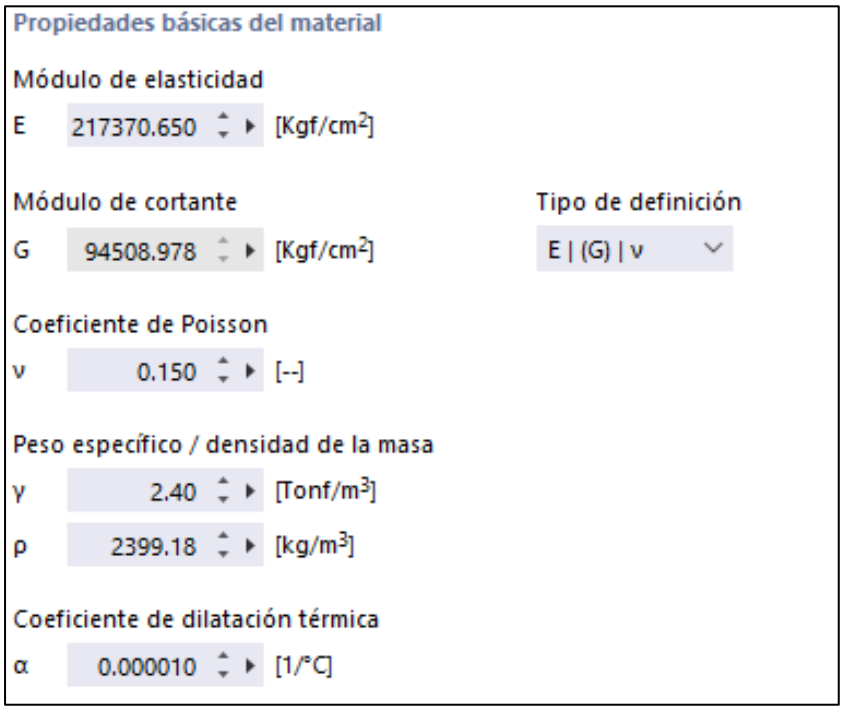
De acuerdo con la información general de los módulos descrita en el ítem 3.8.1, se definieron las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el modelamiento estructural de los módulos E y F.

Para los elementos de concreto armado, se utilizó un concreto con una resistencia a la compresión de 210 kg/cm², un módulo de elasticidad de 217,370.65 kg/cm², un coeficiente de Poisson de 0.15 y un peso específico de 2.40 ton/m³.

Estas propiedades fueron aplicadas de manera uniforme en el modelo estructural de ambos módulos, tal como se ilustran en las siguientes figuras.

Figura 19

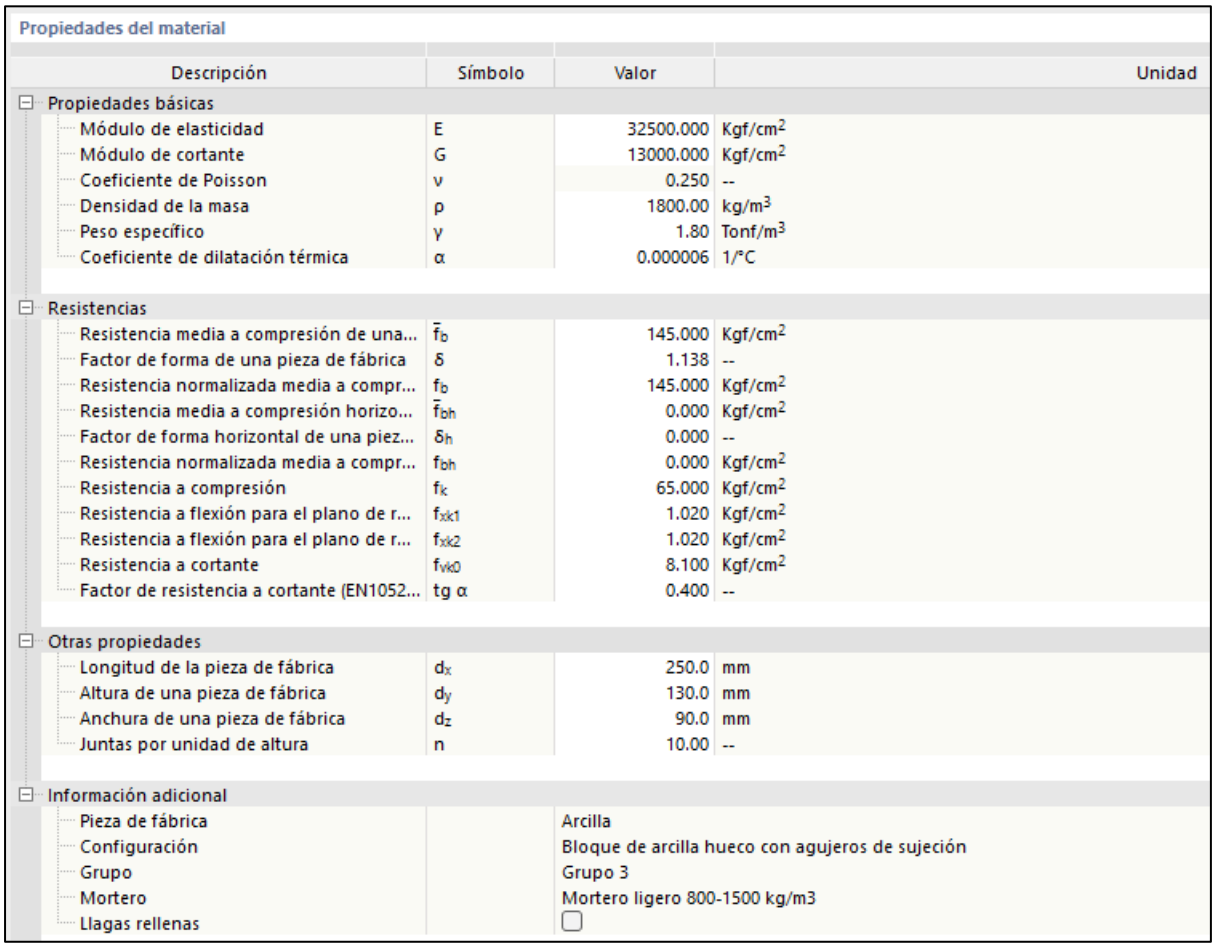
Propiedades básicas del concreto 210 kg/cm2 en RFEM 6



Asimismo, para los elementos de albañilería y muros estructurales, se asignaron las siguientes propiedades: módulo de elasticidad de 32,500 kg/cm², módulo de corte de 13,000 kg/cm², coeficiente de Poisson de 0.25, peso específico de 1.80 ton/m³ y resistencia a la compresión de 65 kg/cm².

Figura 20

Propiedades básicas del muro estructural en RFEM 6



Propiedades del material

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Propiedades básicas			
Módulo de elasticidad	E	32500.000	Kgf/cm²
Módulo de cortante	G	13000.000	Kgf/cm²
Coeficiente de Poisson	ν	0.250	--
Densidad de la masa	ρ	1800.00	kg/m³
Peso específico	γ	1.80	Tonf/m³
Coeficiente de dilatación térmica	α	0.000006	1/°C
Resistencias			
Resistencia media a compresión de una...	$\bar{f}_b$	145.000	Kgf/cm²
Factor de forma de una pieza de fábrica	δ	1.138	--
Resistencia normalizada media a compr...	f_b	145.000	Kgf/cm²
Resistencia media a compresión horizo...	$\bar{f}_{bh}$	0.000	Kgf/cm²
Factor de forma horizontal de una piez...	δ_h	0.000	--
Resistencia normalizada media a compr...	f_{bh}	0.000	Kgf/cm²
Resistencia a compresión	f_k	65.000	Kgf/cm²
Resistencia a flexión para el plano de r...	f_{xk1}	1.020	Kgf/cm²
Resistencia a flexión para el plano de r...	f_{xk2}	1.020	Kgf/cm²
Resistencia a cortante	f_{vk0}	8.100	Kgf/cm²
Factor de resistencia a cortante (EN1052...	tg α	0.400	--
Otras propiedades			
Longitud de la pieza de fábrica	d_x	250.0	mm
Altura de una pieza de fábrica	d_y	130.0	mm
Anchura de una pieza de fábrica	d_z	90.0	mm
Juntas por unidad de altura	n	10.00	--
Información adicional			
Pieza de fábrica		Arcilla	
Configuración		Bloque de arcilla hueco con agujeros de sujeción	
Grupo		Grupo 3	
Mortero		Mortero ligero 800-1500 kg/m3	
Llagas rellenas		☐	

A continuación, se asignaron las dimensiones correspondientes a las secciones de los elementos estructurales, tales como columnas, vigas, muros y cimentaciones, dentro del entorno del programa RFEM 6. Esta etapa fue esencial para definir con precisión la configuración geométrica del modelo estructural y garantizar un análisis coherente con las condiciones reales del proyecto.

Figura 21

Modelamiento de columnas rectangulares en RFEM 6

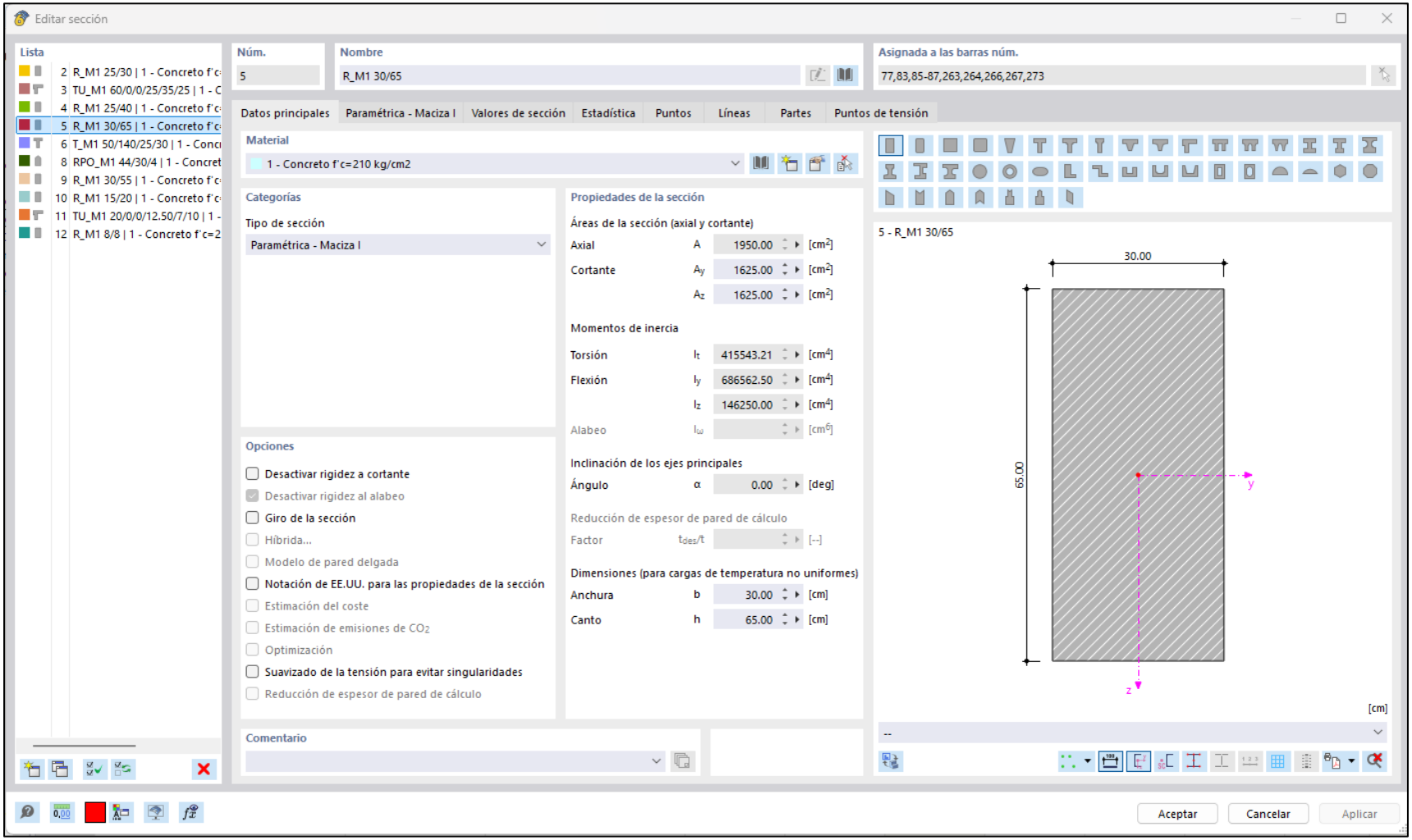


Figura 22

Modelamiento de columnas tipo T en RFEM 6

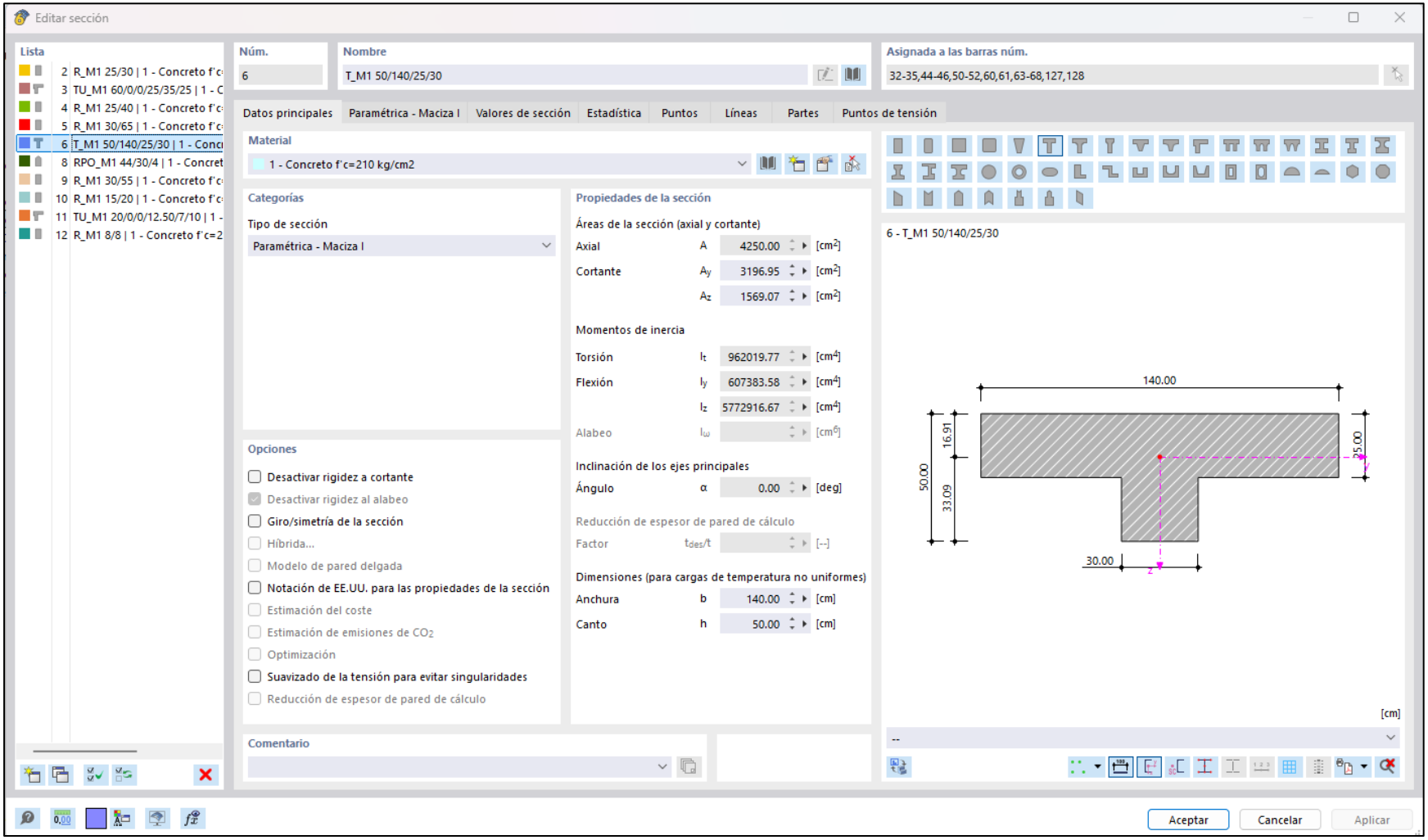


Figura 23

Modelamiento de columnas tipo L en RFEM 6

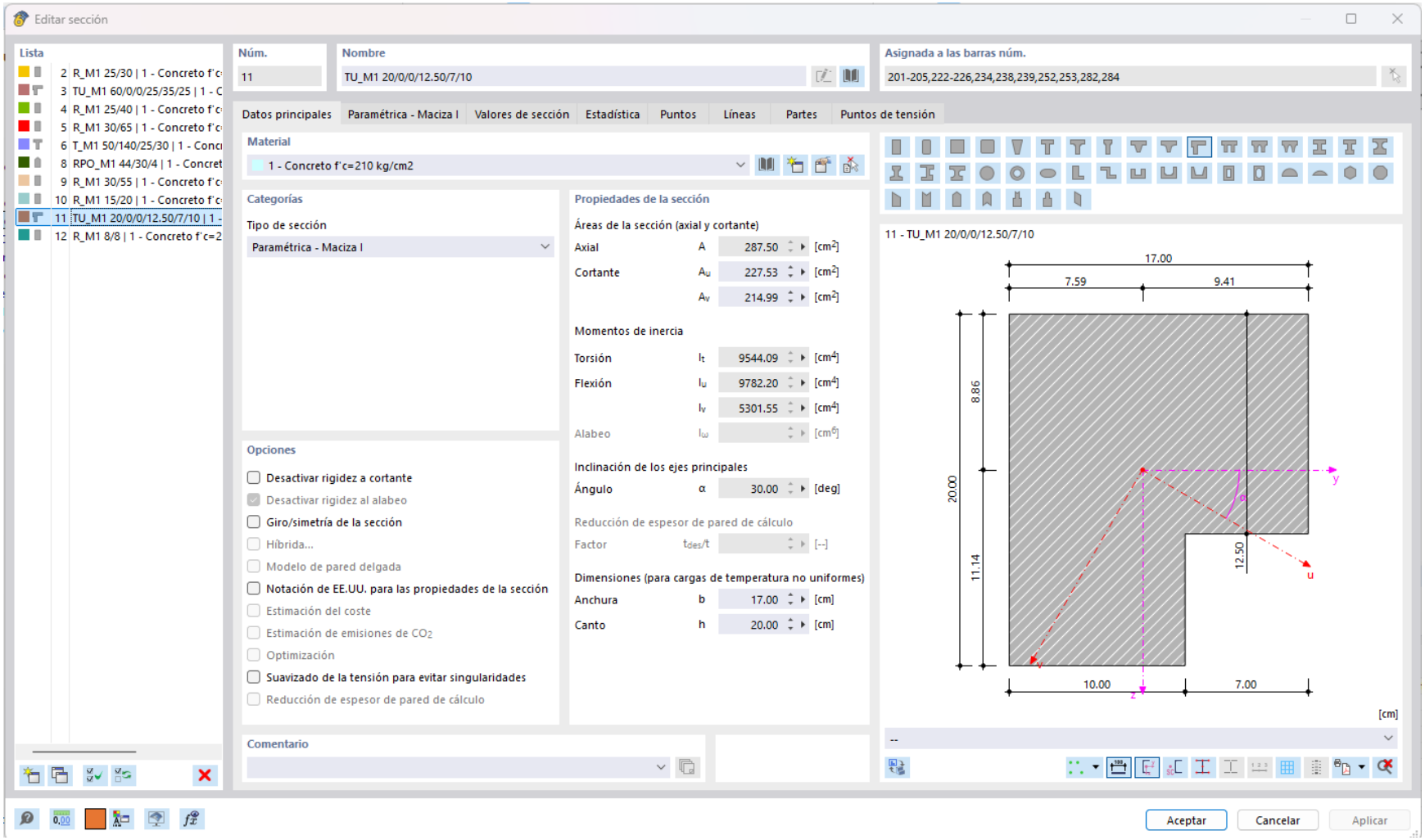


Figura 24

Modelamiento de muros estructurales y losas aligeradas en RFEM 6

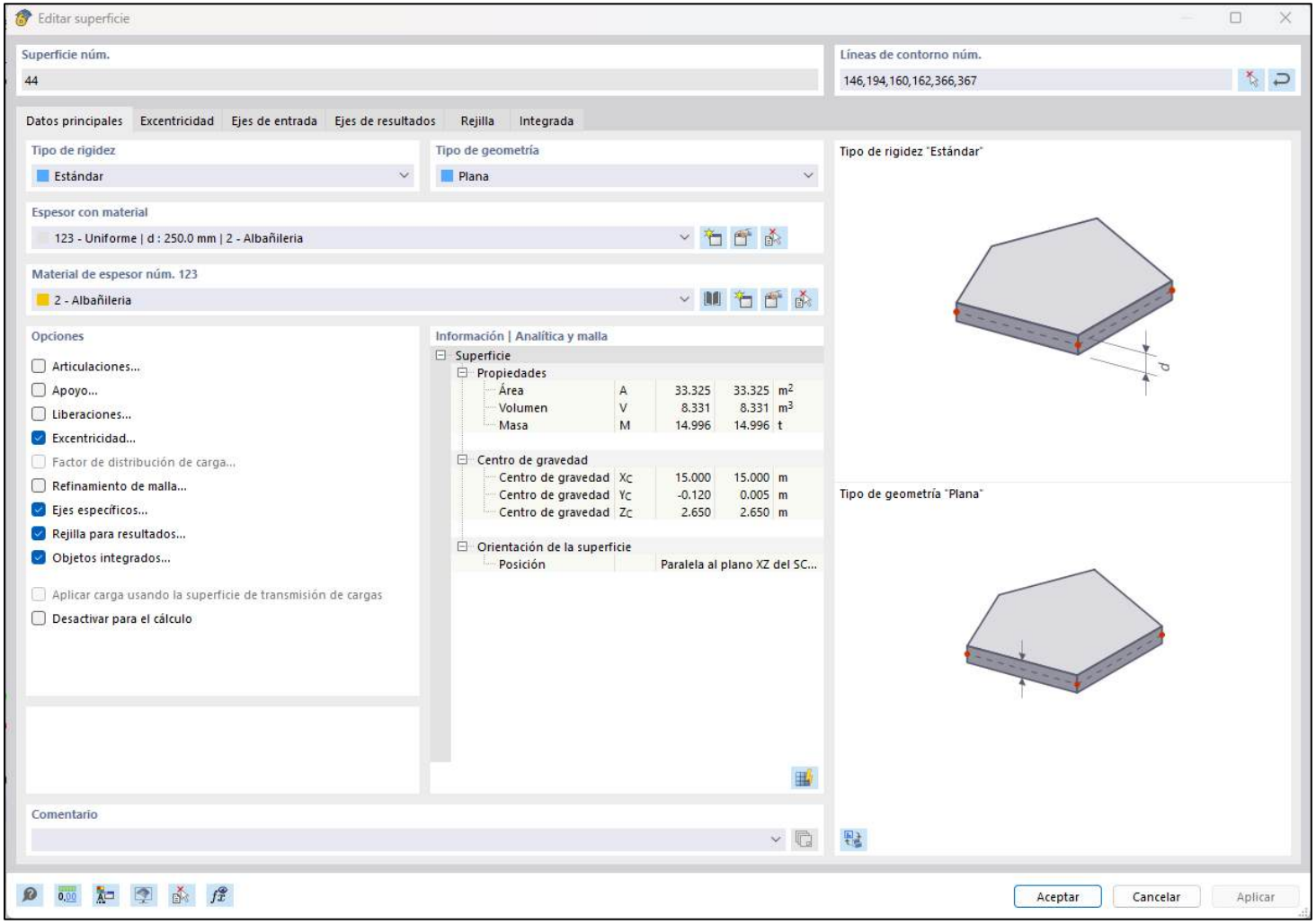
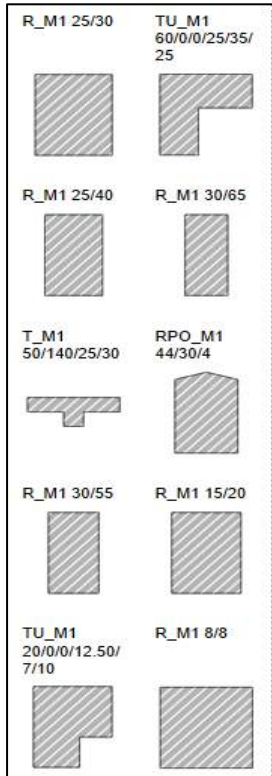


Figura 25

Modelamiento de secciones utilizadas en el modelamiento estructural de los módulos E y F en RFEM 6

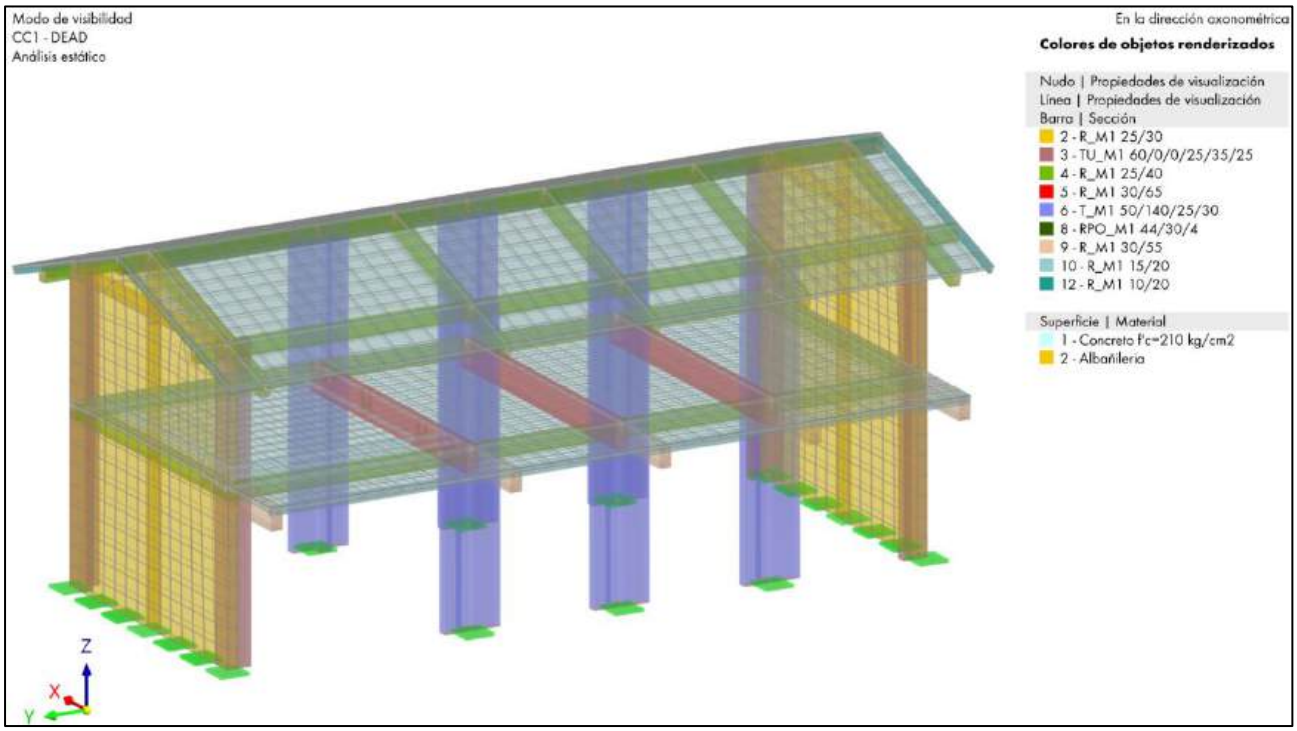


Sección núm.	Material núm.	Tipo de sección	Tipo de fabricación	I_t [cm⁴] / A [cm²]	$I_{y/u}$ [cm⁴] / $A_{y/u}$ [cm²]	$I_{z/v}$ [cm⁴] / $A_{z/v}$ [cm²]	Dimensiones totales b [cm]	Dimensiones totales h [cm]
2	R_M1 25/30 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		77515.40	56250.00	39062.50	25.00	30.00
				750.00	625.00	625.00		
3	TU_M1 60/0/0/25/35/25 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		441552.11	954947.92	374684.76	60.00	60.00
				2375.00	1630.05	1389.86		
4	R_M1 25/40 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		127345.16	133333.33	52083.33	25.00	40.00
				1000.00	833.33	833.33		
5	R_M1 30/65 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		415543.21	686562.50	146250.00	30.00	65.00
				1950.00	1625.00	1625.00		
6	T_M1 50/140/25/30 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		962019.77	607383.58	5772916.67	140.00	50.00
				4250.00	3196.95	1569.07		
8	RPO_M1 44/30/4 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		216094.04	186059.68	92250.00	30.00	44.00
				1260.00	1058.47	1053.56		
9	R_M1 30/55 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		326154.75	415937.50	123750.00	30.00	55.00
				1650.00	1375.00	1375.00		
10	R_M1 15/20 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		12149.07	10000.00	5625.00	15.00	20.00
				300.00	250.00	250.00		
11	TU_M1 20/0/0/12.50/7/10 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		9544.09	9782.20	5301.55	17.00	20.00
				287.50	227.53	214.99		
12	R_M1 8/8 | 1 - Concreto f'c=210 kg/cm2							
	1	Paramétrica - Maciza I		576.85	341.33	341.33	8.00	8.00
				64.00	53.33	53.33		

En la Figura 26 se muestra el modelo tridimensional del módulo E, elaborado en el software RFEM 6. En esta representación se observa la geometría completa de la edificación, incluyendo columnas, vigas, losas, muros de albañilería confinada y fundaciones, todos modelados con sus respectivas propiedades mecánicas y seccionales.

Figura 26

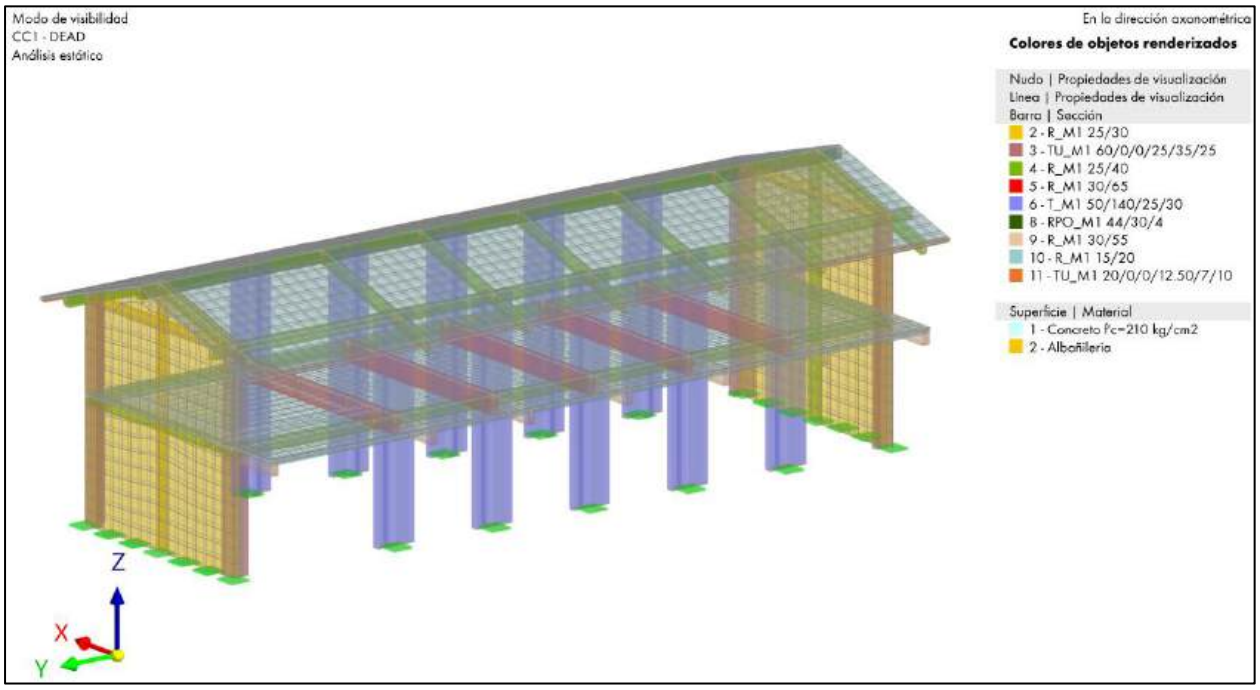
Modelo estructural 3D del Módulo E en RFEM 6



De igual manera en la Figura 27 se presenta el modelo tridimensional correspondiente al módulo F, desarrollado en el software RFEM 6. Esta vista permite identificar la configuración estructural completa de la edificación, la cual incluye columnas, vigas, losas, muros de albañilería confinada y elementos de cimentación, todos definidos con sus respectivas propiedades mecánicas y dimensiones seccionales.

Figura 27

Modelo estructural 3D del Módulo F en RFEM 6.



3. Modelación de la Base: Empotramiento Perfecto e Interacción Suelo-Estructura

Los modelos estructurales se clasificaron en dos grupos, según las condiciones de apoyo consideradas en la base.

El primer grupo corresponde a modelos con empotramiento perfecto, en los que se asume que la base de la estructura no presenta desplazamientos ni rotaciones. En esta categoría se incluyen el Modelo 1 (empotramiento rígido) y el Modelo 2 (empotramiento rígido con cimentación incluida).

El segundo grupo está conformado por modelos que incorporan la interacción suelo-estructura (ISE), permitiendo simular el comportamiento real del sistema suelo–estructura. Esta categoría comprende el Modelo 3 (Winkler), el Modelo 4 (Pasternak) y el Modelo 5 (medio espacio tridimensional).

En todos los casos, el proceso de modelado estructural siguió una secuencia de pasos coherente, diferenciándose únicamente en los criterios de empotramiento aplicados en la base. Las particularidades de cada caso se detallan en los apartados siguientes.

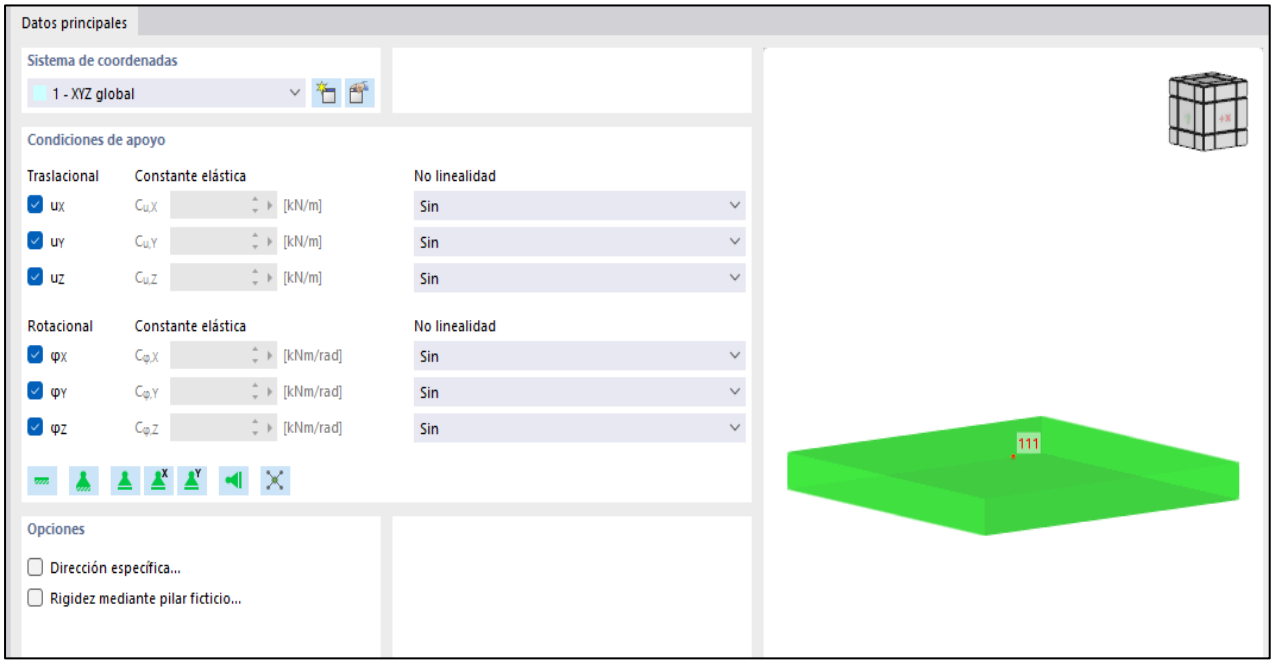
A. Modelo 1 Empotramiento perfecto

Este modelo asumió que la base de la estructura se encontraba completamente empotrada, es decir, se restringieron los desplazamientos en todas las direcciones y las rotaciones respecto a los tres ejes principales. Esta condición representó una idealización común en el análisis estructural, que permitió evaluar la respuesta de la edificación bajo el supuesto de una conexión rígida entre la cimentación y el terreno.

A continuación, se presentó la asignación del empotramiento perfecto en los apoyos, tal como fue implementada en el programa RFEM 6 durante el proceso de modelación estructural.

Figura 28

Asignación de restricciones en la base – Modelo 1 en RFEM 6



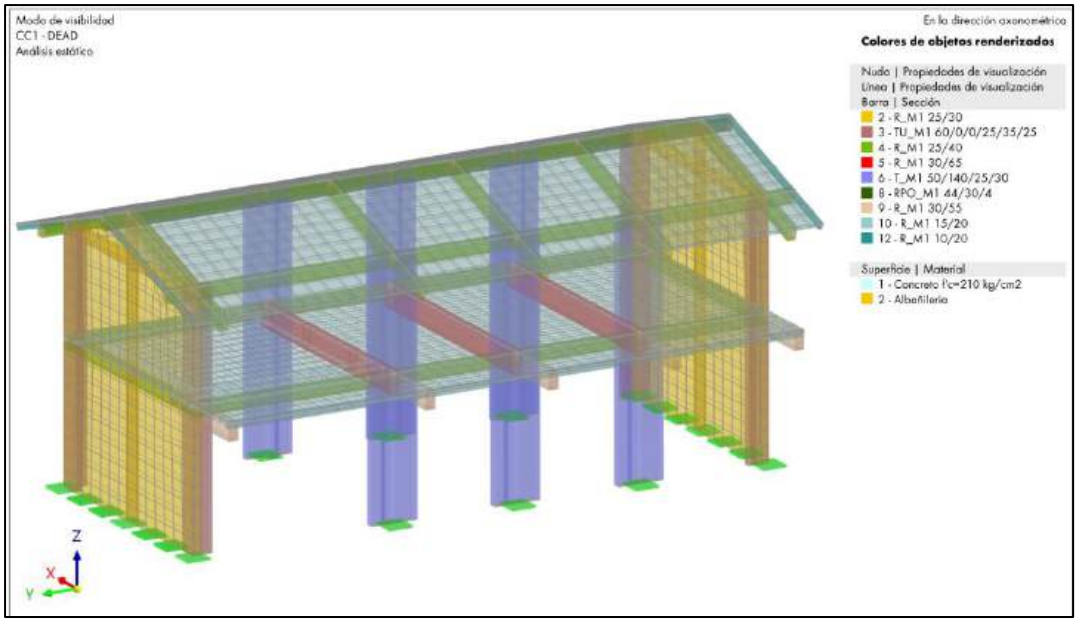
En la Figura 28 se muestra la configuración de los apoyos implementada en el modelo estructural correspondiente al empotramiento perfecto. En esta asignación, se restringieron completamente los grados de libertad traslacionales ux, uy, uz, y rotacionales φx, φy, φz, tal como se observa en las condiciones de apoyo definidas en el entorno del programa RFEM 6.

Esta configuración simuló una base rígida, sin posibilidad de desplazamiento ni rotación, lo cual representó una idealización común en los análisis estructurales tradicionales. La rigidez infinita establecida en todos los ejes permitió tomar este modelo como caso base de comparación frente a los modelos que incluyeron la interacción suelo-estructura.

En la Figura 29 se presenta la visualización tridimensional del modelo estructural del módulo educativo, generada en el entorno del software RFEM 6. Donde se representa de manera detallada la correcta asignación del empotramiento en los apoyos de las columnas, placas y muros de albañilería.

Figura 29

Asignación de apoyos de empotramiento perfecto en la base – Modelo 1 – 3D



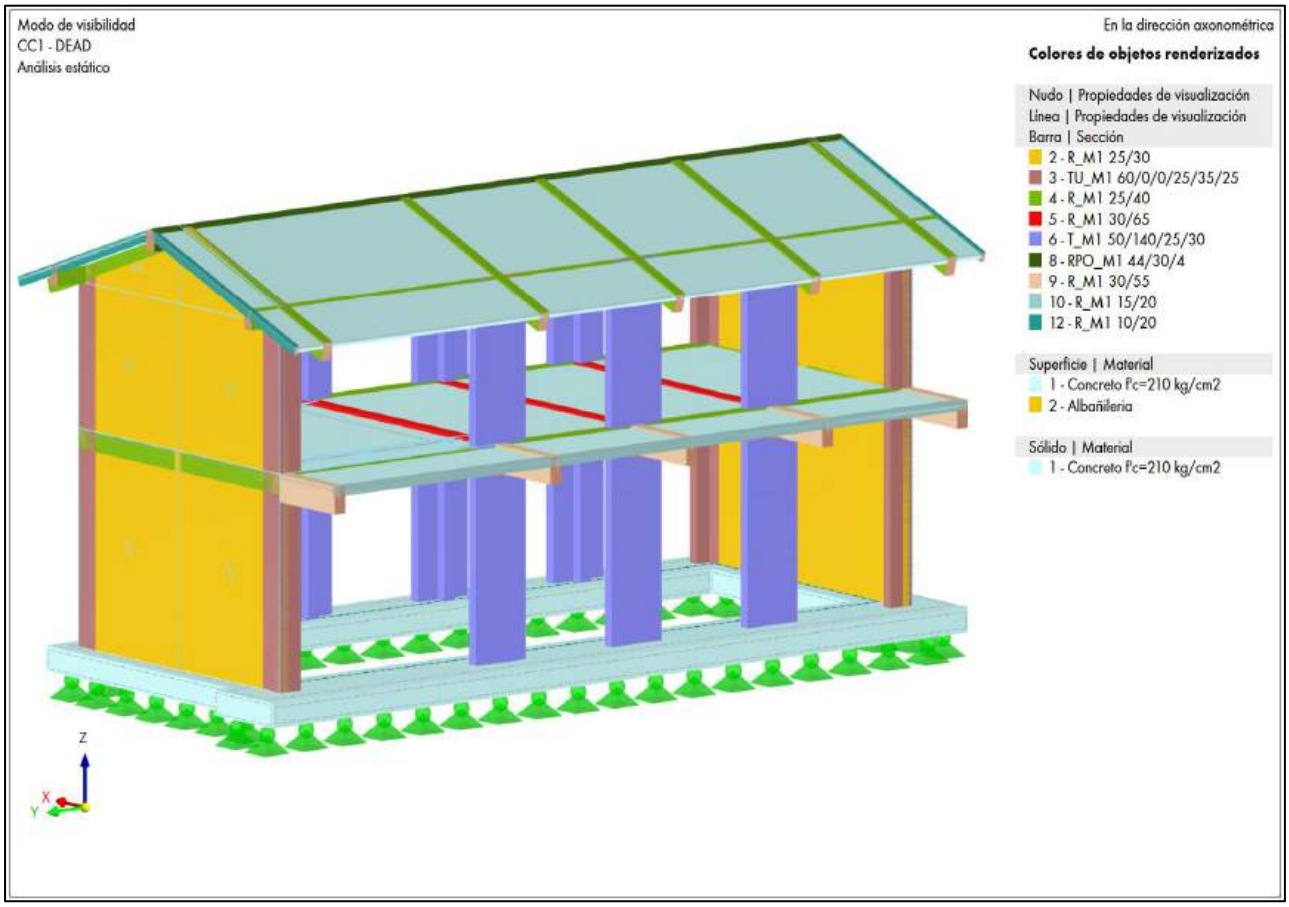
B. Modelo 2 Empotramiento perfecto con cimentación

Este modelo consideró una base empotrada que incorpora la cimentación en el análisis estructural, lo cual implica la restricción total de desplazamientos y rotaciones en los tres ejes en los puntos de apoyo de la fundación.

Esta condición representa una idealización común en el análisis estructural, que asume una conexión rígida entre la superestructura y el terreno, sin considerar la deformabilidad del suelo.

Figura 30

Asignación de apoyos de empotramiento perfecto en la base – Modelo 2 – 3D



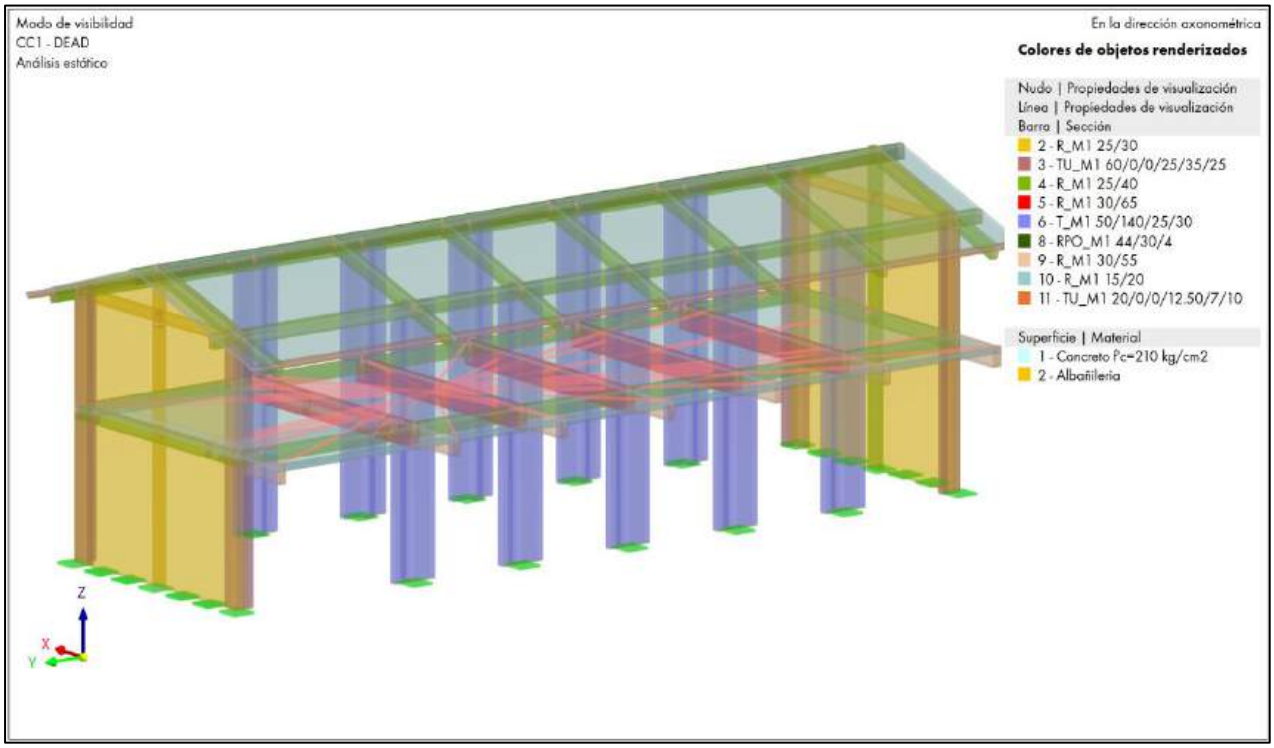
4. Asignación de brazo rígido

En el proceso de modelación estructural desarrollado en el software RFEM 6, se asignó un brazo rígido en la base de los elementos verticales (columnas y muros)

con el objetivo de representar con mayor precisión la transferencia de cargas hacia el sistema de cimentación.

Figura 31

Asignación de diafragma rígido en entrepiso

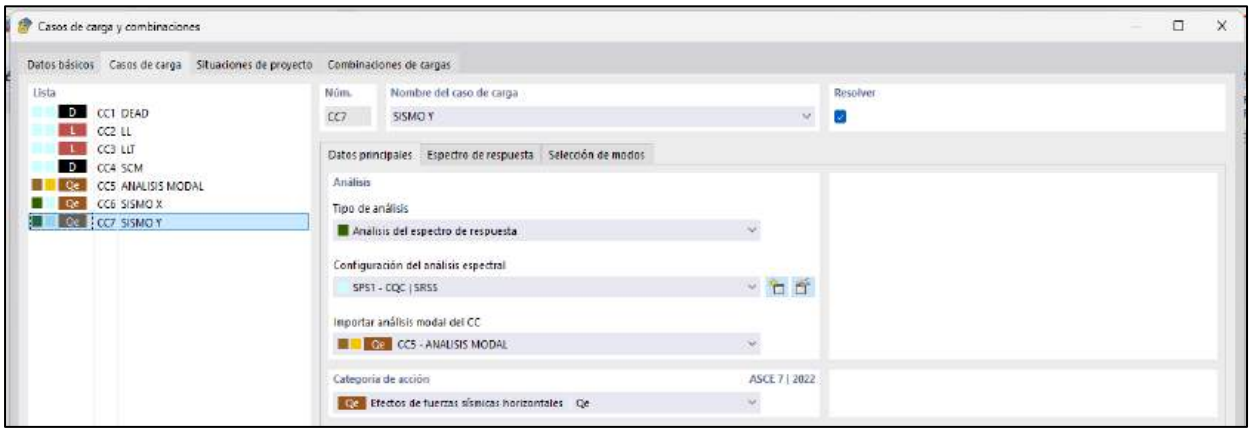


5. Asignación de casos de carga

Durante el proceso de modelado estructural en el software RFEM 6, se definieron y asignaron los casos de carga necesarios para simular con precisión las solicitaciones que actúan sobre los módulos E y F.

Figura 32

Definición de los casos de carga para el análisis estructural

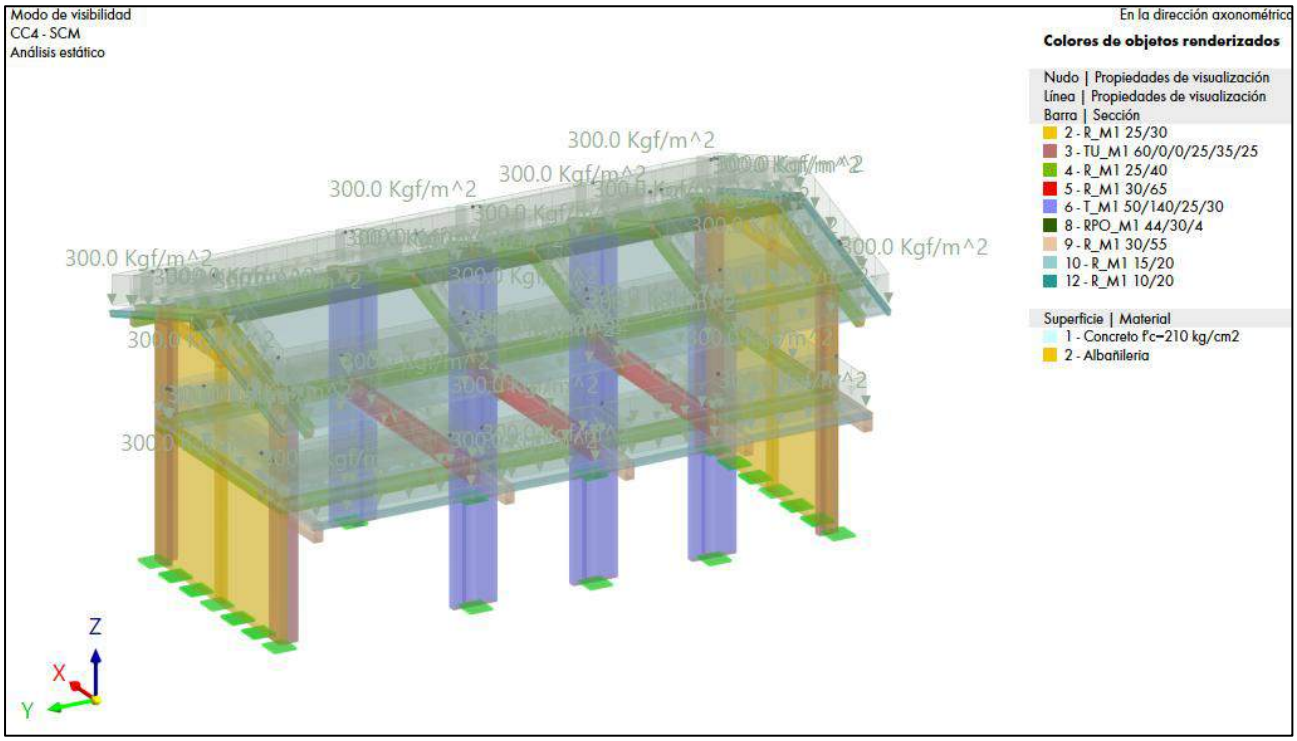


6. Modelado de cargas en módulos

El modelado de cargas en los módulos E y F de la institución educativa N.° 82319 – Pampa Cochabamba se llevó a cabo en el entorno del software RFEM 6, considerando tanto las cargas gravitacionales permanentes como las variables.

Figura 33

Modelado de sobrecarga muerta en la estructura

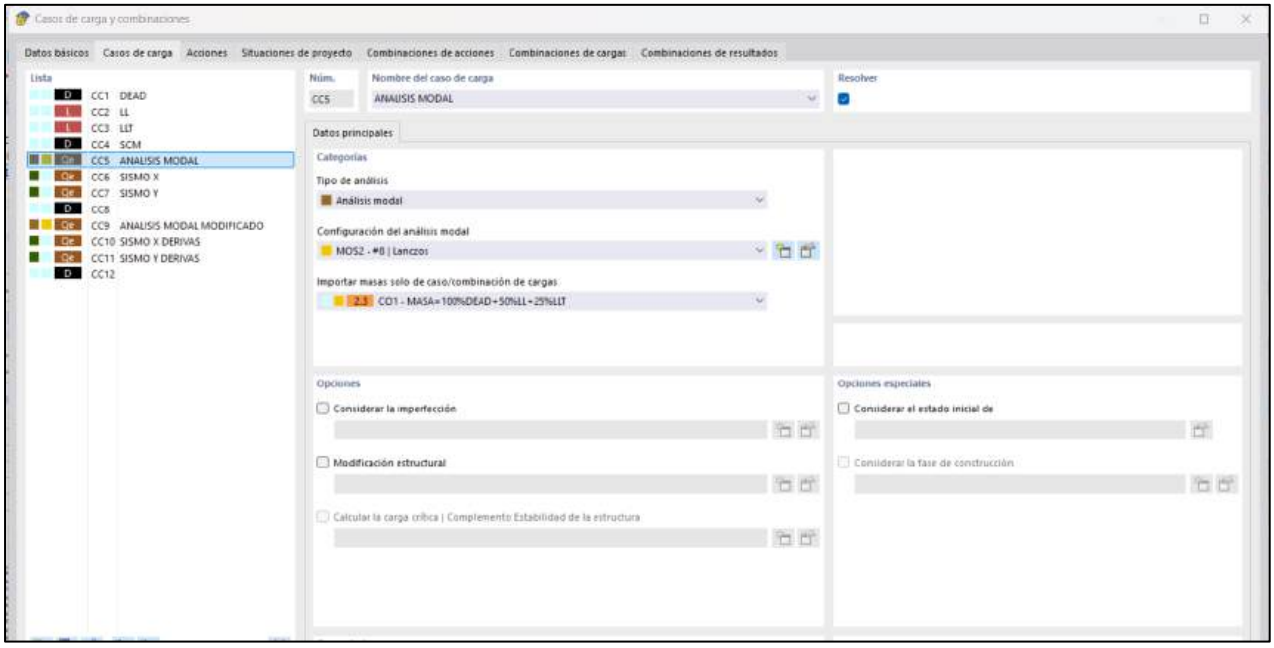


7. Análisis modal

En esta etapa del modelado, se definió el análisis modal espectral como parte del estudio estructural, en conformidad con los lineamientos establecidos por la Norma Técnica Peruana E.020 “Cargas” y la Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”.

Figura 34

Definición del análisis modal



8. Definición del espectro de respuesta

Con el propósito de establecer adecuadamente el espectro de respuesta necesario para el análisis dinámico estructural, se definieron los parámetros sísmicos y geotécnicos conforme a lo estipulado en la Norma Técnica Peruana E.030 “Diseño Sismorresistente”. Estos parámetros fueron obtenidos del expediente técnico del proyecto, y consideran la ubicación geográfica, la zonificación sísmica, el tipo de suelo, el factor de amplificación sísmica, los periodos característicos del terreno, así como el uso y categoría de la edificación. A partir de dicha información, se elaboró la siguiente tabla que resume los parámetros fundamentales de diseño estructural, los

cuales sirvieron de base para la generación del espectro de respuesta que se aplicó en los diferentes modelos estructurales evaluados.

Tabla 10

Parámetros de diseño estructural

Parámetros	Valores	Descripción
Z	0.35	Zona Sísmica 3
U	1.50	Categoría A2 (Edificaciones Esenciales) Ver Tabla N°6 E030
S	1.20	Perfil de Suelo Tipo: S3 Suelos Blandos (Según el E.M.S)
Tp	1.00	Periodo que define la plataforma del factor C (Según el E.M.S)
T_L	1.60	Período que define el inicio de la zona del factor C con desplazamiento constante.
R_{0x}	3	Coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas. (Sistema Albañilería Armada o Confinada)
I_{ax}	1.00	Factor de irregularidad en altura (Valor crítico)
I_{px}	1.00	Factor de irregularidad en planta (Valor crítico)
$Rx=R_{0x}I_{ax}I_{px}$	3	Factor de reducción sísmica en la dirección xx
R_{0y}	6	Coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas. (Sistema de muros estructurales)
I_{ay}	1.00	Factor de irregularidad en altura (Valor crítico)
I_{py}	1.00	Factor de irregularidad en planta (Valor crítico)
$Ry=R_{0y}I_{ay}I_{py}$	6	Factor de reducción sísmica en la dirección yy
hn	7.90	Altura total de la edificación (m)
CTx	60	Coeficiente para estimar el periodo fundamental de un edificio
CTy	60	Coeficiente para estimar el periodo fundamental de un edificio
Tx	0.132	Periodo fundamental de la estructura, sin fuerza adicional
Ty	0.132	Periodo fundamental de la estructura, sin fuerza adicional
C calculado	18.99	Factor de amplificación sísmica
C asumido	2.50	Factor de amplificación sísmica
g	9.81	Aceleración de la gravedad (m/s2)

Luego para cada una de las direcciones analizadas se utilizará un espectro inelástico de seudo aceleraciones definido por:

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} g$$

Para la superposición de los modos se empleó la fórmula de la combinación cuadrática completa (C.Q.C.) de los modos necesarios contemplando un 5% de amortiguamiento crítico.

Tabla 11

Espectro de pseudo-aceleraciones según la Norma E.030

T	C_H	C_V	Sa Dir X-X	Sa Dir Y-Y
0.01	2.500	1.075	5.15	2.58
1.00	2.500	2.500	5.15	2.58
1.10	2.273	2.273	4.68	2.34
1.20	2.083	2.083	4.29	2.15
1.30	1.923	1.923	3.96	1.98
1.40	1.786	1.786	3.68	1.84
1.50	1.667	1.667	3.43	1.72
1.60	1.563	1.563	3.22	1.61
1.70	1.384	1.384	2.85	1.43
1.80	1.235	1.235	2.54	1.27
1.90	1.108	1.108	2.28	1.14
2.00	1.000	1.000	2.06	1.03
2.25	0.790	0.790	1.63	0.81
2.50	0.640	0.640	1.32	0.66
2.75	0.529	0.529	1.09	0.54
3.00	0.444	0.444	0.92	0.46
4.00	0.250	0.250	0.52	0.26
5.00	0.160	0.160	0.33	0.16
6.00	0.111	0.111	0.23	0.11
7.00	0.082	0.082	0.17	0.08
8.00	0.063	0.063	0.13	0.06
9.00	0.049	0.049	0.10	0.05
10.00	0.040	0.040	0.08	0.04

A continuación, se presentan las figuras correspondientes al espectro de respuesta en las direcciones X e Y, elaboradas a partir de los valores de la tabla del espectro de pseudo aceleraciones definidos conforme a la Norma Técnica Peruana E.030. Estas gráficas permiten visualizar el comportamiento dinámico esperado de la estructura ante diferentes periodos de vibración, lo cual resulta fundamental para el análisis modal espectral de los modelos estructurales evaluados.

Figura 35

Espectro de Respuesta en la dirección X según Norma E.030-2018.

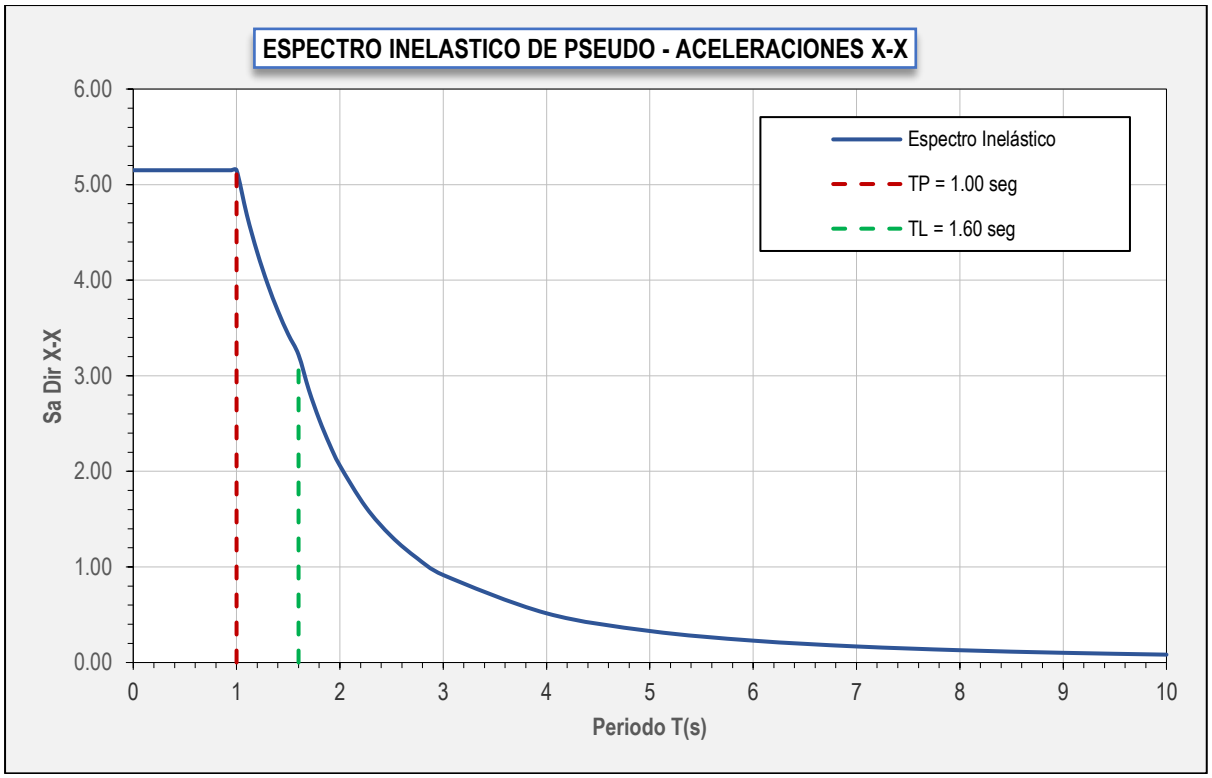
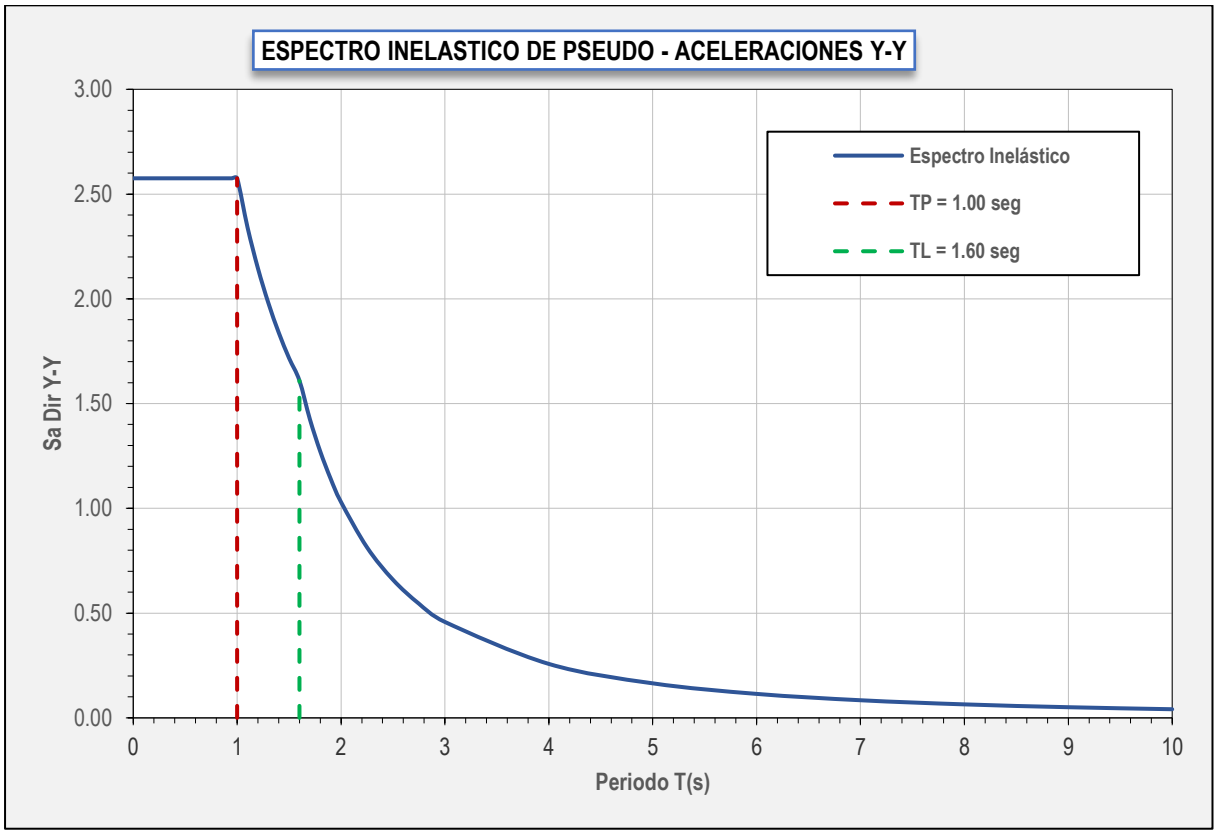


Figura 36

Espectro de Respuesta en la dirección Y según Norma E.030-2018.



Con el fin de aplicar correctamente el análisis dinámico espectral, se procedió a la asignación de los espectros de respuesta en las direcciones X e Y dentro del entorno del software RFEM 6. A continuación, se muestran las figuras que ilustran el procedimiento de ingreso y configuración del espectro en el módulo de análisis dinámico del programa RFEM 6.

Figura 37

Asignación del espectro de respuesta sísmica en la dirección X en RFEM 6

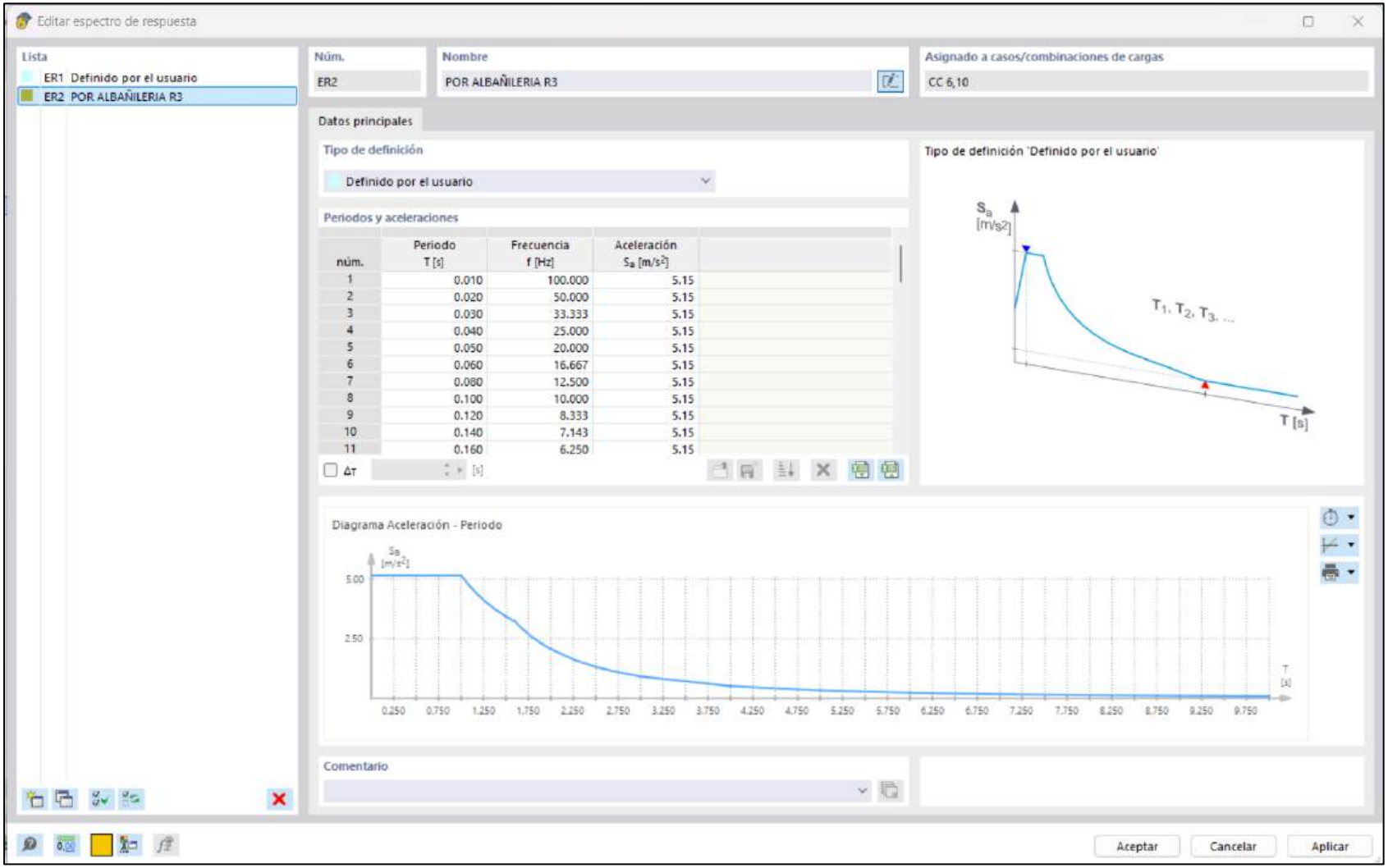


Figura 38

Asignación del espectro de respuesta sísmica en la dirección Y en RFEM 6

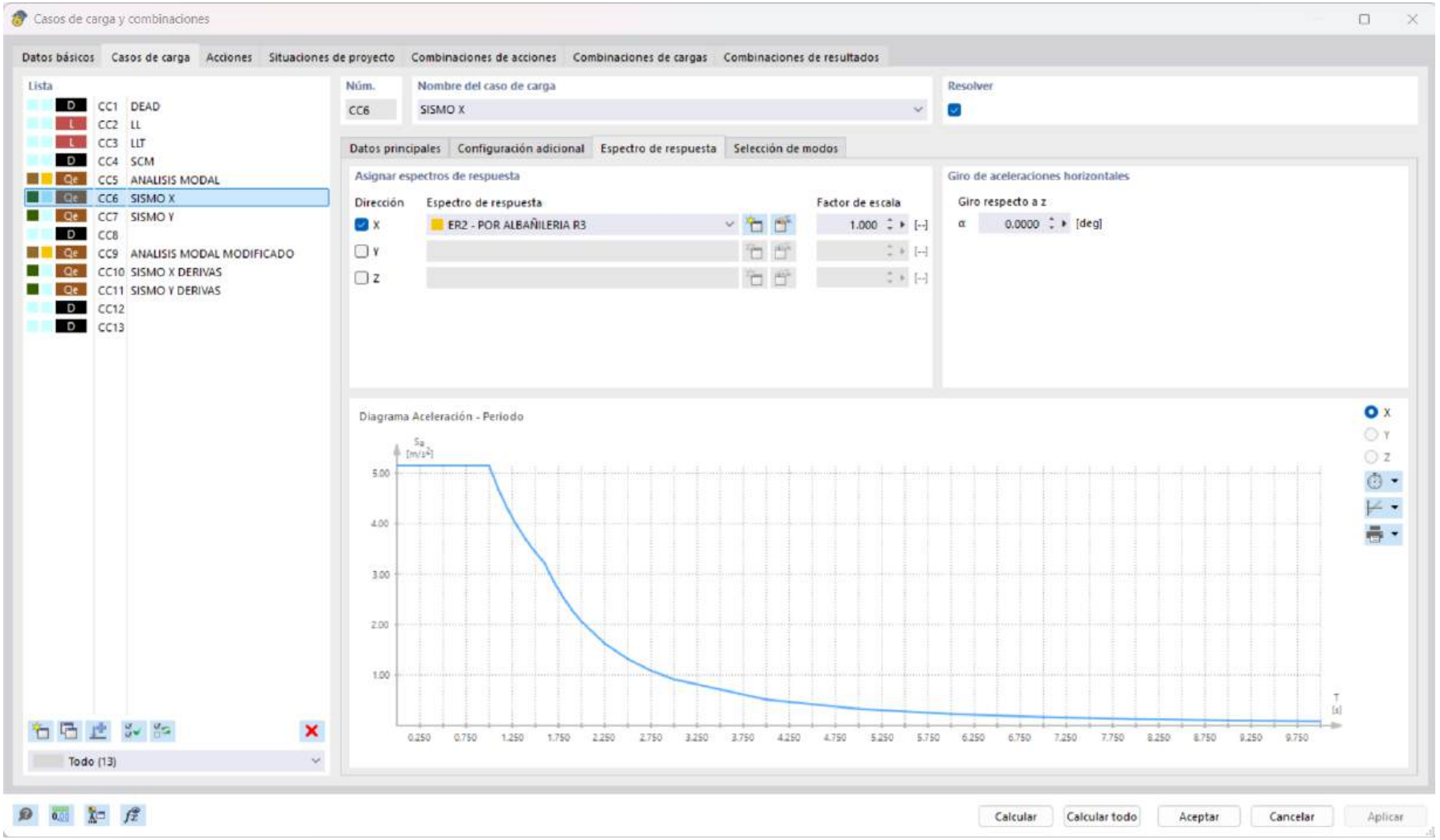
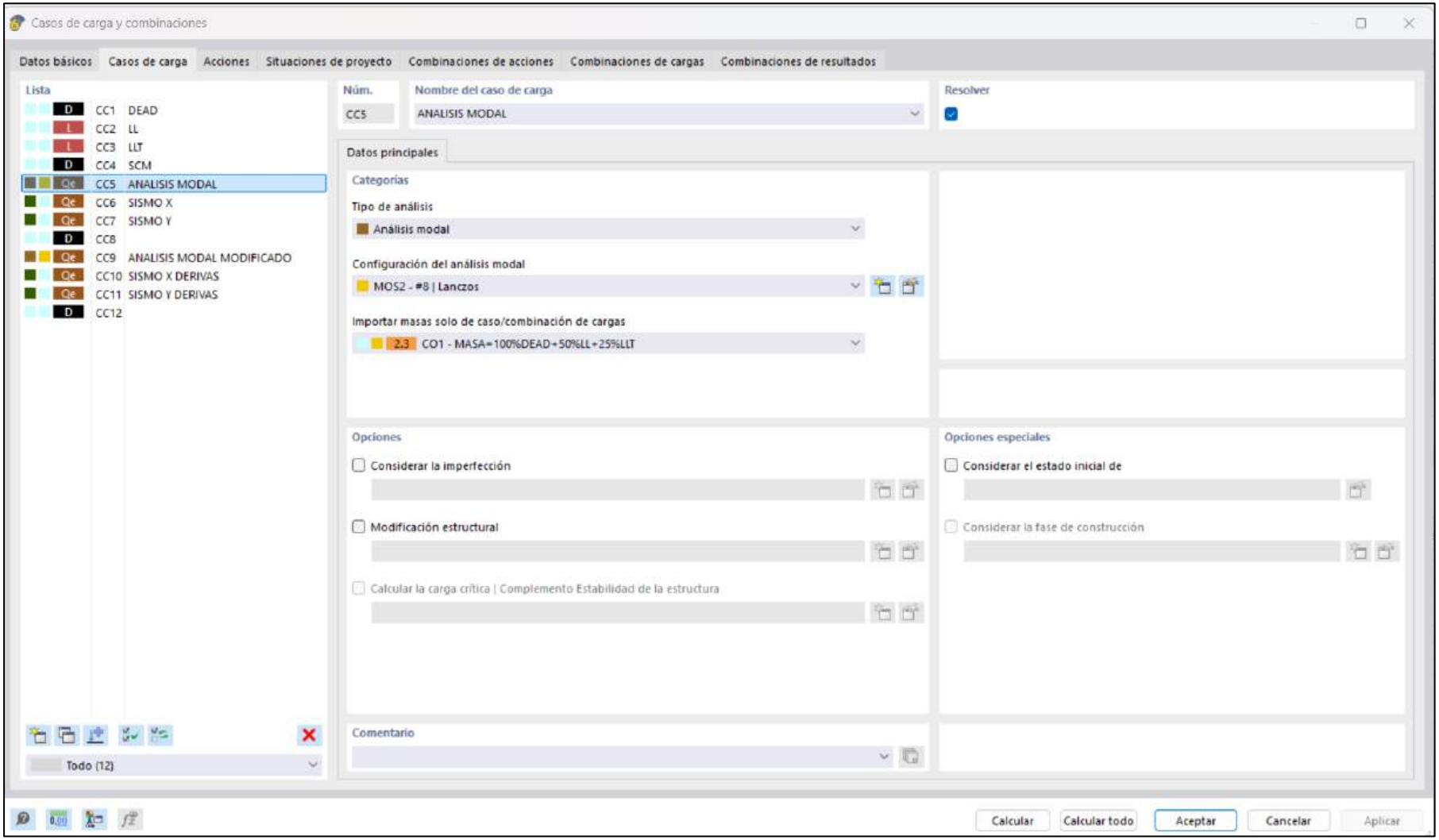


Figura 39

Asignación de casos de carga para el análisis modal



3.8.6. Análisis sísmico considerando la Interacción suelo-estructura (ISE).

En la sexta etapa, se realizó la modelación de los módulos E y F, tomando en cuenta la influencia de la interacción entre el suelo de fundación y la estructura. Esto incluye la consideración de la flexibilidad del terreno mediante la aplicación de los modelos de Winkler, Pasternak y Medio Espacio 3D, tal como se detalló en el capítulo de marco teórico de esta investigación, utilizando los modelos matemáticos correspondientes según cada caso.

3.8.6.1. Modelo Winkler

Este modelo consideró a la cimentación de la edificación sobre resortes, aplicando el coeficiente de balasto según la teoría de Winkler.

1. **Coeficientes de rigidez**

Se reemplazo los valores en la ecuación 2 de Winkler como se aprecia a continuación, con lo cual se realizó el análisis dinámico por el modelo de Winkler.

Reemplazando en la ecuación de Winkler, tenemos:

$$C_1 = \frac{\mathrm{E}_1}{h1(1 - 2{\mu_1}^2)}$$

$$C_1 = \frac{280}{2.5(1 - 2 * 0.4^2)}$$

$$C_1 = 164.71 \ \frac{ton}{m^3}$$

2. **Procedimiento de modelación**

En el procedimiento de asignación de restricciones en la base mediante el modelo de Winkler, se utilizó un valor constante de 164.71 Ton/m3 aplicado a toda la cimentación de la estructura, lo que permite considerar la flexibilidad del terreno de fundación en el análisis.

3. Colocación de los coeficientes de rigidez

En esta etapa del modelado, se procedió a la asignación del coeficiente de rigidez del suelo en la dirección vertical, en el entorno del software RFEM 6. Este coeficiente resultó fundamental para representar adecuadamente el comportamiento del terreno en el modelo Winkler, permitiendo una simulación más realista de la respuesta dinámica. En las siguientes figuras, se muestra la forma en que fue definido y aplicado dicho coeficiente dentro del modelo estructural.

Figura 40

Asignación de restricciones en la base – Modelo 3 – Constantes elásticas

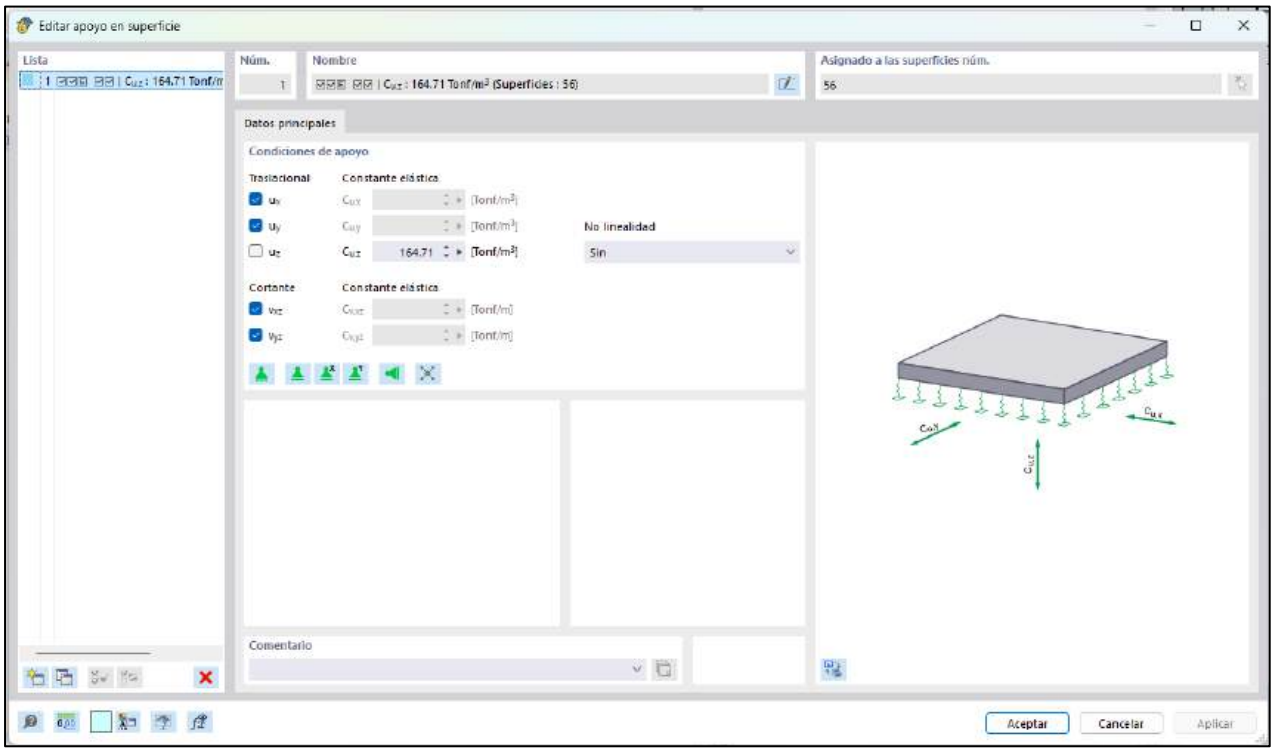
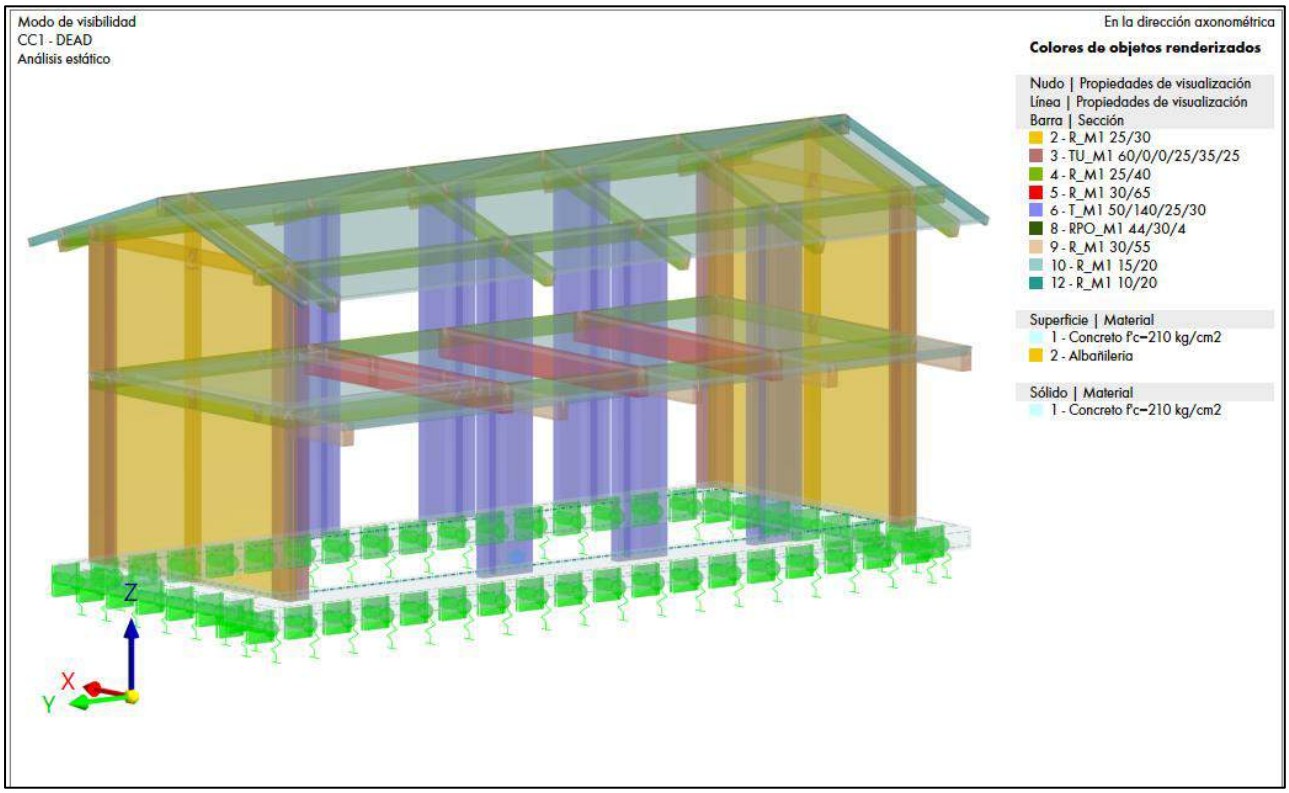


Figura 41

Asignación de restricciones en la base – Modelo 3 – 3D



3.8.6.2. Modelo Pasternak

Este modelo consideró a la cimentación de la edificación sobre resortes y con cortantes, aplicando el coeficiente según la teoría de Pasternak de los dos parámetros.

1. **Coeficiente de rigidez**

Se reemplazo los valores en las ecuaciones 1 y 2 como se aprecia en a continuación, con lo cual se realizó el análisis dinámico por el modelo de Pasternak.

Coeficiente de balasto vertical:

$$C_1 = \frac{\mathrm{E}_1}{h1(1-2{\mu_1}^2)}$$

$$C_1 = \frac{280}{2.5(1 - 2 * 0.4^2)}$$

$$C_1 = 164.71 \ \frac{ton}{m^3}$$

Coeficiente de balasto horizontal:

$$C_2 = \frac{\mathrm{E}_1 . h_1}{6(1 + \mu_1)}$$

$$C_2 = \frac{280 * 2.5}{6(1 + 0.4)}$$

$$C_2 = 83.33 \frac{\mathrm{ton}}{m}$$

2. Procedimiento de modelación

En el procedimiento de asignación de restricciones en la base mediante el modelo de Pasternak, se utilizó los valores constantes de 164.71 Ton/m3 y 83.33 Ton/m aplicado a toda la cimentación de la estructura, lo que permite considerar la flexibilidad del terreno de fundación en el análisis.

3. Colocación de los coeficientes de rigidez

En esta etapa del modelado, se procedió a la asignación de los coeficientes de rigidez del suelo, tanto en dirección vertical como horizontal, en el entorno del software RFEM 6. Estos coeficientes resultaron fundamentales para representar adecuadamente el comportamiento del terreno en el modelo Pasternak, permitiendo una simulación más realista de la respuesta dinámica. En las siguientes figuras, se muestra la forma en que fueron definidos y aplicados dichos coeficientes dentro del modelo estructural.

Figura 42

Asignación de restricciones en la base – Modelo 4 – Constantes elásticas

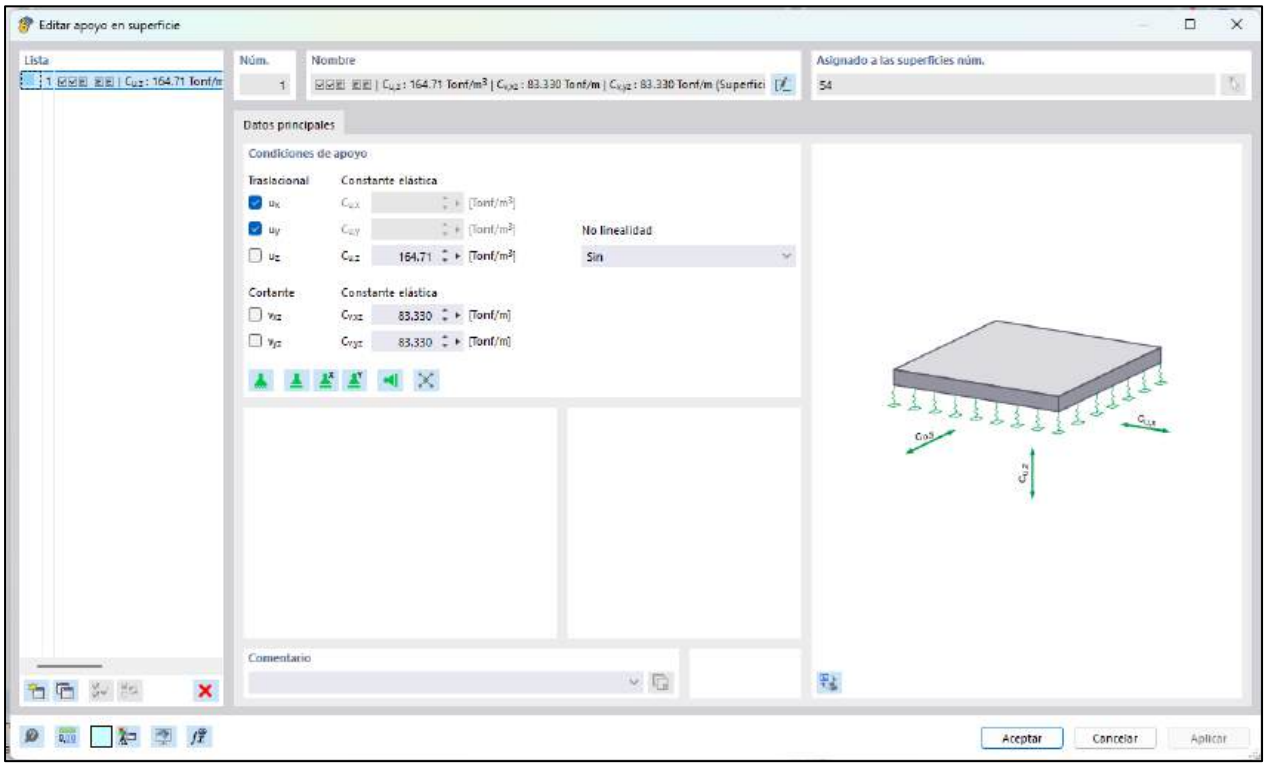
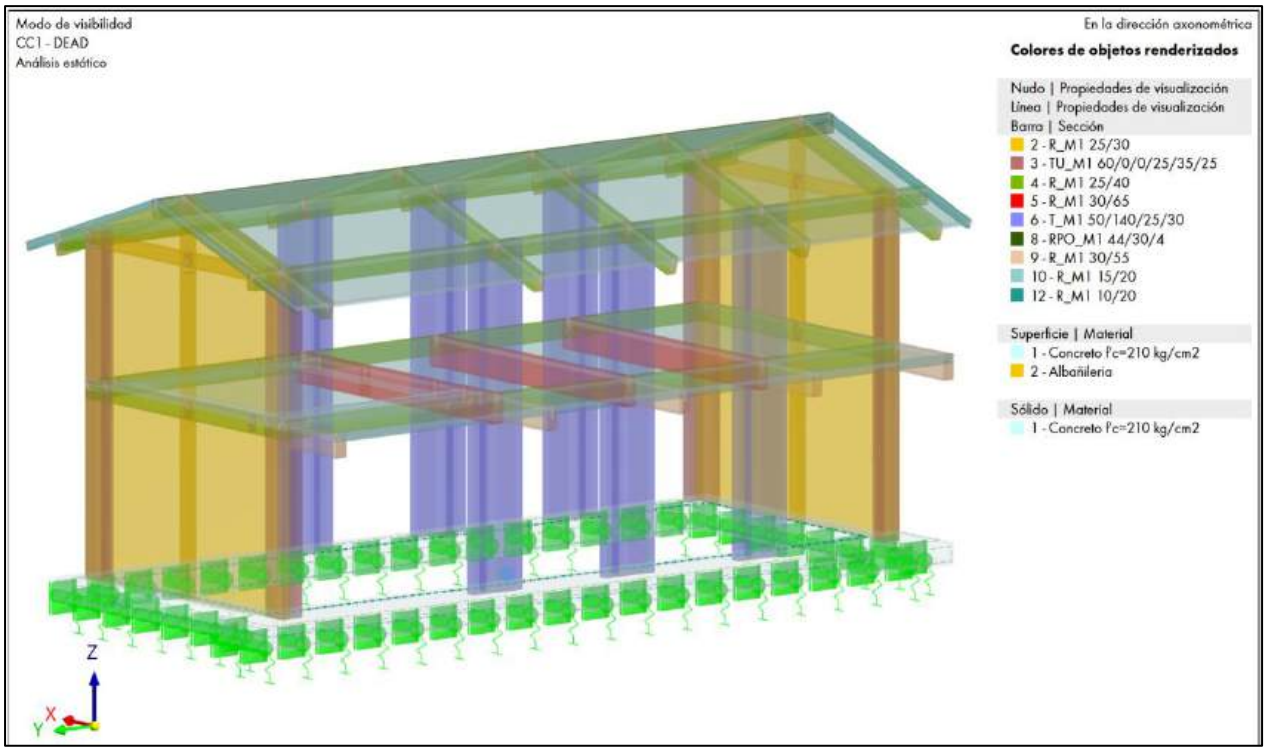


Figura 43

Asignación de restricciones en la base – Modelo 4 – 3D



3.8.6.3. Modelo Medio Espacio 3D

Este modelo consideró a la cimentación de la edificación sobre un sólido que representa al terreno de fundación con su respetiva elasticidad y flexibilidad, con apoyos restringidos en las superficies del solido según la teoría del medio espacio en RFEM 6.

1. **Coeficiente de rigidez**

En este caso, al sólido que representa el terreno se le asignaron condiciones de empotramiento en todos los límites de este.

Figura 44

Asignación de restricciones en la base – Modelo 5

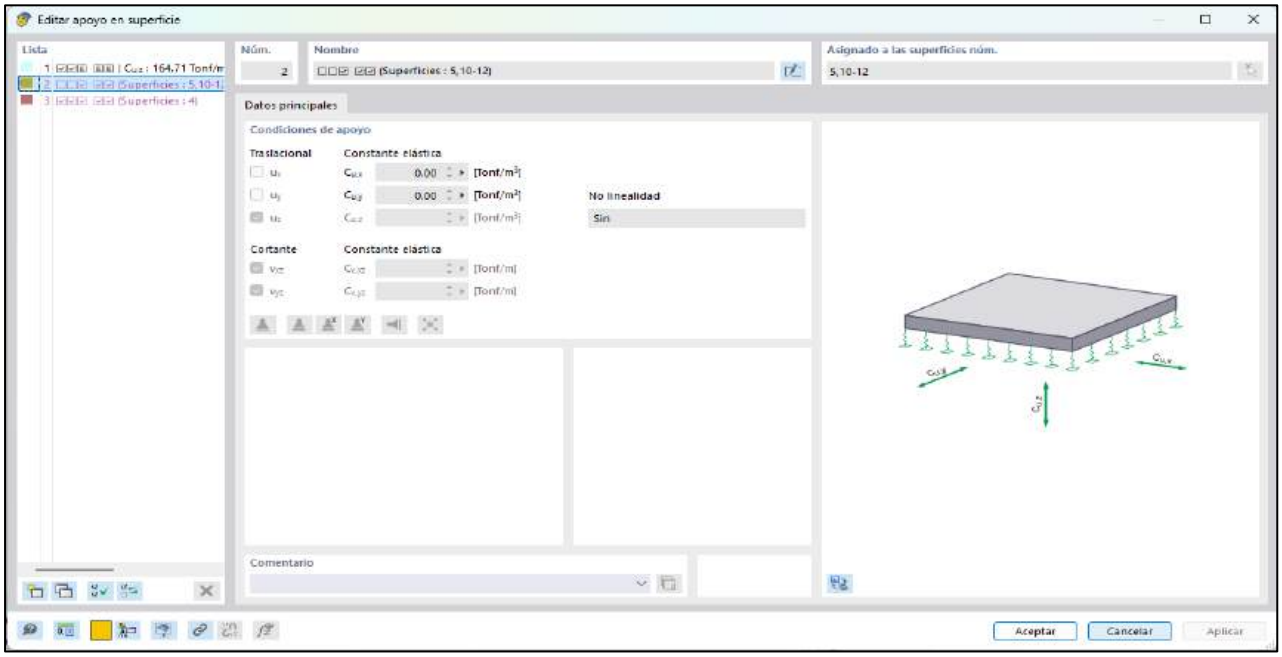
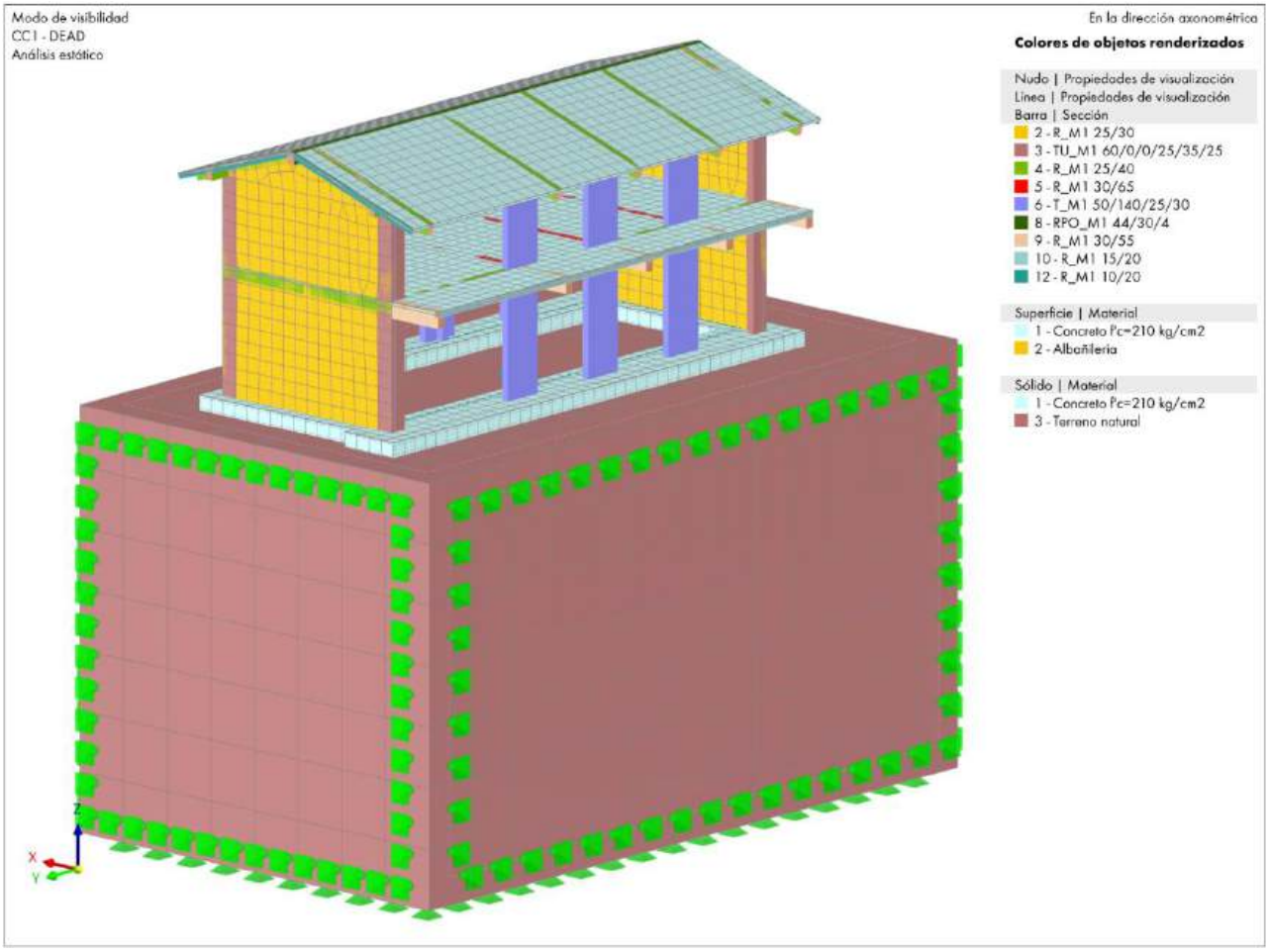


Figura 45

Asignación de restricciones en la base – Modelo 5 - 3D en RFEM 6



3.8.7. Desplazamientos laterales (Norma Técnica E.030-2018, Art.31)

En la séptima etapa, en el programa RFEM 6 se calculó los periodos de vibración, esfuerzos internos y los desplazamientos laterales en todos los elementos estructurales de los cuales se escogerá el de mayor valor para las comparaciones.

Los desplazamientos laterales obtenidos del análisis lineal elástico con las solicitaciones sísmicas reducidas se multiplican por 0.75R. Los valores obtenidos se compararon con el parámetro de la NTE E.030.

$$\Delta_{inelástico} = 0.75R \cdot \Delta_{elástico}$$

A continuación, se muestra el cálculo de las derivas de entrepiso con los datos de los desplazamientos laterales obtenidos de los modelos estructurales simulados.

Figura 46

Derivas de entrepiso (mm) – Sismo X – Modelo 3 - Módulo E

$Nivel$	h (m)	δ (mm)
0	0	1.8
1	3.6	19.1
2	7.9	34.7

$$Deriva_x := \left\| \begin{array}{l} h_n \leftarrow 0\ m \\ \text{for } i \in 1,2..\text{rows}(Nivel)-1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \Delta \leftarrow \dfrac{\delta_{i+1}-\delta_i}{h_{i+1}-h_i} \cdot 0.75 \cdot R \\ h_n \leftarrow h_n + \left(h_{i+1}-h_i\right) \\ Derivas_{i,1} \leftarrow \Delta \\ Derivas_{i,2} \leftarrow h_n \end{array} \right. \\ Derivas \end{array} \right\| = \begin{bmatrix} 0.02163 & 3.6\ m \\ 0.01633 & 7.9\ m \end{bmatrix}$$

Fuente. Hoja de cálculo. Procedimiento de cálculo de las derivas de entrepiso.

Se tendrá en cuenta que las derivas máximas permisibles que dicta la norma E.030, se calcula de la siguiente manera:

Para albañilería confinada Eje (XX).

$$\frac{\Delta_i}{h_{ei}} \leq 0.005$$

Para Concreto Armado Eje (YY).

$$\frac{\Delta_i}{h_{ei}} \leq 0.007$$

Donde, Δi es el desplazamiento relativo del entrepiso i y hei es la altura del entrepiso i. Según el proyecto, se tiene una altura de 3.60 m, por lo tanto, el desplazamiento de entrepiso máximo será.

$\Delta_i \leq 0.007\ (360\ cm)$ $\Delta_{i\ max} \leq 2.52\ cm$

3.9. Presentación de resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los análisis estructurales realizados en los modelos correspondientes a los módulos educativos E y F, considerando y obviando los efectos de la interacción suelo-estructura en la fundación en el software RFEM 6. Dichos resultados comprenden los periodos de vibración, los esfuerzos internos (máximos esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores) y las derivas laterales.

Los elementos estructurales evaluados incluyeron columnas de sección rectangular y tipo T ubicadas en el eje A (según se indica en el plano de estructuras disponible en los Anexos), así como las vigas correspondientes a dicho eje.

3.9.1. Resultados de los periodos de vibración del módulo E

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis modal espectral aplicado al módulo estructural E, bajo dos condiciones: una con interacción suelo-estructura (ISE) y otra asumiendo empotramiento perfecto en la base. Esta comparación permitió identificar las variaciones en los periodos de vibración atribuibles a la inclusión o exclusión de los efectos de la ISE, lo cual resulta clave para comprender su impacto en la respuesta dinámica de la estructura.

3.9.1.1. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 1 (Módulo E)

Figura 47

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 1, Módulo E)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	582.797	24.141	3.842	0.260
2	1772.595	42.102	6.701	0.149
3	3554.041	59.616	9.488	0.105
4	8151.661	90.287	14.370	0.070
5	10464.818	102.298	16.281	0.061
6	14792.590	121.625	19.357	0.052
7	15559.471	124.738	19.853	0.050
8	18240.595	135.058	21.495	0.047

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 1, el valor del periodo de la estructura es de 0.260 s para el módulo E.

3.9.1.2. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 2 (Módulo E)

Figura 48

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 2, Módulo E)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	240.076	15.494	2.466	0.406
2	1577.030	39.712	6.320	0.158
3	2987.290	54.656	8.699	0.115
4	7652.911	87.481	13.923	0.072
5	7791.738	88.271	14.049	0.071
6	14612.253	120.881	19.239	0.052
7	15326.697	123.801	19.704	0.051
8	18163.536	134.772	21.450	0.047

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 2, el valor del periodo de la estructura es de 0.406 s para el módulo E.

3.9.1.3. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 3 (Módulo E)

Figura 49

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 3, Módulo E)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	98.696	9.935	1.581	0.632
2	106.525	10.321	1.643	0.609
3	353.157	18.792	2.991	0.334
4	6600.430	81.243	12.930	0.077
5	7160.640	84.621	13.468	0.074
6	11593.424	107.673	17.137	0.058
7	12414.148	111.419	17.733	0.056
8	17084.387	130.707	20.803	0.048

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 3, el valor del periodo de la estructura es de 0.632 s para el módulo E.

3.9.1.4. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 4 (Módulo E)

Figura 50

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 4, Módulo E)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	72.588	8.520	1.356	0.737
2	94.525	9.722	1.547	0.646
3	318.224	17.839	2.839	0.352
4	6579.342	81.113	12.910	0.077
5	7158.558	84.608	13.466	0.074
6	11564.753	107.540	17.115	0.058
7	12373.775	111.237	17.704	0.056
8	16955.328	130.213	20.724	0.048

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 4, el valor del periodo de la estructura es de 0.737 s para el módulo E.

3.9.1.5. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 5 (Módulo E)

Figura 51

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 5, Módulo E)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	123.822	11.128	1.771	0.565
2	334.222	18.282	2.910	0.344
3	609.190	24.682	3.928	0.255
4	4495.019	67.045	10.671	0.094
5	5388.757	73.408	11.683	0.086
6	8104.628	90.026	14.328	0.070
7	9688.558	98.430	15.666	0.064
8	10439.002	102.171	16.261	0.061

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 5, el valor del periodo de la estructura es de 0.565 s para el módulo E.

3.9.1.6. Comparación de los primeros seis modos de vibración del Módulo E en los diferentes modelos estructurales

Luego de obtener los resultados de los períodos de vibración, se procedió a realizar un análisis comparativo de los seis primeros modos obtenidos en los análisis

modales correspondientes a los cinco modelos estructurales evaluados: empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación, modelo de Winkler, modelo de Pasternak y modelo de medio espacio 3D, aplicados al módulo E.

La comparación de los resultados de dicho análisis se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 12

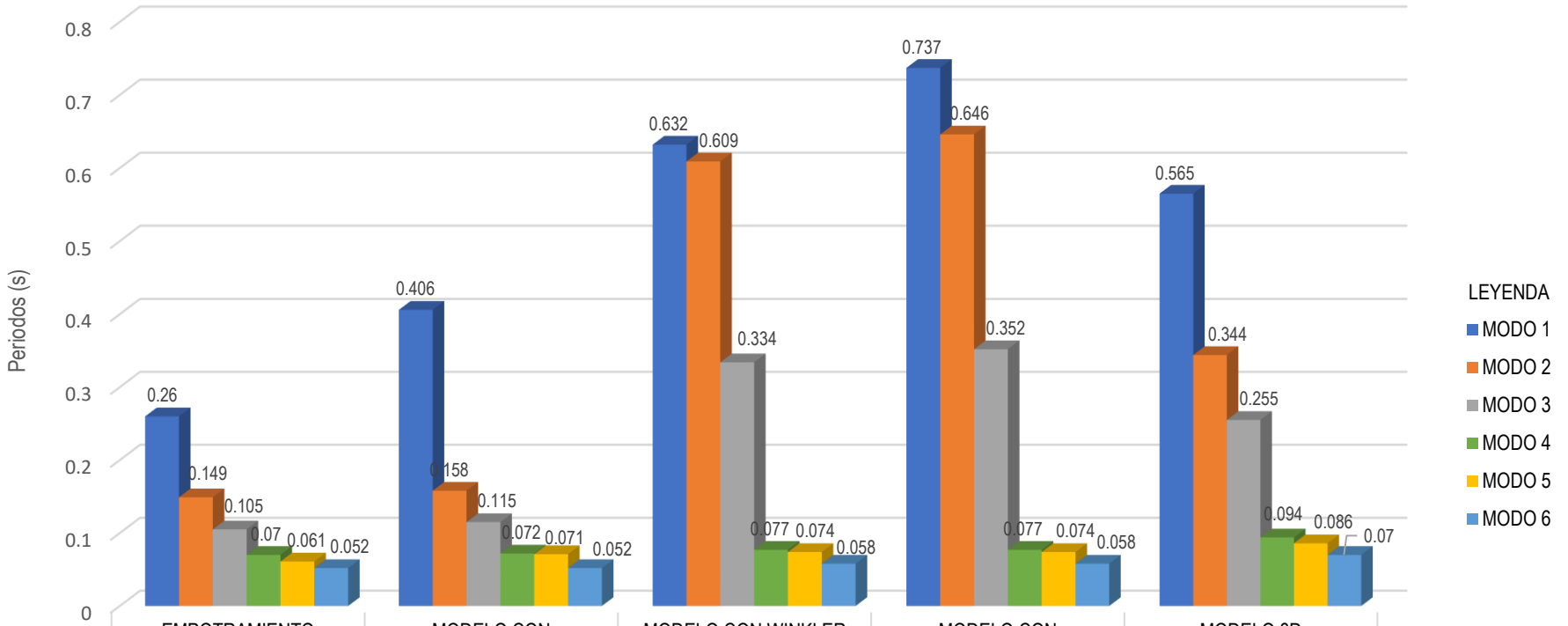
Comparación de los períodos de vibración obtenidos del análisis modal en los diferentes modelos estructurales del módulo E

Modelo	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Empotramiento perfecto	0.260	0.149	0.105	0.070	0.061	0.052
Empotramiento con cimentación	0.406	0.158	0.115	0.072	0.071	0.052
Winkler	0.632	0.609	0.334	0.077	0.074	0.058
Pasternak	0.737	0.646	0.352	0.077	0.074	0.058
Medio espacio 3D	0.565	0.344	0.255	0.094	0.086	0.070

Además, se elaboró un gráfico comparativo que permite visualizar la variación de los períodos de vibración obtenidos en los distintos modelos estructurales. Dicho gráfico se presenta a continuación.

Figura 52

Comparación modal de los periodos de vibración obtenidos para el módulo E en los cinco modelos estructurales analizados



	EMPOTRAMIENTO PERFECTO	MODELO CON CIMENTACIÓN	MODELO CON WINKLER	MODELO CON PASTERNAK	MODELO 3D
MODO 1	0.26	0.406	0.632	0.737	0.565
MODO 2	0.149	0.158	0.609	0.646	0.344
MODO 3	0.105	0.115	0.334	0.352	0.255
MODO 4	0.07	0.072	0.077	0.077	0.094
MODO 5	0.061	0.071	0.074	0.074	0.086
MODO 6	0.052	0.052	0.058	0.058	0.07

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 12 y la Figura 52, se muestran las diferencias significativas en los periodos según el modelo utilizado para el módulo E:

- Modo 1

El modelo estructural con menor periodo en el primer modo fue el de empotramiento perfecto con 0.260 s, debido a la gran rigidez estructural. El modelo estructural del medio espacio 3D mostró un valor intermedio de 0.565 s, mientras que los modelos de Winkler y Pasternak presentaron los periodos más altos 0.632 s y 0.737 s, respectivamente.

- Modo 2

Para el segundo modo, el modelo estructural empotramiento perfecto tuvo el menor periodo con 0.149 s, seguido de empotramiento con cimentación con 0.158 s. Los modelos estructurales Winkler y Pasternak mostrando valores significativamente mayores, con 0.609 s y 0.646 s, respectivamente.

- Modo 3 a 6

En el tercer modo, los periodos más altos se encontraron en los modelos estructurales Winkler (0.334 s) y Pasternak (0.352 s). El modelo medio espacio 3D presentó un valor moderado (0.255 s).

Los modos superiores (4 a 6) evidencian una menor variabilidad entre los modelos, siendo los valores más cercanos los modelos estructurales en empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación y medio espacio 3D.

En base a los resultados, se puede hacer el siguiente análisis comparativo de los periodos de vibración de los modelos estructurales del módulo E.

Los modelos estructurales de Winkler y Pasternak registraron mayores periodos en los primeros modos de vibración debido a la inclusión de mayor deformabilidad del suelo en sus modelos.

Para el primer modo se incrementa en un valor de 2.8 veces con respecto al empotramiento perfecto, para el modo 2 un incremento del valor en 4.3 veces con respecto al empotramiento perfecto, para el modo 3 un incremento de 3.3 veces con respecto al empotramiento perfecto, y para los modos 4, 5 y 6 se presenta valores similares.

3.9.2. Resultados de los periodos de vibración del módulo F

De manera similar al módulo E, a continuación, se presentan los resultados de los períodos de vibración obtenidos para el módulo estructural F, considerando y obviando los efectos de la interacción suelo–estructura en la fundación, realizados en el software RFEM 6.

3.9.2.1. Análisis modal - Periodos de vibración-Modelo 1 (Módulo F)

Figura 53

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 1, Módulo F)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	655.718	25.607	4.075	0.245
2	1363.102	36.920	5.876	0.170
3	3048.636	55.214	8.788	0.114
4	7695.575	87.724	13.962	0.072
5	12170.564	110.320	17.558	0.057
6	13938.047	118.060	18.790	0.053
7	14903.839	122.081	19.430	0.051
8	15102.562	122.892	19.559	0.051

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 1, el valor del periodo de la estructura es de 0.245 s para el módulo F.

3.9.2.2. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 2 (Módulo F)

Figura 54

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 2, Módulo F)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	259.827	16.119	2.565	0.390
2	1211.832	34.811	5.540	0.180
3	2581.323	50.807	8.086	0.124
4	7366.300	85.827	13.660	0.073
5	8743.360	93.506	14.882	0.067
6	13913.451	117.955	18.773	0.053
7	14574.234	120.724	19.214	0.052
8	15036.099	122.622	19.516	0.051

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 2, el valor del periodo de la estructura es de 0.390 s para el módulo F.

3.9.2.3. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 3 (Modulo F)

Figura 55

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 3, Módulo F)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	108.776	10.430	1.660	0.602
2	128.019	11.315	1.801	0.555
3	307.010	17.522	2.789	0.359
4	6702.180	81.867	13.030	0.077
5	7630.869	87.355	13.903	0.072
6	10976.741	104.770	16.675	0.060
7	11856.229	108.886	17.330	0.058
8	14716.597	121.312	19.307	0.052

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 3, el valor del periodo de la estructura es de 0.602 s para el módulo F.

3.9.2.4. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 4 (Módulo F)

Figura 56

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 4, Módulo F)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	79.137	8.896	1.416	0.706
2	127.366	11.286	1.796	0.557
3	269.187	16.407	2.611	0.383
4	6669.076	81.664	12.997	0.077
5	7595.073	87.150	13.870	0.072
6	10962.601	104.702	16.664	0.060

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 4, el valor del periodo de la estructura es de 0.706 s para el módulo F.

3.9.2.5. Análisis modal - Periodos de vibración - Modelo 5 (Módulo F)

Figura 57

Resultados de los periodos de vibración (Modelo 5, Módulo F)

Modo núm.	Valor propio λ [1/s²]	Frecuencia angular ω [rad/s]	Frecuencia natural f [Hz]	Periodo natural T [s]
	CC5 - ANALISIS MODAL			
1	87.037	9.329	1.485	0.673
2	92.939	9.641	1.534	0.652
3	154.651	12.436	1.979	0.505
4	849.110	29.139	4.638	0.216
5	988.559	31.441	5.004	0.200
6	1323.663	36.382	5.790	0.173

En la tabla se puede apreciar que, para el modelo estructural 5, el valor del periodo de la estructura es de 0.673 s para el módulo F.

3.9.2.6. Comparación de los primeros seis modos de vibración del Módulo F en los diferentes modelos estructurales

De igual manera, para el módulo F se llevó a cabo un análisis comparativo de los primeros períodos de vibración correspondientes a los cinco modelos estructurales evaluados. La comparación de los resultados de dicho análisis se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 13

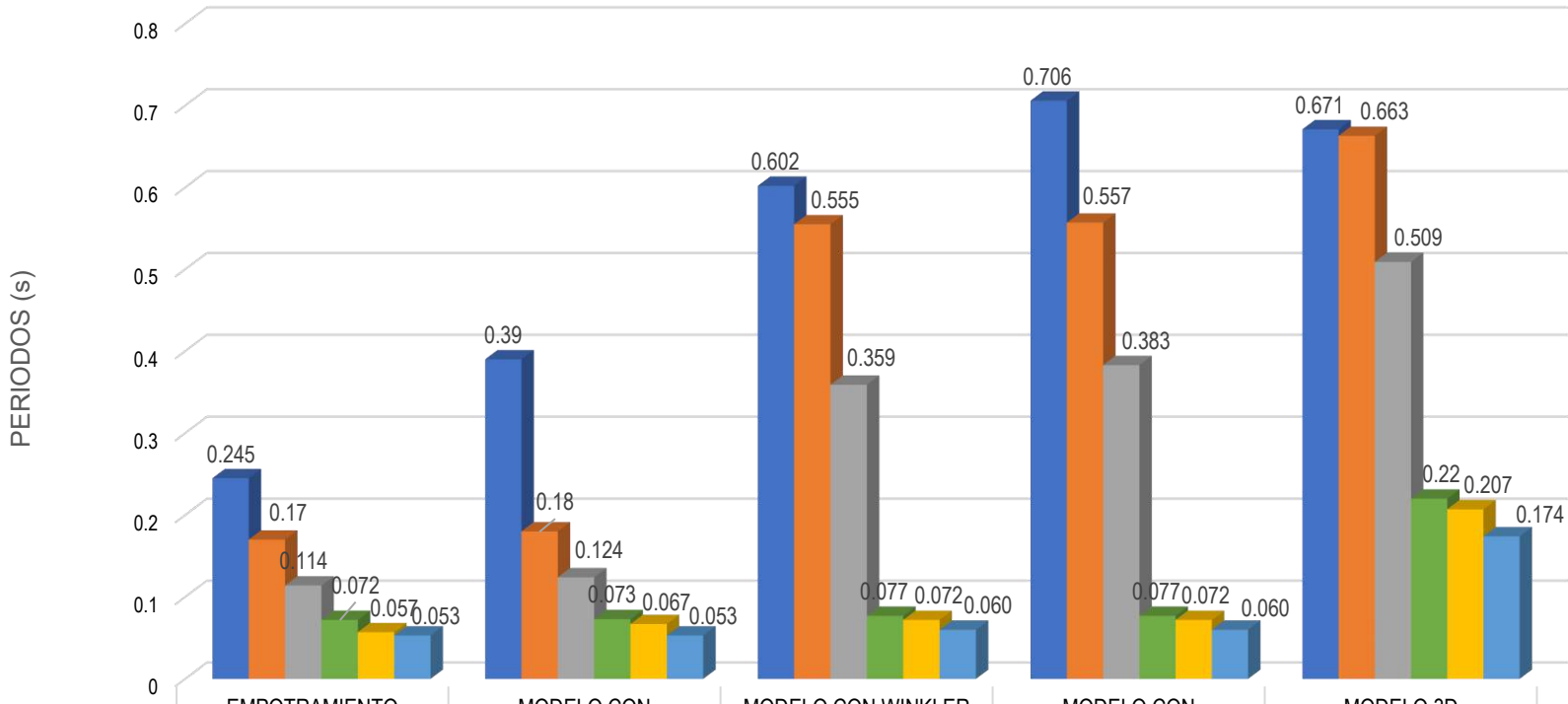
Comparación de los períodos de vibración obtenidos del análisis modal en los diferentes modelos estructurales del módulo F

Modelo	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5	Modo 6
Empotramiento perfecto	0.245	0.170	0.114	0.072	0.057	0.053
Empotramiento con cimentación	0.390	0.180	0.124	0.073	0.067	0.053
Winkler	0.602	0.555	0.359	0.077	0.072	0.060
Pasternak	0.706	0.557	0.383	0.077	0.072	0.060
Medio espacio 3D	0.671	0.663	0.509	0.220	0.207	0.174

Además, se elaboró un gráfico comparativo que se muestra a continuación.

Figura 58

Comparación modal de los periodos de vibración obtenidos para el módulo F en los cinco modelos estructurales analizados



	EMPOTRAMIENTO PERFECTO	MODELO CON CIMENTACIÓN	MODELO CON WINKLER	MODELO CON PASTERNAK	MODELO 3D
MODO NUM.1	0.245	0.39	0.602	0.706	0.671
MODO NUM.2	0.17	0.18	0.555	0.557	0.663
MODO NUM.3	0.114	0.124	0.359	0.383	0.509
MODO NUM.4	0.072	0.073	0.077	0.077	0.22
MODO NUM.5	0.057	0.067	0.072	0.072	0.207
MODO NUM.6	0.053	0.053	0.060	0.060	0.174

En base a los resultados de la Tabla 13 y la Figura 58, se presentan los resultados obtenidos de los periodos según el modelo utilizado para el módulo F:

- Modo 1

El modelo estructural de empotramiento perfecto presentó el periodo más corto (0.245 s), reflejando la mayor rigidez estructural. El modelo empotramiento con cimentación incremento el periodo a 0.390 s.

Winkler: 0.602 s, Pasternak: 0.706 s, es el mayor periodo debido a la mayor deformabilidad. Y el modelo del Medio espacio 3D: 0.671 s, indicando una respuesta intermedia con mayor realismo dinámico.

- Modo 2

En el segundo modo, el modelo estructural de empotramiento perfecto mostro nuevamente el menor periodo (0.170 s). El modelo estructural de empotramiento con cimentación incrementó ligeramente el periodo a 0.180 s.

Los modelos de Winkler y Pasternak presentaron valores similares (0.555 s y 0.557 s, respectivamente). El modelo del medio espacio 3D mostró un incremento notable, alcanzando 0.663 s, destacando su mayor capacidad para representar las deformaciones del suelo.

- Modos 3 a 6

Modo 3: Winkler y Pasternak tienen valores similares (0.359 s y 0.383 s, respectivamente), mientras que el medio espacio 3D es significativamente más alto (0.509 s).

Modo 4 a 6: Los modelos estructurales Winkler y Pasternak se estabilizan alrededor de valores cercanos (0.077 s a 0.060 s). Por otro lado, el medio espacio 3D

muestra incrementos en todos los modos posteriores, con periodos de hasta 0.220 s en el modo 4 y 0.174 s en el modo 6.

En base a los resultados, se puede hacer el siguiente análisis comparativo de los periodos de vibración de los modelos estructurales del módulo F.

Los modelos de Winkler y Pasternak incrementan significativamente los periodos en los primeros tres modos debido a la flexibilidad del suelo.

Para el primer modo se incrementa en un valor de 2.9 veces con respecto al empotramiento perfecto con el modelo Pasternak. Para el modo 2 refleja un incremento del valor en 3.9 veces con respecto al empotramiento perfecto. Para el modo 3 un incremento de 4.5 veces con respecto al empotramiento perfecto. Para el modo 4 se refleja un incremento de 4 veces para el modelo medio espacio 3D. Para los modos 5 y 6 se presenta valores similares.

3.9.3. Fuerzas internas y momentos flectores del módulo E

En este apartado se presentan y analizan las fuerzas internas y los momentos flectores desarrollados en los elementos estructurales del módulo E de la institución educativa N° 82319 – Pampa Cochabamba. El estudio se centró en la evaluación de los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores que se generaron en los pilares y vigas de los cinco modelos estructurales analizados: empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación, modelo de Winkler, modelo de Pasternak y modelo de medio espacio 3D. La finalidad de este análisis fue determinar cómo varían las demandas internas cuando se considera la interacción suelo-estructura (ISE), en comparación con los modelos tradicionales de base rígida. Para ello, se emplearon modelos dinámicos espectrales conforme a la Norma Técnica E.030, utilizando el software RFEM 6.

3.9.3.1. Fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores – Modelo 1 Empotramiento perfecto – Módulo E

Figura 59

Diagrama de fuerzas axiales en placas Eje A (Tn) (Modelo 1, Módulo E)

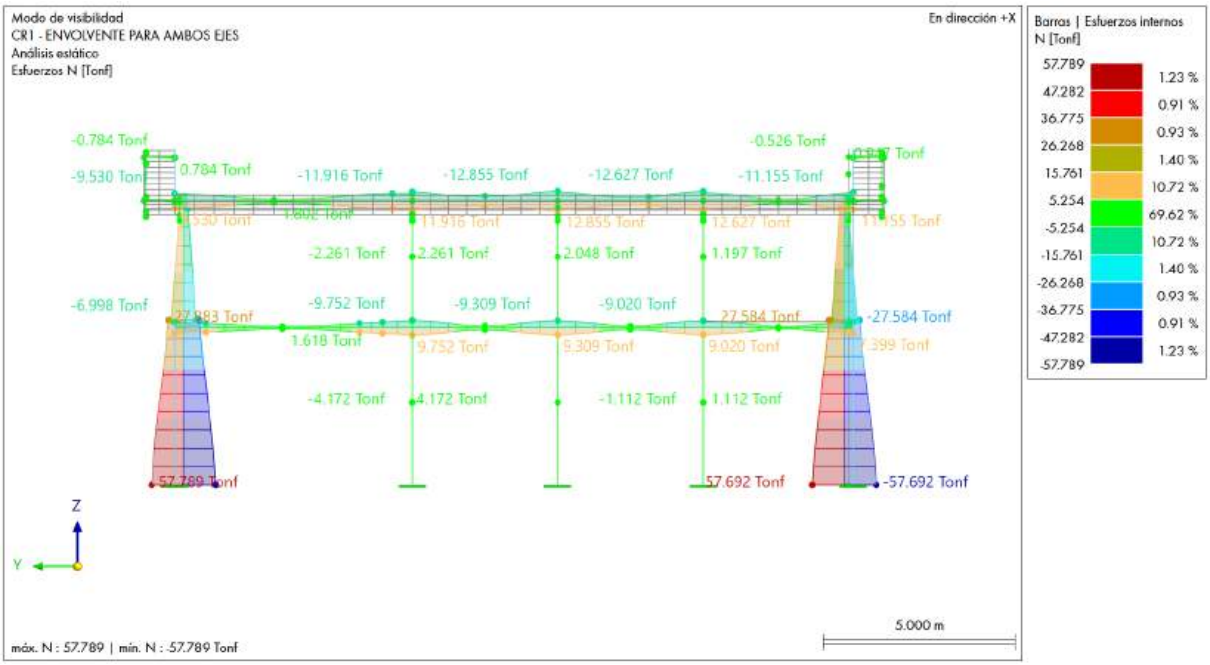


Figura 60

Diagrama de fuerzas cortantes Eje A en placas (Tn) (Modelo 1, Módulo E)

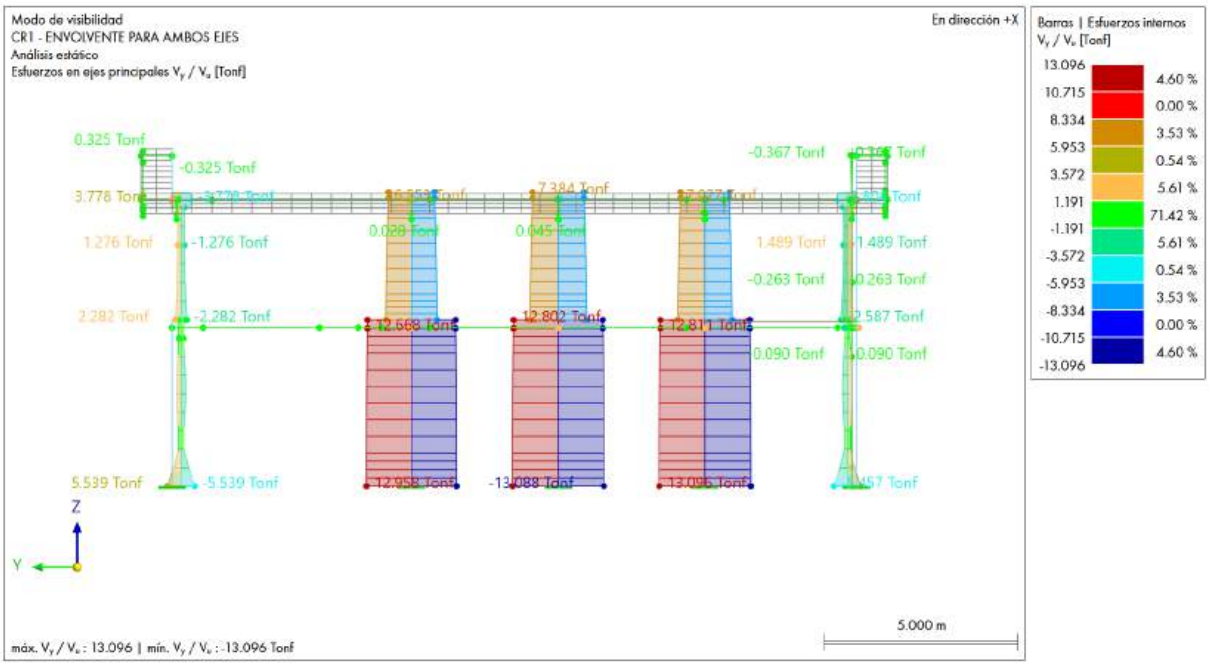


Figura 61

Diagrama de fuerzas cortantes Eje A en columnas (Tn) (Modelo 1, Módulo E)

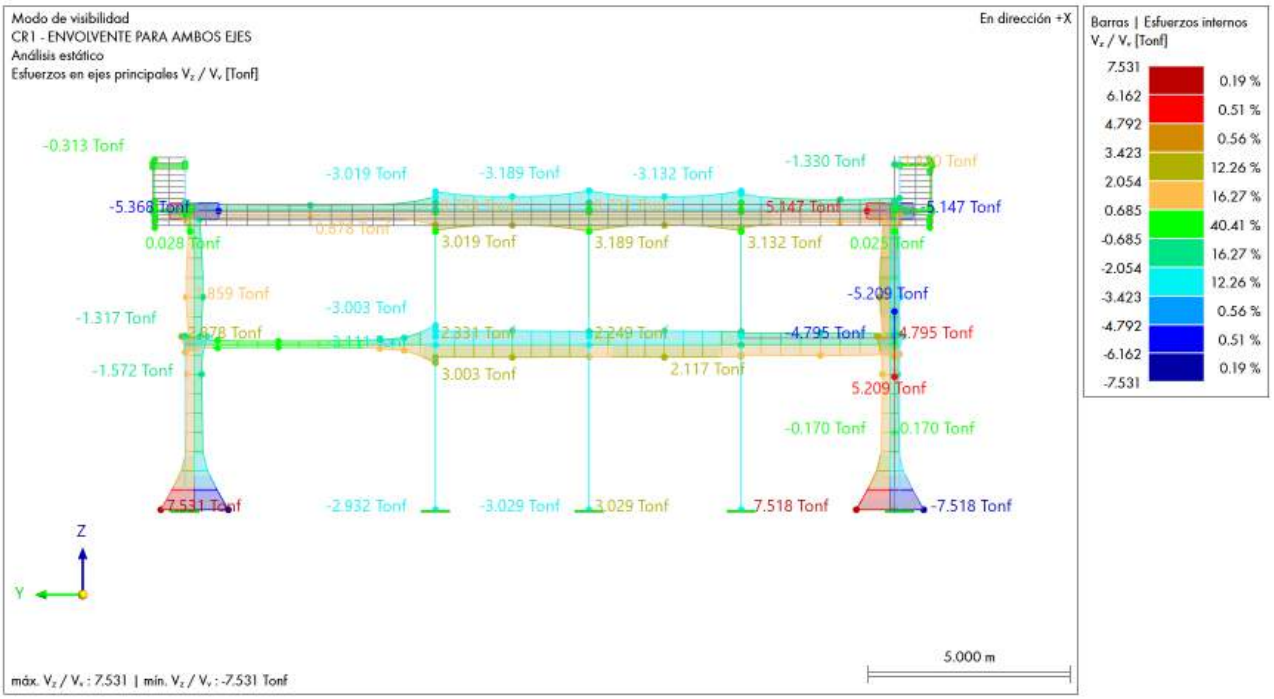


Figura 62

Diagrama de momentos flectores Eje A en columnas (Tn) (Modelo 1, Módulo E)

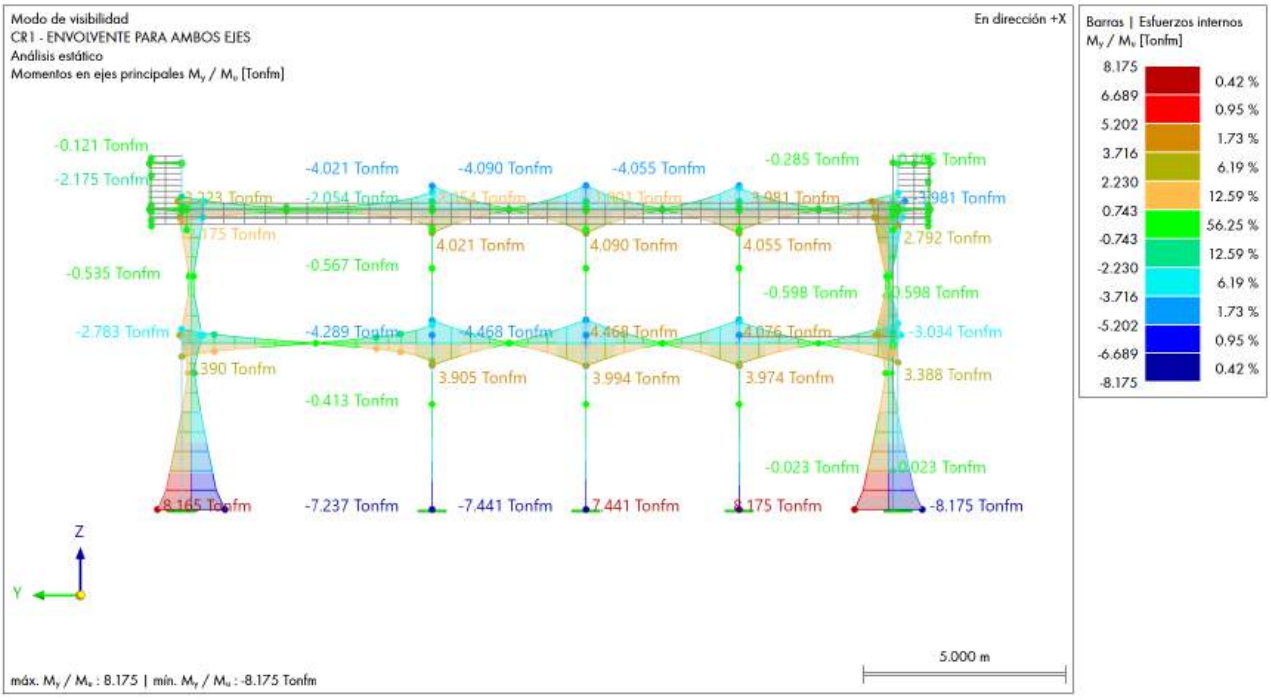
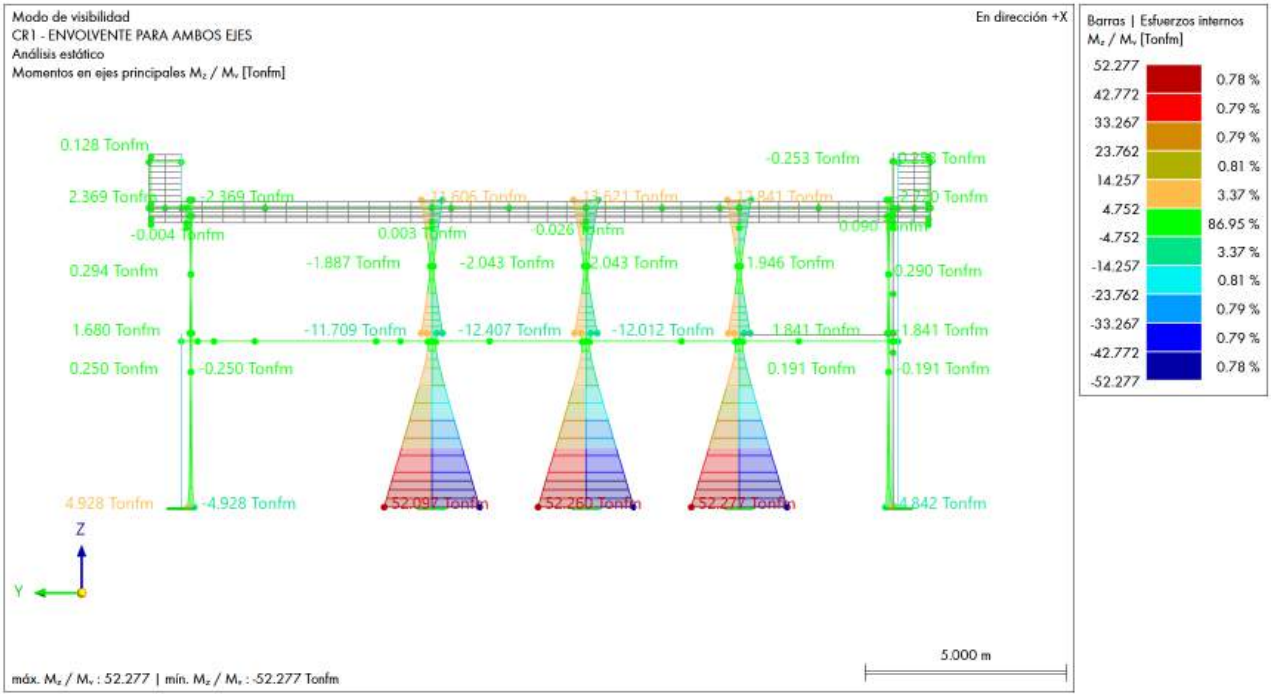


Figura 63

Diagrama de momentos flectores en placas del Eje A (Tn) (Modelo 1, Módulo E)



3.9.3.2. Análisis comparativo de esfuerzos internos en los modelos estructurales del Módulo E

Se realizó los análisis comparativos de los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores de los cinco modelos estructurales en estudio: Empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación, modelo Winkler, modelo Pasternak y medio espacio 3D para el módulo E. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas y gráficos.

3.9.3.3. Esfuerzos axiales del módulo E

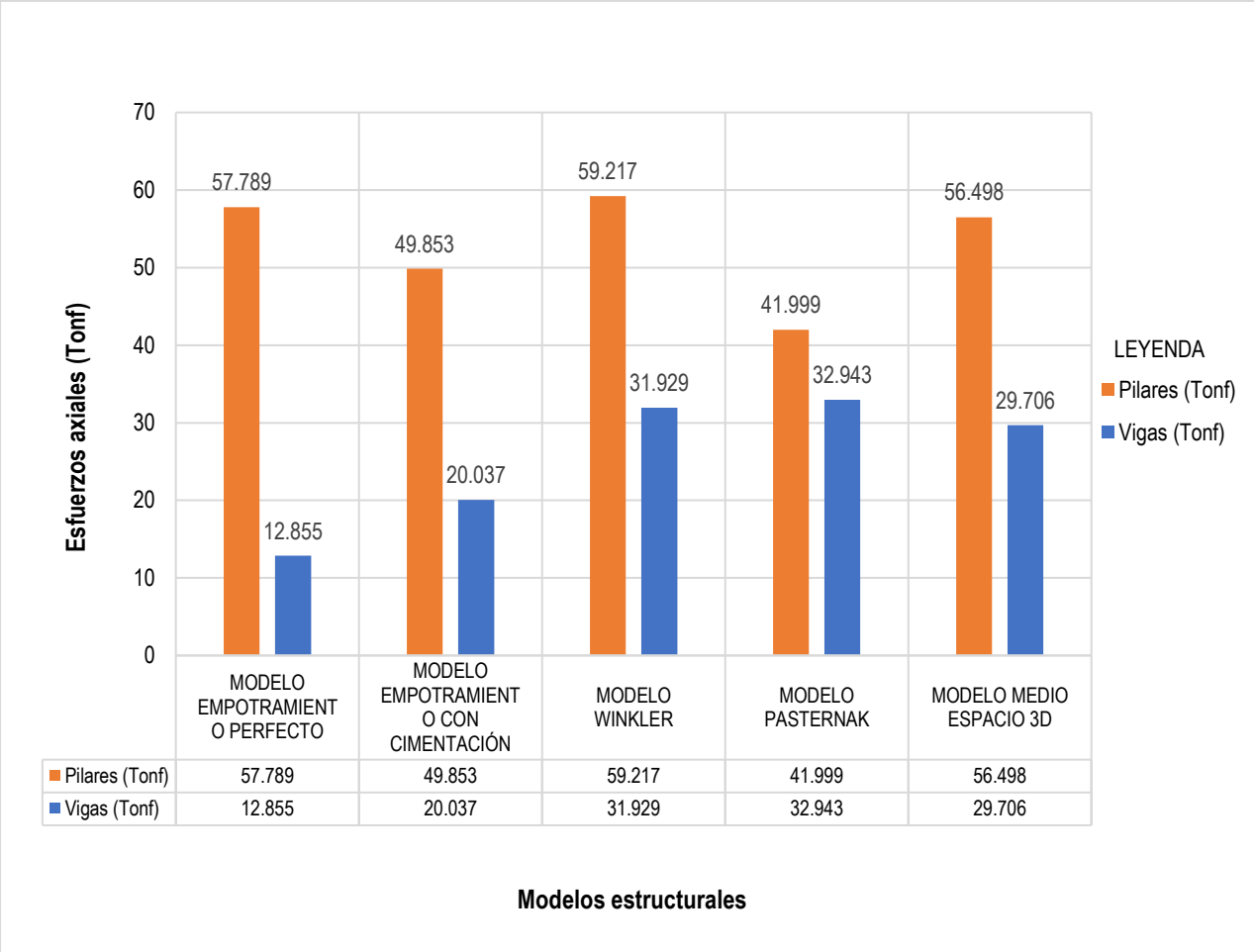
Tabla 14

Comparación de los esfuerzos axiales de los modelos del módulo E

Modelo estructural	Pilares (Tonf)	Vigas (Tonf)
Empotramiento perfecto	57.789	12.855
Empotramiento con cimentación	49.853	20.037
Winkler	59.217	31.929
Pasternak	41.999	32.943
Medio espacio 3D	56.498	29.706

Figura 64

Gráfico comparativo de los esfuerzos axiales en placas y vigas del módulo E según el modelo estructural



En base a los resultados mostrados en la Tabla 14 y la Figura 64 se analiza lo siguiente:

- Esfuerzos axiales en pilares

El modelo con empotramiento perfecto registro un esfuerzo axial en los pilares de 57.789 Tonf, similar al medio espacio 3D (56.498 Tonf) y al modelo Winkler (59.217 Tonf).

El modelo empotramiento con cimentación mostró un esfuerzo menor (49.853 Tonf), mientras que el modelo Pasternak presentó el valor más bajo (41.999 Tonf), indicando mayor flexibilidad del suelo y redistribución de esfuerzos.

- Esfuerzos Axiales en Vigas

El modelo empotramiento perfecto tuvo el menor esfuerzo axial en las vigas (12.855 Tonf), reflejando una rigidez en las conexiones estructurales.

Los esfuerzos axiales más altos se observaron en los modelos Pasternak (32.943 Tonf) y Winkler (31.929 Tonf), seguidos por el medio espacio 3D (29.706 Tonf). Esto resalta como la inclusión de la flexibilidad del suelo afecta la respuesta de las vigas.

El modelo empotramiento con cimentación presento un valor intermedio (20.037 Tonf), mostrando una interacción parcial entre suelo y cimentación.

En base a estos resultados, los modelos más rígidos (empotramiento perfecto y medio espacio 3D) concentran mayores esfuerzos en los pilares y menores esfuerzos en las vigas.

En contraste, los modelos que incluyen flexibilidad del suelo (Winkler y Pasternak) redistribuyen los esfuerzos, incrementando las cargas en las vigas.

El empotramiento con cimentación actúa como un caso intermedio, con valores moderados tanto en pilares como en vigas.

Tabla 15

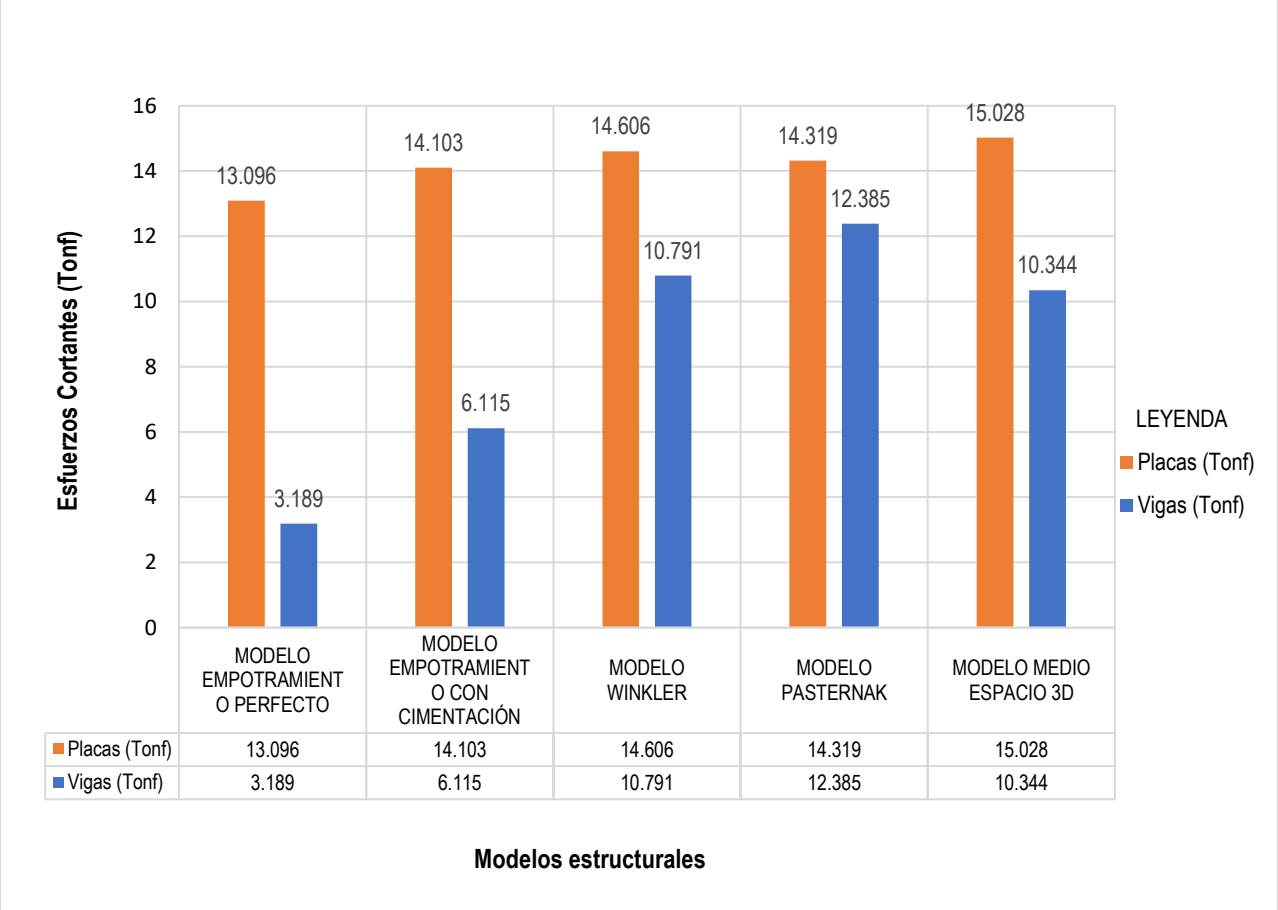
Comparación de los esfuerzos cortantes en placas y vigas según los modelos estructurales del módulo E

Modelo estructural	Placas (Tonf)	Vigas (Tonf)
Empotramiento perfecto	13.096	3.189
Empotramiento con cimentación	14.103	6.115
Winkler	14.606	10.791
Pasternak	14.319	12.385
Medio espacio 3D	15.028	10.344

Además, se elaboró un gráfico comparativo que permite visualizar la variación de los períodos de vibración obtenidos en los distintos modelos estructurales. Dicho gráfico se presenta a continuación.

Figura 65

Gráfico comparativo de los esfuerzos cortantes en placas y vigas del módulo E según el modelo estructural



El análisis de los esfuerzos cortantes en placas y vigas de los diferentes modelos estructurales muestra Tabla 15 y la Figura 65 como la interacción suelo-estructura afecta la transferencia y distribución de cargas en los elementos estructurales. Los resultados más destacados se presentan a continuación:

- Esfuerzos cortantes en Placas

El modelo de empotramiento perfecto presento el esfuerzo cortante más bajo en placas (13.096 Tonf), reflejando su alta rigidez y la ausencia de interacción suelo-estructura.

Los demás modelos incrementaron progresivamente los esfuerzos, en función de la flexibilidad del suelo:

Empotramiento con cimentación: 14.103 Tonf, Winkler: 14.606 Tonf, Pasternak: 14.319 Tonf, Medio espacio 3D: 15.028 Tonf, el valor más alto, indicando mayor transmisión de esfuerzos hacia las placas debido a la interacción suelo-estructura.

- Esfuerzos Cortantes en Vigas

El modelo empotramiento perfecto también mostro el esfuerzo más bajo en vigas (3.189 Tonf), debido a la simplificación de la rigidez infinita en las conexiones al suelo.

Los modelos que incluyen interacción suelo-estructura presentan incrementos significativos:

Empotramiento con cimentación: 6.115 Tonf, Winkler: 10.791 Tonf, Pasternak: 12.385 Tonf, el valor más alto, Medio espacio 3D: 10.344 Tonf, cercano a los modelos de Winkler y Pasternak.

En base a los resultados, se evidenció que los modelos que incluyen flexibilidad del suelo (Winkler, Pasternak y medio espacio 3D) incrementan los esfuerzos cortantes en placas entre un 11% y 14% respecto al empotramiento perfecto.

Los resultados para las vigas indican que los modelos Winkler, Pasternak y medio espacio 3D muestran esfuerzos en vigas más de cuatro veces mayores que el modelo de empotramiento perfecto, evidenciando una mayor redistribución de cargas hacia los elementos horizontales.

El empotramiento con cimentación se comporta como un caso intermedio, representando una transición entre modelos simplificados y avanzados.

Tabla 16

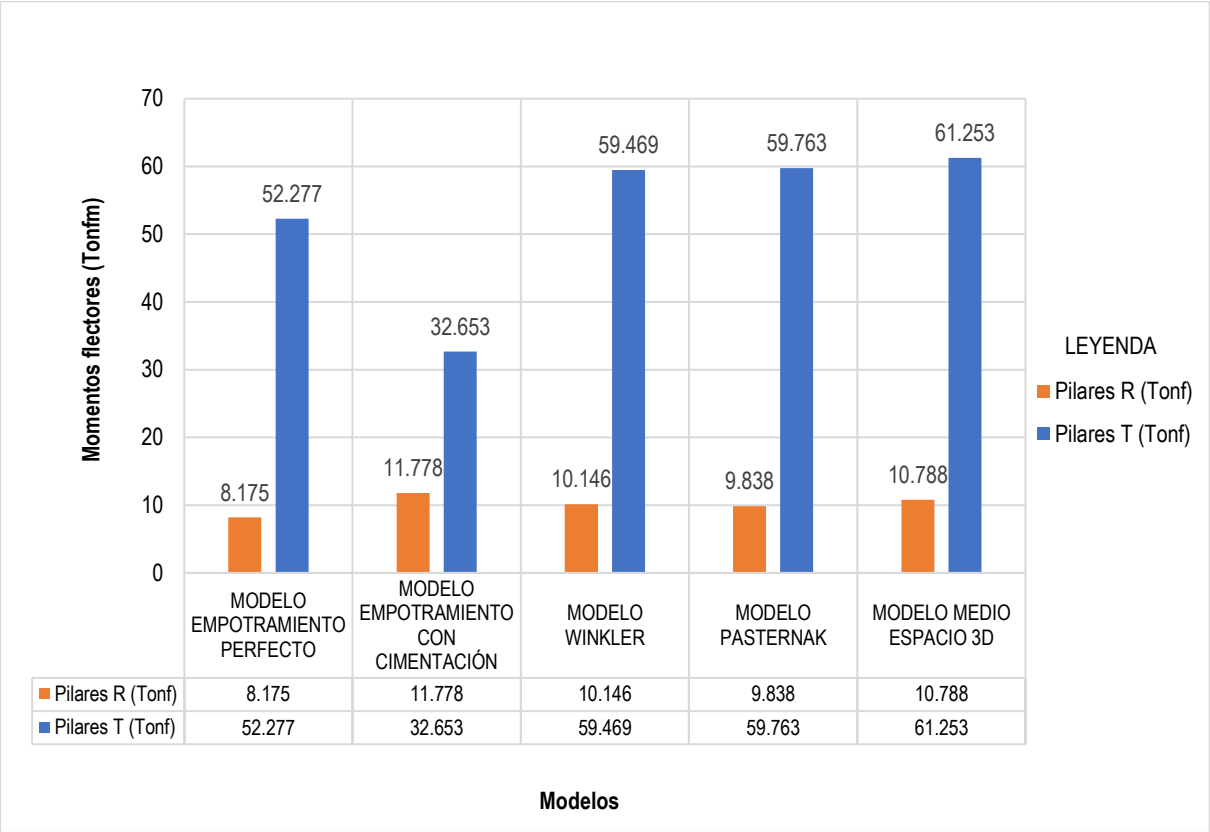
Comparación de los momentos flectores de los modelos del módulo E

Modelo estructural	Pilares R (Tonfm)	Pilares T (Tonfm)
Empotramiento perfecto	8.175	52.277
Empotramiento con cimentación	11.778	32.653
Winkler	10.146	59.469
Pasternak	9.838	59.763
Medio espacio 3D	10.788	61.253

Además, se elaboró un gráfico comparativo que permite visualizar la variación de los períodos de vibración obtenidos en los distintos modelos estructurales. Dicho gráfico se presenta a continuación.

Figura 66

Gráfico de barras - Comparación de los momentos flectores del módulo E



En base a los resultados de la Tabla 16 y la Figura 74, el análisis de los momentos flectores en pilares sometidos a esfuerzos por flexión reveló variaciones significativas según el modelo empleado. Este comportamiento está condicionado por las características de rigidez y flexibilidad de los distintos modelos estructurales y la interacción suelo estructura. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Momentos flectores en pilares rectangulares

El modelo de empotramiento perfecto mostró el menor momento flector en los pilares rectangulares (8.175 Tonfm), debido a la rigidez infinita asumida en las conexiones con el suelo.

Los modelos con interacción suelo-estructura presentan incrementos significativos:

Empotramiento con cimentación: 11.778 Tonfm, un incremento moderado respecto al empotramiento perfecto.

Winkler:10.146 Tonfm, Pasternak:9.838 Tonfm, el valor más alto. Medio espacio 3D: 10.788 Tonfm, cerca de Winkler y Pasternak, reflejando una distribución más realista de los momentos.

Momentos flectores en pilares tipo T

En los pilares T, el modelo estructural de empotramiento perfecto mostro un momento considerablemente alto (52.277 Tonfm), debido a la transferencia rígida de cargas.

En contraste, los modelos que incluyen interacción suelo estructura distribuyen de manera más uniforme:

Empotramiento con cimentación: 32.653 Tonfm, con una reducción significativa respecto al empotramiento perfecto.

Winkler: 59.469 Tonfm, Pasternak: 59.763 Tonfm, el valor más alto, asociado con un suelo más flexible. Medio espacio 3D: 61.253 Tonfm, el mayor valor, reflejando las complejidades tridimensionales del sistema de interacción suelo-estructura.

Según los resultados sobre los pilares rectangulares: Los modelos de Winkler, Pasternak y medio espacio 3D presentan momentos flectores en pilares rectangulares de casi el 31% que los modelos de empotramiento perfecto, debido a la interacción del suelo.

Pilares tipo T: El empotramiento perfecto subestima los momentos en comparación con los modelos avanzados, donde Winkler, Pasternak y medio espacio 3D incrementan los momentos transversales hasta un 17% más alto.

3.9.4. Fuerzas internas y momentos flectores Módulo F

De manera similar al módulo E, en esta sección se analizaron las fuerzas internas (esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores) del módulo F de la institución educativa N° 82319 – Pampa Cochabamba. Se compararon los cinco modelos estructurales evaluados: empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación, modelo de Winkler, modelo de Pasternak y medio espacio 3D, a fin de identificar la influencia de la interacción suelo-estructura (ISE) sobre las demandas estructurales.

3.9.4.1. Fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores - Modelo 1 Empotramiento perfecto - Módulo F

Figura 67

Diagrama de fuerzas axiales Eje A (Tn)(Modelo 1, Módulo F)

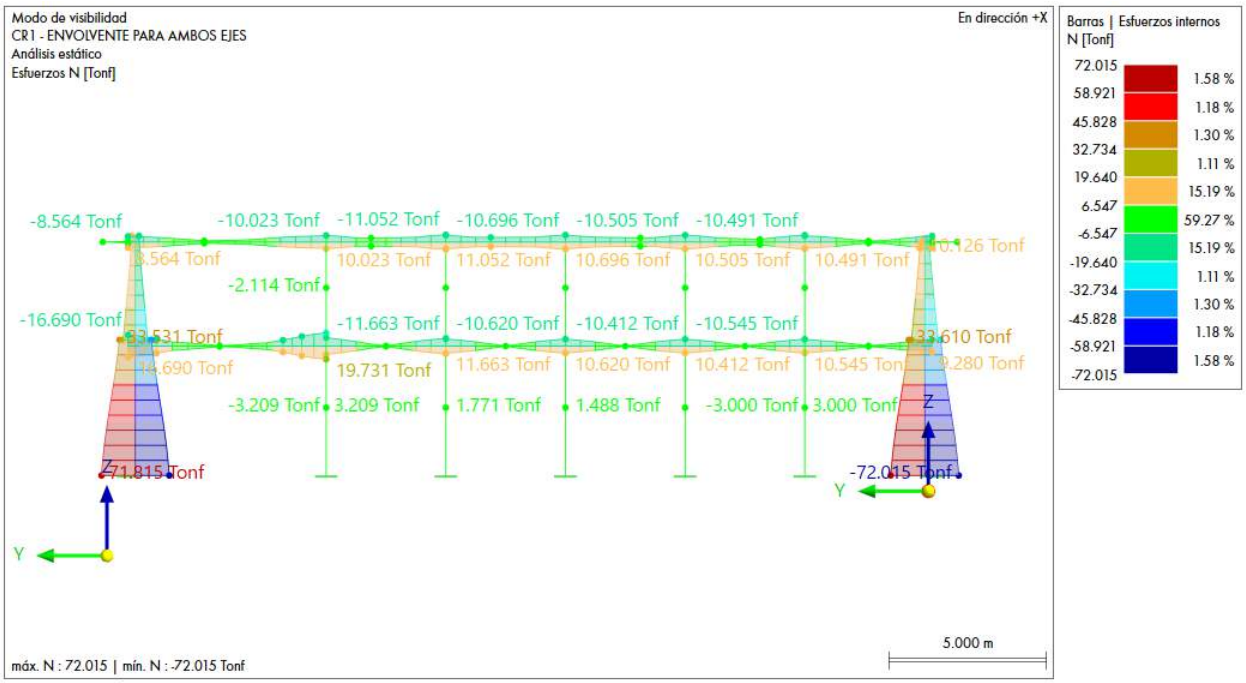


Figura 68

Diagrama de fuerzas cortantes en placas del Eje A (Tn)(Modelo 1, Módulo F)

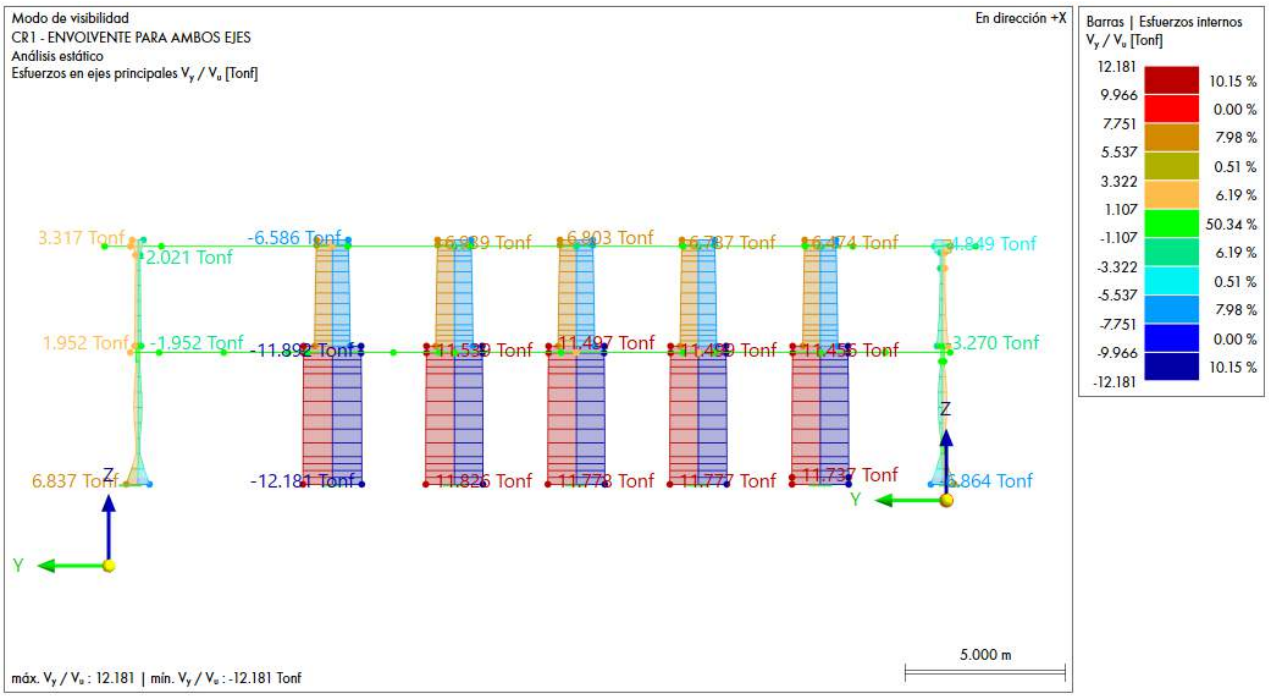


Figura 69

Diagrama de fuerzas cortantes en columnas del Eje A (Tn)(Modelo 1, Módulo F)

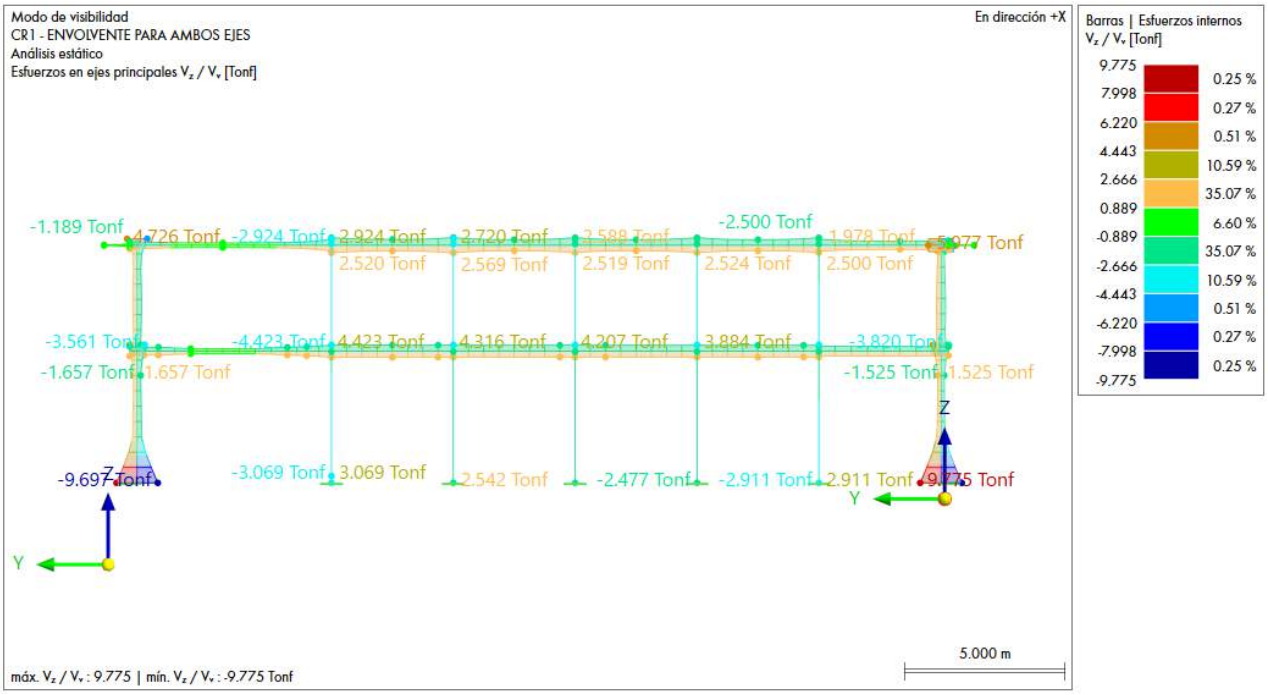


Figura 70

Diagrama de momentos flectores Eje A en columnas (Tn)(Modelo 1, Módulo F)

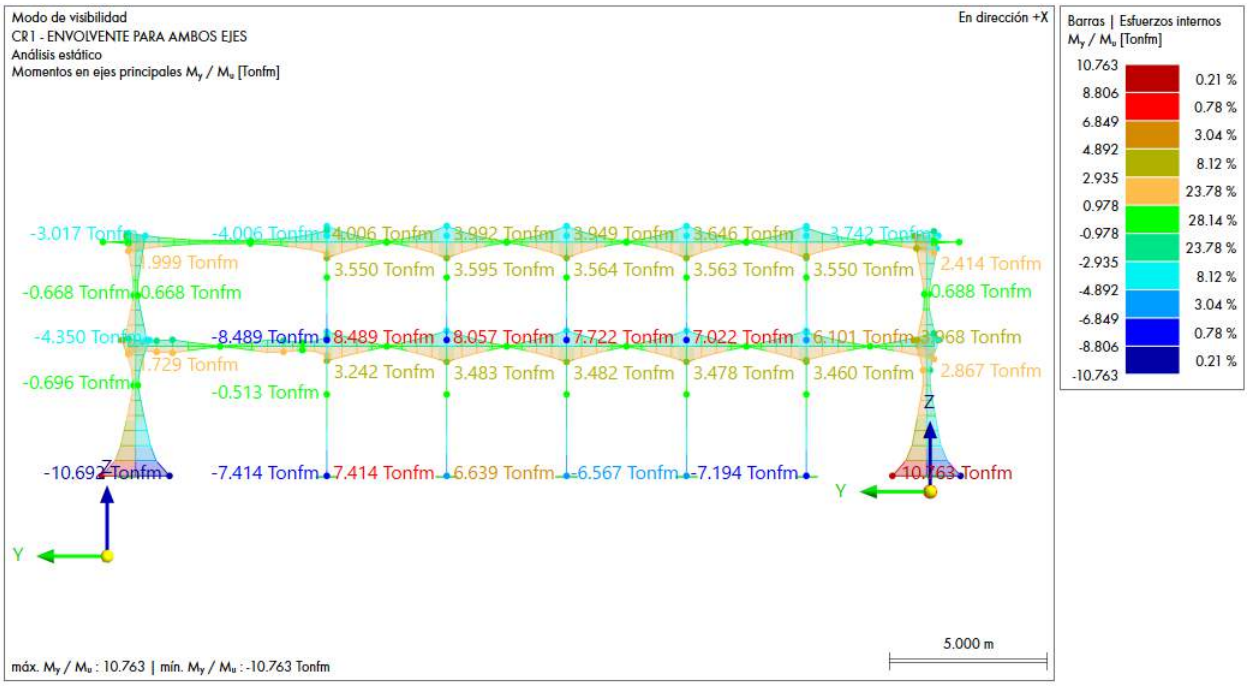
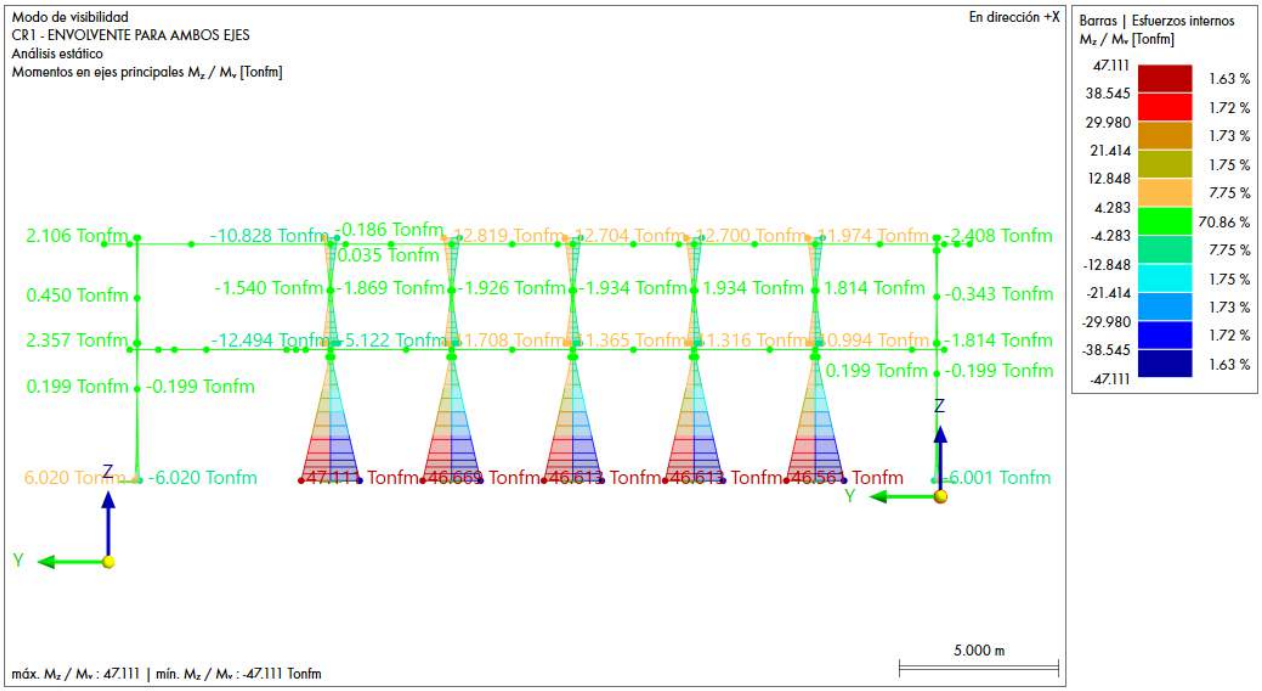


Figura 71

Diagrama de momentos flectores en placas del Eje A (Tn) (Modelo 1, Módulo F)



3.9.4.2. Análisis comparativo de esfuerzos internos en los modelos estructurales del Módulo F

Se realizó los análisis comparativos de los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores de los cinco modelos estructurales en estudio: Empotramiento perfecto, empotramiento con cimentación, modelo Winkler, modelo Pasternak y medio espacio 3D para el módulo F. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas y gráficos.

Tabla 17

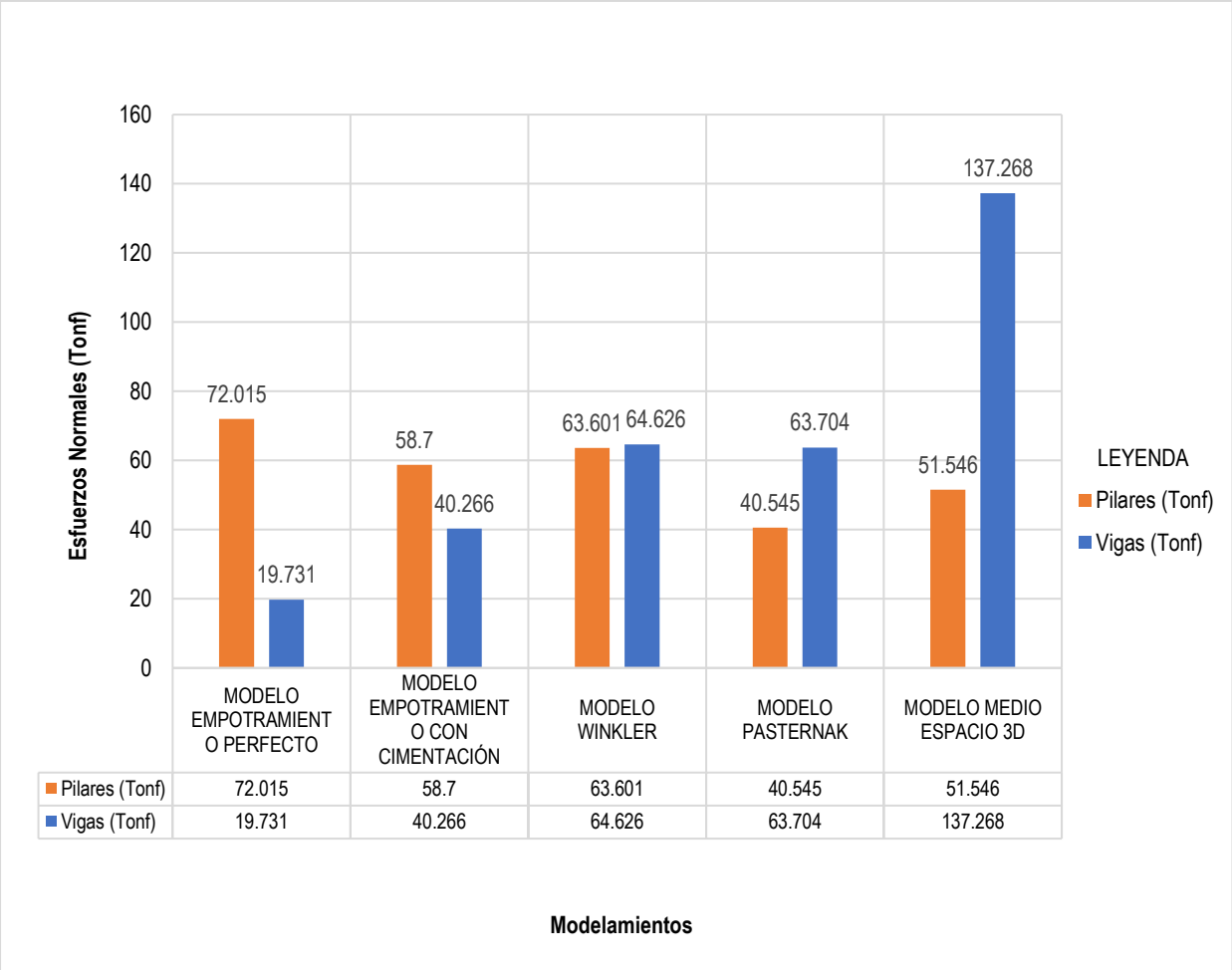
Comparación de los esfuerzos axiales de los modelos del módulo F

Modelo	Pilares (Tonf)	Vigas (Tonf)
Empotramiento perfecto	72.015	19.731
Empotramiento con cimentación	58.700	40.266
Winkler	63.601	64.626
Pasternak	40.545	63.704
Medio espacio 3D	51.546	137.268

Además, se elaboró un gráfico comparativo que permite visualizar la variación de los períodos de vibración obtenidos en los distintos modelos estructurales. Dicho gráfico se presenta a continuación.

Figura 72

Gráfico comparativo de los esfuerzos axiales en placas y vigas del módulo F según el modelo estructural



En base a los resultados mostrados en la Tabla 17 y la Figura 80, el análisis de los esfuerzos axiales en pilares y vigas de los diferentes modelos estructurales evidenció como las condiciones de interacción suelo estructura afectan la distribución de las cargas axiales en los elementos estructurales. Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

Esfuerzos axiales en pilares: El modelo con empotramiento perfecto presentó el mayor esfuerzo axial en los pilares (72.015 Tonf), lo cual es consistente con su alta rigidez y la concentración de esfuerzo en estos elementos.

Los modelos con interacción suelo-estructura muestran una reducción significativa en los esfuerzos axiales en los pilares:

Empotramiento con cimentación: 58.7 Tonf.

Winkler: 63.601 Tonf, aun elevado pero menor al empotramiento perfecto.

Pasternak: 40.545 Tonf, el valor más bajo debido a la mayor flexibilidad del suelo.

Medio espacio 3D: 51.546 Tonf, con una distribución intermedia entre los modelos flexibles y rígidos.

Esfuerzos axiales en vigas: En las vigas, el modelo de empotramiento perfecto presentó el menor esfuerzo axial (19.731 Tonf), al asumir una transferencia mínima de carga hacia estos.

Los modelos que consideran flexibilidad del suelo muestran incrementos significativos en los esfuerzos axiales de las vigas:

Empotramiento con cimentación: 40.266 Tonf, más del doble respecto al empotramiento perfecto.

Winkler: 64.626 Tonf, el segundo valor más alto, Pasternak: 63.704 Tonf, con un comportamiento similar al modelo Winkler, Medio espacio 3D: 137.268 Tonf, el valor más alto, indicando una mayor transferencia de carga hacia las vigas en este modelo tridimensional.

Según los resultados, se tiene que para los pilares: los modelos que incorporan flexibilidad del suelo (Pasternak y medio espacio 3D) reducen los esfuerzos axiales en pilares hasta un 77% en comparación con el empotramiento perfecto, lo que refleja una redistribución de las cargas hacia otros elementos.

Vigas: Los esfuerzos en vigas son significativamente mayores en los modelos Winkler, Pasternak y medio espacio 3D, mostrando incrementos de hasta 7 veces más que en el empotramiento perfecto.

Empotramiento con cimentación: Actúa como un caso de transición mostrando valores intermedios tanto en pilares como en vigas.

Tabla 18

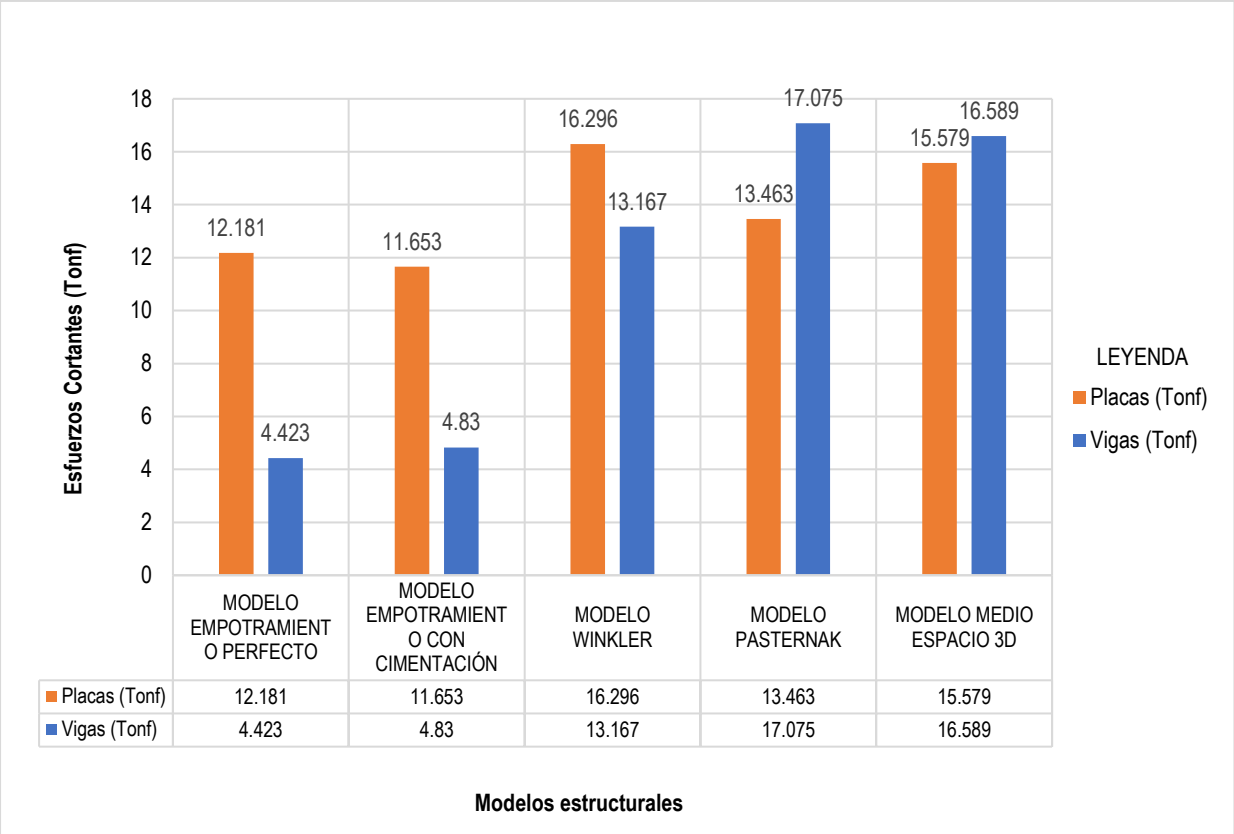
Comparación de los esfuerzos cortantes en placas y vigas según los modelos del módulo F

Modelo	Placas (Tonf)	Vigas (Tonf)
Empotramiento perfecto	12.181	4.423
Empotramiento con cimentación	11.653	4.830
Winkler	16.296	13.167
Pasternak	13.463	17.075
Medio espacio 3D	15.579	16.589

Además, se elaboró un gráfico comparativo que permite visualizar la variación de los períodos de vibración obtenidos en los distintos modelos estructurales. Dicho gráfico se presenta a continuación.

Figura 73

Gráfico comparativo de los esfuerzos cortantes en placas y vigas del módulo F según el modelo estructural



Según se muestra en la Tabla 18 y la Figura 73, el análisis de los esfuerzos cortantes en placas y vigas según los modelos estructurales destacó variaciones significativas, reflejando como la interacción suelo estructura influye en la transferencia de esfuerzos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Esfuerzos cortantes en Placas: El modelamiento con empotramiento perfecto registro un esfuerzo cortante en placas de 12.181 Tonf, uno de los valores más bajos debido a su alta rigidez.

El modelo de empotramiento con cimentación presentó un valor ligeramente inferior (11.653 Tonf), probablemente relacionado con una reducción de esfuerzos por interacción con el suelo.

Los modelos que consideran flexibilidad del suelo muestran un incremento en los esfuerzos:

Winkler:16.269 Tonf, Pasternak: 13.463 Tonf. Medio espacio 3D: 15.579 Tonf, el valor más alto, reflejando un incremento respecto al empotramiento perfecto.

Esfuerzo cortante en vigas: El modelo de empotramiento perfecto tuvo el menor esfuerzo cortante en vigas (4.423 Tonf), reflejando una transferencia limitada de cargas laterales.

El empotramiento con cimentación mostró un valor similar (4.830 Tonf), manteniendo una rigidez relativa en las conexiones.

Los modelos avanzados exhibieron un aumento significativo en los esfuerzos:

Winkler: 13.167 Tonf, incrementaron con respecto al empotramiento perfecto, Pasternak: 17.075 Tonf, el mayor valor. Medio espacio 3D:16.589 Tonf, cercano al modelo Pasternak, reflejando la complejidad tridimensional del sistema.

Según los resultados, se tiene que para las placas: los modelos Winkler, Pasternak y medio espacio 3D incrementan los esfuerzos cortantes en placas hasta un 36% en comparación con los modelos de empotramiento rígido.

Vigas: Los esfuerzos cortantes en vigas son más sensibles a la interacción suelo-estructura de hasta 3.75 veces en los modelos avanzados (Pasternak y medio espacio 3D) frente al empotramiento perfecto.

Empotramiento con cimentación: Actúa como un caso intermedio con valores cercanos al empotramiento perfecto, pero sin capturar el incremento de esfuerzos en los elementos flexibles.

Tabla 19

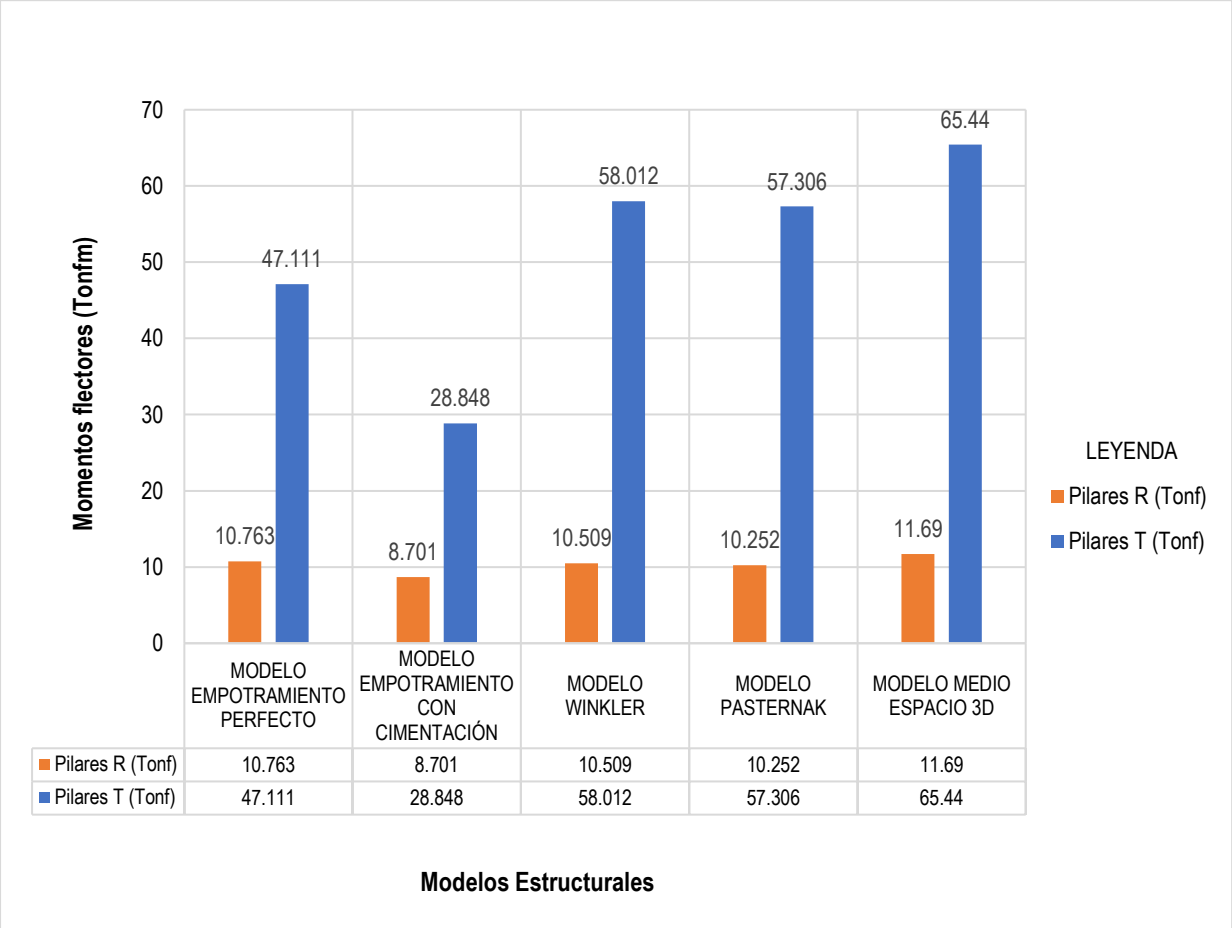
Comparación de los momentos flectores de los modelos del módulo F

Modelo	Pilares R (Tonfm)	Pilares T (Tonfm)
Empotramiento perfecto	10.763	47.111
Empotramiento con cimentación	8.701	28.848
Winkler	10.509	58.012
Pasternak	10.252	57.306
Medio espacio 3D	11.690	65.440

Además, se elaboró un gráfico comparativo que permite visualizar la variación de los períodos de vibración obtenidos en los distintos modelos estructurales. Dicho gráfico se presenta a continuación.

Figura 74

Gráfico comparativo de los momentos flectores en placas y vigas del módulo F según el modelo estructural



Según los resultados de la Tabla 19 y la Figura 74, el análisis de momentos flectores en pilares rectangulares y tipo T para los distintos modelos estructurales reflejó como las características de rigidez y flexibilidad afectan la distribución de momentos en los elementos verticales. A continuación, se presentan los resultados más destacados:

Momentos flectores en pilares rectangulares: El modelo con empotramiento perfecto presento el menor momento flector en pilares rectangulares (10.763 Tonfm), reflejando una rigidez alta y mínima interacción con el suelo.

El modelo de empotramiento con cimentación mostró 8.701 Tonfm, debido a la interacción parcial con el suelo.

Los modelos más flexibles presentaron valores significativamente más altos:

Winkler: 10.509 Tonfm, Pasternak: 10.252 Tonfm, Medio espacio 3D: 11.69 Tonfm, el valor más alto destacando la influencia de la flexibilidad del suelo, indicando una distribución más realista de los momentos en condiciones tridimensionales.

Momentos flectores en Pilares tipo T: En los pilares tipo T, el modelo estructural de empotramiento perfecto mostró un valor alto (47.111 Tonfm), reflejando una transferencia rígida de cargas hacia estos elementos.

El empotramiento con cimentación registró una reducción significativa en el momento (28.848 Tonfm), debido a la redistribución de cargas por la interacción suelo-estructura.

Los modelos avanzados presentaron los valores más altos:

Winkler: 58.012 Tonfm, Pasternak: 57.306 Tonfm, Medio espacio 3D: 65.440 Tonfm, el mayor valor, indicando una interacción tridimensional más precisa.

Según los resultados, se tiene que para los pilares rectangulares: Los modelos Winkler, Pasternak y medio espacio 3D incrementan los momentos en pilares rectangulares hasta un 8% respecto al empotramiento perfecto, reflejando una mayor flexibilidad del sistema estructural.

Pilares tipo T: Aunque el empotramiento perfecto presenta un momento significativo, los modelos avanzados (Winkler, Pasternak y medio espacio 3D) muestran un incremento de hasta un 39% en comparación.

Empotramiento con cimentación: Este modelo actúa como una transición, reduciendo los momentos en pilares tipo T y mostrando valores intermedios en pilares rectangulares.

3.9.5. Derivas laterales del Módulo E

En el presente apartado se desarrolló el análisis de las **derivas de entrepiso** del módulo E de la institución educativa Nº 82319 – Pampa Cochabamba, como parte fundamental de la evaluación del comportamiento estructural frente a cargas sísmicas. Este análisis permitió determinar las derivas laterales a partir de los desplazamientos relativos entre pisos consecutivos, obtenidos a través del modelamiento y análisis realizado en el software RFEM 6.

Se compararon los resultados obtenidos en los cinco modelos estructurales evaluados —desde el modelo con base empotrada hasta el modelo de medio espacio 3D— con el objetivo de analizar la influencia de la interacción suelo-estructura (ISE) en el incremento o reducción de dichas derivas.

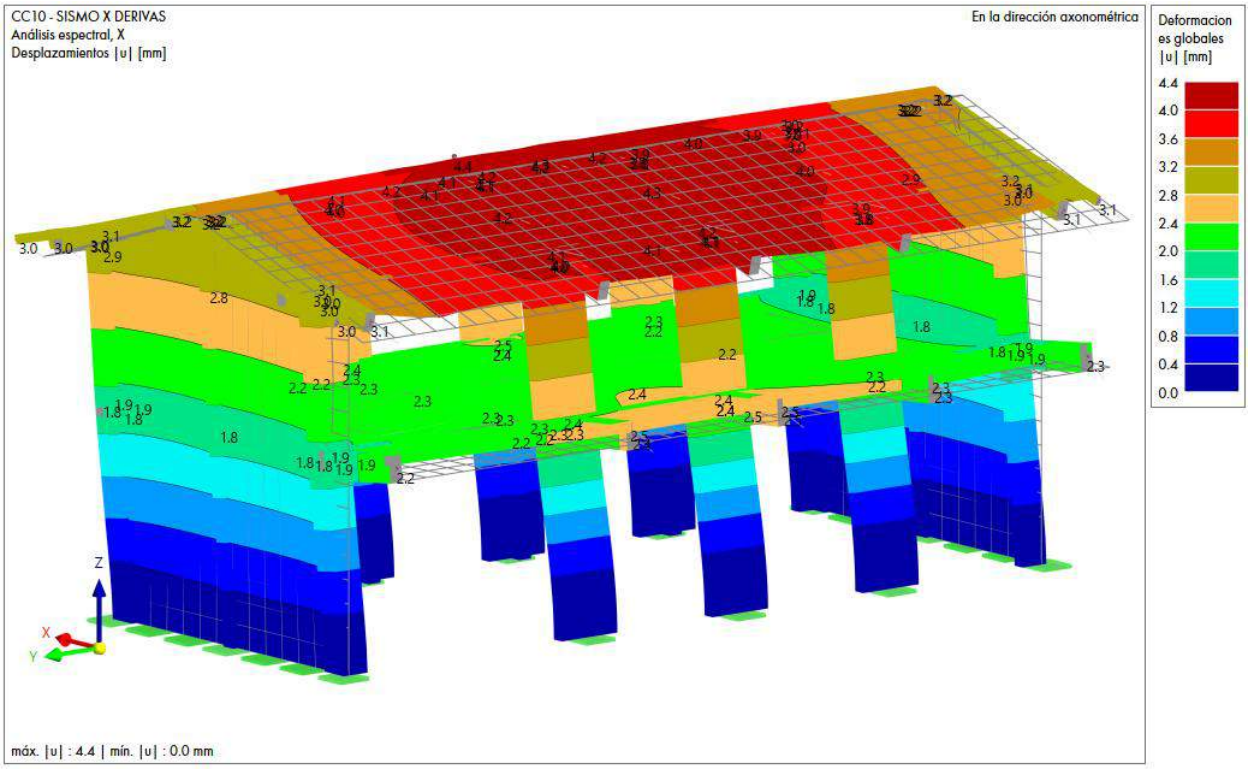
3.9.5.1. Desplazamientos máximos – Modelo 1 - Módulo E.

A continuación, se presentan los desplazamientos máximos obtenidos para el Modelo E bajo la hipótesis de empotramiento perfecto en la base, ante un evento sísmico en la dirección X. Este análisis fue realizado mediante un modelo dinámico modal espectral, siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica E.030.

Los resultados reflejan el comportamiento de la estructura sin considerar la flexibilidad del suelo, lo cual sirve como línea base para su comparación con los modelos que sí incluyen los efectos de la interacción suelo-estructura.

Figura 75

Desplazamientos máximos (mm) en dirección X (Modelo 1, Módulo E) en RFEM 6



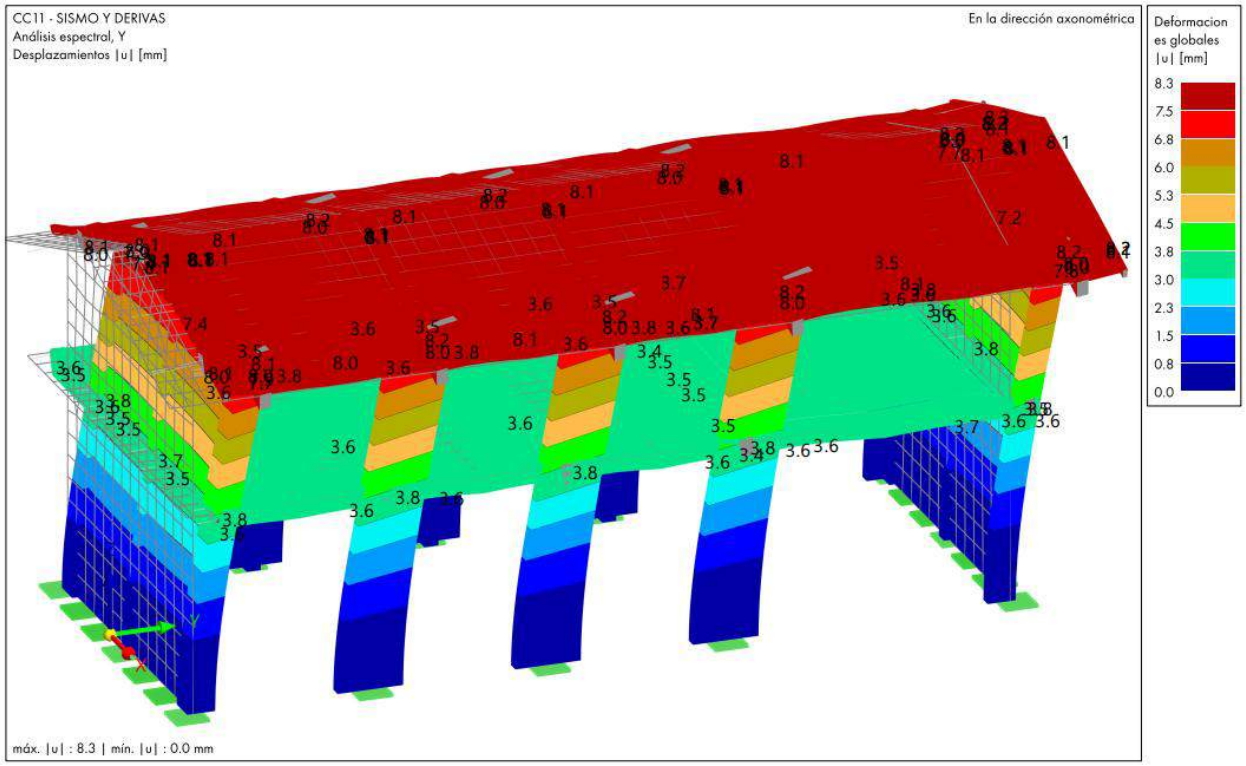
En la figura se puede observar que, para el modelo estructural 1 (empotramiento perfecto), el valor del desplazamiento máximo registrado en la estructura corresponde a 4.4 mm en el módulo E, ante una excitación sísmica en la dirección X. Este valor representa la respuesta de referencia sin considerar la

interacción suelo-estructura (ISE). De manera similar, se procederá a presentar y analizar los desplazamientos máximos obtenidos para los cinco modelos estructurales evaluados en este estudio, a fin de comparar el efecto de la ISE en el comportamiento dinámico de la edificación.

Asimismo, se presentan los desplazamientos máximos obtenidos para el Modelo E bajo la hipótesis de empotramiento perfecto en la base, ante un evento sísmico en la dirección Y. Este análisis fue realizado mediante un modelo dinámico modal espectral, siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica E.030.

Figura 76

Desplazamientos máximos (mm) en dirección Y (Modelo 1, Módulo E) en RFEM 6



En la figura se puede observar que, para el modelo estructural 1 (empotramiento perfecto), el valor del desplazamiento máximo registrado en la estructura corresponde a 8.3 mm en el módulo E, ante una excitación sísmica en la dirección Y.

Análisis comparativo de derivas de entrepiso en el eje X – Módulo E

Asimismo, se llevó a cabo el modelamiento y análisis de las derivas de entrepiso para los demás modelos estructurales. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, organizados en la tabla y gráfico respectivos, con el fin de facilitar su interpretación comparativa.

Tabla 20

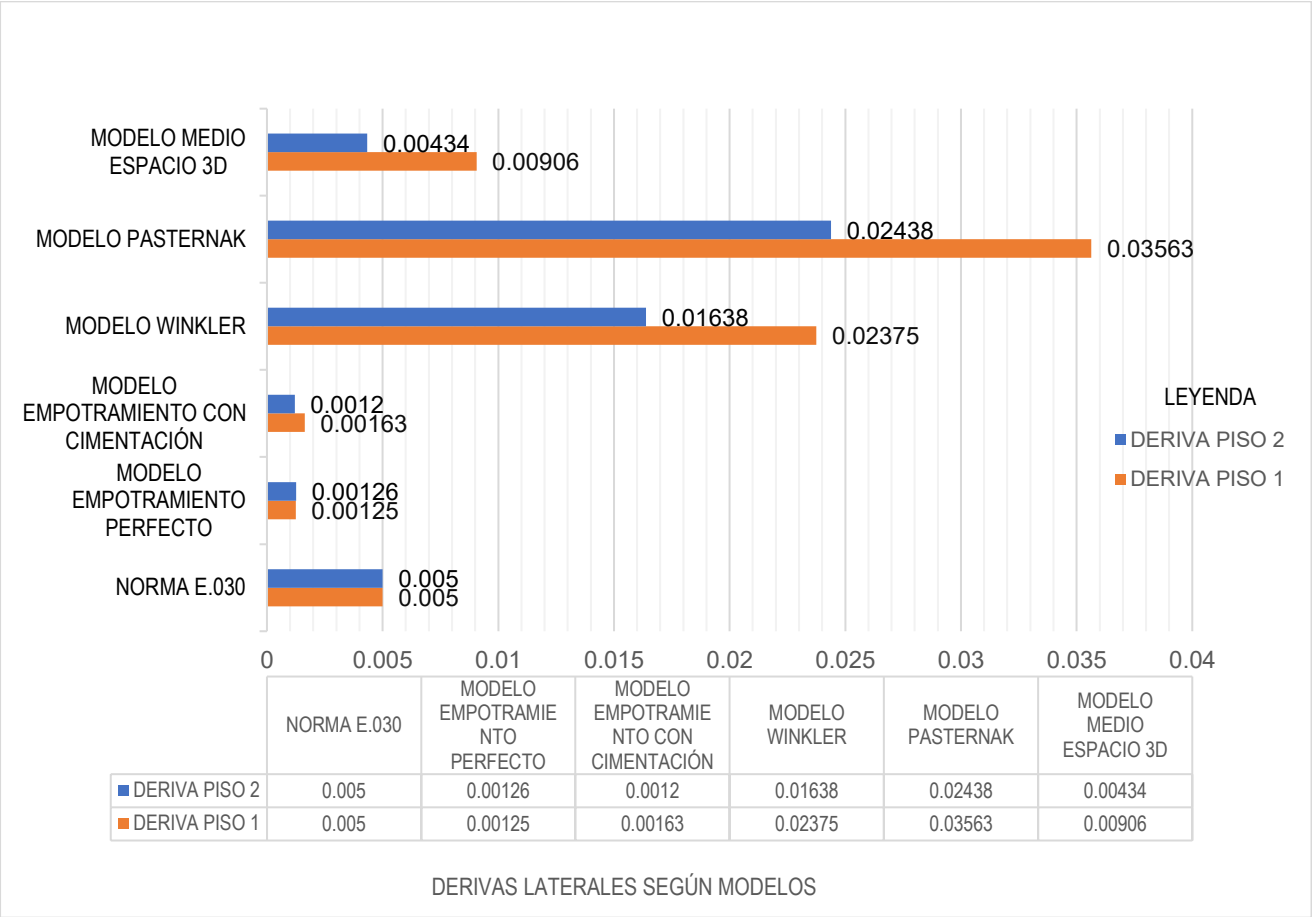
Derivas de entrepiso en el eje X para los modelos estructurales del módulo E

Modelo	Base (mm)	Piso 1 (mm)	Piso 2 (mm)	Deriva Piso 1 (mm)	Deriva Piso 2 (mm)
Norma E 0.30				0.005	0.005
Empotramiento perfecto	0.00	2.00	4.40	0.00125	0.00126
Empotramiento con cimentación	0.00	2.60	4.90	0.00163	0.0012
Winkler	0.00	38.00	69.30	0.02375	0.001638
Pasternak	0.00	57.00	103.60	0.03563	0.02438
Medio espacio 3D	0.00	14.50	22.80	0.00906	0.00434

Además, se elaboró un gráfico comparativo que permite visualizar de manera clara la variación de las derivas de entrepiso para los diferentes modelos estructurales analizados:

Figura 77

Gráfico de las derivas laterales en el eje X del módulo E según modelo estructural



	NORMA E.030	MODELO EMPOTRAMIENTO PERFECTO	MODELO EMPOTRAMIENTO CON CIMENTACIÓN	MODELO WINKLER	MODELO PASTERNAK	MODELO MEDIO ESPACIO 3D
DERIVA PISO 2	0.005	0.00126	0.0012	0.01638	0.02438	0.00434
DERIVA PISO 1	0.005	0.00125	0.00163	0.02375	0.03563	0.00906

A partir de los resultados de la **Tabla 20**, se pueden resaltar las siguientes observaciones clave:

- **Norma Técnica E.030:** Establece como límite máximo de deriva de entrepiso un valor de **0.005**, el cual debe cumplirse para garantizar la seguridad estructural y el confort ocupacional ante cargas sísmicas.
- **Empotramiento perfecto:** Presenta derivas muy reducidas (**0.00125** y **0.00126**), que se encuentran significativamente por debajo del límite normativo. Esto evidencia una condición de elevada rigidez en la base, al no considerar la deformabilidad del suelo.

- **Empotramiento con cimentación:** Muestra un leve incremento respecto al modelo anterior, con derivas de **0.00163** y **0.00120**, las cuales también cumplen con la norma y sugieren un comportamiento más realista sin dejar de ser conservador.
- **Modelo Winkler:** Al considerar resortes verticales que simulan la flexibilidad del terreno, las derivas aumentan Fuenteblemente a **0.02375** y **0.01638**, superando el valor normativo y evidenciando la sensibilidad del sistema a la flexibilidad de la cimentación.
- **Modelo Pasternak:** Se obtiene el mayor incremento de derivas (**0.03563** y **0.02438**), reflejando la mayor flexibilidad del sistema estructural al incorporar, además, la interacción entre puntos adyacentes del terreno.
- **Modelo de medio espacio 3D:** Presenta un comportamiento intermedio, con derivas de **0.00906** y **0.00434**. Aunque el valor del **primer piso supera ligeramente** el límite normativo, se mantiene dentro de un rango aceptable, representando una solución estructural más equilibrada y realista frente a la ISE.

Según los resultados, se tiene que los modelos rígidos, como el empotramiento perfecto y empotramiento con cimentación presentan derivas bajas, cumpliendo con la normativa.

Los modelos Winkler y Pasternak muestran derivas significativamente mayores hasta 7 veces, reflejando un mayor desplazamiento lateral debido a la flexibilidad del suelo.

Medio espacio 3D: Ofrece un balance entre rigidez y flexibilidad, con derivas cercanas al límite normativo, pero sin excederlo.

Los modelos empotramiento perfecto, empotramiento y medio espacio 3D cumplen con los límites establecidos por la Norma E 0.30.

Los modelos Winkler y Pasternak exceden los limites normativos, los que sugieren que su aplicación requería ajustes en el diseño estructural para garantizar la seguridad.

Análisis comparativo de derivas de entrepiso en el eje Y – Módulo E

En esta sección se presentan los resultados del análisis de derivas de entrepiso en la dirección **Y** para los modelos estructurales del módulo **E** de la institución educativa Nº 82319 – Pampa Cochabamba. Las derivas fueron calculadas a partir de los desplazamientos relativos entre niveles consecutivos, obtenidos mediante análisis dinámico modal espectral con el software **RFEM 6**. La **Tabla 21** resume estos resultados y permite comparar el comportamiento lateral de cada modelo estructural frente a un evento sísmico.

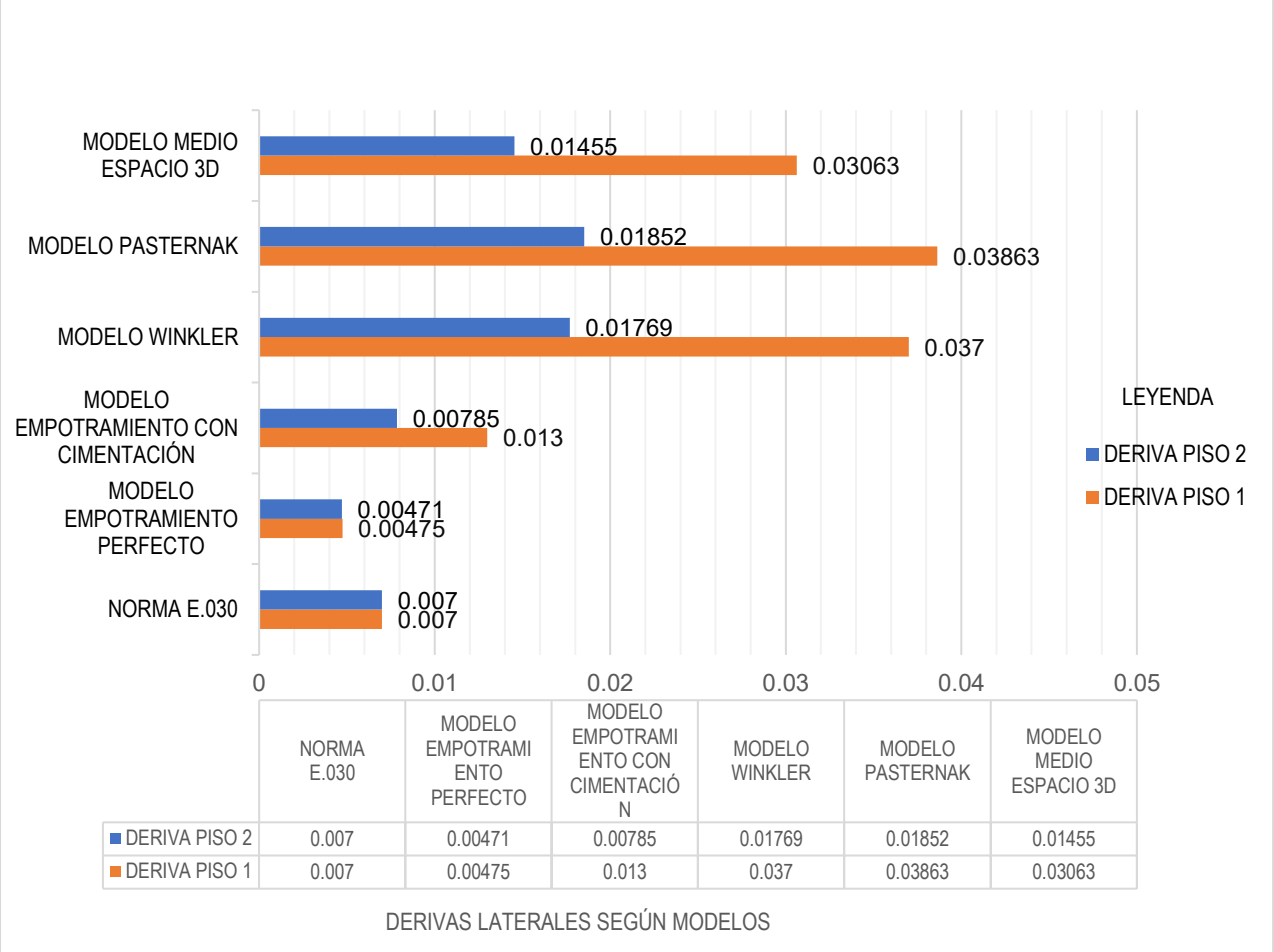
Tabla 21

Derivas de entrepiso en el eje Y para los modelos estructurales del módulo E

Modelo estructural	Base (mm)	Piso 1 (mm)	Piso 2 (mm)	Deriva Piso 1	Deriva Piso 2
Norma E 0.30				0.00700	0.00700
Empotramiento perfecto	0.00	3.80	8.30	0.00475	0.00471
Empotramiento con cimentación	0.00	10.40	17.90	0.01300	0.00785
Winkler	0.00	29.6	46.50	0.03700	0.01769
Pasternak	0.00	30.90	48.60	0.03863	0.01852
Medio espacio 3D	0.00	24.50	38.40	0.03063	0.01455

Figura 78

Gráfico de las derivas laterales en el eje Y del módulo E según modelo estructural



A partir de estos resultados, se destaca lo siguiente:

- **Norma E.030:** Establece un valor máximo de deriva permisible de **0.007** para edificaciones esenciales. Este umbral sirve como referencia normativa para evaluar el desempeño sísmico de cada modelo.
- **Empotramiento perfecto:** Presenta derivas bajas (**0.00475** y **0.00471**), por debajo del límite normativo, lo que refleja un comportamiento rígido con desplazamientos mínimos.
- **Empotramiento con cimentación:** Muestra un incremento moderado de las derivas (**0.01300** y **0.00785**), superando levemente el límite

permitido en el primer nivel. Esto indica una mayor flexibilidad respecto al empotramiento idealizado, aunque aún dentro de márgenes manejables.

- **Modelo Winkler:** Se observa un incremento sustancial de las derivas (**0.03700** y **0.01769**), superando ampliamente los valores normativos. Este comportamiento refleja una mayor deformabilidad lateral asociada a la flexibilidad del suelo modelado con resortes independientes.
- **Modelo Pasternak:** Registra las derivas más altas (**0.03863** y **0.01852**), debido a la incorporación del efecto de corte en la interacción del suelo. La respuesta obtenida resalta la importancia de considerar el modelo de interacción para una representación más realista del comportamiento estructural.
- **Modelo de medio espacio 3D:** Muestra un comportamiento intermedio con derivas de **0.03063** y **0.01455**, por encima del límite normativo, pero menores que los modelos de Winkler y Pasternak. Esto refleja una interacción tridimensional más distribuida del suelo y un equilibrio entre rigidez estructural y flexibilidad de cimentación.

Según los resultados, se tiene que los modelos de empotramiento perfecto y en menor medida el empotramiento con cimentación, presentan derivas significativamente inferiores, cumpliendo o casi cumpliendo los limites normativos.

Modelos de Winkler y Pasternak: Exceden ampliamente los valores permitidos, con derivas en el primer piso que son hasta 5.6 veces mayores que el límite normativo, reflejando la mayor flexibilidad de estos modelos.

Medio espacio 3D: Aunque también excede los limites normativos, las derivas son menores que en Winkler y Pasternak, mostrando un comportamiento más realista.

3.9.6. Derivas laterales del Módulo F

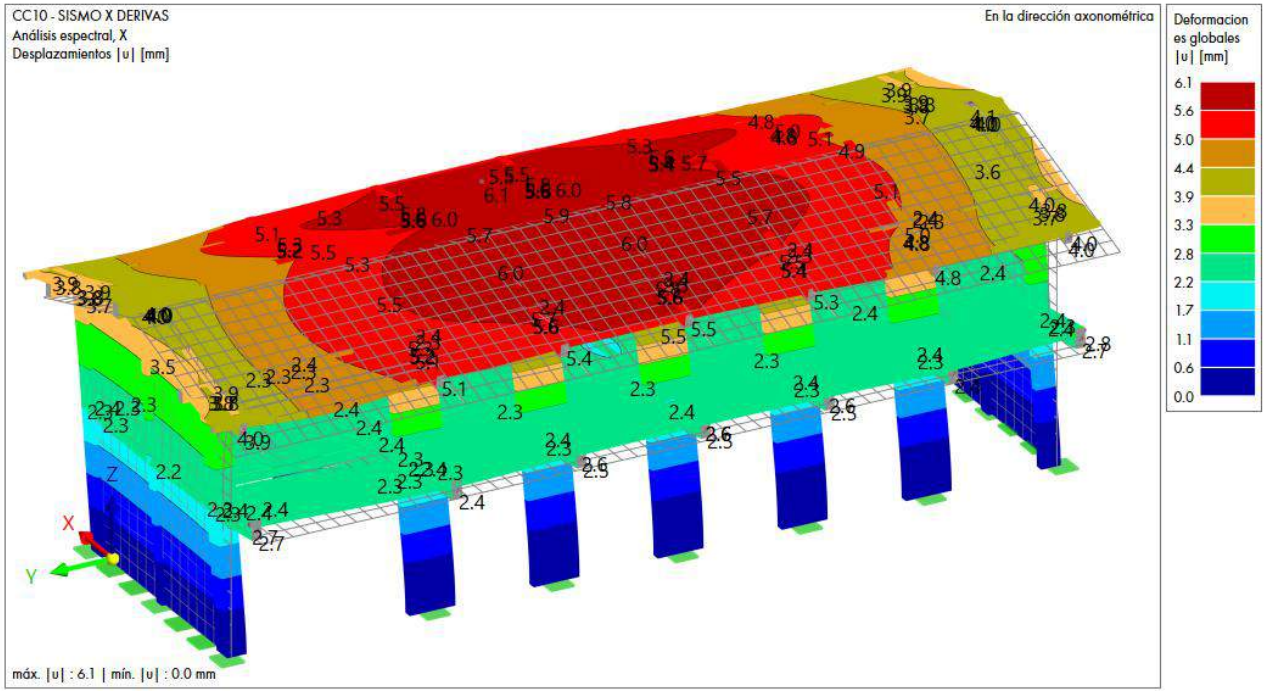
De similar manera que para el módulo E, se realizó el análisis de las derivas de entrepiso del módulo F. Este análisis permitió determinar las derivas laterales a partir de los desplazamientos relativos entre pisos consecutivos, obtenidos desde el modelamiento y análisis en el programa RFEM 6. Se compararon los resultados obtenidos en los cinco modelos estructurales analizados —desde el modelo con base empotrada hasta el modelo de medio espacio 3D— con el objetivo de evaluar la influencia de la interacción suelo-estructura (ISE) en el incremento o reducción de dichas derivas.

3.9.6.1. Desplazamientos máximos – Modelo 1 – Módulo F

A continuación, se muestran los desplazamientos máximos obtenidos en el modelo estructural 1, correspondiente al análisis con empotramiento perfecto en la base del módulo E, ante un evento sísmico en la dirección X. Este análisis fue realizado mediante un modelo dinámico modal espectral, siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica E.030. Los resultados reflejan la respuesta de la estructura sin considerar la flexibilidad del suelo, lo cual sirve como línea base para comparaciones posteriores con modelos que sí incluyen interacción suelo-estructura.

Figura 79

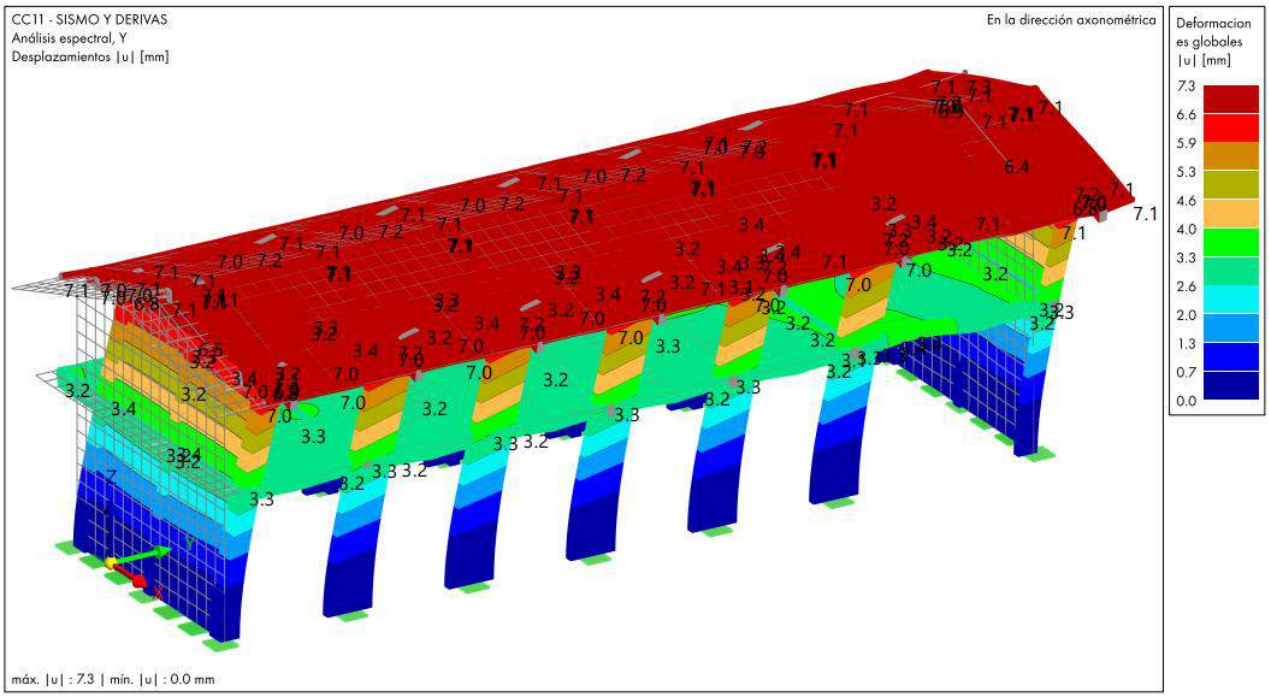
Desplazamientos máximos (mm) en dirección X(Modelo 1, Módulo F) en RFEM 6



En la figura se puede observar que, para el modelo estructural 1 (empotramiento perfecto), el valor del desplazamiento máximo registrado en la estructura corresponde a 6.1 mm en el módulo F, ante una excitación sísmica en la dirección X. Este valor representa la respuesta de referencia sin considerar la interacción suelo-estructura (ISE). De manera similar, se procederá a presentar y analizar los desplazamientos máximos obtenidos para los cinco modelos estructurales evaluados en este estudio, a fin de comparar el efecto de la ISE en el comportamiento dinámico de la edificación.

Figura 80

Desplazamientos máximos (mm) en dirección Y (Modelo 1, Módulo F) en RFEM 6



En la figura se puede observar que, para el modelo estructural 1 (empotramiento perfecto), el valor del desplazamiento máximo registrado en la estructura corresponde a 7.3 mm en el módulo E, ante una excitación sísmica en la dirección Y. Este valor representa la respuesta de referencia sin considerar la interacción suelo-estructura (ISE).

Análisis comparativo de derivas de entrepiso en el eje X – Módulo F

Asimismo, se llevó a cabo el modelamiento y análisis de las derivas de entrepiso para los demás modelos estructurales. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, organizados en la tabla y gráfico respectivos, con el fin de facilitar su interpretación comparativa.

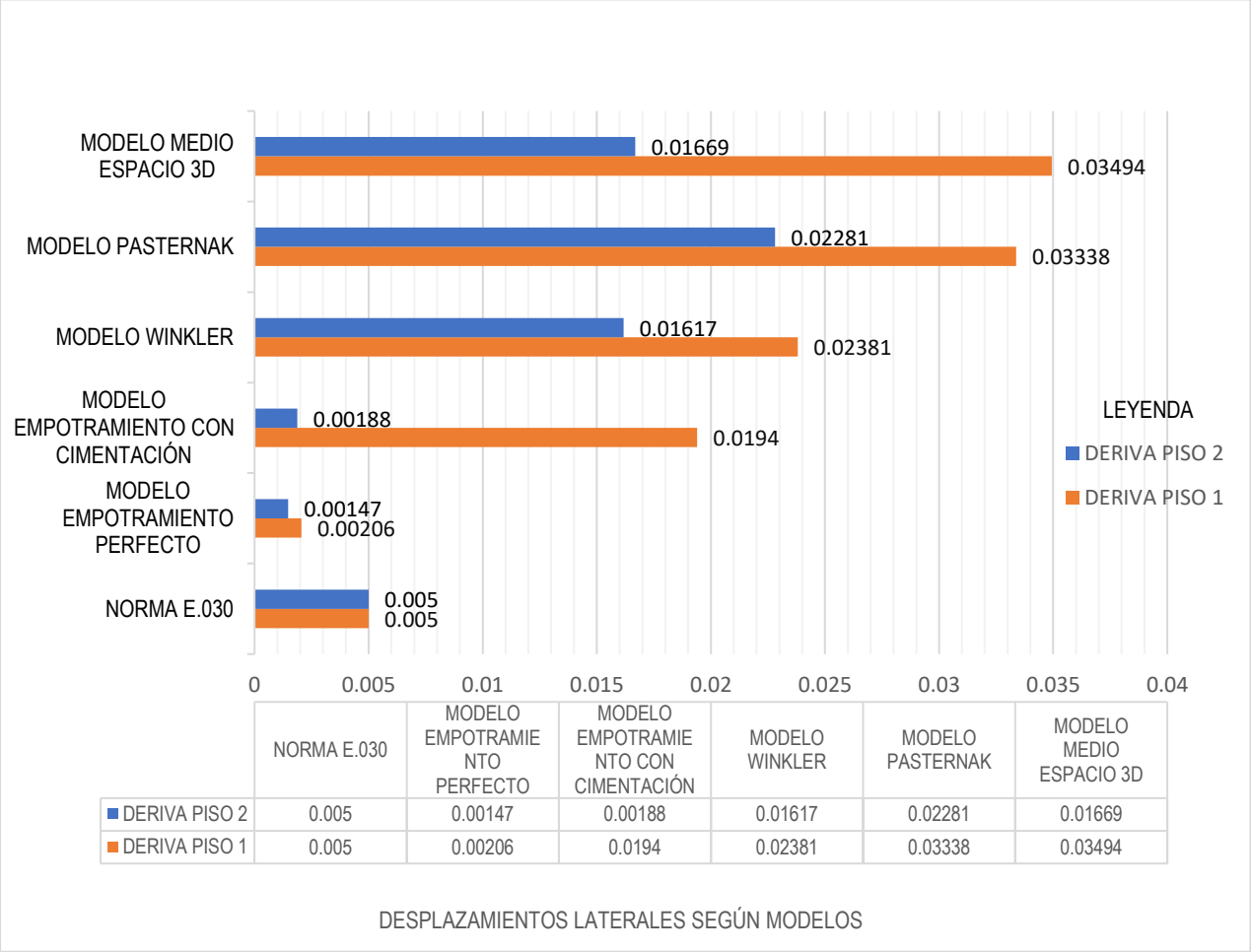
Tabla 22

Derivas de entrepiso en el eje X para los modelos estructurales del módulo F

Modelo	Base (mm)	Piso 1 (mm)	Piso 2 (mm)	Deriva Piso 1	Deriva Piso 2
Norma E 0.30				0.00500	0.00500
Empotramiento perfecto	0.00	3.30	6.10	0.00206	0.00147
Empotramiento con cimentación	0.00	3.10	6.70	0.0194	0.00188
Winkler	0.00	38.10	69.00	0.02381	0.01617
Pasternak	0.00	53.40	97.00	0.03338	0.02281
Medio espacio 3D	0.00	55.90	87.80	0.03494	0.01669

Figura 81

Gráfico de las derivas laterales en el eje X del módulo F según modelo estructural



A partir de los datos presentados en la Tabla 22, se destacan las siguientes observaciones técnicas:

- **Norma Técnica E.030:** Establece un valor límite de deriva de entrepiso de **0.007**, que actúa como parámetro de comparación para determinar la aceptabilidad del desempeño estructural.
- **Empotramiento perfecto:** Las derivas obtenidas (**0.00206** y **0.00147**) están muy por debajo del límite normativo, evidenciando una alta rigidez estructural sin considerar la flexibilidad del terreno.
- **Empotramiento con cimentación:** Se observó una ligera variación (**0.00194** y **0.00188**), que también cumplen con la normativa, aunque se percibe un pequeño aumento de la deformación por la inclusión de la cimentación como elemento independiente.
- **Modelo Winkler:** Presenta un aumento considerable en las derivas (**0.02381** y **0.01617**), superando el límite normativo y reflejando una mayor deformabilidad lateral del sistema ante la flexibilidad del suelo.
- **Modelo Pasternak:** Las derivas alcanzaron valores más elevados (**0.03338** y **0.02281**), lo que evidencia una respuesta estructural más flexible y demandante, indicando que este modelo representa condiciones de terreno más blandas o deformables.
- **Medio espacio 3D:** Se obtuvo un comportamiento estructural similar al de Pasternak, con derivas de **0.03494** y **0.01669**, que también superan los límites normativos, aunque con una distribución de desplazamientos más controlada por su modelación tridimensional.

Según los resultados, se tiene que los modelos de empotramiento perfecto y con cimentación presentan derivas significativamente más bajas, cumpliendo ampliamente con la normativa en ambos pisos.

Los modelos Winkler y Pasternak tienen derivas en el primer y segundo piso que son 7 veces mayores que el límite normativo, evidenciando una deformación lateral pronunciada.

Medio espacio 3D: Este modelo supera el límite normativo, pero con derivas más moderadas en comparación con Winkler y Pasternak, mostrando un comportamiento más representativo.

El modelo medio espacio 3D excede los límites, pro con valores más cercanos al límite permitido.

Análisis comparativo de derivas de entrepiso en el eje Y – Módulo F

En esta sección se presentan los resultados del análisis de derivas de entrepiso en la dirección **Y** para los modelos estructurales del módulo **F** de la institución educativa Nº 82319 – Pampa Cochabamba. Las derivas fueron calculadas a partir de los desplazamientos relativos entre niveles consecutivos, obtenidos mediante análisis dinámico modal espectral con el software **RFEM 6**. La **Tabla 23** resume estos resultados y permite comparar el comportamiento lateral de cada modelo estructural frente a un evento sísmico.

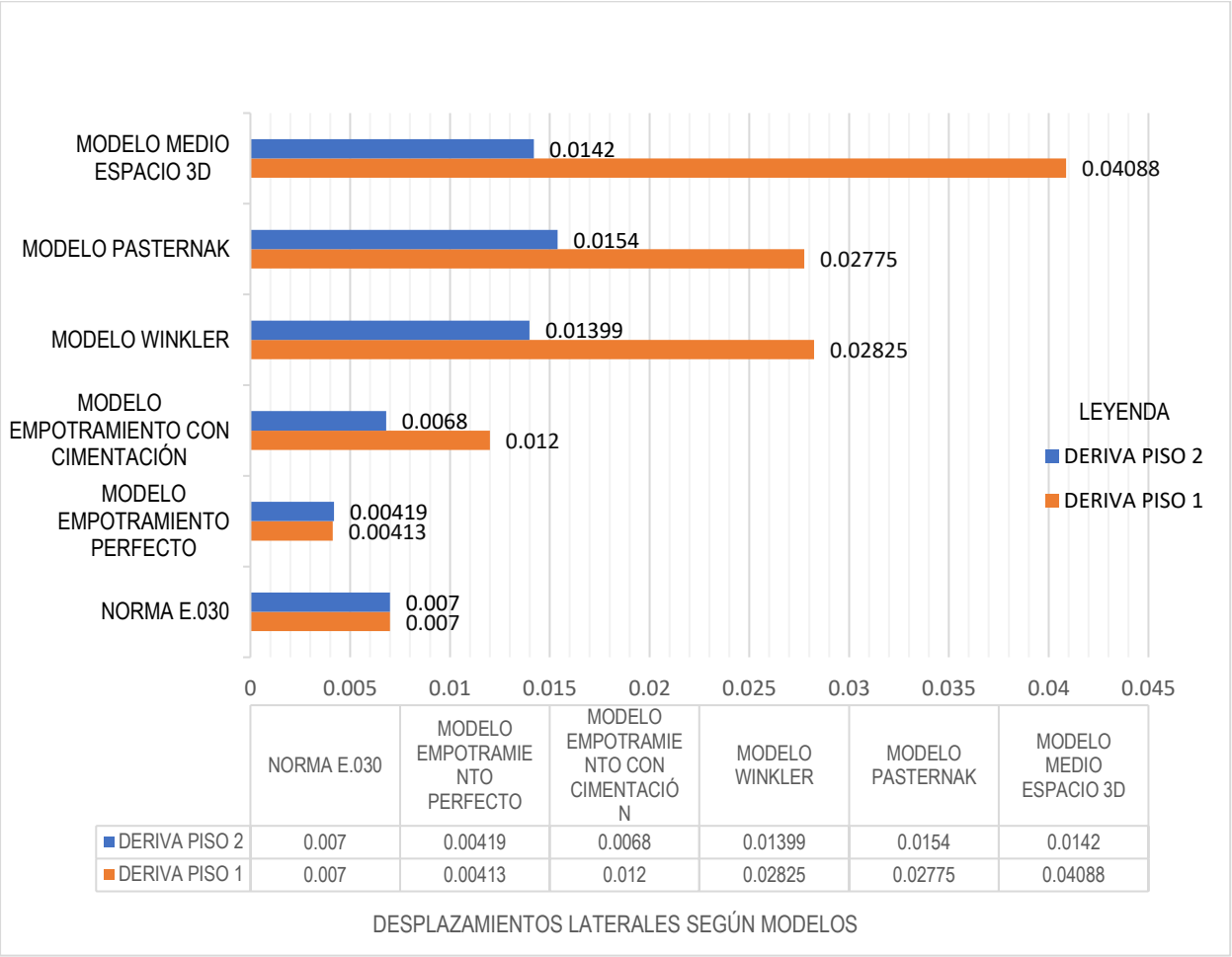
Tabla 23

Derivas de entrepiso en el eje Y para los modelos estructurales del módulo F

Modelo	Base (mm)	Piso 1 (mm)	Piso 2 (mm)	Deriva Piso 1	Deriva Piso 2
Norma E 0.30				0.00700	0.00700
Empotramiento perfecto	0.00	3.30	7.30	0.04130	0.00419
Empotramiento con cimentación	0.00	9.60	16.10	0.01200	0.00680
Winkler	0.00	22.60	35.50	0.02825	0.01399
Pasternak	0.00	22.20	36.40	0.02775	0.01540
Medio espacio 3D	0.00	32.70	45.80	0.04088	0.01420

Figura 82

Gráfico de las derivas laterales en el eje Y del módulo F según modelo estructural



A partir de los resultados presentados en la Tabla 23, se resumen las siguientes observaciones relevantes:

- **Norma E.030:** Establece un límite de **0.007** como valor máximo permisible de deriva de entrepiso. Este umbral normativo es el punto de referencia para evaluar el cumplimiento del desempeño estructural en edificaciones esenciales.
- **Empotramiento perfecto:** Las derivas obtenidas fueron **0.00413** y **0.00419**, por debajo del límite normativo, indicando un comportamiento estructural rígido, sin considerar la influencia del suelo.

- **Empotramiento con cimentación:** Se evidencia un ligero aumento en las derivas (**0.01200** y **0.00680**). La deriva del primer piso supera el límite normativo, lo que implica que la inclusión del efecto de cimentación flexible comienza a afectar el desempeño lateral.
- **Modelo Winkler:** Presentó incrementos considerables (**0.02825** y **0.01399**), superando los valores establecidos por la norma en ambos niveles. Este comportamiento refleja una mayor deformabilidad producto de la interacción suelo-estructura.
- **Modelo Pasternak:** Las derivas alcanzadas fueron **0.02775** y **0.01540**, manteniéndose en un rango similar al modelo de Winkler. El acoplamiento entre los resortes del suelo y su rigidez transversal amplificó los desplazamientos.
- **Medio espacio 3D:** Obtuvo los valores más altos en el primer piso (**0.04088**) y niveles aún superiores a la norma en el segundo piso (**0.01420**), aunque con una respuesta más controlada comparado con Pasternak. Este modelo representa de forma más realista la interacción tridimensional entre suelo y estructura.

Según los resultados, se tiene que los modelos rígidos: Los modelos de empotramiento perfecto y con cimentación cumplen en su mayoría con la normativa, especialmente en el segundo piso. Esto refleja una menor flexibilidad del sistema estructural.

Modelos de Winkler y Pasternak: Presentan las mayores derivas en el primer y segundo piso, excediendo ampliamente los límites permitidos, lo que indica una alta deformabilidad lateral.

Medio espacio 3D: Aunque las derivas superan la norma en casi 6 veces, están más controladas que en los modelos Winkler y Pasternak, mostrando un comportamiento más equilibrado.

Excedencia significativa: Los modelos de Winkler, Pasternak y medio espacio 3D superan ampliamente los valores permitidos, especialmente en el primer piso.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan el análisis y la discusión de los resultados obtenidos para los periodos de vibración, las fuerzas internas (esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores) y las derivas laterales, correspondientes a los cinco modelos estructurales evaluados, tanto considerando como sin considerar los efectos de la interacción suelo–estructura (ISE). Estos resultados, aplicables a los módulos E y F de la institución educativa N° 82319 – Pampa Cochabamba, constituyen la base para la validación de la hipótesis planteada y ofrecen una perspectiva clave sobre la influencia de la flexibilidad del suelo en el comportamiento dinámico de las edificaciones.

4.1. Análisis y discusión

El análisis comparativo de los comportamientos estructurales evidenció que la incorporación de la interacción suelo-estructura (ISE) genera cambios significativos en los parámetros de diseño sísmico, tales como los periodos de vibración, esfuerzos internos y derivas de entrepiso. Los resultados mostraron que los modelos tradicionales de empotramiento rígido subestiman el comportamiento real, lo que podría resultar en diseños conservadores, pero no representativos de la realidad dinámica.

En particular, el modelo de medio espacio 3D se destacó como la representación más precisa, al incorporar efectos tridimensionales que permiten un análisis más realista del sistema suelo-estructura. Este modelo evidenció incrementos moderados pero controlados en las derivas, sugiriendo su viabilidad practica para diseños en zonas sísmicas.

El análisis de los periodos de vibración mostró incrementos notables al considerar la ISE. En el módulo E, los tres primeros modos incrementaron entre 2.8, 4.3 y 3.3 veces; mientras que en el módulo F, los incrementos oscilaron entre 2.9, 3.9 y 4.5 veces. Este fenómeno se debe a la pérdida de rigidez efectiva provocada por la flexibilidad del suelo.

El modelo empotrado arrojó valores de periodo considerablemente más bajos, lo cual podría inducir un sobredimensionamiento en la demanda sísmica si se utilizara como única referencia. La comparación confirma que el modelo más preciso para representar el comportamiento dinámico fue el medio espacio 3D, cuyos periodos se alinean mejor con una modelación realista del terreno.

En ambos módulos se observó que los esfuerzos internos se ven modificados al considerar la interacción con el suelo. En el módulo E, los esfuerzos axiales aumentaron hasta 2.5 veces, los esfuerzos cortantes hasta 4 veces y los momentos flectores hasta un 17%. Para el módulo F, los esfuerzos axiales se incrementaron hasta 7 veces, los cortantes 3.8 veces y los momentos flectores hasta un 39%.

Este comportamiento se debe a la redistribución de rigideces entre los elementos estructurales al considerar la flexibilidad del terreno. Los modelos Winkler y Pasternak evidenciaron mayores incrementos en esfuerzos, mientras que el modelo de medio espacio 3D permitió un análisis más controlado, aunque más demandante que el empotramiento simple.

Las derivas de entrepiso presentaron incrementos significativos al incluir la ISE, especialmente en el eje Y en los modelos de Pasternak (0.03863, Módulo E) y Medio Espacio 3D (0.04088, Módulo F), donde se alcanzaron valores superiores al límite normativo (0.007) de la Norma Técnica E.030. En cambio, el empotramiento

perfecto y el modelo con cimentación mostraron valores dentro de los márgenes establecidos.

Este resultado demuestra que el análisis sin considerar ISE subestima la deformación estructural y puede inducir a errores en el diseño de elementos no estructurales o en la evaluación de daños. El modelo de medio espacio 3D resultó ser el más equilibrado al representar con mayor fidelidad la interacción real del sistema, manteniendo derivas controladas dentro de los rangos admisibles.

4.2. Contrastación de la Hipótesis

Luego de haber desarrollado satisfactoriamente todos los objetivos planteados en la presente investigación, se aceptó la hipótesis formulada: *Los comportamientos estructurales de los módulos E y F de la institución educativa Nº 82319 – Pampa Cochabamba son mayores en un 20% al considerar la interacción suelo–estructura (ISE) en la fundación, en comparación con los modelos que no la consideran.*

Esta hipótesis se valida a partir de los resultados obtenidos, los cuales demuestran aumentos significativos en los períodos de vibración, desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y esfuerzos internos (axiales, cortantes y flectores) en los modelos que incorporan la ISE. Estos hallazgos ponen en evidencia que la rigidez asumida en los modelos con base empotrada subestima el comportamiento dinámico real de la edificación.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. Se concluye que: Los comportamientos estructurales de los módulos E y F de la institución educativa Nº 82319 – Pampa Cochabamba **son mayores** en un **20 % (180% en periodos fundamentales de vibración, 39% en esfuerzos internos y 238% en derivas de entrepiso)** al considerar la interacción suelo–estructura (ISE) en la fundación, en comparación con los modelos que no la consideran.

2. Se comparó los **periodos fundamentales de vibración** y se concluye que al considerar la interacción suelo estructura estos **son mayores** en un 1**80%** (modelos de Pasternak y Medio espacio 3D) en comparación con los modelos que no la incorporan. En el módulo E, los incrementos fueron de hasta 2.8, 4.3 y 3.3 veces en los tres primeros modos. Para el módulo F, estos aumentos alcanzaron 2.9, 3.9 y 4.5 veces, respectivamente. Estos resultados reflejan la pérdida de rigidez efectiva derivada de la flexibilidad del suelo.

3. Se comparó los **esfuerzos internos** y se concluye que al considerar la interacción suelo estructura, estos **son mayores** en un **39%**(modelos de Pasternak y Medio espacio 3D) en comparación con los modelos que no la incorporan. En el módulo E, los esfuerzos axiales aumentaron hasta 2.5 veces, los cortantes hasta 4 veces y los momentos flectores un 17%. En el módulo F, los incrementos alcanzaron hasta 7 veces en esfuerzos axiales, 3.8 veces en cortantes y 39% en momentos flectores, lo que evidencia una redistribución de rigideces en el sistema suelo–estructura.

4. Se comparó las **derivas de entrepiso** y se concluye que al consideran la interacción suelo-estructura, estas son mayores en un **238**% en comparación con los modelos que no la incorporan, especialmente en la dirección Y. En el módulo E, el modelo Pasternak alcanzó una deriva de 0.03863, mientras que en el módulo F, el modelo de medio espacio 3D registró 0.04088.

5.2. Recomendaciones

1. Se recomienda realizar estudios sobre la redistribución de esfuerzos entre pilares y vigas, así como los efectos del incremento de las cargas axiales, cortantes y momentos flectores debido a la interacción suelo-estructura en los elementos estructurales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Civil Engineers. (2020). ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ASCE.

Arquiñego Laulate, J. J., & Velásquez Barrios, N. I. (2020). "Evaluación de la interacción suelo - estructura en una edificación de 4 pisos, en el distrito de Cercado de Lima".

Bapir, M., Aldowaisan, T., & ElNaggar, H. (2023). Soil–structure interaction effects on seismic response of buildings: A review and meta-analysis. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 170, 107323. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107323

Chopra, A. K. (2020). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.). Pearson Education.

Dhadse, G. D., Ramtekkar, G. D., & Bhatt, G. (2021). Finite element modeling of soil–structure interaction system with interface: A review. Archives of Computational Methods in Engineering, 28(12), 3415–3432. https://doi.org/10.1007/s11831-020-09526-8

Dlubal, S. (02 de Setiembre de 2024). Dlubal Software de cálculo de estructuras y diseño. Obtenido de https://www.dlubal.com/es/descargas-e-informacion/documentos/manuales-en-linea/rfem-6-analisis-geotecnico/005893: https://www.dlubal.com/es/descargas-e-informacion/documentos/manuales-en-linea/rfem-6-analisis-geotecnico/005893

Güllü, H., & Natur, O. (2025). Three-dimensional simulation of seismic structure–soil–structure interaction for mid-rise buildings near dense shallow sloping soils

under the impact of 6 February 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık earthquake. **Buildings, 15**(7), 1013. https://doi.org/10.3390/buildings15071013

Garay Chávez, R. K. (2019). Influencia de la interacción suelo - estructura en el comportamiento sismico de un edificio de 7 niveles del proyecto "Multifamiliar los Balcones del Valle" Barrio Columbo - Cajamarca. 12.

Garro Manayay, H. J., Sotelo Vargas, H. H., Grozo Alencar, G. A., Arguelles Madalengoitia, L. A., & Aguirre Plejo, C. B. (diciembre de 2020). Analisis estrcutural considerando Interacción suelo - Estructura en centro educativo Puente Piedra. 1.

Gazetas, G. (2021). Soil-structure interaction: A historical and updated perspective. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 147, 106766. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106766

González, L., & Martínez, P. (2020). Advances in Soil-Structure Interaction Models for Seismic Engineering. Journal of Structural Dynamics, 18(4), 233–248.

Hidalgo de la Cruz, M. (2024). Interacción suelo-estructura en el diseño de losas de cimentación. Interacción suelo-estructura en el diseño de losas de cimentación. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Hidalgo de la Cruz, R. (2023). Interacción suelo-estructura en el diseño de losas de cimentación [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].

Hinostroza Rosales, L. M. (2021). Influencia de la interacción suelo–estructura en respuesta dinámica estructural de edificaciones de 7 y 14 pisos en Ica, Perú. Universidad César Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/65905

INDECI. (2020). Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Instituto Nacional de Defensa Civil.

Jines Cabezas, R. M. (2017). Interacción sismica suelo - estructura en edificaciones de sistema dual en la ciudad de Moquegua. Interacción sismica suelo - estructura en edificaciones de sistema dual en la ciudad de Moquegua. Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú.

Kausel, E. (2022). Soil–structure interaction: From classical solutions to computational models. Springer.

Kramer, S. L. (2020). Geotechnical earthquake engineering (2nd ed.). Pearson.

López Sotelo, L. (2020). Análisis de interacción sísmica suelo-estructura para edificaciones con zapatas aisladas. Universidad Nacional de Ingeniería.

López, W. O., & Ocas, M. (2021). Comportamiento estructural al incorporar la interacción suelo-estructura de una edificación de cuatro niveles en La Molina – Cajamarca (Tesis de licenciatura). Universidad Privada del Norte.

López, Y. W. (2023). Influencia del tipo de suelo en el diseño de cimentaciones para instituciones educativas. Revista de Ingeniería Civil y Geotecnia, 5(2), 45–57.

Ministerio de Educación del Perú [MINEDU]. (2021). Lineamientos de diseño para instituciones educativas seguras. https://www.minedu.gob.pe

Ministerio de Educación del Perú [MINEDU]. (2021). Lineamientos técnicos para infraestructura educativa resiliente.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS]. (2018). Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente. RNE - Reglamento Nacional de Edificaciones. https://www.gob.pe/rne

Ocas Llanos, J., & López Campos, M. (2021). Comportamiento estructural al incorporar la interacción suelo-estructura en una edificación en Cajamarca. Universidad Nacional de Cajamarca.

Serrano, R., Gutiérrez, L., & Vásquez, P. (2022). Evaluación de la interacción suelo-estructura en edificaciones sobre suelos blandos. Ingeniería Sísmica y Geotécnica, 4(1), 23–38.

United States Geological Survey [USGS]. (2023). Earthquake glossary. https://earthquake.usgs.gov

Villarreal Castro, G. A., & Aguila Gómez, C. T. (2021). Interacción suelo-estructura y su influencia en la respuesta sísmica de edificios de concreto armado. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 26(3), 426–471. https://doi.org/10.24133/riie.v26i3.2336

ANEXOS

INFORME DEL ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS

1. MEMORIA DESCRIPTIVA

1.1. Resumen de las condiciones de cimentación

RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE CIMENTACIÓN
(C - 03) – MÓDULO DE CENTRO DE RECURSOS Y AULAS 07 Y 08
Profesional Responsable (PR): Jhonny Vásquez Torres. **Ing. Civil CIP:** 255746
Tipo de Cimentación: Zapatas aisladas.
Profundidad de la Napa Freática: No se encontró
Parámetros de Diseño de la Cimentación Profundidad de la Cimentación: 3.00 m mínimo. Presión Admisible: 0.9057 kg/cm^2, para Df = 2.50m y B = 2.80m Factor de Seguridad por Corte (Estático, Dinámico): 3.00
Parámetros Sísmicos del Suelo (De acuerdo a la Norma E.030) Zona Sísmica: (Zona 3) Z=0.35 Tipo de perfil del suelo: S_3 Factor del Suelo (S): 1.20 Período TP (s): 1.0 Período TL (s): 1.6
Agresividad del Suelo a la Cimentación: Suelo moderadamente agresivo, emplear Cemento Portland Tipo MS (ASTM C-1157)
Problemas Especiales de cimentación Licuación: No susceptible Colapso: No colapsable Expansión: Bajo
Indicaciones Adicionales: -

GUERSAN INGENIEROS SRL

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

1.2. Objetivo del Informe:

El presente Estudio de mecánica de suelos tiene por finalidad dar a conocer, los resultados de las investigaciones del suelo del terreno de fundación donde se ejecutará el Proyecto: "MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."

La metodología para cumplir dicho objetivo consiste en trabajos de campo a través de cinco (05) pozos de exploración a cielo abierto o calicatas, ensayos de laboratorio estándar y especiales a fin de obtener las principales características físicas y mecánicas del subsuelo, sus propiedades de resistencia y labores de gabinete en base a los cuales se define el perfil estratigráfico, tipo y profundidad de cimentación, Capacidad de Carga Admisible, conclusiones y recomendaciones generales para la cimentación.

El programa de trabajo realizado con este propósito ha consistido en:

Reconocimiento del terreno.
Excavación de Pozos de Exploración.
Toma de Muestras de campo.
Ejecución de Ensayos de Laboratorio.
Evaluación de los Trabajos de Campo y Laboratorio.
Perfiles Estratigráficos.
Análisis de la Capacidad de Carga Admisible.
Conclusiones y Recomendaciones.

1.3. Normatividad

El presente trabajo de consultoría está en concordancia con las siguientes normativas:

Norma Técnica E.030 "Diseño sismo resistente".
Norma Técnica E.050 "Suelos y Cimentaciones".
Norma Técnica E.060 "Concreto Armado".
ASTM y NTP (Referentes a los ensayos de mecánica de suelos)

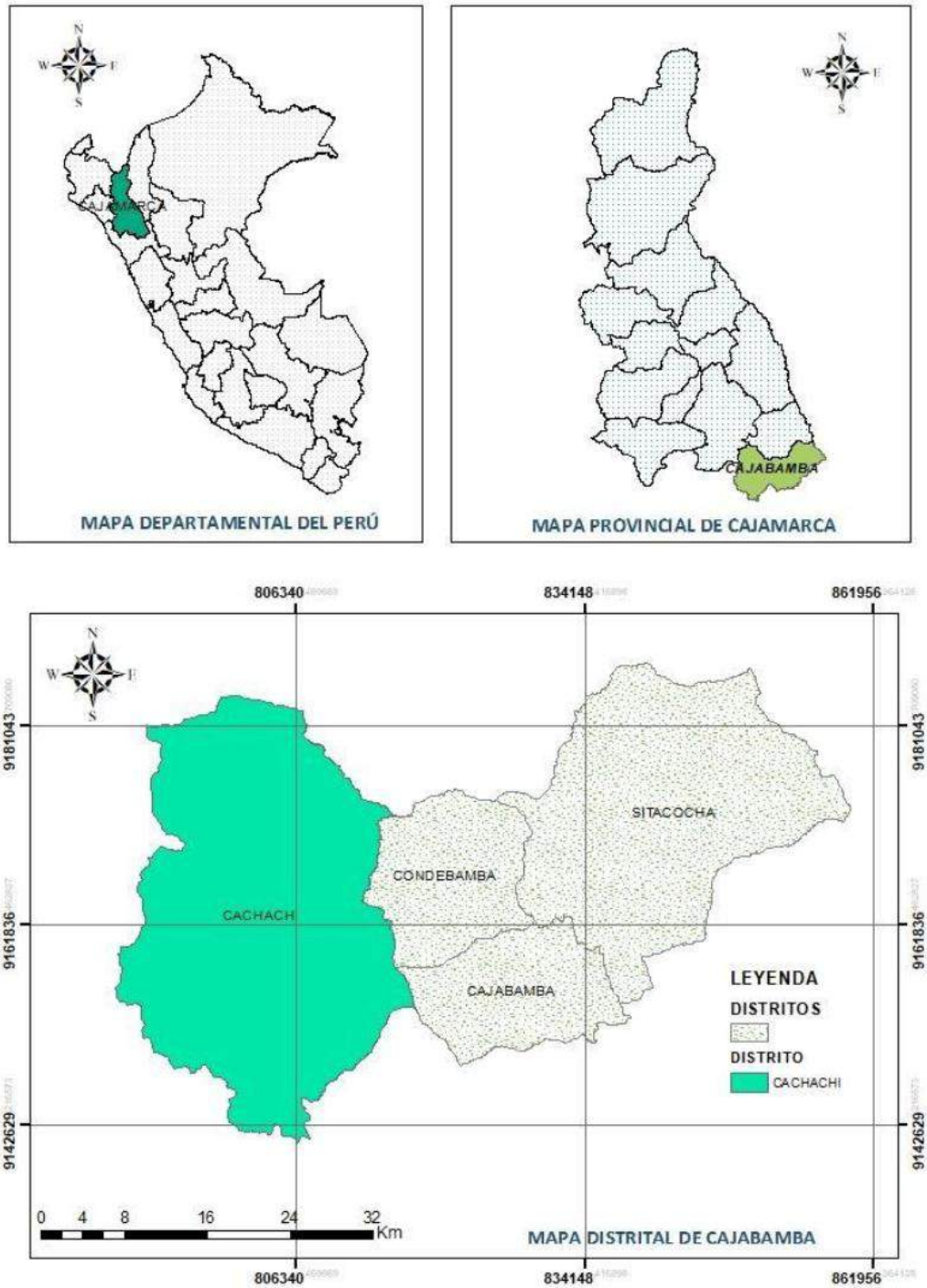
1.4. Ubicación y Descripción del Área en Estudio

El terreno destinado para la ejecución del Proyecto: "MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA.", se encuentra ubicado en:

- Región : Cajamarca
- Provincia : Cajabamba
- Distrito : Cachachi
- Sector : Pampa Cochabamba
- Institución Educativa : N° 82319

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

GRÁFICO N° 1. Mapa Políticos de la zona de estudio. (Fuente: Elaboración propia)



GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

1.5. Antecedentes

El terreno con un área total de 9793.599 m^2 y un perímetro total de 409.308 ml. El uso actual del mismo es un área libre. Los terrenos circundantes al área de estudio son de una trocha carrozable y terrenos de terceros empleados tanto para vivienda como para la agricultura. Respecto a las construcciones cercanas, son viviendas de máximo 02 niveles, fabricadas con materiales rústicos (tapial), pero no evidencian problemas significativos en cuanto a sus cimentaciones (fallas).

1.6. Alcance del EMS

El presente EMS se limita geográficamente al terreno donde se proyectará el mejoramiento y ampliación del servicio educativo de la I.E. N° 82319 (Consultar planos de Ubicación de Calicatas). Asimismo, técnicamente el estudio es válido en la profundidad y estratos encontrados en la exploración de campo.

1.7. Datos generales de la zona

El terreno del proyecto es una explanada con pendiente media, el cual esta circundado por terrenos de uso agrícola y viviendas. Se ubica en la misma localidad; además, existe una trocha carrozable al oeste de la misma. Además, la edificación proyectada tiene las siguientes características:

- **Uso de la edificación:** Institución Educativa
- **Número de Pisos:** Presenta módulos de 02 niveles.
- **Área aproximada**: 9793.599 m^2
- **Tipo de Estructura:** Aporticado

1.8. Accesos al área de estudios

Para acceder al proyecto se sigue desde Cajamarca hacia Cajabamba por la red vial nacional PE- 3N, en el distrito de Condebamba, en el cruce de Pomabamba se sigue la la Vía Vecinal CA-111, hacia el sur-oeste al C.P de Chuquibamba, para continuar hacia el oeste al centro Poblado de Araqueda, a una distancia aproximada total de 11.9 km desde el centro poblado en dirección nor-oeste por una trocha carrozable se llega al Sector Pampa Cochabamba.

1.9. Condición climática y altitud de la zona

El Centro Poblado de Pampa Cochabamba, pertenece a Cachachi; uno de los distritos de la provincia de Cajabamba, ubicada en el departamento de Cajamarca. Se encuentra aproximadamente a 2964.7 msnm.

Los veranos son cortos, frescos y nublados y los inviernos son cortos, muy frío, secos y parcialmente nublados. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 0 °C a 15 °C y rara vez baja a menos de -2 °C o sube a más de 17 °C. La temporada templada dura 3.0 meses, del 1 de diciembre al 28 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 14 °C.

La temporada fresca dura 2.0 meses, del 8 de junio al 6 de agosto, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 13 °C.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

2. INVESTIGACIÓN DE CAMPO

2.1. Programación de ensayos y procesamiento de datos

En general, el trabajo de campo se realizó en dos periodos marcados de tiempo; primeramente, el reconocimiento del área y exploración geotécnica y extracción de muestras y luego el procesamiento de los ensayos realizados.

La fase de reconocimiento del área de estudio y la exploración geotécnica y muestro de calicatas, el día: 01-10-2021. Luego, en el intervalo de tiempo entre los días 04-10-2021 y 09-07-2021 se ejecutaron los ensayos estándar para suelos, también se extrajo muestras inalteradas para los ensayos de potencial de colapso; para posteriormente procesar en gabinete y obtener los resultados de cada ensayo.

2.2. Determinación de Parámetros Sísmicos según Norma E-030

Respecto a la zonificación sísmica, dado que el proyecto se ubica en distrito de Cachachi, la provincia de *Cajabamba* y departamento de *Cajamarca*, esta será **Zona 3**. Luego el factor de zona correspondiente es **0.35**.

REGIÓN (DPTO.)	PROVINCIA	DISTRITO	ZONA SÍSMICA	ÁMBITO
CAJAMARCA	CAJABAMBA	SITACOCHA	2	UN DISTRITO
		CACHACHI	3	TRES DISTRITOS
		CAJABAMBA		
		CONDEBAMBA		

Tabla N° 1
FACTORES DE ZONA "Z"

ZONA	Z
4	0,45
3	0,35
2	0,25
1	0,10

Para la selección del tipo de perfil de suelo se consideró lo siguiente:

El tipo de suelo de fundación en la zona de estudio, como se evidenció en los perfiles descritos de las calicatas realizadas, predomina la arcilla de baja plasticidad, clasificados como CL.

Por lo anterior expuesto, de acuerdo con la norma E.030, se concluye que este correspondería a un **perfil del suelo S_3.**

Tabla N° 2
CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO

Perfil	$\bar{V}_s$	$\bar{N}_{60}$	$\bar{S}_u$
S_0	> 1500 m/s	-	-
S_1	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S_2	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S_3	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S_4	Clasificación basada en el EMS		

Luego, teniendo en cuenta los anteriores criterios sísmicos, se obtienen los siguientes parámetros de sitio:

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

Tabla N° 3
FACTOR DE SUELO "S"

ZONA \ SUELO	S_0	S_1	S_2	S_3
Z_4	0,80	1,00	1,05	1,10
Z_3	0,80	1,00	1,15	1,20
Z_2	0,80	1,00	1,20	1,40
Z_1	0,80	1,00	1,60	2,00

Tabla N° 4
PERÍODOS "T_P" Y "T_L"

	Perfil de suelo			
	S0	S1	S2	S3
T_P (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T_L (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

Finalmente, como se proyecta construir una institución educativa, en el área de estudio, esta se clasifica como una edificación esencial (A2). Por ello el factor de uso a considerar debe ser **1.5**.

Tabla N° 5
CATEGORÍA DE LAS EDIFICACIONES Y FACTOR "U"

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U
A Edificaciones Esenciales	A1: Establecimientos del sector salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud.	Ver nota 1
	A2: Edificaciones esenciales para el manejo de las emergencias, el funcionamiento del gobierno y en general aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre. Se incluyen las siguientes edificaciones: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos, estaciones ferroviarias de pasajeros, sistemas masivos de transporte, locales municipales, centrales de comunicaciones. - Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua. - Instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. - Edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. - Edificios que almacenen archivos e información esencial del Estado.	1,5

En resumen, y de acuerdo a la norma NTE E.030 Diseño Sismorresistente, se tiene:

Ubicación del Proyecto	Sector Pampa Cochabamba, Distrito Cachachi, Provincia Cajabamba, Departamento Cajamarca
Categoría de la Edificación Factor de Uso (U)	A2 – 1.5
Zona Sísmica	3
Factor de Zona (Z)	0.35
Perfil Tipo	S_3
Factor de Suelo (S)	1.20
Periodo (T_p (S))	1.0
Periodo (T_L (S))	1.6

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vasquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

2.3. Cantidad y profundidad de puntos de exploración

Para determinar el número mínimo de calicatas para realizar el EMS, seguimos las indicaciones presentadas en la norma E.050, articulo 13 y 15. En primer lugar determinamos el tipo de estructura, para ello tenemos en cuenta que; se empleará un sistema estructural compuesto de pórticos, las distancias entre apoyos no superan los 10 metros y el número de pisos de la estructura es menor que 3 niveles.

Los datos anteriores se extrapolan a la Tabla 1 (*Tipo de edificación u obra para determinar el número de puntos de exploración*). Esto se presenta a continuación, los datos del proyecto están resaltados en rojo.

TABLA 1
TIPO DE EDIFICACIÓN U OBRA PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN (TABLA 6)

DESCRIPCIÓN	DISTANCIA MAYOR ENTRE APOYOS • (m)	NÚMERO DE PISOS (Incluidos los sótanos)			
		≤ 3	4 a 8	9 a 12	> 12
APORTICADA DE ACERO	< 12	III	III	III	II
PÓRTICOS Y/O MUROS DE CONCRETO	< 10	III	III	II	I
MUROS PORTANTES DE ALBAÑILERÍA	< 12	II	I	---	---
BASES DE MÁQUINAS Y SIMILARES	Cualquiera	I	---	---	---
ESTRUCTURAS ESPECIALES	Cualquiera	I	I	I	I
OTRAS ESTRUCTURAS	Cualquiera	II	I	I	I
- Cuando la distancia sobrepasa la indicada, se clasificará en el tipo de edificación inmediato superior.					
TANQUES ELEVADOS Y SIMILARES		≤ 9 m de altura	> 9 m de altura		
		II	I		
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA		III			
INSTALACIONES SANITARIAS DE AGUA Y ALCANTARILLADO EN OBRAS URBANAS.		IV			

Luego, con un tipo de edificación III y el área techada del primer piso del proyecto: 1630.206 m^2 (*Dato de la especialidad de Arquitectura*), calculamos el número de puntos de exploración (n) usando la tabla 6 *(Número de puntos de exploración)*:

TABLA 6
NÚMERO DE PUNTOS DE EXPLORACION

Tipo de edificación u obra (Tabla 1)	Número de puntos de exploración (n)
I	uno por cada 225 m2 de área techada del primer piso
II	uno por cada 450 m2 de área techada del primer piso
III	uno por cada 900 m2 de área techada del primer piso*
IV	uno por cada 100 m de instalaciones sanitarias de agua y alcantarillado en obras urbanas
Habilitación urbana para Viviendas Unifamiliares de hasta 3 pisos	3 por cada hectárea de terreno por habilitar

Por tanto:

$$n = \frac{A_T}{900m^2} = \frac{1630.206m^2}{900m^2} = 1.811 \;\; ; \; n \approx 2$$

Debido a que se quiere abarcar la mayor cantidad de área a tener gran cantidad de área libre se consideró realizar 03 calicatas más, siendo un total de 05 puntos de exploración para al proyecto.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

En segundo lugar, para determinar la profundidad de los puntos de exploración usamos las fórmulas y consideraciones expuesta en el artículo 15. Además de que la edificación proyectada no cuenta con sótano.

$$p = D_f + z$$

Considerando un valor de D_f mínimo de 1.5m y de ancho de cimentación (B) 1.0m. Reemplazando los valores en la ecuación:

$$p = 1.5m + (1.5 \cdot 1.0m) = 3.0m$$

Este valor se usa en la exploración de campo para las calicatas donde se prevé se ubicará la edificación y de las cuales se extraerán muestras para el cálculo de capacidad de carga.

2.4. Registro de puntos de exploración:

Calicatas, pozos de exploración y perforaciones:

Con la finalidad de determinar el perfil estratigráfico del área en estudio se han realizado cinco (05) excavaciones a cielo abierto usando herramientas manuales. Estas tienen largo y ancho aproximado de 1.00 m x 1.00 m, y 3.0 m mínimo de profundidad máxima.

Asimismo, las calicatas se registraron bajo la Norma A.S.T.M. D 2488 (Procedimiento Visual-Manual, Descripción e Identificación de Suelos), anotándose las principales características de los tipos de suelos encontrados, tales como: espesor, humedad, compacidad, dilatancia, plasticidad, tenacidad, etc.

Calicata N°	ESTRUCTURA	Coordenadas	
		Este	Norte
C-01	ZAPATA	803391	9158546
C-02	ZAPATA	803440	9158547
C-03	**ZAPATA**	**803467**	**9158530**
C-04	MURO DE CONTENCION	803395	9158521
C-05	LOSA	803370	9158549

2.5. Muestreo Disturbado.

Se tomaron muestras inalteradas en bloque (Mib) de cada uno de los tipos de suelos encontrados, en cantidad suficiente, para realizar los ensayos de clasificación e identificación de suelos.

3. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos estándar y especiales en Suelos se realizaron bajo las Normas A.S.T.M. (American Society For testing and Materials).

3.1. Ensayos Estándar

07 ensayos de Análisis granulométrico	ASTM D 422
07 ensayos de Límite líquido, Límite plástico	ASTM D 4318
07 ensayos de Contenido de Humedad	ASTM D 2216
04 ensayos de densidad de suelo por método de cilindro impulsor	ASTM D 2937

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

3.2. Ensayos Especiales

04 ensayo de Corte Directo	ASTM D 3080
01 ensayo de Proctor Modificado	AASHTO T 180 – ASTM D 1557
01 ensayo de California Bearning Ratio (CBR)	AASHTO T 193 – ASTM D 1883

3.3. Clasificación de Suelos

Las clasificaciones de las muestras ensayadas en el laboratorio se han clasificado de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), bajo la Norma A.S.T.M. D 2487 y la Norma Técnica A.A.S.H.T.O. M 145, según se requiera.

Cuadros de clasificación de suelos

CALICATA	C – 03
Muestra	M - 1
Profundidad (m)	0.30 m a 3.00 m
% Pasa Tamiz Nº 4	91.79
% Pasa Tamiz Nº 200	76.74
Límite Líquido (%)	38.00
Índice Plástico (%)	16.00
Contenido de Humedad (%)	10.96
Clasificación S.U.C.S.	CL

4. PERFIL DEL SUELO

En base a los trabajos de campo y ensayos de laboratorio se deduce la siguiente información:

La Calicata N° 3 Presenta un primer estrato hasta 0.30 m de profundidad constituido por materia orgánica. De 0.30 m hasta 3.00m de profundidad existe un segundo estrato constituido por arcilla inorgánica de baja plasticidad, color marrón, mezclada con 8.21% de grava de TM 3/4" y 15.05% de arena gruesa a fina.

5. ASPECTOS RELACIONADOS CON LA NAPA FREÁTICA.

En todas las exploraciones, no se encontró nivel freático.

6. ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN

6.1. Cálculo de la Capacidad de Carga Admisible

Para la determinar la Capacidad de Carga Admisible, se ha considerado el ángulo de fricción interna y el valor de la cohesión, obtenido del Ensayo de Corte Directo (ASTM D 3080). Los cuáles son:

CALICATA		**C – 03**
Muestra		**M – 1**
Tipo de Suelo		**CL**
Ángulo de Fricción Interna (°)	ø	14.03
Cohesión (Kg/cm^2)	c	0.171
Peso específico húmedo (g/cm^3)	γ_H	1.627

La capacidad portante del suelo se calculará haciendo variar el tipo de suelo para la cimentación, a la vez que la profundidad de desplante y sus dimensiones. Se usará el método de Terzaghi.

Los datos en el cálculo de capacidad portante, serán los del corte directo de las calicatas (C-n), dado que es el caso crítico, de ángulo de fricción y cohesión efectivos más bajos. Este último valor se empleará en los cálculos siguientes.

Teoría de capacidad de carga de Terzaghi:

Falla local por corte y falla de corte por punzonamiento:

GUERSAN INGENIEROS SRL.

Cimentación continua o corrida

$$q_u = \frac{2}{3}c'N_c' + qN_q' + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma'$$

N_c', N_q', N_γ' = Factores de capacidad de carga modificados.

Cimentación cuadrada

$$q_u = 0.867c'N_c' + qN_q' + 0.4\gamma B N_\gamma'$$

Ecuación general de la capacidad de carga (Meyerhof):

$$q_u = c'N_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + qN_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2}\gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Donde:

- c' = Cohesión del suelo
- γ = Peso específico del suelo
- q = γD_f Esfuerzo efectivo al nivel de fondo de la cimentación.
- $F_{cs}, F_{qs}, F_{\gamma s}$ = Factores de forma.
- $F_{cd}, F_{qd}, F_{\gamma d}$ = Factores de profundidad.
- $F_{ci}, F_{qi}, F_{\gamma i}$ = Factores de inclinación de la carga.
- N_c, N_q, N_γ = Factores de capacidad de carga.
- B = Ancho de la cimentación

Luego, la capacidad de carga admisible, se determina bajo la siguiente expresión. Independientemente del método de cálculo de la capacidad portante o el tipo de cimentación:

$$q_{perm} = \frac{q_u}{FS}$$

Las siguientes tablas resumen muestran la capacidad portante determinada para diferentes condiciones y por los métodos antes descritos.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

7.1.3. Capacidad de carga del suelo (C - 03) - Módulo de Centro de Recursos y Aulas 07 y 08 del Nivel Primario de 02 niveles

MÉTODO DE TERZAGHI:

Se emplearon los siguientes datos:

Cohesión (kg/cm2):	**c=**	0.171
Ángulo de fricción (°):	**ϕ =**	14.03
Peso específico húmedo (g/cm3):	**γ =**	1.627
Factor de Seguridad	**F.S. =**	3
Tipo de Falla	Falla loca l por corte	

En base al ángulo de fricción los factores de capacidad de carga modificados, son:

N'c =	9.321
N'q =	2.555
N'g=	0.483

Por tanto, al aplicar las fórmulas correspondientes se obtienen los siguientes datos, en función del tipo de cimentación:

CIMENTACIÓN CUADRADA - Ec. Terzaghi (Suelo en C-03 (Módulo de Centro de Recursos y AA. 07 y 08 del Nivel Primario de 02 Niveles))

Df (m)	B (m)	L (m)	N'c	N'q	N'g	qu (kg/cm2)	qadm (kg/cm2)
1.50	1.00	1.00	9.321	2.555	0.483	2.037	0.679
	1.25	1.25	9.321	2.555	0.483	2.045	0.682
	1.50	1.50	9.321	2.555	0.483	2.053	0.684
	2.00	2.00	9.321	2.555	0.483	2.068	0.689
	2.80	2.80	9.321	2.555	0.483	2.093	0.698
2.00	1.00	1.00	9.321	2.555	0.483	2.245	0.748
	1.25	1.25	9.321	2.555	0.483	2.253	0.751
	1.50	1.50	9.321	2.555	0.483	2.261	0.754
	2.00	2.00	9.321	2.555	0.483	2.276	0.759
	2.80	2.80	9.321	2.555	0.483	2.301	0.767
2.50	1.00	1.00	9.321	2.555	0.483	2.453	0.818
	1.25	1.25	9.321	2.555	0.483	2.461	0.820
	1.50	1.50	9.321	2.555	0.483	2.468	0.823
	2.00	2.00	9.321	2.555	0.483	2.484	0.828
	2.80	2.80	9.321	2.555	0.483	2.509	0.836
3.00	1.00	1.00	9.321	2.555	0.483	2.661	0.887
	1.25	1.25	9.321	2.555	0.483	2.668	0.889
	1.50	1.50	9.321	2.555	0.483	2.676	0.892
	2.00	2.00	9.321	2.555	0.483	2.692	0.897
	2.80	2.80	9.321	2.555	0.483	2.717	0.906

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

6.2. Cálculo de Asentamiento Inmediato

Se determinó el asentamiento elástico basado en la teoría de la elasticidad. Dicho asentamiento está basado en la ley de Hooke (Braja 2011, p.245), y se expresa con la siguiente fórmula:

$$Se = q_0 (\alpha B') \frac{1-\mu_s^2}{Es} . I_S . I_F$$

Donde:

q_0 = Presión neta aplicada sobre la cimentación
μ_s = Coeficiente de Poisson para el suelo
E_s = Módulo de elasticidad promedio del suelo debajo de la cimentación medido desde z=0 hasta z=4B
B' = B/2 para el centro de la cimentación
= B para la esquina de la cimentación
I_s = Factor de forma (Steinbrenner,1934)

$$I_S = F_1 + \frac{1-2\mu_s}{1-\mu_s} F_2$$

Variación F_1, F_2 con respecto m', n'
Para el centro de la cimentación: m'=L/B y n'=H/(B/2)
Para la esquina de la cimentación: m'=L/B y n'=H/B

I_f = Factor de profundidad (Fox,1948)
α = Factor que depende de la ubicación de la cimentación en donde el asentamiento está siendo calculado

Para el centro de la cimentación: α=4
Para la esquina de la cimentación: α=1

Además, se debe asumir parámetros elásticos en función del tipo de suelo de fundación. Para este fin empleamos la tabla de *Rangos Típicos de Constantes Elásticas de Diferentes Materiales* (Lambe & Whitman, 1969). Dónde los valores para el suelo CL se marcan en color rojo.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

Typical Ranges for Elastic Constants of Various Materials

Material	Young's Modulus E kg/cm^2	Poisson's Ratio, υ
SOILS		
Clay:		
Soft sensitive	20-40 (500s_u)	
Firm to stiff	40-80 (1000s_u)	0.4-0.5
Very stiff	80-200 (1500s_u)	(undrained)
Loess	150-600	0.1-0.3
Silt	20-200	0.3-0.35
Fine sand:		
Loose	80-120	
Medium dense	120-200	0.25
Dense	200-300	
Sand:		
Loose	100-300	0.2-0.35
Medium dense	300-500	
Dense	500-800	0.3-0.4
Gravel:		
Loose	300-800	
Medium dense	800-1000	
Dense	1000-2000	
ROCKS		
Sound, intact igneous and metamorphics	6 - 10x10^5	
Sound, intact sandstone and limestone	4 - 8x10^5	
Sound, intact shale	1 - 4x10^5	
Coal	1 - 2x10^5	

Asimismo, el valor de la presión neta aplicada sobre la cimentación será el resultado del metrado de cargas verticales sobre columnas, considerando siempre el valor crítico. Para cada caso se tomaron columnas que permitan hacer el análisis del valor crítico respectivo. En este caso se ha considerado 02 columnas (color rojo y azul como se muestran en los gráficos).

GUERSAN INGENIEROS SRL.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

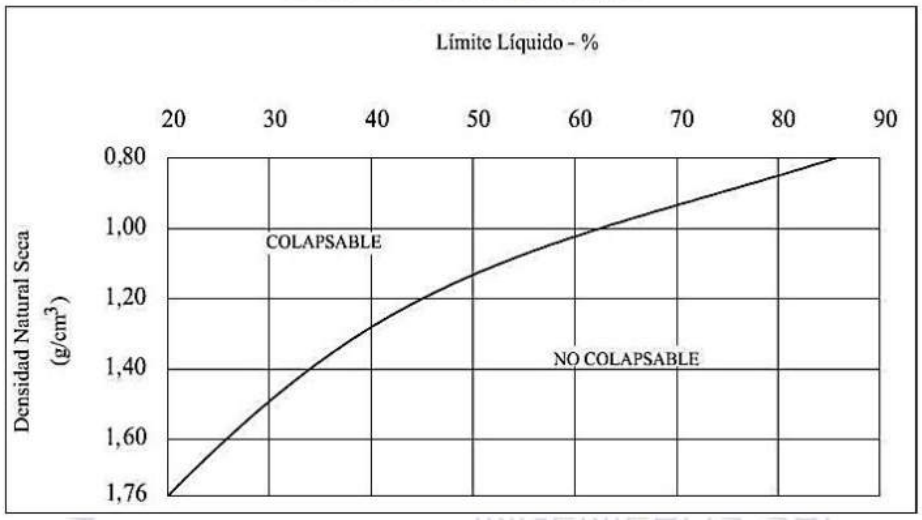
7. PROBLEMAS ESPECIALES DE CIMENTACIÓN

A continuación, se analiza los problemas especiales de cimentación de acuerdo con el Capítulo 6 de la norma E.050 SUELOS Y CIMENTACIONES – RNE.

SUELOS COLAPSABLES

Para determinar si el suelo en estudio puede sufrir colapso usamos los datos de límite líquido, densidad húmeda natural y el contenido de humedad, estos dos últimos valores para calcular previamente la densidad natural seca. Posteriormente se emplea la gráfica siguiente para evaluar, por calicata, si el suelo es o no colapsable:

Criterios del Potencial de Colapso

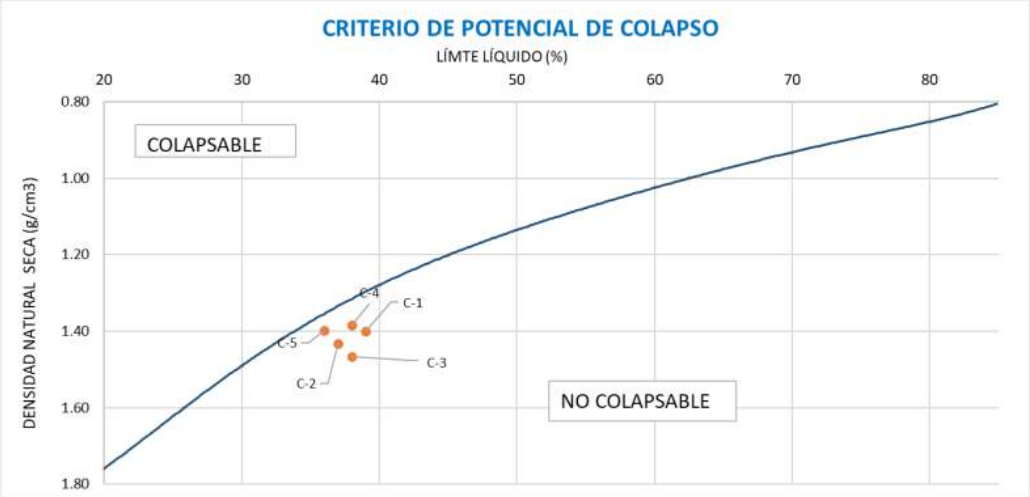


Los datos a utilizar son, calicatas donde se realizó el ensayo de *densidad in situ*:

SUELOS COLAPSABLES						
CALICATA	RESULTADO DE ENSAYO					
	LL(%)	LP(%)	IP(%)	W(%)	DENSIDAD HÚMEDA (g/cm3)	DENSIDAD NATURAL SECA
C - 3	38.00	22.00	16.00	10.96	1.627	1.466

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vasquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

Luego, al ubicar cada calicata en la gráfica de *Criterio del Potencial de Colapso*:



Dado que la densidad seca es mayor a 1.30 g/cm^3 y el valor de los límites líquidos de cada calicata están entre 30% y 40%, se concluye que los suelos estudiados son suelos no colapsables.

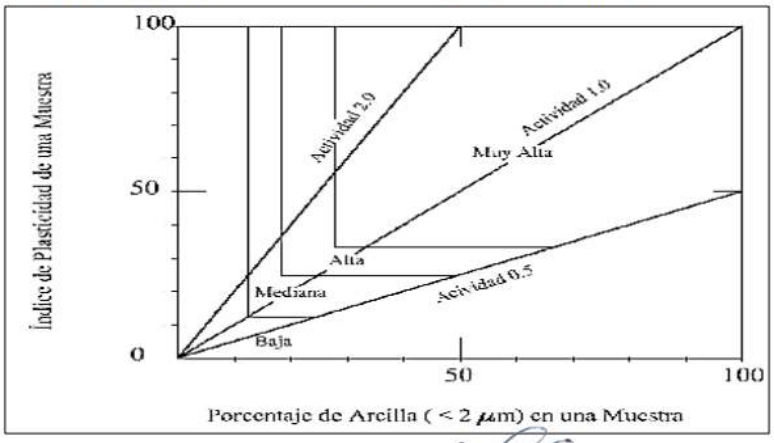
SUELOS EXPANSIVOS

Para valorar el potencial de expansión de los suelos en estudio emplearemos el criterio de actividad (A) propuesto en la norma E.050 y su comparación con un nomograma y con la tabla de Skempton (1953). Asimismo, tendremos en cuenta el método de Nayak y Christensen, para calcular el porcentaje de hinchamiento posible (Sp %). Y finalmente una comparación empleando una tabla de clasificación.

En el primer método usamos la relación siguiente:

$$Actividad\ (A) = \frac{IP}{\%arcillas}$$

Luego se evalúa la expansión mediante el siguiente nomograma:



GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

Asimismo, se emplea la siguiente tabla:

ACTIVIDAD DE LAS ARCILLAS (Skempton, 1953)	
ACTIVIDAD	CATEGORÍA DE SUELO
<0.75	INACTIVO
0.75 – 1.25	NORMAL
>1.25	ACTIVO

Por otro lado, el método Nayak y Christensen emplea la siguiente relación:

$$Sp = (2.29 \cdot 10^{-2}) \cdot (IP)^{1.45} \cdot \frac{C}{W_i} + 6.38$$

Donde:

$S_p =$ % de hinchamiento posible
$IP =$ Índice de plasticidad
$C =$ Contenido de arcilla en %

Finalmente se clasifica usando la tabla siguiente:

Grado de Expansión	LL %	IP %	τ nat (Ton/pie^2)
Elevado	> 60	> 35	> 4
Marginal	50-60	25-35	1.5-4
Bajo	< 50	< 25	< 1.5

Empleamos los resultados obtenidos de laboratorio se presentan en la siguiente tabla:

SUELOS EXPANSIVOS									
CALICATA	RESULTADO DE ENSAYO					Actividad (A)	Método de Nayak Sp (%)	Valoración Skempton	Valoración
	LL(%)	LP(%)	IP(%)	W(%)	FRACCIÓN ARCILLA				
C - 1	39.00	22.00	17.00	15.95	80.86	0.21	13.89	Inactivo	Bajo
C - 2	37.00	23.00	14.00	12.80	73.48	0.19	12.87	Inactivo	Bajo
C - 3	38.00	22.00	16.00	10.96	76.74	0.21	15.76	Inactivo	Bajo
C - 4	38.00	22.00	16.00	18.28	63.29	0.25	11.25	Inactivo	Bajo
C - 5	36.00	23.00	13.00	14.01	64.79	0.20	11.20	Inactivo	Bajo

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

LICUACIÓN DE SUELOS

Para evaluar este fenómeno en el suelo de cimentación emplearemos dos criterios: Andrews – Martin, y Wang. Además de las consideraciones presentadas en el artículo 38 de la norma E.050.
El criterio Andrews - Martin, que aplica a suelos con presencia de finos. Basta comparar las propiedades del suelo con el cuadro siguiente:

	Limite Liquido < 32	Limite Liquido ≥ 32
Fracción de arcilla < 10%	Susceptible	Puede ser susceptible (Requiere información adicional)
Fracción de arcilla ≥ 10%	Puede ser susceptible (Requiere información adicional)	No susceptible

Por otro lado, Wang proponen cuatro criterios, que si todos son cumplidos por el suelo en estudio significará que este el susceptible al fenómeno de licuación: Fracción de arcilla es menor o igual a 15%, Límite líquido menor o igual a 35%, Contenido de humedad natural mayor o igual a 0.9 veces de límite líquido y Índice de liquidez menor o igual a 0.75.

Además, de acuerdo con la normativa peruana un criterio indispensable para que suelos sean susceptibles a este fenómeno deben encontrarse sumergidos (presencia de napa freática). Situación que en la exploración no se observó en ninguno de los puntos de estudio.

Lo valoración del fenómeno de licuación en los suelos en estudio se presenta a continuación:

LICUACIÓN DE SUELOS

CALICATA	RESULTADO DE ENSAYO						PRESENCIA DE NAPA FREÁTICA	CRITERIO ANDREWS - MARTIN	CRITERIO WANG
	LL(%)	LP(%)	IP(%)	W(%)	0.9*LL	FRACCIÓN ARCILLA (%)			
C - 1	39.00	22.00	17.00	15.95	35.10	80.86	NO	No susceptible	No susceptible
C - 2	37.00	23.00	14.00	12.80	33.30	73.48	NO	No susceptible	No susceptible
C - 3	**38.00**	**22.00**	**16.00**	**10.96**	**34.20**	**76.74**	**NO**	**No susceptible**	**No susceptible**
C - 4	38.00	22.00	16.00	18.28	34.20	63.29	NO	No susceptible	No susceptible
C - 5	36.00	23.00	13.00	14.01	32.40	64.79	NO	No susceptible	No susceptible

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

8. AGRESIÓN DEL SUELO A LA CIMENTACIÓN

De los resultados obtenidos del ensayo de análisis de sales agresivas al concreto, realizado en una muestra del suelo representativa de las siguientes calicatas, se tiene:

Calicata	pH	Cl^{1-}	SO_4^{2-}
		(%)	(%)
	NTP 339.176	NTP 339.177	NTP 339.178
C - 3	7.01	0.087	0.132

Este caso se consideraría como exposición moderada a los sulfatos, categoría S clase S1 (proporción de sulfatos: 0.1% ≤ SO_4^2 ≤ 0.2 %), según el código ACI 318 S-14 y el capítulo 4 de la Norma E.060 del Reglamento Nacional de Edificaciones; por consiguiente, se recomienda utilizar, Cemento Portland Tipo MS (ASTM C-1157).

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

9.1. El terreno en estudio se encuentra ubicado en el en el Sector Pampa Cochabamba, Distrito de Cachachi, Provincia Cajabamba, Región Cajamarca.

9.2. El subsuelo del terreno destinado para la ejecución del Proyecto: "MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA." está conformado por:

CALICATA	DESCRIPCIÓN
C - 03	Presenta un primer estrato hasta 0.30 m de profundidad constituido por materia orgánica. De 0.30 m hasta 3.00m de profundidad existe un segundo estrato constituido por arcilla inorgánica de baja plasticidad, color marrón, mezclada con 8.21% de grava de TM 3/4" y 15.05% de arena gruesa a fina.

9.3. Adicionalmente, se recomienda que ningún elemento o estructura del proyecto se cimiente sobre turba, suelo orgánico, tierra vegetal, desmonte o relleno sanitario y que estos materiales inadecuados deberán ser removidos en su totalidad, antes de construir la cimentación y ser reemplazados con materiales seleccionados.

9.4. Al evaluar las propiedades de los suelos de fundación (Límite Líquido, Índice Plástico, Contenido de humedad, Fracción de arcillas, entre otros), se concluye que estos son: No Colapsables, poseen bajo Potencial de expansión y No son susceptibles al fenómeno de licuación.

9.5. Dado que el método de Terzaghi, para el cálculo de la capacidad portante, brinda resultados más conservadores respecto a los obtenido por la ecuación de Meyerhof, serán estos los que se empleen para las conclusiones y recomendaciones referentes a la cimentación de estructuras aporticada del proyecto en estudio.

9.6. Referente al Módulo de Centro de Recursos y Aulas 07 y 08 del Nivel Primario de 02 Niveles:

Comparando la presión producto de la carga vertical crítica (68.11 Tn) y la capacidad de carga del suelo, se observa que no ocurrirá una falla por corte cuando la profundidad de cimentación sea mayor o igual a 3.00m y el lado de la zapata aislada sea mayor o igual a 2.80m. Ya que bajo estas condiciones la capacidad de carga del estrato de fundación (0.9057 kg/cm^2) es mayor al esfuerzo transmitido por la estructura (0.8827 kg/cm^2).

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

Para las condiciones de cimentación antes descritas. El asentamiento flexible en el centro de la zapata es de 1.468 cm, en tanto que para la esquina es de 0.419 cm. Ambos valores no superar el valor máximo de asentamiento para estructuras aporticada; 1" (2.54 cm aproximadamente).

La distorsión angular se determinó comparando los asentamientos producidos por dos cargas verticales diferentes en un pórtico principal (68.11 Tn y 52.84 Tn), para el caso de zapatas aisladas a profundidad de desplante de 3.00 m y ancho de 2.80m, ambas separadas 7.450 m se obtienen un valor de $\propto$=1/2264. Valor que es menor al límite seguro para edificios en los que no se permiten grietas (1/500).

En base a las conclusiones anteriores y el tipo de suelo donde se cimentará, se recomienda que la profundidad de cimentación mínima sea 3**.00m.** Este valor incluye los mejoramientos de suelos bajo el nivel final de la zapata (**2.50m**) y son:

Solado de concreto: 0.10m
Capa Nivelante: 0.10m
Piedra grande: 0.30m

9.7. Por la exposición moderada a sulfatos encontrados en el análisis químico, se recomienda que los elementos de concreto en contacto con el suelo de la cimentación sean elaborados con Cemento Portland Tipo MS (ASTM C-1157).

9.8. El ingeniero estructurista estará a cargo de determinar las dimensiones de la cimentación, acorde a la capacidad admisible de carga del terreno de fundación compatible con las cargas transmitidas y la Norma Técnica E-060.

9.9. El concreto a utilizar en la cimentación debe ser diseñado por un especialista en Tecnología del Concreto, empleando agregados que deben cumplir con la Norma A.S.T.M. C 33M-16. Además, el agua a ser utilizada para las mezclas de concreto debe cumplir con la Norma N.T.P, 339.088. Asimismo, utilizar agregados lavados, por cuanto, estos pueden contener sustancias deletéreas que influyen negativamente en las propiedades del concreto endurecido.

9.10. Se recomienda, realizar muestreo de las mezclas de concreto a elaborar en la ejecución de la Obra, acorde a la Norma A.S.T.M. C 172. Asimismo, se debe utilizar un método de curado adecuado para el concreto acorde a la Norma A.S.T. M. C 31M-10 (temperatura de agua de curado: 23°C ± 2°C, humedad relativa 95%), con la finalidad de alcanzar el grado de hidratación y por ende la resistencia mecánica requerida en obra y los especímenes de concreto deberán ensayarse de acuerdo a la Norma A.S.T.M. C 39, con la finalidad de evaluar el control de calidad del concreto en concordancia con el Reglamento ACI 318S-14.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

GUERSAN INGENIEROS SRL	"MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."					GI-EMS-003-10-21 Fecha: 4/10/2021
CONTENIDO DE HUMEDAD **A.S.T.M. D 2216 / A.A.S.H.T.O. T 265**						
SOLICITANTE:	MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CACHACHI.					
UBICACIÓN:	CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DECAJABAMBA - CAJAMARCA.					
CALICATA:	C-03	**ESTRUCTURA:**	ZAPATA	**COORDENADAS:**	**ESTE:**	803467
MUESTRA:	M - 1	**PROFUNDIDAD:**	DE 0.30M. A 3.00M.		**NORTE:**	9158530.00

Resultados de ensayos de laboratorio.

CONTENIDO DE HUMEDAD	
TEMPERATURA DE SECADO	110° C
TARA Nº	**T-8**
Wt+ M.Húmeda (g)	**1768.00**
Wt+ M. Seca (g)	**1604.00**
W agua (g)	164.00
W tara (g)	**107.50**
W M.Seca (g)	1496.50
W (%)	**10.96%**

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

GUERSAN INGENIEROS SRL	"MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."	GI-EMS-003-10-21 Fecha: 4/10/2021

LÍMITES DE ATTERBERG

A.S.T.M. D 4318 / A.A.S.H.T.O. T 89

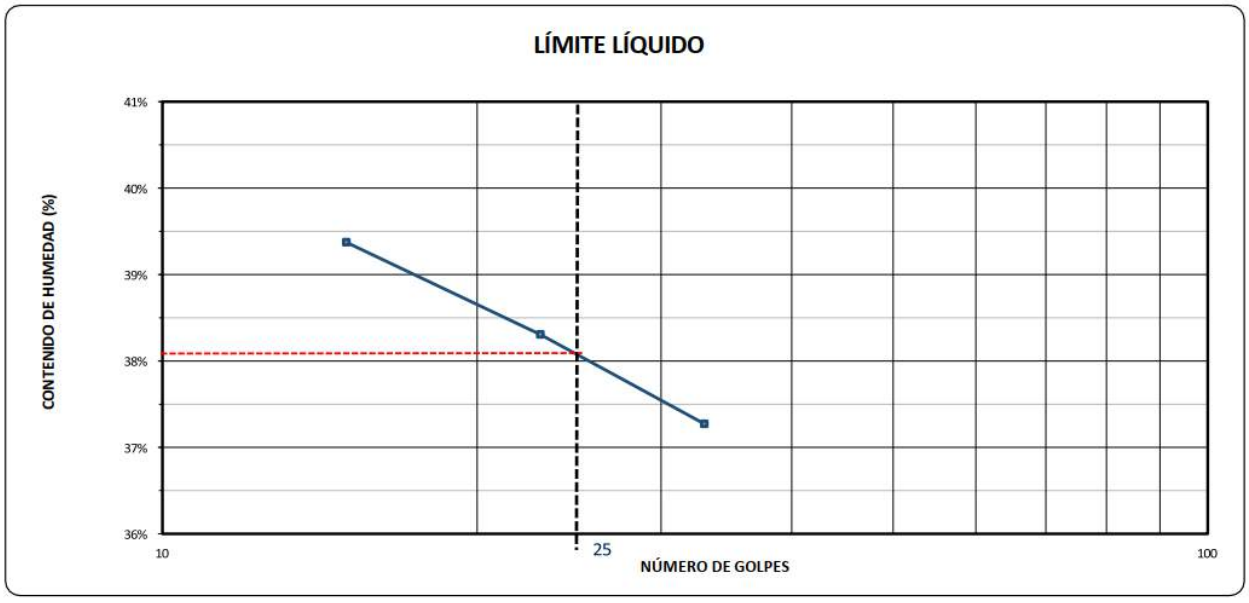
SOLICITANTE:	MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CACHACHI.					
UBICACIÓN:	CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DECAJABAMBA - CAJAMARCA.					
CALICATA:	C-03	**ESTRUCTURA:**	ZAPATA	**COORDENADAS**	**ESTE:**	803467
MUESTRA:	M - 1	**PROFUNDIDAD:**	DE 0.30M. A 3.00M.		**NORTE:**	9158530

LÍMITE LÍQUIDO			
TARA Nº	1	2	3
Wt+ M.Húmeda (g)	**31.52**	**30.75**	**31.17**
Wt+ M. Seca (g)	**26.13**	**26.05**	**26.47**
W agua (g)	5.39	4.70	4.70
W tara (g)	**12.44**	**13.78**	**13.86**
W M.Seca (g)	13.69	12.27	12.61
W(%)	39.37%	38.30%	37.27%
N.GOLPES	**15**	**23**	**33**

TEMPERATURA DE SECADO	
PREPARACIÓN DE MUESTRA	
60°C	110° C
CONTENIDO DE HUMEDAD	
60°C	110° C
AGUA USADA	
DESTILADA	
POTABLE	
OTRA	

LÍMITE PLÁSTICO			
TARA Nº	4	5	Promedio
Wt+ M.Húmeda (g)	**20.31**	**20.11**	
Wt+ M. Seca (g)	**19.20**	**19.01**	
W agua (g)	1.11	1.10	
W tara (g)	**14.21**	**14.10**	
W M.Seca (g)	4.99	4.91	
W(%)	22.24%	22.40%	22.32%

LÍMITE LÍQUIDO	38.00%
LÍMITE PLÁSTICO	22.00%
ÍNDICE DE PLASTICIDAD	16.00%



GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

GUERSAN INGENIEROS SRL	"MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."	GI-EMS-003-10-21
		Fecha: 4/10/2021

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
A.S.T.M. D 422 / A.A.S.H.T.O. T 88

SOLICITANTE:	MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CACHACHI.					
UBICACIÓN:	CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DECAJABAMBA - CAJAMARCA.					
CALICATA:	C-03	**ESTRUCTURA:**	ZAPATA	**COORDENADAS**	**ESTE:**	803467
MUESTRA:	M - 1	**PROFUNDIDAD:**	DE 0.30M. A 3.00M.		**NORTE:**	9158530

CONDICIONES DE LA MUESTRA TOTAL				
TEMPERATURA DE SECADO	110° C	PORCENTAJE DE GRAVA, ARENAS Y FINOS		% TOTAL
PESO TOTAL MUESTRA SECA (g)	**3812.00**	GRAVA (%):	8.21	**100.00**
PESO TOTAL MUESTRA SECA < Nº 4 (g)	3499.00	ARENA GRUESA (%):	11.46	
PESO TOTAL MUESTRA SECA > Nº 4 (g)	313.00	ARENA FINA (%):	3.59	
PESO TOTAL MUESTRA HUMEDA (g)	3816.18	FINOS (%):	76.74	

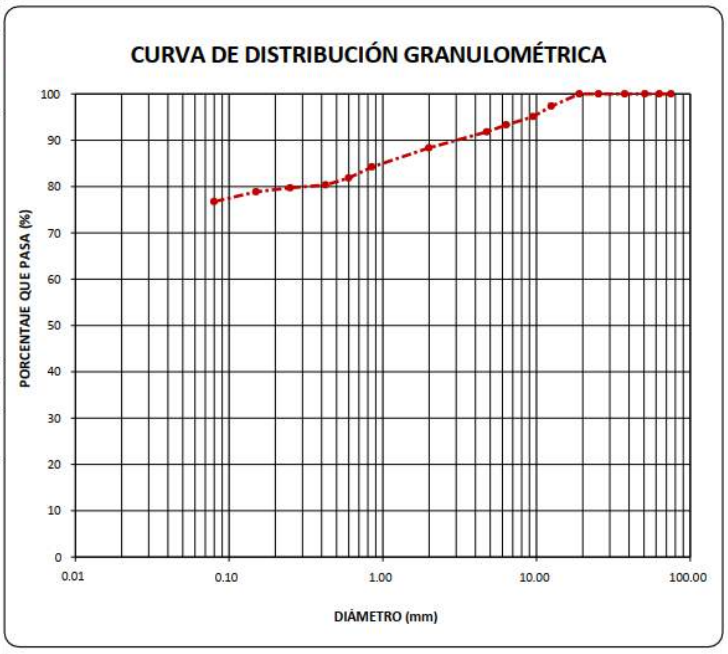
ANÁLISIS FRACCIÓN GRUESA

Tamiz N°	Tamiz Abertura (mm)	Peso Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Parcial	Porcentaje Retenido Acumulado	Porcentaje Que Pasa
3"	76.20	0.00	0.00	0.00	100.00
2 ½"	63.50	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00
1 ½"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.05	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	12.70	101.00	2.65	2.65	97.35
3/8"	9.52	86.00	2.26	4.91	95.09
1/4"	6.35	68.00	1.78	6.69	93.31
N°4	4.75	58.00	1.52	8.21	**91.79**
TOTAL	W G =	313.00			

ANÁLISIS FRACCIÓN FINA

CORRECCIÓN DE MUESTRA CUARTEADA :					0.3672
PESO SECO FRACCIÓN FINA :					250.00
N 10	2.00	9.40	3.45	11.66	88.34
N 20	0.85	11.20	4.11	15.77	84.23
N 30	0.60	6.50	2.39	18.16	81.84
N 40	0.43	4.10	1.51	19.67	80.33
N 60	0.25	1.70	0.62	20.29	79.71
N 100	0.15	2.30	0.84	21.13	78.87
N 200	0.08	5.80	2.13	23.26	**76.74**
Cazoleta	--	--	--	--	--
TOTAL					

LÍMITES DE CONSISTENCIA A.S.T.M. D 4318 / A.A.S.H.T.O. T 89	
LÍMITE LÍQUIDO :	38.00%
LÍMITE PLÁSTICO :	22.00%
ÍNDICE PLÁSTICO :	16.00%
CLASIFICACIÓN S.U.C.S. :	**CL**



D60 =		D30=		D10 =	
	Cu =		Cc =		

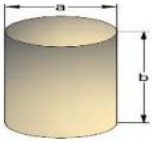
OBSERVACIONES: LA MUESTRA EN ESTUDIO HA SIDO CLASIFICADA UTILIZANDO EL METODO S.U.C.S. Y CORRESPONDE A UNA ARCILLA INORGANICA DE BAJA PLATICIDAD, COLOR MARRON, MEZCLADA CON 8.21% DE GRAVA DE TM 3/4" Y 15.05% DE ARENA GRUESA A FINA.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vasquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255748

GUERSAN INGENIEROS SRL	"MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."	GI-EMS-003-10-21 Fecha: 4/10/2021

DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO (MÉTODO VOLUMÉTRICO)

SOLICITANTE:	MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CACHACHI.					
UBICACIÓN:	CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DECAJABAMBA - CAJAMARCA.					
CALICATA:	C-03	**ESTRUCTURA:**	ZAPATA	**COORDENADAS**	**ESTE:**	803467.00
MUESTRA:	M - 1	**PROFUNDIDAD:**	DE 0.30M. A 3.00M.		**NORTE:**	9158530.00

DENSIDAD HÚMEDA		
PROPIEDADES		**CILINDRO METÁLICO**
	Peso del anillo (Wc) (g)	74.49
	Diámetro (a) (cm)	5.96
	Altura (b) (cm)	1.82
	Volumen del anillo (Vc) (cm3)	**50.78**
Peso de la muestra + anillo (Wh+c) (g)		**157.10**
Peso de la muestra (Wh) (g)		82.6
Dh (g/cm3)		**1.627**

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

GUERSAN INGENIEROS SRL	"MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."	GI-EMS-003-10-21 Fecha: 4/10/2021

ENSAYO DE CORTE DIRECTO ESTÁNDAR EN SUELOS
A.S.T.M. D 3080

SOLICITANTE:	MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CACHACHI.					
UBICACIÓN:	CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DECAJABAMBA - CAJAMARCA.					
CALICATA:	C-03	**ESTRUCTURA:**	ZAPATA	**COORDENADAS**	**ESTE:**	803467
MUESTRA:	M - 1	**PROFUNDIDAD:**	DE 0.30M. A 3.00M.		**NORTE:**	9158530

CLASIFICACIÓN S.U.C.S. :	**CL**	**ESTADO :**	**INALTERADO**

DATOS DEL MOLDE					
MOLDE	**DIÁMETRO (cm)**	**ALTURA (cm)**	**ÁREA (cm2)**	**VOLUMEN (cm3)**	**PESO (g)**
CIRCULAR	**5.96**	**1.82**	**27.899**	**50.78**	**74.49**

DATOS DEL ENSAYO								
ESFUERZO NORMAL	**(kg/cm2)**	**0.50 Kg/cm2**		**1.00 Kg/cm2**		**2.00 Kg/cm2**	
VELOCIDAD ENSAYO	(mm/min)	**0.151**		**0.103**		**0.056**	
PESO DEL ANILLO MÁS MUESTRA	(g)	**157.100**		**157.100**		**157.200**	
PESO MUESTRA	(g)	**82.610**		**82.610**		**82.710**	
DEFORMACIÓN FINAL	(mm)	**-0.201**		**-0.403**		**-0.603**	
ETAPA		**INICIAL**	**FINAL**	**INICIAL**	**FINAL**	**INICIAL**	**FINAL**
TARA		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
PESO DE LA TARA	(g)	**10.58**	**10.72**	**10.65**	**10.78**	**10.88**	**10.92**
PESO TARA + MUESTA HUMEDA	(g)	**93.19**	**94.21**	**93.26**	**94.29**	**93.59**	**94.62**
PESO TARA + MUESTRA SECA	(g)	**85.05**	**85.31**	**85.07**	**85.31**	**85.41**	**85.68**
ALTURA	(cm)	1.82	1.80	1.82	1.78	1.82	1.76
DIAMETRO	(cm)	5.96	5.96	5.96	5.96	5.96	5.96
CONTENIDO DE HUMEDAD	(%)	10.93%	11.93%	11.01%	12.05%	10.98%	11.96%
DENSIDAD HÚMEDA	(g/cm3)	1.627	1.645	1.627	1.664	1.629	1.685

ETAPA DE APLICACIÓN DE CARGA

DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL (mm)	**0.50 Kg/cm2**			**1.00 Kg/cm2**			**2.00 Kg/cm2**		
	CARGA		**ESFUERZO DE CORTE**	**CARGA**		**ESFUERZO DE CORTE**	**CARGA**		**ESFUERZO DE CORTE**
	N	**kg**	**Kg (cm2)**	**N**	**kg**	**Kg (cm2)**	**N**	**kg**	**Kg (cm2)**
0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000
0.100	6.90	0.704	0.025	9.92	1.011	0.036	14.40	1.468	0.053
0.200	11.50	1.173	0.042	19.29	1.967	0.071	27.50	2.804	0.101
0.300	18.31	1.867	0.067	28.99	2.957	0.106	46.04	4.695	0.168
0.400	26.50	2.702	0.097	34.23	3.490	0.125	57.33	5.846	0.210
0.500	30.82	3.143	0.113	43.06	4.390	0.157	68.48	6.983	0.250
1.000	35.05	3.574	0.128	50.79	5.180	0.186	82.10	8.372	0.300
1.500	40.11	4.090	0.147	59.30	6.047	0.217	96.63	9.853	0.353
2.000	45.17	4.606	0.165	68.89	7.025	0.252	112.19	11.440	0.410
2.500	52.16	5.319	0.191	79.79	8.136	0.292	128.53	13.107	0.470
3.000	58.05	5.920	0.212	88.40	9.014	0.323	143.19	14.601	0.523
3.500	65.04	6.633	0.238	97.56	9.948	0.357	158.75	16.188	0.580
4.000	73.05	7.449	0.267	107.69	10.982	0.394	173.02	17.643	0.632
4.500	80.87	8.246	0.296	115.00	11.726	0.420	183.40	18.701	0.670
5.000	80.87	8.246	0.296	115.00	11.726	0.420	183.40	18.701	0.670
5.500	80.87	8.246	0.296	115.00	11.726	0.420	183.40	18.701	0.670
6.000	80.87	8.246	0.296	115.00	11.726	0.420	183.40	18.701	0.670

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.
Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
CIP N° 255748

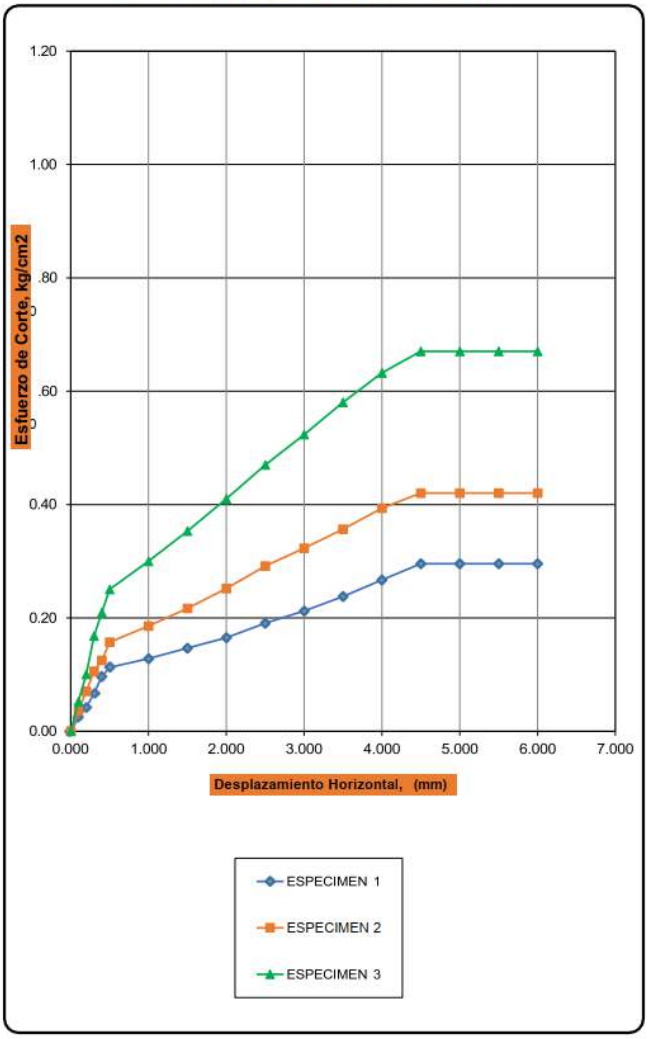
GUERSAN INGENIEROS SRL.	"MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."	GI-EMS-003-10-21 Fecha: 4/10/2021

ENSAYO DE CORTE DIRECTO ESTÁNDAR EN SUELOS
A.S.T.M. D 3080

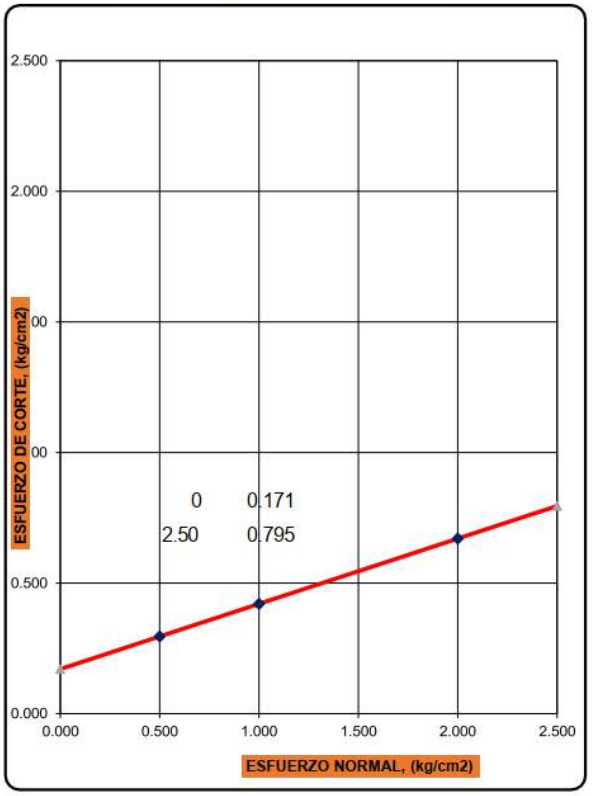
SOLICITANTE:	MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CACHACHI.					
UBICACIÓN:	CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DECAJABAMBA - CAJAMARCA.					
CALICATA:	C-03	**ESTRUCTURA:**	ZAPATA	**COORDENADAS**	**ESTE:**	803467
MUESTRA:	M - 1	**PROFUNDIDAD:**	DE 0.30M. A 3.00M.		**NORTE:**	9158530

CLASIFICACIÓN S.U.C.S. :	**CL**	**ESTADO :**	**INALTERADO**

APLICACIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE



ENVOLVENTES DE RESISTENCIA



ESPECIMEN	ESFUERZO NORMAL (kg/cm2	ESFUERZO DE CORTE (kg/cm2)
1	0.500	0.296
2	1.000	0.420
3	2.000	0.670

PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE		
COHESIÓN =	**0.171**	**kg/cm²**
ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA =	**14.03**	**°**

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

GUERSAN INGENIEROS SRL	"MEJORAMIENTO DEL SERVICIO EDUCATIVO DE LA I.E. Nº 82319 EN EL SECTOR PAMPA COCHABAMBA DEL CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DE CAJABAMBA - CAJAMARCA."	GI-EMS-003-10-21 Fecha: 4/10/2021

PERFIL ESTRATIGRÁFICO

EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

SOLICITANTE:	MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CACHACHI.					
UBICACIÓN:	CENTRO POBLADO ALGAMARCA, DISTRITO DE CACHACHI, PROVINCIA DECAJABAMBA - CAJAMARCA.					
CALICATA:	C-03	**ESTRUCTURA:**	ZAPATA	**COORDENADAS**	**ESTE:**	803467
MUESTRA:	-	**PROFUNDIDAD:**	-		**NORTE:**	9158530

Perfiles Estratigráficos

Profundidad (m)	Muestra	DESCRIPCIÓN	Clasificación		Contenido de humedad	Límites de Consistencia	
			Símbolo	Símbolo Gráfico		LL (%)	IP (%)
0.10 – 0.20 – 0.30	S/M	MATERIA ORGANICA	-		-	-	-
0.40 – 0.50 – 0.60 – 0.70 – 0.80 – 0.90 – 1.00 – 1.10 – 1.20 – 1.30 – 1.40 – 1.50 – 1.60 – 1.70 – 1.80 – 1.90 – 2.00 – 2.10 – 2.20 – 2.30 – 2.40 – 2.50 – 2.60 – 2.70 – 2.80 – 2.90 – 3.00	M - 1	ARCILLA INORGANICA DE BAJA PLATICIDAD, COLOR MARRON, MEZCLADA CON 8.21% DE GRAVA DE TM 3/4" Y 15.05% DE ARENA GRUESA A FINA.	CL		10.96%	38.00	16.00
3.10 – 3.20 – 3.30 – 3.40 – 3.50 – 3.60 – 3.70 – 3.80 – 3.90 – 4.00							

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746

Panel Fotográfico

Fotografía N° 01. Vista general de la calicata C – 3.

Fotografía N° 02. Vista Perfil Estratigráfico de la calicata C – 3.

GUERSAN INGENIEROS S.R.L.

Jhonny Vásquez Torres
INGENIERO CIVIL
REG. CIP N° 255746