



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE PROYECTOS DE PUENTES MEDIANTE DISEÑO PARAMÉTRICO Y GENERATIVO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ÁLVARO ANDRÉS RIQUELME GALLARDO

PROFESOR GUÍA

GUSTAVO RAIMUNDO SOLAR GUZMÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

PEDRO ASTABURUAGA GUTIÉRREZ

RAFAEL RUIZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE

2022

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

Por: Álvaro Andrés Riquelme Gallardo

Año: 2022

Profesor Guía: Gustavo Solar Guzmán

**DESARROLLO DE LA AUTOMATIZACIÓN DE PROYECTOS DE PUENTES
MEDIANTE DISEÑO PARAMÉTRICO Y GENERATIVO**

El presente trabajo consiste en desarrollar herramientas de trabajo para automatizar proyectos de puentes con vigas longitudinales en su etapa de diseño, cálculo y revisión. Para esto se realizan tres códigos de programación en el lenguaje Grasshopper de Rhino basados en la metodología paramétrica y generativa que modelan completamente un puente. Además de esto, los códigos se pueden exportar al programa de elementos finitos RFem, en el cual se puede realizar el análisis y cálculo completo de la estructura.

El primer código de Grasshopper, que modela un estribo paramétrico, importa información desde una planilla de Excel que contiene medidas de geometría, materiales, apoyos, empujes y cargas, las cuales el código utiliza para dibujar el estribo completo. Luego, usando componentes de Grasshopper, el usuario puede exportar el modelo a RFem. El segundo código de Grasshopper es similar al primer código, pero dibujando la superestructura y las cepas paramétricas de un puente. Al igual que el código de estribo, se importa toda la información desde una planilla Excel y el usuario puede exportar todo el modelo a RFem. El tercer código utiliza el componente Galápagos de Grasshopper, el cual optimiza vigas pretensadas para puentes simplemente apoyados mediante el diseño generativo. Este código opera de manera individual, ya que no exporta la viga a RFem, pero también puede ser utilizado en conjunto con los códigos paramétricos del puente calibrando la viga que utiliza la estructura.

Además de estos tres códigos, se validan resultados de RFem usando SAP2000, ya que el programa RFem no es muy utilizado en Chile. Entre los dos programas se comparan las fuerzas axiales, momentos en pilotes, diagramas de interacción, reacciones en apoyos y deformaciones obtenidas desde un modelo de estribo y desde un modelo general (superestructura y cepas).

Los códigos paramétricos se desarrollaron de manera exitosa ahorrando al ingeniero cerca de un 80% del tiempo total de modelado por cada puente en estudio. El código generativo de vigas pretensadas también tuvo un exitoso desarrollo permitiendo que el ingeniero ahorre un buen porcentaje de material constructivo al optimizar una viga. Junto con esto, los resultados de cálculo comparados en RFem y SAP2000 arrojan buenos resultados (bajo porcentaje de diferencia) en combinaciones sísmicas y diagramas de interacción en pilotes. Sin embargo, existen altos porcentajes de diferencia en reacciones de placas de apoyo que se puede deber a algún problema de compatibilidad en el elemento de rigidez definible entre RFem y SAP. Debido a esto la validación debería estudiarse más a fondo para comprender la razón real de estas diferencias.

El objetivo principal se cumple, exponiendo y explicando una metodología moderna, con sus ventajas y desventajas, no muy utilizada actualmente en Chile, pero se espera que con el tiempo sea utilizada por un mayor número de ingenieros interesados en la automatización e innovación.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi jefe de práctica y profesor guía Gustavo Solar por el gran apoyo brindado para la realización de este trabajo y por introducirme en el mundo de la ingeniería de puentes. También agradezco a los miembros de la comisión Pedro Astaburuaga y Rafael Ruiz por sus aportes al trabajo y enseñanzas en la universidad.

Agradezco también a Fernando, Aníbal, y a la empresa Sincal por ayudarme a encontrar errores y mejorar los códigos de programación desarrollados. Espero haber sido un aporte en sus proyectos como ellos lo fueron para mi trabajo.

En Melipilla, agradezco a mi colegio Santa Mónica por los valores que me entregaron durante mi infancia y adolescencia. A mis profesores, especialmente a Antonio y Carolina, por atraerme a las matemáticas y ayudar a mi formación como alumno y como persona. También a mis amigos y amigas del colegio, con quienes mantengo una muy buena relación hasta el día de hoy.

También agradezco a mis amigos y amigas de plan común y de civil en la universidad, que me acompañaron en clases, ventanitas, almuerzos, salidas a terreno y que me ayudaron en mi cambio a la vida en Santiago. Me llevo lindos e inolvidables recuerdos de estos 8 años de carrera gracias a todos ellos.

Agradezco a mi familia, abuelos, tíos, primos y gente cercana que me han dado cariño, me han ayudado a crecer, me han dado ánimos o simplemente me han alegrado el día. Son todos muy importantes para mí. También le doy las gracias a mis abuelos maternos, Margarita y Luis, por darme un hogar para vivir en Santiago durante mi vida universitaria.

Agradezco a mis padres, Juan y Katia, y a mi hermana Fernanda por ser los pilares fundamentales en mis 26 años, por estar siempre a mi lado y ayudarme a cumplir mis metas y sueños. Sin ellos hubiera sido imposible llegar hasta acá.

Finalmente agradezco a dos personas muy especiales que ya no están con nosotros, mi abuelo Luis y mi tío Omar, que fueron muy importantes en mi vida y que me acompañan en cada paso que doy.

A todos ustedes, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 2 |
| 1.2.1. Objetivo General | 2 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 2 |
| 1.3. METODOLOGÍA | 2 |
| 1.4. ALCANCES..... | 3 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1. DISEÑO PARAMÉTRICO..... | 4 |
| 2.2. DISEÑO GENERATIVO..... | 6 |
| 2.3. HERRAMIENTAS DIGITALES..... | 7 |
| 2.3.1. Rhinoceros 3D..... | 7 |
| 2.3.2. Grasshopper..... | 8 |
| 2.3.2.1. GhExcel..... | 10 |
| 2.3.2.2. Parametric FEM Toolbox..... | 11 |
| 2.3.2.3. Galápagos..... | 13 |
| 2.3.3. Dlubal RFem | 15 |
| 2.4. PUENTES | 16 |
| 2.4.1. Definición..... | 16 |
| 2.4.2. Puentes de Vigas Longitudinales | 17 |
| 2.4.3. Norma AASHTO Standard 2002 | 17 |
| 2.4.4. Cargas y Combinaciones según AASHTO Standard 2002 | 18 |
| 3. MODELACIÓN PARAMÉTRICA | 19 |
| 3.1. MODELO ESTRIBO | 19 |
| 3.1.1. Geometría..... | 19 |
| 3.1.2. Apoyos | 22 |
| 3.1.3. Materiales y Secciones | 26 |
| 3.1.4. Empujes de Suelo | 27 |
| 3.1.5. Cargas..... | 28 |
| 3.1.6. Casos y Combinaciones de Carga | 28 |
| 3.1.7. Exportación a RFem..... | 31 |
| 3.1.8. Ejemplos de Exportación de Estribos..... | 35 |
| 3.2. MODELO SUPERESTRUCTURA Y CEPAS | 38 |
| 3.2.1. Geometría..... | 38 |
| 3.2.2. Apoyos | 40 |
| 3.2.3. Materiales y Secciones de Área..... | 43 |
| 3.2.4. Asignación de Vigas por Vano..... | 46 |
| 3.2.5. Cargas..... | 48 |
| 3.2.6. Casos, Combinaciones y Resultados de Carga..... | 48 |
| 3.2.7. Exportación a RFem..... | 50 |
| 3.2.8. Ejemplos de Exportación de Modelos Generales..... | 55 |
| 4. COMPARACIÓN RESULTADOS RFEM/SAP2000 | 59 |
| 4.1. MODELO ESTRIBO | 59 |

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| 4.1.1. | Resumen | 59 |
| 4.1.2. | Momento y Carga Axial en Pilotes | 60 |
| 4.1.3. | Diagramas de Interacción para Pilotes | 63 |
| 4.1.4. | Reacciones en Apoyos | 65 |
| 4.1.5. | Deformación en Ala | 67 |
| 4.1.6. | Esfuerzos en Muro Espaldar y Frontal | 69 |
| 4.1.7. | Esfuerzos en Muro Ala..... | 70 |
| 4.2. | MODELO SUPERESTRUCTURA Y CEPAS | 71 |
| 4.2.1. | Resumen | 71 |
| 4.2.2. | Momento en Pila/Pilotes | 73 |
| 4.2.3. | Diagramas de Interacción para Pila/Pilotes en Cepa de Entrada..... | 76 |
| 4.2.4. | Reacciones en Apoyos | 77 |
| 4.2.5. | Deformaciones en Losa..... | 79 |
| 4.2.6. | RESUMEN ANÁLISIS DE CONVERGENCIA | 81 |
| 5. | MODELACIÓN GENERATIVA | 84 |
| 5.1. | RESUMEN..... | 84 |
| 5.2. | SOLICITACIONES Y RESTRICCIONES | 85 |
| 5.3. | OPTIMIZACIÓN CON GALÁPAGOS..... | 88 |
| 6. | CONCLUSIONES Y COMENTARIOS | 92 |
| 7. | BIBLIOGRAFÍA..... | 94 |
| ANEXOS | | 96 |
| | ANEXO A. Código de Python para cálculo de empujes en estribo..... | 96 |
| | ANEXO B. Información y parámetros importantes de proyectos de puentes ejemplificados..... | 98 |
| | ANEXO C. Códigos de Python para cálculos de propiedades mecánicas y cálculos de cargas vivas, cargas muertas y momentos..... | 103 |
| | ANEXO D. Códigos de Python para verificación de tensiones y momentos admisibles de viga... | 106 |
| | ANEXO E. Estado tensional en el ejemplo de viga pretensada optimizada con Grasshopper..... | 108 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Momentos y carga axial para caso “PP Relleno” | 61 |
| Tabla 2. Momentos y carga axial para caso “Super Sismo Y” | 61 |
| Tabla 3. Momentos y carga axial para caso “Empuje Estático Activo” | 62 |
| Tabla 4. Momentos y carga axial para caso “Empuje Sísmico X” | 62 |
| Tabla 5. Momentos y carga axial para combinación “Estático Rotura” | 63 |
| Tabla 6. Momentos y carga axial para combinación “Rotura $0.3*X+Y$ Max” | 63 |
| Tabla 7. Reacciones para caso “PP Relleno” | 65 |
| Tabla 8. Reacciones para caso “Super Sismo Y” | 65 |
| Tabla 9. Reacciones para caso “Empuje Estático Activo” | 66 |
| Tabla 10. Reacciones para caso “Empuje Sísmico X” | 66 |
| Tabla 11. Reacciones para combinación “Estático” | 66 |
| Tabla 12. Reacciones para combinación “ $0.3*X+Y$ sin mayorar” | 67 |
| Tabla 13. Deformaciones para caso “PP Relleno” | 68 |
| Tabla 14. Deformaciones para caso “Super Sismo Y” | 68 |
| Tabla 15. Deformaciones para caso “Empuje Estático Activo” | 69 |
| Tabla 16. Deformaciones para caso “Empuje Sísmico X” | 69 |
| Tabla 17. Deformaciones para combinación “Estático” | 69 |
| Tabla 18. Deformaciones para combinación “ $0.3*X+Y$ sin mayorar” | 69 |
| Tabla 19. Esfuerzos máximos y mínimos en muro frontal para momento en eje X | 70 |
| Tabla 20. Esfuerzos máximos y mínimos en muro frontal para momento en eje Y | 70 |
| Tabla 21. Esfuerzos máximos y mínimos en muro ala para momento en eje X | 71 |
| Tabla 22. Esfuerzos máximos y mínimos en muro ala para momento en eje Y | 71 |
| Tabla 23. Momentos y carga axial para caso “Peso Propio” | 74 |
| Tabla 24. Momentos y carga axial para caso “Pavimento” | 75 |
| Tabla 25. Momentos y carga axial para resultado de carga “ $PP+EqX+0.3*EqY$ ” | 75 |
| Tabla 26. Momentos y carga axial para resultado de carga “ $PP+0.3*EqX+EqY$ ” | 75 |
| Tabla 27. Valores máximos de momentos y carga axial para resultado de carga “ $PP+0.3*EqX+EqY$ ” | 76 |
| Tabla 28. Reacciones para combinación “Permanentes” en estribos | 78 |
| Tabla 29. Reacciones para resultado de carga “Sismo X” en estribos | 78 |
| Tabla 30. Reacciones para resultado de carga “Sismo Y” en estribos | 78 |
| Tabla 31. Reacciones de punta en cepas para resultado de carga “ $PP+EqX+0.3*EqY$ ” | 79 |
| Tabla 32. Reacciones de punta en cepas para resultado de carga “ $PP+0.3*EqX+EqY$ ” | 79 |
| Tabla 33. Deformaciones para caso “Peso Propio” | 81 |
| Tabla 34. Deformaciones para caso “Pavimento” | 81 |
| Tabla 35. Deformaciones para resultado de carga “ $PP+EqX+0.3*EqY$ ” | 81 |
| Tabla 36. Deformaciones para resultado de carga “ $PP+0.3*EqX+EqY$ ” | 81 |
| Tabla 37. Reacciones para combinación “Permanentes” en estribos con nuevo mallado | 83 |
| Tabla 38. Reacciones para combinación “Sismo X” en estribos con nuevo mallado | 83 |
| Tabla 39. Reacciones para combinación “Sismo Y” en estribos con nuevo mallado | 84 |
| Tabla 40. Parámetros generales de puentes utilizados | 100 |
| Tabla 41. Parámetros del estribo sur de puentes utilizados | 100 |
| Tabla 42. Parámetros de cepas de puentes utilizados | 101 |
| Tabla 43. Tipos de hormigón y acero en los puentes utilizados | 101 |
| Tabla 44. Parámetros de suelo de relleno de puentes utilizados | 102 |
| Tabla 45. Parámetros para generación de espectro sísmico en puentes utilizados | 102 |
| Tabla 46. Medidas de la sección de la viga pretensada | 108 |
| Tabla 47. Comparación de áreas de sección en la viga pretensada | 108 |
| Tabla 48. Estado tensional de viga pretensada en 1ra etapa | 108 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 49. Estado tensional de viga pretensada en 2da etapa..... | 109 |
| Tabla 50. Estado tensional de viga pretensada en 3ra etapa..... | 109 |
| Tabla 51. Estado tensional de viga pretensada en 4ta etapa..... | 109 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Figura 1. Red paramétrica creada en Grasshopper. [4] | 4 |
| Figura 2 a) y b). Cambio de altura de un objeto usando un “slider” de Grasshopper. [5]..... | 5 |
| Figura 3. Diagrama de softwares con diseño paramétrico usados actualmente. [1]..... | 5 |
| Figura 4. Secuencia de optimización de una pieza de metal. [7]..... | 6 |
| Figura 5. Logo Rhinoceros3D. [8] | 7 |
| Figura 6. Superficie NURBS de Rhino. [9]..... | 7 |
| Figura 7. Logo Grasshopper. [8] | 8 |
| Figura 8 a) y b). Código de un triángulo en Grasshopper con su vista previa en Rhinoceros..... | 8 |
| Figura 9 a) y b). Código de un triángulo en Grasshopper con sliders. | 9 |
| Figura 10 a) y b). Cambio de forma usando sliders de Grasshopper..... | 9 |
| Figura 11. Logo GhExcel. [10]..... | 10 |
| Figura 12. Ejemplo de funcionamiento de GhExcel..... | 10 |
| Figura 13. Logo FEM Toolbox. [10]..... | 11 |
| Figura 14. Algunos componentes de FEM Toolbox en Grasshopper..... | 11 |
| Figura 15. Ejemplo de interoperabilidad entre Rhino y RFem..... | 11 |
| Figura 16 a) y b). Modelos de pasarela Tondo en Rhino y RFem. [11] | 12 |
| Figura 17. Pasarela Tondo en Bruselas, Bélgica. [11]..... | 12 |
| Figura 18. Logo Galápagos. [12]..... | 13 |
| Figura 19. Terreno para encontrar el punto más alto en Galápagos. [13] | 13 |
| Figura 20. Población aleatoria. [13] | 14 |
| Figura 21. Eliminación de genes menos aptos. [13]..... | 14 |
| Figura 22. Población optimizada luego de varias iteraciones. [13]..... | 14 |
| Figura 23. Interfaz de Galápagos. [1]..... | 15 |
| Figura 24. Logo RFem. [15]..... | 15 |
| Figura 25 a) y b). Modelos RFem de un estribo y tablero con cepas correspondiente al puente Cancura, diseñado por la empresa Sincal. [17] | 16 |
| Figura 26. Ejemplo de puente con vigas de hormigón. [19]..... | 17 |
| Figura 27. Diagrama general de un puente de vigas..... | 17 |
| Figura 28. Tabla de coeficientes para combinaciones según AASHTO Std 2002. [22]..... | 19 |
| Figura 29 a) y b). Esqueleto lineal de la geometría del estribo en Grasshopper. | 20 |
| Figura 30. Fragmento del código de la geometría en Grasshopper. | 20 |
| Figura 31. Diagrama de parámetros en la vista frontal de un estribo. | 21 |
| Figura 32. Diagrama de parámetros en la vista lateral de un estribo..... | 22 |
| Figura 33. Ubicación de resortes en pilotes..... | 23 |
| Figura 34. Fragmento del código de resortes en Grasshopper. | 23 |
| Figura 35. Fragmento de código de efecto grupo..... | 24 |
| Figura 36. Componentes de exportación de apoyos de estribo a RFem..... | 24 |
| Figura 37 a) y b). Diagrama de apoyos en línea en muros ala y frontal..... | 25 |
| Figura 38. Componentes para exportación de apoyos en línea a RFem..... | 25 |
| Figura 39. Tabla de valores de constantes para materiales..... | 26 |
| Figura 40. Tabla de valores de constantes para secciones de pilotes. | 26 |
| Figura 41. Componentes de exportación a RFem de materiales y secciones. | 27 |
| Figura 42. Fragmento del código de empujes en Grasshopper..... | 27 |
| Figura 43. Tabla de Excel para ingresar datos de suelo. | 28 |
| Figura 44. Tabla de Excel para ingresar cargas de superestructura al modelo de estribo. | 28 |
| Figura 45 a) y b). Tablas en Excel para ingresar casos y combinaciones de carga..... | 30 |
| Figura 46. Fragmento del código Grasshopper para exportar combinaciones de carga a RFem. | 30 |
| Figura 47. Componente Set Data en modelo estribo Grasshopper..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Figura 48. Vista general código Grasshopper estribo..... | 32 |
| Figura 49. Botones para exportar modelos a RFem. | 32 |
| Figura 50 a), b) y c). Modelo completo de estribo en GH, RFem lineal y RFem extruído. | 33 |
| Figura 51 a), b) y c). Modelo de muro frontal en GH, RFem lineal y RFem extruído..... | 33 |
| Figura 52 a), b) y c). Modelo de muro ala en GH, RFem lineal y RFem extruído..... | 34 |
| Figura 53 a), b), c) y d). Ejemplos de cargas aplicadas en RFem, correspondientes a carga sísmica de superestructura, empuje estático, empuje sísmico en ala (Eje Y), empuje sísmico en muro frontal y espaldar (Eje X)..... | 34 |
| Figura 54 a), b) y c). Modelo de estribo sur del puente Quepe en GH, RFem lineal y RFem extruído. | 35 |
| Figura 55 a), b) y c). Modelo de estribo sur del puente Pocoyán en GH, RFem lineal y RFem extruído.... | 36 |
| Figura 56 a), b) y c). Modelo de estribo sur del paso superior El Cobre en GH, RFem lineal y RFem extruído. | 37 |
| Figura 57 a) y b). Geometría de superestructura en Grasshopper con distintos tipos de cepa. | 38 |
| Figura 58. Diagrama de parámetros en la vista en planta del tablero de un puente. | 39 |
| Figura 59. Diagrama de parámetros en la vista frontal de la cepa de un puente. | 40 |
| Figura 60 a) y b). Ubicación de resortes en los dos tipos de cepa. | 41 |
| Figura 61. Componente Cluster del código Grasshopper..... | 41 |
| Figura 62. Código dentro del Cluster de Grasshopper. | 42 |
| Figura 63. Componentes de exportación de apoyos de superestructura a RFem. | 42 |
| Figura 64. Tabla de valores de constantes para materiales en superestructura. | 43 |
| Figura 65. Tabla de secciones de área en superestructura. | 44 |
| Figura 66. Tabla para nombrar secciones de viga de acero..... | 44 |
| Figura 67. Tabla para nombrar secciones de viga de hormigón..... | 45 |
| Figura 68. Componentes de exportación de materiales y secciones a RFem. | 45 |
| Figura 69. Tabla de definición de vigas. | 46 |
| Figura 70. Diagramas de información para definición de vigas..... | 46 |
| Figura 71. Tabla de asignación de vigas por vano. | 47 |
| Figura 72. Fragmento de código de Grasshopper para generación de vigas. | 47 |
| Figura 73. Tabla de Excel para ingresar cargas al modelo de superestructura..... | 48 |
| Figura 74 a) y b). Tabla de Excel para ingresar casos y resultados de carga al modelo..... | 49 |
| Figura 75. Fragmento del código Grasshopper para exportar casos, combinaciones y resultados de carga a RFem..... | 49 |
| Figura 76. Componente Set Data en modelo superestructura Grasshopper. | 50 |
| Figura 77. Botones para exportación a RFem. | 51 |
| Figura 78. Vista general de código Grasshopper superestructura con cepas pila/pilote..... | 51 |
| Figura 79. Vista general de código Grasshopper superestructura con cepas columna/dado/pilote..... | 51 |
| Figura 80 a), b) y c). Modelo de superestructura en GH, RFem lineal y RFem extruído para cepa pila/pilote. | 52 |
| Figura 81 a), b) y c). Modelo de superestructura en GH, RFem lineal y RFem extruído para cepa columna/dado/pilote..... | 53 |
| Figura 82. Modelo RFem extruído con acercamiento a las vigas de acero con cambios de sección. | 54 |
| Figura 83 a) y b). Ejemplos de cargas aplicadas en RFem, correspondientes a peso de pavimento y carga de barreras viales..... | 54 |
| Figura 84. Alineación de vigas en RFem. | 55 |
| Figura 85 a), b) y c). Modelo general del puente Quepe en GH, RFem lineal y RFem extruído..... | 56 |
| Figura 86 a), b) y c). Vigas del puente Quepe en modelo RFem extruído. | 56 |
| Figura 87 a), b) y c). Modelo general del puente Pocoyán en GH, RFem lineal y RFem extruído..... | 57 |
| Figura 88 a), b) y c). Vigas del puente Pocoyán en modelo RFem extruído..... | 58 |
| Figura 89 a), b) y c). Modelo general del paso superior El Cobre en GH, RFem lineal y RFem extruído. | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 90 a), b) y c). Vigas del paso superior El Cobre en modelo RFem extruído. | 59 |
| Figura 91 a) y b). Modelos del estribo sur del puente Cancura en RFem y SAP2000. | 59 |
| Figura 92 a) y b). Momentos de pilotes en RFem y SAP2000 para caso de carga “Empuje Estático Activo”. | 60 |
| Figura 93. Diagrama de armadura en pilotes de estribo. | 64 |
| Figura 94. Diagrama de interacción de SAP2000 para combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”. | 64 |
| Figura 95. Diagrama de interacción de RFem para combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”. | 64 |
| Figura 96 a) y b). Diagrama de deformación resultante en RFem y SAP2000 para caso de carga “Empuje Estático Activo”. | 67 |
| Figura 97 a) y b). Diagrama de deformación resultante en RFem y SAP2000 para combinación de carga “0.3*X+Y sin mayorar”. | 68 |
| Figura 98 a) y b). Diagrama de esfuerzo de momento en eje Y para combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”. | 70 |
| Figura 99 a) y b). Diagrama de esfuerzo Shell en ala de momento en eje Y para combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”. | 71 |
| Figura 100 a) y b). Modelos de la superestructura del puente Cancura en RFem y SAP2000. | 72 |
| Figura 101. Espectro sísmico según manual de carreteras para Zona 2 y Suelo III. | 73 |
| Figura 102 a) y b). Momento en eje X de pilotes en RFem y SAP2000 para caso de carga “Peso Propio”. | 74 |
| Figura 103. Diagrama de armadura de pilotes en cepa entrada. | 76 |
| Figura 104. Diagrama de interacción de RFem para resultado de carga “PP+0.3*EqX+EqY”. | 77 |
| Figura 105. Diagrama de interacción de SAP para resultado de carga “PP+0.3*EqX+EqY”. | 77 |
| Figura 106 a) y b). Diagrama de deformación en RFem y SAP2000 para resultado de carga “Peso Propio” en el eje X. | 80 |
| Figura 107 a) y b). Diagrama de deformación en RFem y SAP2000 para resultado de carga “Peso Propio” en el eje Z. | 80 |
| Figura 108 a) y b). Cambio de mallado en modelo RFem. | 82 |
| Figura 109 a) y b). Cambio de mallado en modelo SAP2000. | 82 |
| Figura 110. Vista general del código generativo de Grasshopper. | 85 |
| Figura 111. Vista previa de la viga en la interfaz de Rhino. | 85 |
| Figura 112. Ejemplos de input en Grasshopper. | 86 |
| Figura 113 a) y b). Componentes de Python para verificación de tensiones y ductilidad. | 88 |
| Figura 114. Esquema de medidas de viga enumeradas de b1 a b7 y d1 a d7. | 89 |
| Figura 115. Componente Galápagos. | 89 |
| Figura 116. Interfaz visual de Galápagos en funcionamiento. | 90 |
| Figura 117. Optimización de área de viga. | 90 |
| Figura 118. Función para memorizar resultados de optimización. | 91 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La búsqueda de la optimización en las estructuras de ingeniería, junto con la evolución de la tecnología computacional, crea una necesidad de actualización constante en las empresas del rubro en cuanto a metodologías de diseño y cálculo estructural. Entre estas nuevas metodologías se encuentran el diseño paramétrico y el diseño generativo, técnicas que han tenido un crecimiento exponencial a lo largo de los últimos años por las grandes ventajas que aportan al mundo de la ingeniería y arquitectura.

El diseño paramétrico es una técnica avanzada de modelación que ha tomado fuerza en los últimos años tanto en diseño industrial, como en arquitectura y obras civiles. Se basa en modelos que cuentan con parámetros variables en su configuración, permitiendo al usuario manipular los parámetros de forma que la geometría conceptualizada cambie con los mismos. El objetivo del diseño paramétrico es obtener un modelo que sea lo suficientemente flexible para poder realizar cambios en él lo más rápido posible y con el menor coste asociado [1]. Junto con esto, existe el diseño generativo, que consiste en un proceso de iteración que optimiza parámetros requeridos en un modelo para maximizar su funcionalidad. Estas dos formas de trabajo son las que se desarrollan en este informe, aterrizándolas a la ingeniería, para lograr un avance importante en la automatización de proyectos de puentes.

Los programas Rhinoceros3D y Dlubal RFem pueden operar en conjunto para crear un modelo paramétrico de una estructura, en donde cada uno cumple un rol fundamental para el correcto análisis de esta. Rhino es un software de modelado 3D que posee un complemento llamado Grasshopper, el cual ha tenido una gran repercusión por su capacidad de generar diseños paramétricos y generativos, permitiendo al usuario tener un amplio control sobre los parámetros de un modelo. Por otra parte, RFem es un software de cálculo estructural desarrollado por Dlubal Software que posee funciones como análisis de materiales de construcción, inclusión de cargas y análisis modal espectral. Además de esto, RFem permite una importación directa de modelos realizados en Rhino, razón por la cual este programa fue elegido para el presente trabajo por sobre otros programas de cálculo.

En este trabajo de título se exponen las ventajas que ofrece la interoperabilidad Rhino/RFem para proyectos de puentes con vigas longitudinales, con el fin de mostrar los beneficios de una metodología que actualmente no es muy utilizada en el país. Junto con esto se agrega una validación de RFem usando el programa de cálculo SAP2000 y comparar los resultados obtenidos en ambos softwares al analizar una estructura.

El resultado final son tres códigos en Grasshopper. Con dos de ellos se puede modelar completamente un puente paramétrico en RFem, que puede ser calculado y verificado con la normativa vigente en Chile. El último código es una optimización generativa de vigas de hormigón pretensado para este mismo tipo de puentes.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Presentar las bases de una metodología de trabajo moderna y funcional, basada en el diseño paramétrico y generativo; y ayudar con esta a la automatización de proyectos de puentes tradicionales chilenos, con tramos simplemente apoyados, tableros con losa de hormigón y vigas longitudinales de acero o pretensadas.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo paramétrico en Grasshopper del estribo de un puente de vigas incluyendo geometría, materiales, apoyos, cargas, empujes y combinaciones de carga, y que incluya la opción de importación de datos desde Excel y exportación a RFem.
- Desarrollar un modelo paramétrico en Grasshopper de la superestructura y cepas de un puente incluyendo geometría, materiales, apoyos, secciones de área, cargas y combinaciones de carga, que incluya la opción de importación de datos desde Excel y exportación a RFem.
- Comparar y validar resultados de los modelos Rhino/RFem con SAP2000, el programa de cálculo más utilizado en el país.
- Desarrollar un modelo generativo de optimización de vigas pretensadas utilizando Galápagos de Grasshopper para calcular la mejor viga posible según las solicitaciones del puente en estudio.

1.3. METODOLOGÍA

- Revisión Bibliográfica
- Código Grasshopper Estribo
 - Geometría (GH): Dimensiones, esviaje, peraltes, pendiente longitudinal.
 - Apoyos (GH): Apoyos simples, apoyos empotrados, resortes en pilotes con efecto grupo.
 - Materiales (Excel): Tabla de Excel para ingresar lista de materiales, ingresando E, μ , G, γ , α , γ_m por tipo de material.
 - Empujes de suelo (GH): Programación en GH con componentes Python que calculan los empujes estáticos y sísmicos de relleno en el estribo.
 - Cargas (Excel): Tabla en Excel para ingresar cargas provenientes de superestructura en el modelo.
 - Casos y Combinaciones de Carga (Excel): Tabla de Excel para ingresar casos y combinaciones de carga según tres normativas AASHTO (2002, 2014 y 2017).
- Código Grasshopper Superestructura y Cepas
 - Geometría (GH): Dimensiones, esviaje, peraltes, pendiente longitudinal, elección entre cepas pila/pilote o cepas con columna/dado/pilote.
 - Apoyos (GH): Apoyos empotrados de estribo, elección entre apoyo simple o apoyo resorte en parte inferior de pilotes, resortes en pilotes con efecto grupo.

- Materiales (Excel): Tabla de Excel para ingresar lista de materiales, ingresando E, μ , G, γ , α , γ_m por tipo de material.
- Secciones de Área (Excel): Tabla de Excel para ingresar tipo de viga y tipo de pilote con sus dimensiones. El nombre ingresado depende del formato de secciones impuesto por la biblioteca de RFem.
- Cargas (Excel): Tabla en Excel para ingresar valores de cargas correspondientes a peso propio, pavimento, barandas y barreras.
- Casos, Combinaciones y Resultados de Carga (Excel): Tabla de Excel para ingresar casos, combinaciones y resultados de carga según normativa AASHTO Std 2002.
- Validación Resultados con SAP2000
 - Modelación del mismo puente en RFem y SAP2000.
 - Comparación de resultados de momentos en pilotes, deformaciones, reacciones en apoyos y esfuerzos en elementos placa.
- Código Grasshopper Optimización de Vigas
 - Selección de parámetros a optimizar.
 - Estudiar y seleccionar restricciones para optimización.
 - Programación de código en Grasshopper con ayuda de complemento Galápagos.

1.4. ALCANCES

Este proyecto busca mejorar tiempos de diseño y revisión de puentes de vigas que sean similares geoméricamente. El máximo potencial de los códigos de modelación se puede analizar en concesiones o proyectos que involucren muchos puentes con la misma tipología.

Las limitaciones vienen dadas de acuerdo a cuantos detalles o asimetrías se tienen en un puente específico. Por ejemplo, al existir dos tipos de esviaje a lo largo del puente o cepas de distinta tipología, el código deja de ser completamente funcional. El presente código exporta puentes rectos y esviados de vigas longitudinales simplemente apoyadas con geometría estándar y vigas simétricas de hormigón pretensado o acero. Los valores máximos de extensión son 13 vigas, 50 cepas y 51 tramos.

Los estribos deben tener fundación, con o sin pilotes, muro frontal, muro espaldar y dos muros ala, con o sin aletas. No funcionan estribos tipo pila/pilote. Las cepas deben tener la misma tipología a lo largo del puente, ya sea pila/pilote, pila/pilote con dado de amarre o columna/dado/pilote. El largo de las columnas y pilotes pueden ser variables en diferentes cepas, pero las dimensiones del dado y la viga de amarre no. La loseta de continuidad debe ser agregada en todas las cepas.

Además de esto, se debe señalar que el análisis del trabajo se enfoca en las cargas sísmicas a lo largo del puente, por lo que para el modelo general (superestructura y cepas) no se analizaron fuerzas de sobrecarga móvil. Al ser puentes de tipología tradicional (tramos simplemente apoyados), las vigas y losas pueden ser comprobadas en planillas Excel externas en donde ya se debería tener agregado el impacto de la sobrecarga vehicular.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DISEÑO PARAMÉTRICO

El diseño paramétrico es una técnica avanzada de modelación que ha tomado fuerza en los últimos años tanto en diseño industrial, como en arquitectura y urbanismo. Este método se utiliza para crear modelos y geometrías, basadas en un conjunto de parámetros y operaciones algorítmicas, que permiten al usuario manipular los valores de los parámetros de forma que la geometría conceptualizada cambie con los mismos [1]. Es por esto que el diseño paramétrico no innova en el “qué” se crea, sino en el “cómo” se crea [2].

Existe una infinita variedad de parámetros que se pueden utilizar para definir un modelo, como por ejemplo alturas, anchos, repeticiones, áreas, etc. y a su vez, se pueden crear asociaciones geométricas entre elementos de manera que los cambios en un parámetro afectan a los demás [3]. En la figura 1 se muestra una red paramétrica creada en Grasshopper, el editor de algoritmos del programa de modelación Rhinoceros3D.

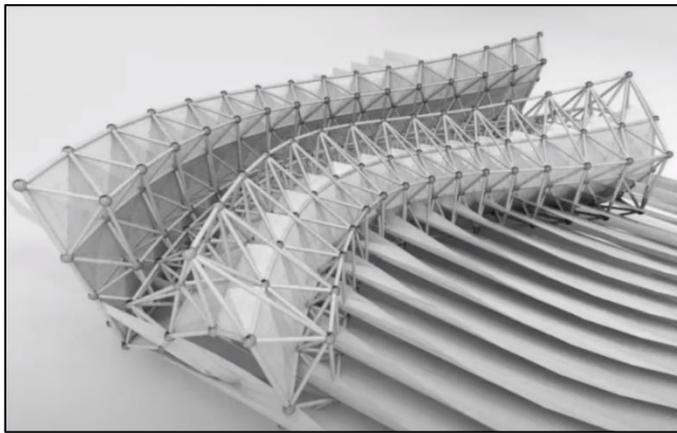


Figura 1. Red paramétrica creada en Grasshopper. [4]

Resumiendo lo anterior, un modelo paramétrico tiene la ventaja de ser un modelo “variable” en donde el usuario puede cambiar parámetros al valor que quiera y cuantas veces quiera y el modelo se redibuja al instante incluyendo los cambios realizados en los valores de parámetros. En la figura 2a y 2b se aprecia un cambio de altura en un objeto parametrizado usando un componente “Number Slider”, o solo “Slider”, de Grasshopper, que corresponde a una barra deslizante con un dominio de números entre los cuales el usuario escoge para darle valor a un parámetro específico del objeto.

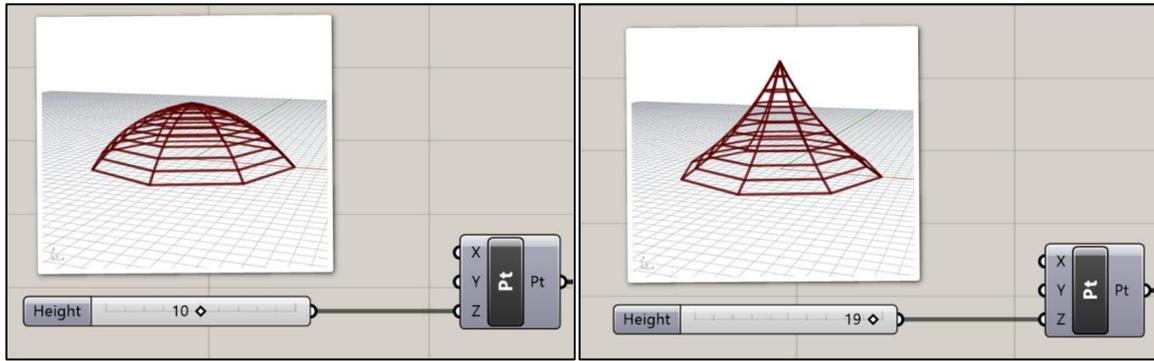


Figura 2 a) y b). Cambio de altura de un objeto usando un “slider” de Grasshopper. [5]

Esta moderna forma de trabajo tiene muchas ventajas asociadas, como el dinamismo, el ahorro de tiempo y la disminución de errores. Al tener un modelo paramétrico de una estructura, se hace muy fácil y rápido incluir un cambio no esperado después de la etapa de diseño variando un parámetro fácilmente, cosa que con la metodología de trabajo actual significaría mayor tiempo y mayor trabajo.

En contra parte de esto existen algunas desventajas, por ejemplo, para estructuras que tienen muchas geometrías distintas, se hace difícil parametrizar detalles y cambios que pueda agregar el ingeniero a cargo. Es por esto que el modelo de estructura creado en esta tesis será un puente estándar siguiendo la geometría promedio utilizada en Chile.

Actualmente el lenguaje de programación paramétrico por excelencia en el mundo es Grasshopper, del programa Rhinoceros3D, creado por “Robert McNeel & Associates”, aunque existen otros programas que también son muy útiles y muy utilizados en la industria constructora. En la figura 3 se muestra un pequeño diagrama con algunos de los programas de diseño paramétrico existentes en el área de construcción.

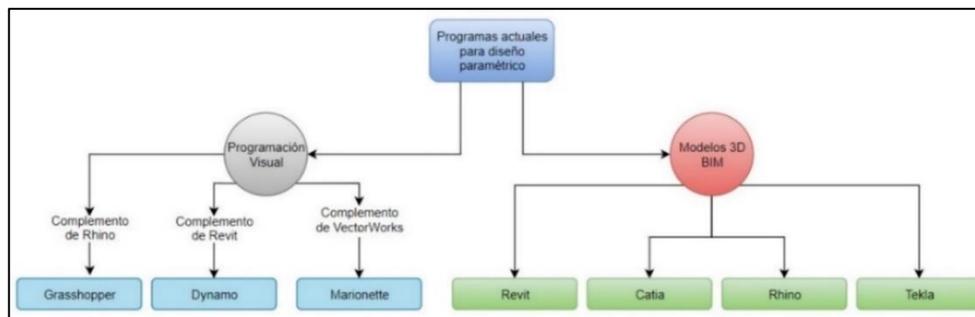


Figura 3. Diagrama de softwares con diseño paramétrico usados actualmente. [1]

2.2. DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo es un proceso de optimización computacional relacionado con el diseño paramétrico. Este método consiste en una optimización de parámetros de una figura utilizando un algoritmo de una función objetivo. La metodología generativa propone codificar los parámetros ingresados por un usuario, simular resultados para obtener distintas soluciones, para finalmente generar la mejor alternativa para resolver el problema inicial.

Este proceso de iteración no necesariamente tiene que ser realizado por un computador, ya que el uso de esta técnica no es reciente, y se remonta a una época donde no existían computadoras [6]. Sin embargo, la computación ha permitido mejorar tiempos y tener mejores soluciones. En la figura 4 se muestra un ejemplo de optimización de una pieza de construcción usando AutoDesk Generative Design.



Figura 4. Secuencia de optimización de una pieza de metal. [7]

En esta tesis se trabaja con el diseño generativo aplicándolo a la ingeniería, creando un algoritmo para optimizar vigas pretensadas en cuanto a tamaño y forma dependiendo de las fuerzas solicitantes en el puente en estudio. Para esto se utiliza el complemento Galápagos, incluido en el editor de algoritmos Grasshopper, que trabaja con códigos generativos.

2.3. HERRAMIENTAS DIGITALES

2.3.1. RHINOCEROS 3D

Rhinoceros es un software de modelado en tres dimensiones desarrollado por la empresa Robert McNeel & Associates. Originalmente este programa fue creado como un complemento de AutoCad y actualmente posee múltiples aplicaciones en distintas áreas, como por ejemplo en la ingeniería, la arquitectura, el diseño gráfico, la joyería, el diseño automotriz, entre otros.

Rhinoceros trabaja en torno a curvas de tipo NURBS, las cuales corresponden a representaciones matemáticas de geometría en 3D que son capaces de describir cualquier tipo de forma con precisión. Abarca desde líneas, círculos, arcos o curvas 2D hasta los sólidos o superficies de forma libre en 3D [9]. En la figura 6 se muestra un ejemplo de una superficie de tipo NURBS.

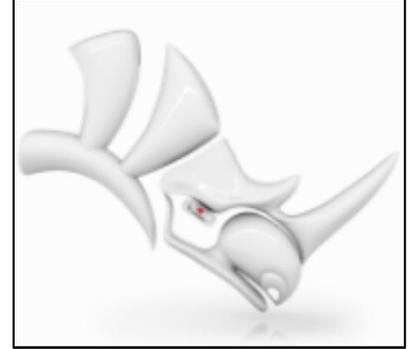


Figura 5. Logo Rhinoceros3D. [8]

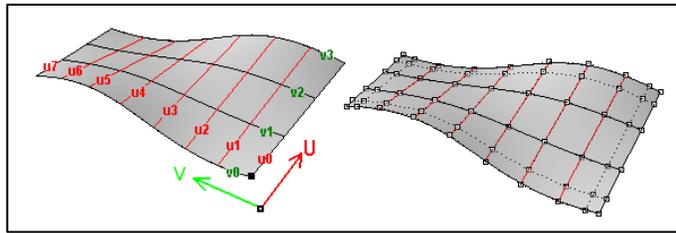


Figura 6. Superficie NURBS de Rhino. [9]

Este programa posee su propio lenguaje interpretado llamado Rhinoscript, el cual tiene su núcleo en visual script. Permite trabajar con variables, codificar algoritmos genéticos, usar las distintas funciones dentro del programa e intervenir con su interfaz, dando la posibilidad de crear una aplicación sobre esta herramienta y potenciar su funcionalidad. Este lenguaje ha tenido una explosión enorme, tanto a nivel profesional como académico y cada vez se suman más problemas resueltos con este tipo de herramientas [6].

La principal novedad de Rhinoceros frente a otros softwares de modelos 3D es su editor de algoritmos gráficos llamado Grasshopper que tiene la capacidad de generar diseños paramétricos, el cual ha sido usado en numerosos estudios de arquitectura.

2.3.2. GRASSHOPPER

Grasshopper es un editor gráfico de algoritmos integrado en el programa Rhinoceros3D. Tiene la particularidad de ser un lenguaje de programación amigable para el usuario, ya que, en lugar de programar de manera textual, se programa gráficamente con bloques funcionales que representan distintas operaciones algorítmicas [5]. Uniendo estos bloques con cables, se pueden crear secuencias de operaciones las cuales simulan a la perfección un lenguaje de programación textual como Matlab, aunque también existen bloques funcionales de programación Python.



Figura 7. Logo Grasshopper. [8]

En la figura 8a se muestra un ejemplo de código en Grasshopper para la creación de un triángulo, usando los componentes “Panel”, “Punto”, “Línea” y “Área Contenida”. En la figura 8b se muestra la vista previa en Rhinoceros del triángulo creado.

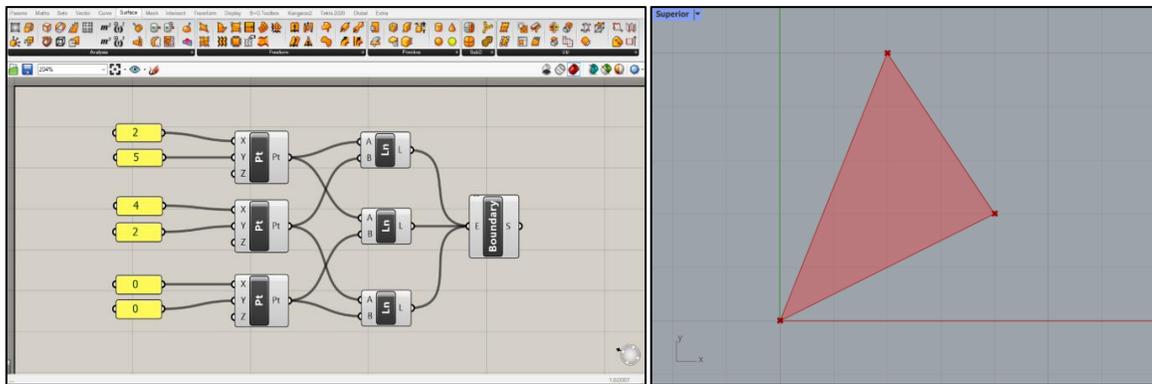


Figura 8 a) y b). Código de un triángulo en Grasshopper con su vista previa en Rhinoceros.

Los componentes de Grasshopper funcionan con valores input y output. Los inputs son los datos y parámetros de entrada sobre los que el componente necesita trabajar y los outputs son la información de respuesta después de haber transformado los inputs [3]. Comúnmente los códigos o algoritmos en Grasshopper tienen como inputs iniciales a los componentes de tipo "Slider", los cuales son valores numéricos variables que crean un diseño paramétrico. En la figura 9a y 9b se muestra el mismo triángulo creado anteriormente en la figura 8, pero esta vez se definen las coordenadas de los puntos mediante sliders.

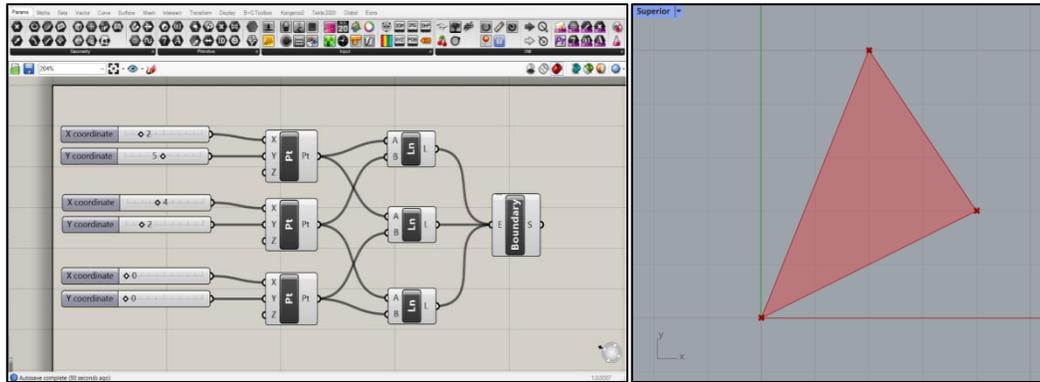


Figura 9 a) y b). Código de un triángulo en Grasshopper con sliders.

La principal diferencia es que en el primer triángulo las coordenadas son constantes e invariables ($\{2,5\}$, $\{4,2\}$ y $\{0,0\}$), en cambio con los sliders el usuario puede cambiar las coordenadas del triángulo moviendo el botón deslizador, y por ende cambiar la forma del triángulo. En la figura 10 se muestra una variación del triángulo cambiando los valores en los sliders.

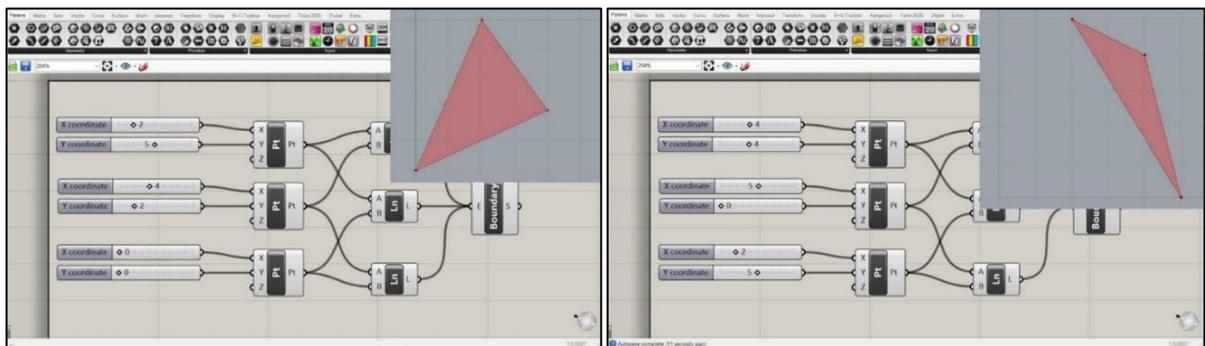


Figura 10 a) y b). Cambio de forma usando sliders de Grasshopper.

Los creadores del programa Rhino cuentan con una página web desde donde se pueden descargar complementos para Grasshopper de manera gratuita llamada "Food4Rhino". Estos complementos agregan componentes de utilidad a Grasshopper que no necesariamente vienen incluidos en la licencia estándar del software. Desde esta página se descargaron dos complementos que son de mucha ayuda para este trabajo de tesis, llamados "GhExcel" y "Parametric FEM Toolbox", y junto con estos se utiliza el componente Galápagos (incluido en Grasshopper) para el diseño generativo de vigas. A continuación, se describen estas herramientas.

2.3.2.1. GHEXCEL

GhExcel es un complemento externo para Grasshopper desarrollado por Xiaoming. Tiene la función de vincular e importar datos desde un archivo Excel a un código de Grasshopper mediante algunos componentes incluidos en la descarga.

GhExcel se usa principalmente para el ingreso de parámetros al código de Grasshopper, ya que el formato de planilla en Excel le da simplicidad al código. Se opta por esta opción, a pesar de que los sliders siguen siendo la mejor alternativa para un diseño paramétrico, ya que al extraer valores de un archivo Excel se pueden crear rutinas de cálculo a la vez que se ingresan los valores a Grasshopper.

En la figura 12 se muestra el funcionamiento de este complemento, creando un triángulo en Grasshopper con los datos importados desde Excel. Los datos de la columna C4:C6 y D4:D6 en Excel forman las coordenadas {2,4}, {3,3} y {6,5}, las cuales dibujan un triángulo en la interfaz de Rhino.



Figura 11. Logo GhExcel.
[10]

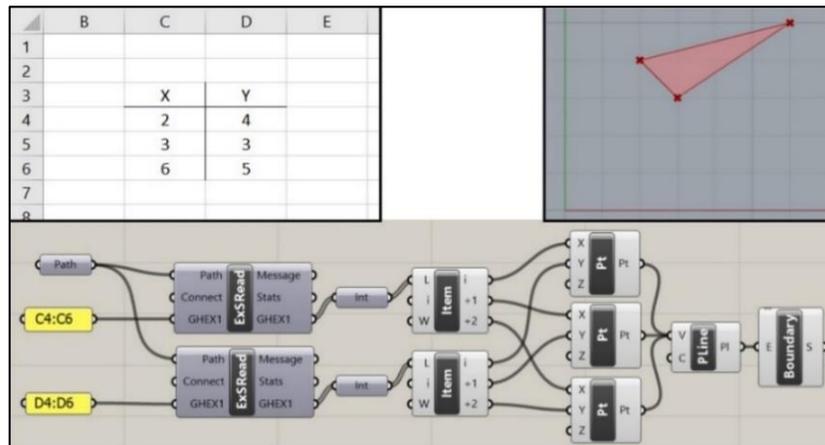


Figura 12. Ejemplo de funcionamiento de GhExcel.

2.3.2.2. PARAMETRIC FEM TOOLBOX

El complemento Parametric FEM Toolbox fue desarrollado por Diego Apellaniz, en conjunto con la empresa europea Bollinger+Grohmann, para crear una interoperabilidad entre los programas Rhinoceros y RFem. Este complemento permite al programador exportar la información desde Rhino a RFem mediante componentes simples de Grasshopper, lo cual es muy útil para lograr el objetivo principal de la tesis.

En Grasshopper se crearán las funciones que permitirán el cálculo de un puente agregando casos de carga, fuerzas, análisis sísmico, etc. y todo esto será exportado al software de cálculo junto a la geometría paramétrica del modelo. En la figura 14 se muestran algunos componentes de Grasshopper incluidos en el complemento FEM Toolbox y en la figura 15 se muestra un código de ejemplo con la vista previa de una superficie en la interfaz de Rhino y exportada a la interfaz de RFem.

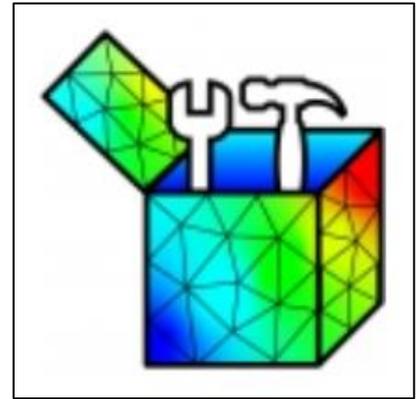


Figura 13. Logo FEM Toolbox. [10]

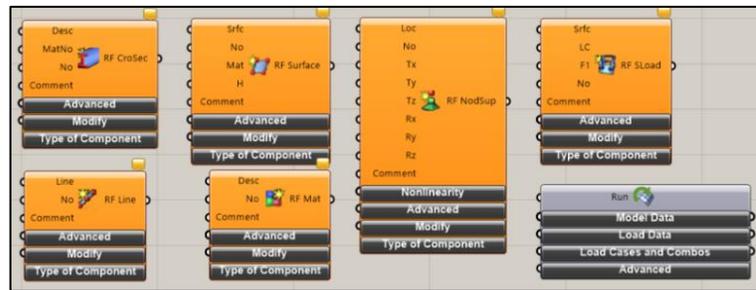


Figura 14. Algunos componentes de FEM Toolbox en Grasshopper.

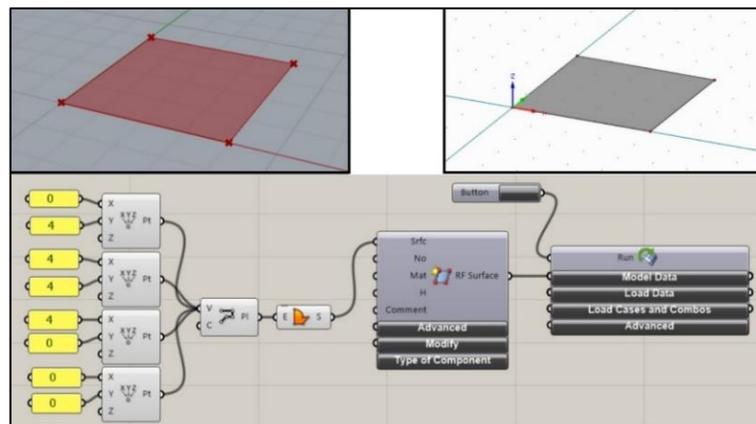


Figura 15. Ejemplo de interoperabilidad entre Rhino y RFem.

Esta metodología fue utilizada recientemente en el proyecto de la pasarela Tondo en Bruselas, Bélgica, por la empresa Bollinger+Grohmann. Esta pasarela conecta las oficinas de la Cámara de Representantes con su ampliación reciente, el edificio Forum. En este proyecto se utilizó un modelo paramétrico en Rhino para luego ser exportado a RFem verificando su estabilidad estructural y la seguridad para las personas que transiten por la pasarela. En las imágenes 16a y 16b se muestran los modelos en Rhino y RFem de la pasarela Tondo y en la figura 17 el resultado de la construcción final en Bruselas.

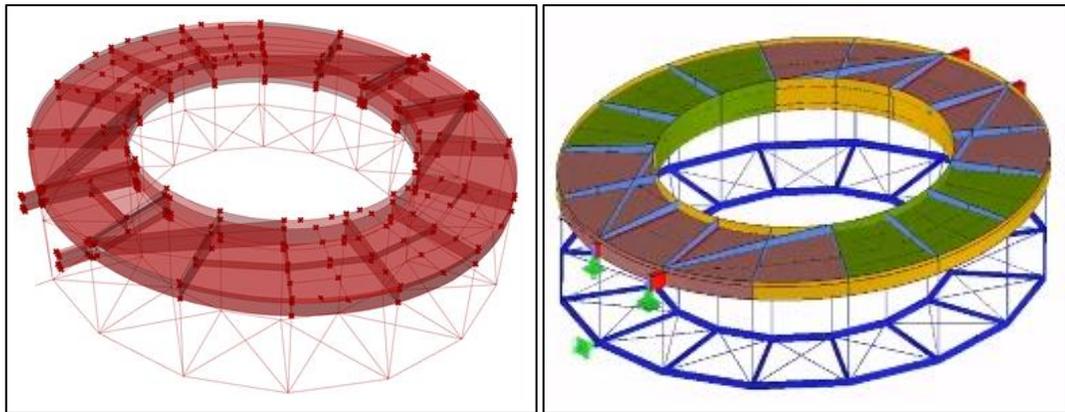


Figura 16 a) y b). Modelos de pasarela Tondo en Rhino y RFem. [11]



Figura 17. Pasarela Tondo en Bruselas, Bélgica. [11]

2.3.2.3. GALÁPAGOS

Galápagos es un complemento incluido en Grasshopper que se utiliza para la creación de diseños generativos en la interfaz de Rhino. Este complemento trabaja a partir de parámetros, los cuales va optimizando a medida que se acerca a un número de iteraciones predeterminadas. Luego transforma y genera una figura formada por componentes en Grasshopper agregando la base del algoritmo genético con su función objetivo y los diferentes mecanismos de selección [6].

La forma en que se unen Galápagos y Grasshopper es muy sencilla, por ejemplo, basta con conectar Galápagos con algún(os) componente(s) de Grasshopper y una superficie visualizada en Rhinoceros será optimizada al hacer funcionar Galápagos. La particularidad que tiene Galápagos es que puede generar distintas formas de un objeto sobre Rhinoceros [6].

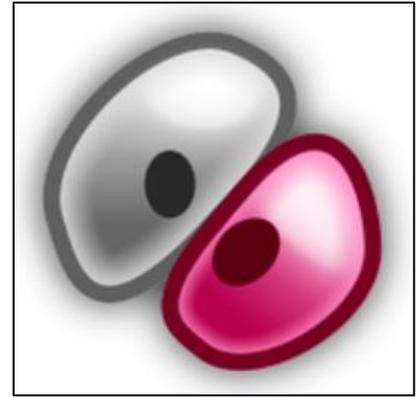


Figura 18. Logo Galápagos. [12]

El algoritmo de Galápagos se puede dividir en cinco partes: función objetivo, selección del mecanismo, algoritmo de acoplamiento, algoritmo de coalescencia y fábrica de mutación [1].

A continuación, se muestra un ejemplo del funcionamiento del algoritmo evolutivo de Galápagos [13]. En la figura 19 se muestra el campo a optimizar con dos variables: Gen A y Gen B, con el objetivo de encontrar el punto más alto.

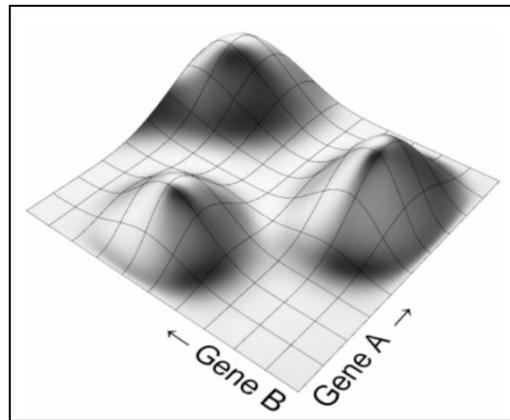


Figura 19. Terreno para encontrar el punto más alto en Galápagos. [13]

El primer paso interno es poblar el modelo con una colección al azar de “genomas”. Después de saber que tanto se acercan los resultados al objetivo, se puede hacer una jerarquía entre los mejores y peores resultados. Es entonces cuando el algoritmo elimina los peores genomas, dejando los que mejor se adaptan al resultado [13]. En la figura 20 se muestran los genomas creados por Galápagos y en la figura 21 se muestran los mejores puntos que cumplen la condición objetivo.

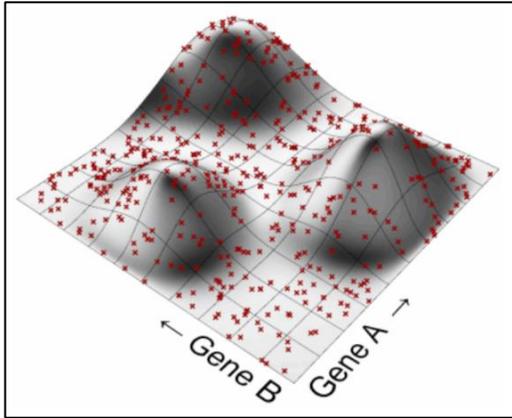


Figura 20. Población aleatoria. [13]

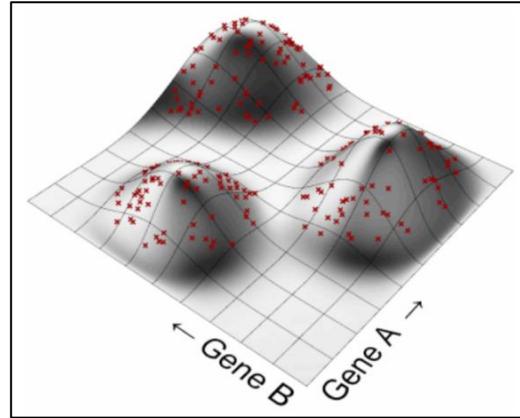


Figura 21. Eliminación de genes menos aptos. [13]

El genoma de mejor rendimiento en la población inicial no necesariamente es la mejor solución. Dado que todos los genomas de la generación 0 se eligieron al azar, en realidad es muy improbable que alguno de ellos sea la respuesta que se busca [13].

El siguiente paso será crear nuevos puntos dentro de la población optimizada obtenida de la generación 0 (figura 21). Luego con la generación 1, se obtendrán nuevos puntos optimizados, eliminando los puntos más bajos. Este proceso se repite según las iteraciones que necesite el usuario, ya que el número de iteraciones es un valor input en Galápagos. En la figura 22 se muestra el resultado final de optimización luego de varias iteraciones del proceso de optimización.

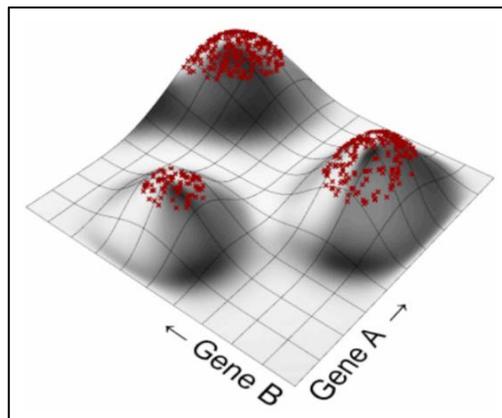


Figura 22. Población optimizada luego de varias iteraciones. [13]

En la figura 23 se puede apreciar la pestaña llamada solver en la interfaz de Galápagos, en esta sección de la interfaz es donde se corre el programa y se despliegan todos los resultados que se han obtenido durante el proceso iterativo en la ventana inferior derecha [1].

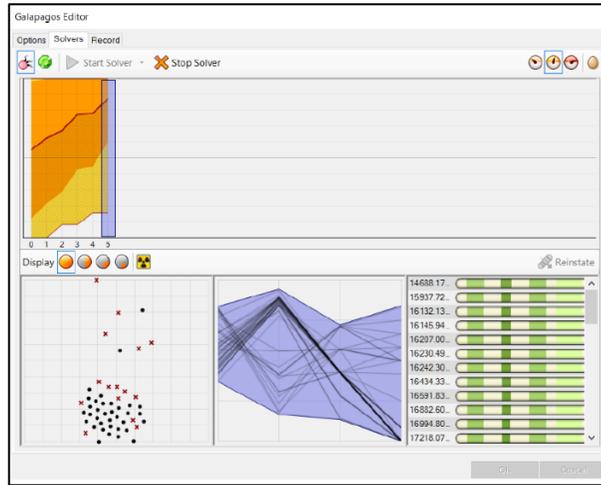


Figura 23. Interfaz de Galápagos. [1]

2.3.3. DLUBAL RFEM

Dlubal RFem, más conocido solo como RFem, es un software tridimensional de análisis de elementos finitos creado por Dlubal Software. Se utiliza para definir estructuras, materiales y cargas para tanto sistemas de estructuras planas como espaciales compuestas de placas, muros, láminas y barras [14].

Este programa ofrece una amplia gama de características para el intercambio de datos dentro de un proceso BIM, manteniendo todos los datos en un modelo digital en 3D, que se puede utilizar en todas las etapas de planificación. Gracias a esto, RFem es una excelente opción dentro de otros softwares de análisis estructural como SAP 2000, RISA o Robot Structural Analysis [16]. En la figura 25a y 25b se muestra un modelo de un puente de vigas de hormigón armado realizado por la empresa Sincal.



Figura 24. Logo RFem. [15]

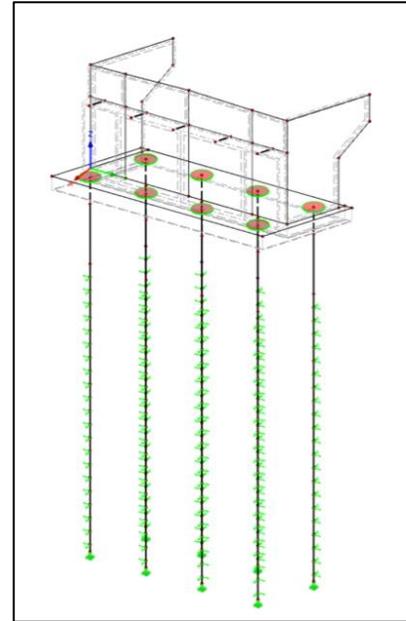
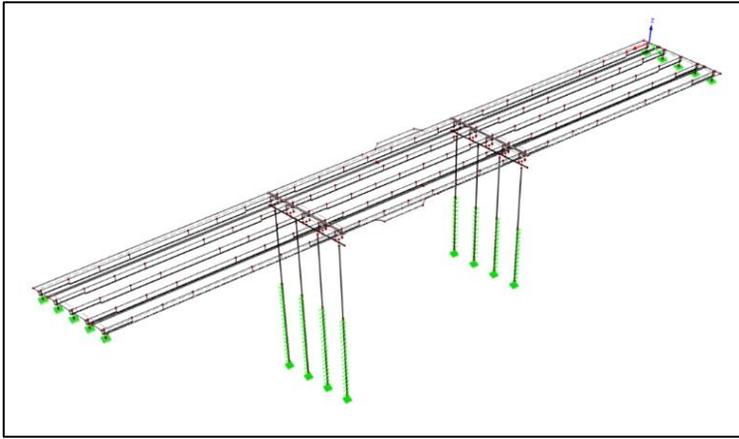


Figura 25 a) y b). Modelos RFem de un estribo y tablero con cepas correspondiente al puente Cancura, diseñado por la empresa Sincal. [17]

Una de las mayores ventajas de RFem, es su capacidad de operación conjunta con el programa Rhinoceros, lo que permite crear diseños paramétricos modelados desde Grasshopper, lo cual es el principal objetivo del presente trabajo.

2.4. PUENTES

2.4.1. DEFINICIÓN

Un puente es una estructura que forma parte de caminos, carreteras, líneas férreas y canalizaciones, construida sobre una depresión, río, u obstáculo cualquiera [18]. Principalmente se divide en dos partes importantes: superestructura e infraestructura. La superestructura se conforma por el tablero, que soporta las cargas directamente, vigas, armaduras, cables y arcos que transmiten carga a los apoyos. La infraestructura compone apoyos centrales, como pilares o cepas, apoyos extremos, como estribos, y fundaciones, los cuales se encargan de transmitir las fuerzas al suelo. El tablero soporta directamente las cargas dinámicas y por medio de la armadura transmite las tensiones a pilas y estribos. Las armaduras trabajarán a flexión (vigas), a tracción (cables), a flexión y compresión (arcos), etc. [18]

En este trabajo de título se estudian puentes rectos y esviados con tramos simplemente apoyados, losa de hormigón y vigas longitudinales de acero o pretensadas. En la figura 26 se muestra un ejemplo de puente con vigas longitudinales.



Figura 26. Ejemplo de puente con vigas de hormigón. [19]

2.4.2. PUENTES DE VIGAS LONGITUDINALES

Consisten en puentes con varias vigas, que, colocadas paralelamente unas a otras con separaciones entre ellas, salvan la distancia entre estribos o cepas y soportan el tablero [18]. Comúnmente se utilizan vigas de forma I compuestas de hormigón armado, pretensado o acero. Los puentes de vigas de hormigón armado o de acero pueden salvar tramos de 20 a 25 m; para distancias superiores se utilizan mucho el acero y el hormigón pretensado y, cuando la longitud es considerable, las vigas son compuestas [18]. En la figura 27 se expone un diagrama de un puente de vigas estándar.

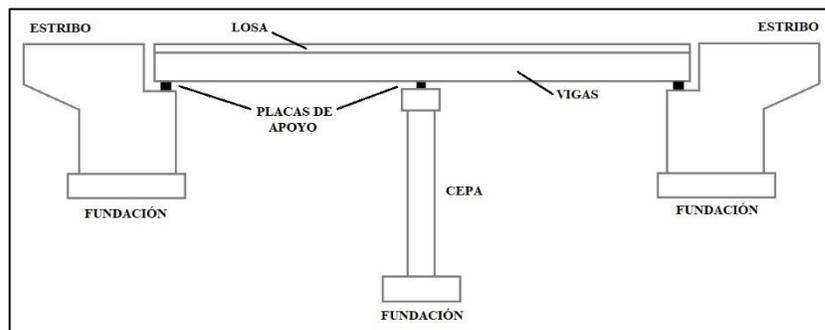


Figura 27. Diagrama general de un puente de vigas.

2.4.3. NORMA AASHTO STANDARD 2002

La norma estadounidense AASHTO Standard 2002 Specifications for Highway Bridges, utilizada para el diseño de puentes, se basa en la mezcla de dos filosofías de diseño para puentes, las cuales son ASD y LFD [20].

El diseño por esfuerzos admisibles (ASD) generalmente tratan cada carga sobre la estructura de igual manera desde el punto de vista de variabilidad estática. El margen de seguridad está desarrollado principalmente por la capacidad o resistencia de un miembro en lugar de las

cargas [21]. El diseño por factores de carga (LFD) reconoce que ciertas cargas de diseño, como las cargas vivas son más variables que otras cargas, como las cargas muertas. Por lo tanto, diferentes multiplicadores son usados para cada tipo de carga. La resistencia, basada principalmente en la resistencia máxima estimada de un miembro, deberá exceder la combinación de cargas [21].

Esta norma es utilizada en este trabajo para las definiciones de combinaciones de carga en los modelos de Grasshopper y para la comparación de resultados entre los programas RFem y SAP2000.

2.4.4. CARGAS Y COMBINACIONES SEGÚN AASHTO STANDARD 2002

La norma AASHTO indica que un puente está afectado por múltiples estados de carga, y las combinaciones de estas debe ser soportada por la estructura a lo largo de su vida útil. Las fuerzas aplicadas generalmente a todas las estructuras del puente son: Carga muerta, Carga viva, Fuerza de impacto y Fuerzas de viento. Las demás cargas: Fuerzas longitudinales, Fuerza centrífuga, Flotabilidad, Fuerza por dilatación térmica, Presiones de tierra, Presiones de hielo, Terremotos y Contracciones, solo serán aplicadas en caso de existir [22].

Los diferentes grupos representan varias combinaciones de cargas y fuerzas a las cuales las estructuras están sometidas. Cada componente de la estructura o de la fundación debe estar regida bajo un grupo de combinaciones seguras para las fuerzas aplicadas en particular por efectos de tipos o lugares [22]. Las combinaciones de cargas están dadas por:

$$Group(N) = \gamma * [\beta_D * D + \beta_L * (L + I) + \beta_C * CF + \beta_E * E + \beta_B * B + \beta_S * SF + \beta_W * W + \beta_{WL} * WL + \beta_L * LF + \beta_R * (R + S + T) + \beta_{EQ} * EQ + \beta_{ICE} * ICE]$$

Dónde: N: Número del grupo, γ : Factor de carga dado por tabla (Figura 28), β : Coeficiente dado por tabla (Figura 28), D: Carga muerta, L: Carga viva, I: Carga viva de impacto, E: Presión de tierras, B: Flotabilidad, W: Carga de viento en la estructura, WL: Carga de viento en la carga viva - 100lb por pie, LF: Fuerzas longitudinales por la carga viva, CF: Fuerza centrífuga, R: Acortamientos nervios, S: Contracciones, T: Temperaturas, EQ: Fuerza sísmica, SF: Presión del flujo de corriente, ICE: Presión de hielo [22].

La tabla de coeficientes β para combinaciones de carga se muestra en la figura 28.

| Col. No. | 1 | 2 | 3 | 3A | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
|--------------------|----------|-----------------|--------------------|--------------------|----|-----------|-----------|----|---|-----|----|-------|----|-----|-----|----------------|
| GROUP | γ | β FACTORS | | | | | | | | | | | | | % | |
| | | D | (L+I) _D | (L+I) _P | CF | E | B | SF | W | WL | LF | R+S+T | EQ | ICE | | |
| SERVICE LOAD | I | 1.0 | 1 | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| | IA | 1.0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 150 |
| | IB | 1.0 | 1 | 0 | 1 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | ** |
| | II | 1.0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 125 |
| | III | 1.0 | 1 | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 125 |
| | IV | 1.0 | 1 | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 125 |
| | V | 1.0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 140 |
| | VI | 1.0 | 1 | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 140 |
| | VII | 1.0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 133 |
| | VIII | 1.0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 140 |
| IX | 1.0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 150 | |
| X | 1.0 | 1 | 1 | 0 | 0 | β_E | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | |
| LOAD FACTOR DESIGN | I | 1.3 | β_D | 1.67* | 0 | 1.0 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Not Applicable |
| | IA | 1.3 | β_D | 2.20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | IB | 1.3 | β_D | 0 | 1 | 1.0 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | II | 1.3 | β_D | 0 | 0 | 0 | β_E | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | III | 1.3 | β_D | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| | IV | 1.3 | β_D | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| | V | 1.25 | β_D | 0 | 0 | 0 | β_E | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| | VI | 1.25 | β_D | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0.3 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| | VII | 1.3 | β_D | 0 | 0 | 0 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| | VIII | 1.3 | β_D | 1 | 0 | 1 | β_E | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| IX | 1.20 | β_D | 0 | 0 | 0 | β_E | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| X | 1.30 | 1 | 1.67 | 0 | 0 | β_E | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |

Figura 28. Tabla de coeficientes para combinaciones según AASHTO Std 2002. [22]

3. MODELACIÓN PARAMÉTRICA

3.1. MODELO ESTRIBO

3.1.1. GEOMETRÍA

Para la modelación de la geometría se parte desde el punto {0,0,0} (origen) el cual corresponde al punto más alto en el eje del estribo. Desde el origen se dibujan las calzadas y pasillos con sus respectivos peraltes. Desde aquí hacia abajo se dibujan los muros ala, el muro espaldar y muro frontal en donde se dibujan los puntos de apoyo de vigas en la parte superior de este muro. Por último, en la parte inferior, se dibuja el dado de fundación y los pilotes. En la figura 29a y 29b se muestra el esqueleto de un estribo con parámetros previamente ingresados al código desde Excel.

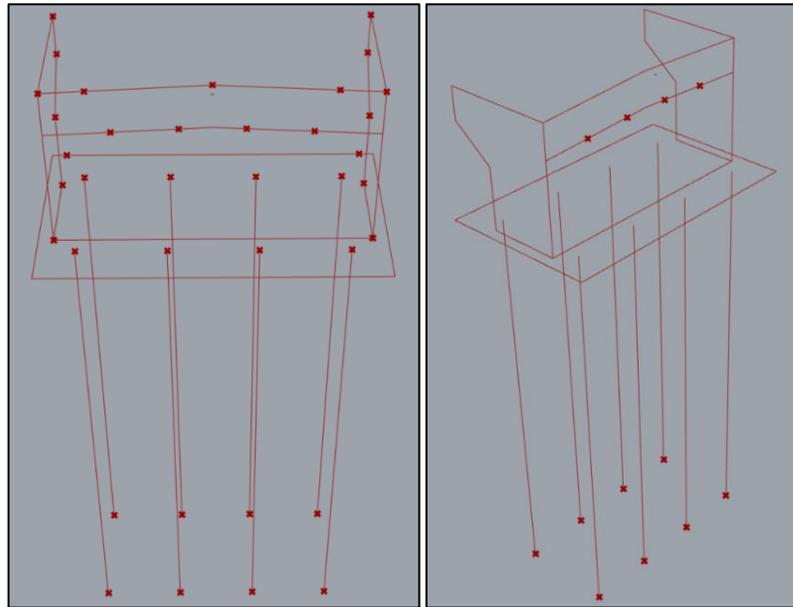


Figura 29 a) y b). Esqueleto lineal de la geometría del estribo en Grasshopper.

Para la programación de la geometría se usan principalmente componentes de puntos, líneas y superficies, pero el principal componente corresponde a un código Python dentro de Grasshopper, desde donde se extraen la mayoría de puntos útiles. En la figura 30 se muestra una parte del código donde se aprecia el componente Python principal.

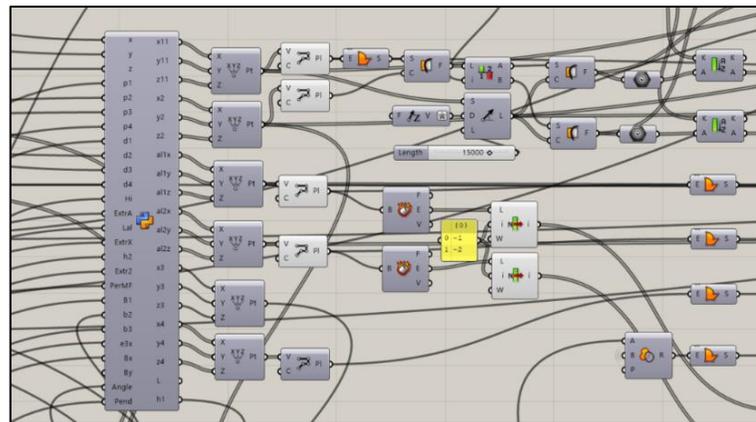


Figura 30. Fragmento del código de la geometría en Grasshopper.

Los valores parametrizables en la generación de la geometría, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Peraltes y anchos de calzada y pasillos, con elección para el usuario de agregar cero, uno o dos pasillos.
- Ángulo de esviaje y pendiente longitudinal.
- Separación de vigas apoyadas en muro frontal.

- Dimensiones muro frontal y muro espaldar (altura y espesor, ancho definido por anchos de calzada y pasillos).
- Dimensiones muro ala (ancho y espesor, altura definida por muros espaldar y frontal)
- Dimensiones aletas de muros ala, con elección para el usuario de no agregarlas
- Dimensiones dado de fundación (largo, ancho y espesor).
- Separación entre ala y muro frontal con el borde de zapata.
- Dimensiones de pilotes (radio de sección y largo de profundidad) y separación longitudinal y transversal entre ellos.
- Número de pilotes por eje (X e Y).

En la figura 31 y 32 se muestran dos diagramas de un estribo con la mayoría de los parámetros que se pueden ingresar al código.

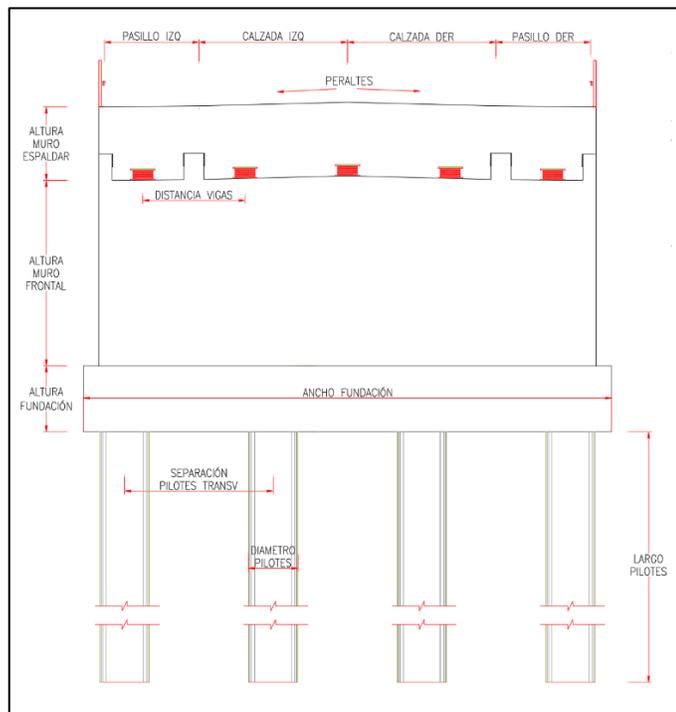


Figura 31. Diagrama de parámetros en la vista frontal de un estribo.

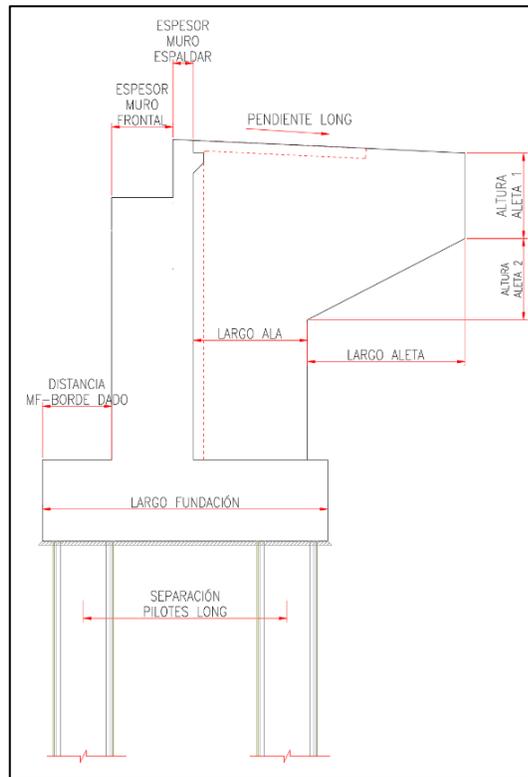


Figura 32. Diagrama de parámetros en la vista lateral de un estribo.

3.1.2. APOYOS

Los apoyos generados en el modelo de estribo corresponden a los apoyos simples en la parte inferior de los pilotes, apoyos de resortes a lo largo del pilote para simular la interacción con el suelo, y apoyos empotrados en línea para los modelos RFem de muro frontal y alas. Para la programación de la ubicación de los resortes en los pilotes se utilizan componentes de “Curve Array” en Grasshopper, el cual dibuja puntos equiespaciados a lo largo de un elemento. El programa divide el pilote en “enterrado” y “no enterrado”, en donde se agregan resortes solo a la parte enterrada. En esta parte enterrada, el último resorte se ubica a $0,5 \cdot D$ de la parte inferior, con D la distancia entre resortes.

En la figura 33 se muestra la posición de los resortes, representados por puntos en cruz, en los pilotes con espaciamiento de 1 metro y la figura 34 expone un fragmento del código de los resortes en Grasshopper.

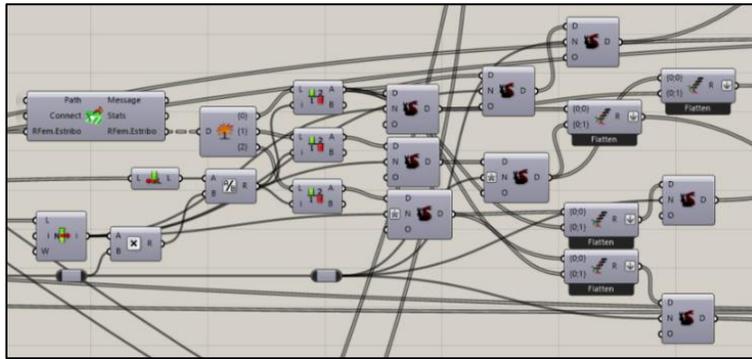


Figura 35. Fragmento de código de efecto grupo.

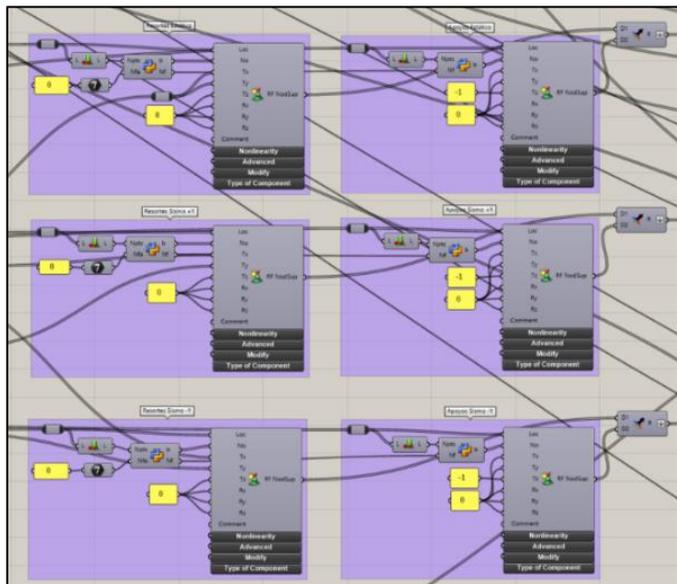


Figura 36. Componentes de exportación de apoyos de estribo a RFem.

En caso de requerir un modelo específico de muro frontal o muro ala, también en el código existen apoyos en línea, los cuales solo se activan en estos modelos específicos. En las figuras 37a y 37b se muestran los apoyos lineales de ala y muro frontal. Los componentes de exportación a RFem se presenta en la figura 38.

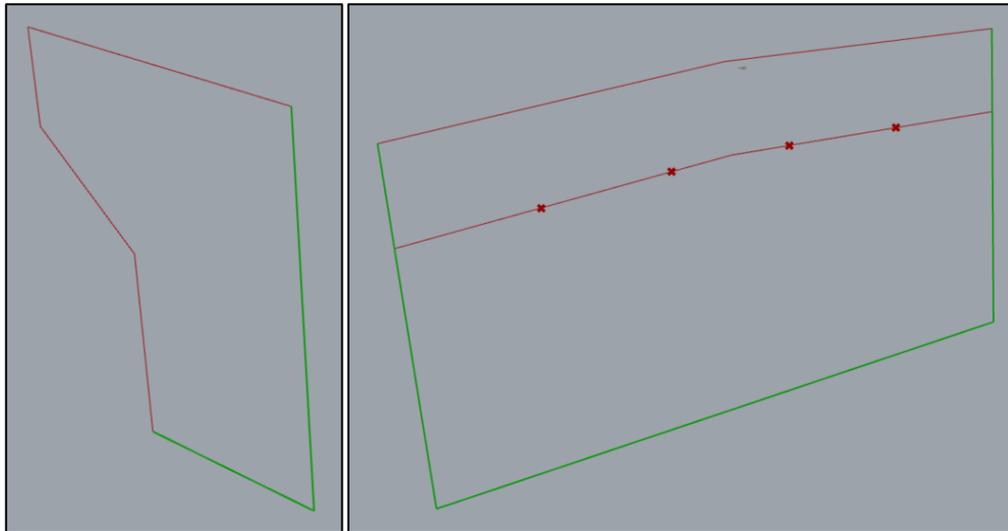


Figura 37 a) y b). Diagrama de apoyos en línea en muros ala y frontal.

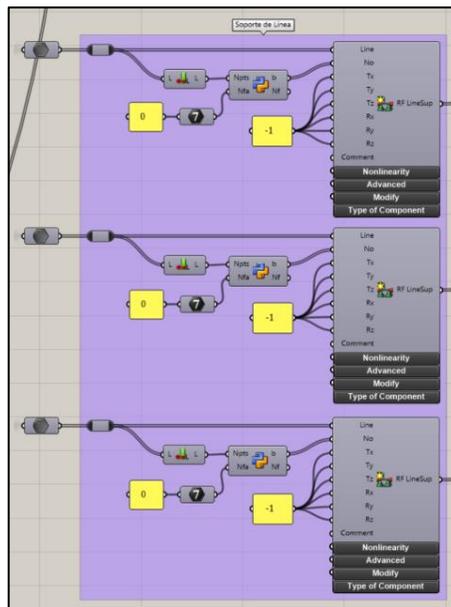


Figura 38. Componentes para exportación de apoyos en línea a RFem.

Los valores parametrizables en la generación de apoyos y resortes, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Largo de pilote enterrado y no enterrado.
- Factor de reducción por efecto grupo en eje X e Y.
- Constantes elásticas en orden descendente según cantidad de resortes en los pilotes (máximo 40 por pilote).
- Separación entre resortes.

3.1.3. MATERIALES Y SECCIONES

Los tipos de materiales y secciones se agregan al código Grasshopper desde dos tablas de Excel. Los datos de cada material ingresado son los que el programa RFem pide para la creación de ese material. Estos datos son: Módulo de elasticidad (E), Coeficiente de Poisson (μ), Módulo de corte (G), Peso específico (γ), Coeficiente de dilatación térmica (α) y Coeficiente parcial de seguridad (γ_m). La tabla para ingresar estos datos en Excel se muestra en la figura 39.

| Materiales | | Número de Materiales | | | | | |
|------------|--------|------------------------|-----------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | | | | 0 |
| | | [kN/cm ²] | [-] | [kN/cm ²] | [kN/m ³] | [1/C°] | [-] |
| Nombre | Índice | E (Módulo elasticidad) | μ (Poisson) | G (Módulo corte) | γ (Peso específico) | α (Coef. Expansión térmica) | γ_m (Factor de seg. parcial) |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Figura 39. Tabla de valores de constantes para materiales.

De la misma forma se ingresan los tipos de secciones circulares para pilotes. En la tabla de Excel se debe especificar el diámetro de la sección y el índice de material incluido en la tabla de materiales. La primera fila de esta tabla de secciones debe ser la sección del pilote enterrado por temas de programación. En la figura 40 se muestra la tabla creada en Excel para importar datos al código.

| Sección de Área | | Número Secc. de Área | | | |
|------------------|--------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | | | | 0 |
| | Nombre | Índice | Índice Material | D [mm] Diámetro | D [m] Diámetro |
| Pilote Enterrado | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Figura 40. Tabla de valores de constantes para secciones de pilotes.

Los valores parametrizables en la generación de materiales y secciones, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Nombres de materiales.
- Datos E, μ , G, γ , α , γ_m por cada material a utilizar.
- Asignación de materiales a los elementos principales del estribo incluyendo muros, alas y zapata.
- Nombres de secciones circulares para pilotes y su diámetro.
- Asignación de material a cada sección de pilotes utilizada.
- Asignación de sección a pilote enterrado y no enterrado.

En la figura 41 se muestra un fragmento del código Grasshopper para exportación de materiales y secciones a RFem.

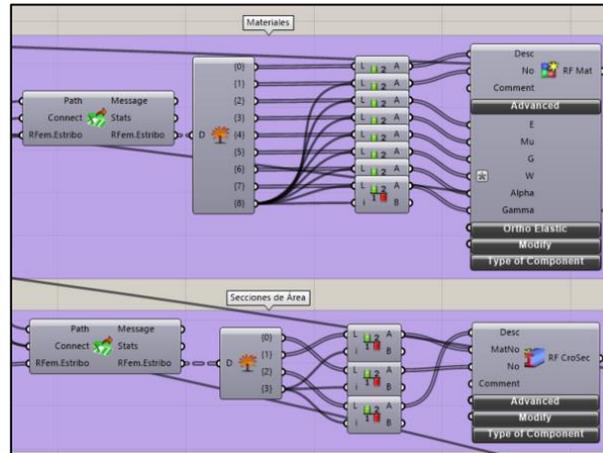


Figura 41. Componentes de exportación a RFem de materiales y secciones.

3.1.4. EMPUJES DE SUELO

Para el cálculo de empujes se utilizan varios componentes Python, en donde se calculan los empujes estáticos y sísmicos mediante la metodología de Mononobe-Okabe. Los códigos se adjuntan en el Anexo A.

Desde estos códigos de Python el programa puede calcular el empuje estático en reposo, empuje estático activo, empuje sísmico, carga sísmica y peso propio de relleno, todo a partir de los datos de suelo ingresados desde Excel, correspondientes al ángulo de fricción, peso específico, tipo de suelo, zona sísmica y ángulos de pendiente i y β . Los parámetros de A_0 y S se calculan según manual de carreteras [23]. En la figura 42 se muestra un fragmento del código de empujes en Grasshopper y en la figura 43 se muestra la tabla de Excel para el ingreso de datos de suelo.

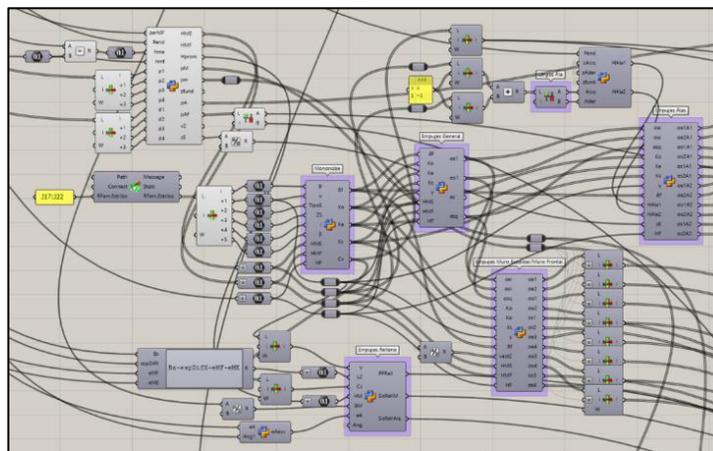


Figura 42. Fragmento del código de empujes en Grasshopper.

| Datos Suelo | |
|------------------------------|-------|
| Datos Empujes | Valor |
| ϕ [°] | |
| γ [T/m ³] | |
| Tipo de Suelo [] | |
| Zona Sísmica [] | |
| i [°] | |
| β [°] | |

Figura 43. Tabla de Excel para ingresar datos de suelo.

Los valores parametrizables en la generación de empujes de suelo, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Tipo de suelo, zona sísmica, ϕ , γ , i y β del relleno que contiene el estribo.

3.1.5. CARGAS

Las cargas agregadas al estribo corresponden a las cargas de peso propio en elementos “sin peso” y las cargas provenientes desde la superestructura, estas últimas son: Peso propio del hormigón, Peso propio del pavimento, Sobrecarga vehicular y Cargas sísmicas en ambos ejes. La carga de peso propio en elementos sin peso se aplica en el pilote enterrado, ya que estos elementos se modelan con $\gamma=0$. En la figura 44 se presenta la tabla paramétrica en Excel para ingresar las cargas de superestructura, para un puente de 13 vigas máximo.

| Cargas Superestructura Estribo Entrada | | | | | |
|--|-------------|--------------|------------|---------------------|---------------------|
| Viga / Valores [kN] | PP Hormigón | PP Pavimento | Sobrecarga | Carga Sísmica Eje X | Carga Sísmica Eje Y |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| 11 | | | | | |
| 12 | | | | | |
| 13 | | | | | |

Figura 44. Tabla de Excel para ingresar cargas de superestructura al modelo de estribo.

3.1.6. CASOS Y COMBINACIONES DE CARGA

Los nombres de casos de carga para el modelo de estribo no se ingresan paramétricamente, ya que son agregados directamente desde Grasshopper hacia RFem. Estos casos de carga ingresados a RFem son:

1. **Peso Propio:** Carga calculada como peso específico * sección de área de pilotes.
2. **Peso Propio Hormigón (Super):** Valor de carga parametrizable.

3. **Peso Propio Pavimento (Super):** Valor de carga parametrizable.
4. **Sobrecarga Vehicular (Super):** Valor de carga parametrizable.
5. **Sismo Peso Propio Eje X:** Factor Cs en eje X para todos los elementos del modelo, coeficiente Cs calculado según zona sísmica de suelo.
6. **Sismo Peso Propio Eje Y:** Factor Cs en eje Y para todos los elementos del modelo, coeficiente Cs calculado según zona sísmica de suelo.
7. **Sismo Superestructura Eje X:** Valor de carga parametrizable.
8. **Sismo Superestructura Eje Y:** Valor de carga parametrizable.
9. **Sismo Relleno Eje X:** Carga aplicada en contra del muro frontal y espaldar, provocada por el relleno. Constante en altura.
10. **Sismo Relleno Eje Y:** Carga aplicada en contra de los muros ala, provocada por el relleno. Constante en altura.
11. **Peso Propio Relleno:** Carga gravitatoria calculada como altura muro espaldar * peso específico suelo * gravedad. Aplicada en zarpa trasera del estribo.
12. **Empuje Estático Activo:** Carga aplicada en todos los muros, calculada por Mononobe-Okabe para un caso estático activo. Aumenta en profundidad.
13. **Empuje Estático en Reposo:** Carga aplicada en todos los muros, calculada por Mononobe-Okabe para un caso estático en reposo. Aumenta en profundidad.
14. **Empuje Sísmico Relleno Eje X:** Carga aplicada en contra del muro frontal y espaldar. Disminuye en profundidad
15. **Empuje Sísmico Relleno Eje Y:** Carga aplicada en contra del muro frontal y espaldar. Disminuye en profundidad.

A diferencia de los casos de carga, las combinaciones si pueden ser modificadas por el usuario, pero de igual forma se puede elegir exportar las combinaciones siguiendo tres normas utilizadas actualmente en los modelos, estas normas son la AASHTO estándar 2002, LRFD 2014 y LRFD 2017. Las combinaciones usadas por año son:

- **Estándar 2002:** Service Load I, VII, Load Factor Design I, VII. [22]
- **LRFD 2014:** Strength I, Extreme Event I, Service I. [24]
- **LRFD 2017:** Strength I, Extreme Event I, Service I. [25]

En la figura 45a y 45b se muestran las tablas creadas en Excel para ingresar casos y combinaciones de carga al código, y en la figura 46 se muestra un fragmento del código de Grasshopper de los componentes para exportar a RFem, ambas figuras con datos de ejemplo.

| Casos de Carga (CC) | | |
|---------------------|----------------|---------------|
| Indice | Nombre | Factor PP/Eje |
| 1 | PP | (-1)/Z |
| 2 | PPSuper_Horm | |
| 3 | PPSuper_Pav | |
| 4 | CV | |
| 5 | Sismo_PP_X | (Cs)/X |
| 6 | Sismo_PP_Y | (Cs)/Y |
| 7 | Super_Sismo_X | |
| 8 | Super_Sismo_Y | |
| 9 | SismoRel_X | |
| 10 | SismoRel_Y | |
| 11 | PP_Relleno | |
| 12 | Empuje_Est_Act | |
| 13 | Empuje_Est_Rep | |
| 14 | Empuje_Sis_X | |
| 15 | Empuje_Sis_Y | |

| Norma AASHTO LRFD 2014 | | |
|------------------------|--------------------------|---|
| Indice | Nombre | Combinación |
| 1 | Strength 1 Max | 1.25*CC1+1.25*CC2+1.5*CC3+1.75*CC4+1.25*CC11+1.35*CC13 |
| 2 | Strength 1 Min | 0.9*CC1+0.9*CC2+0.65*CC3+1.75*CC4+0.9*CC11+0.9*CC13 |
| 3 | Extreme Event 1 1X+0.3Y | CC1+CC2+CC3+CC5+0.3*CC6+CC7+0.3*CC8+CC9+0.3*CC10+CC11+CC12+CC14+0.3*CC15 |
| 4 | Extreme Event 1 0.3X+1Y | CC1+CC2+CC3+0.3*CC5+CC6+0.3*CC7+CC8+0.3*CC9+CC10+CC11+CC12+0.3*CC14+CC15 |
| 5 | Extreme Event 1 Mayo Max | 1.25*CC1+1.25*CC2+1.5*CC3+CC5+CC6+CC7+CC8+CC9+CC10+1.25*CC11+CC12+1.35*CC13+CC14+CC15 |
| 6 | Extreme Event 1 Mayo Min | 0.9*CC1+0.9*CC2+0.65*CC3+CC5+CC6+CC7+CC8+CC9+CC10+0.9*CC11+CC12+0.9*CC13+CC14+CC15 |
| 7 | Service 1 | CC1+CC2+CC3+CC4+CC11+CC13 |
| 8 | EQX | CC5+CC7+CC9+CC14 |
| 9 | EQY | CC6+CC8+CC10+CC15 |
| 10 | | |
| 11 | | |
| 12 | | |
| 13 | | |
| 14 | | |
| 15 | | |

Figura 45 a) y b). Tablas en Excel para ingresar casos y combinaciones de carga.

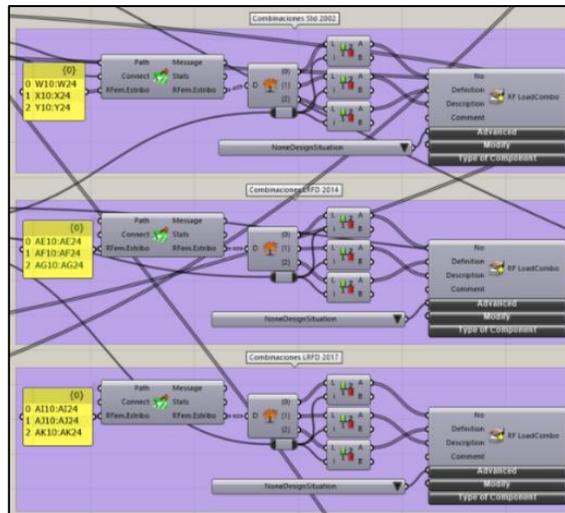


Figura 46. Fragmento del código Grasshopper para exportar combinaciones de carga a RFEM.

Los valores parametrizables en la generación de casos y combinaciones de carga, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Nombres de casos y combinaciones de carga.
- Definiciones de combinaciones de carga con factores de multiplicación a casos de carga requeridos.
- Año de norma a utilizar en el modelo, escogiendo entre 2002, 2014 y 2017.

3.1.7. EXPORTACIÓN A RFEM

Incluyendo todo lo anterior, el código está listo para exportarse a RFem; para esto se utiliza el componente “Set Data” incluido en el FEM Toolbox. En este componente convergen los demás bloques funcionales del código y en este mismo componente se puede incluir el nombre del archivo RFem donde se exportará y un botón de exportación. El componente se muestra en la figura 47.



Figura 47. Componente Set Data en modelo estribo Grasshopper.

Para exportar el modelo se debe tener abierto el modelo en RFem con el nombre indicado en el componente. Para el modelo de estribo se crearon 6 posibles exportaciones a modelos diferentes, cada uno con su propio componente “Set Data”, con pequeñas diferencias. Los modelos que pueden crearse son:

1. **Modelo General Estático:** Modelo general del estribo con cargas estáticas y resortes de pilotes iguales sin efecto grupo.
2. **Modelo General Sísmico +Y:** Modelo general del estribo con cargas sísmicas en el eje Y positivo aplicadas en el ala derecha. Resortes con efecto grupo en el sentido X positivo e Y positivo.
3. **Modelo General Sísmico -Y:** Modelo general del estribo con cargas sísmicas en el eje Y negativo aplicadas en el ala izquierda. Resortes con efecto grupo en el sentido X positivo e Y negativo.
4. **Modelo Muro Espaldar/Frontal:** Modelo del muro frontal del estribo incluyendo solo las cargas aplicadas en el eje longitudinal.
5. **Modelo Ala Izquierda:** Modelo del muro ala izquierdo del estribo incluyendo solo las cargas aplicadas en esta ala.
6. **Modelo Ala Derecha:** Modelo del muro ala derecho del estribo incluyendo solo las cargas aplicadas en esta ala.

En la imagen 48 se muestra un plano general del código en Grasshopper creado. Los botones de exportación se ubican en la esquina superior izquierda, al inicio del código, para simplificar el uso de este. En la figura 49 se muestran los botones que se pueden utilizar en el código.

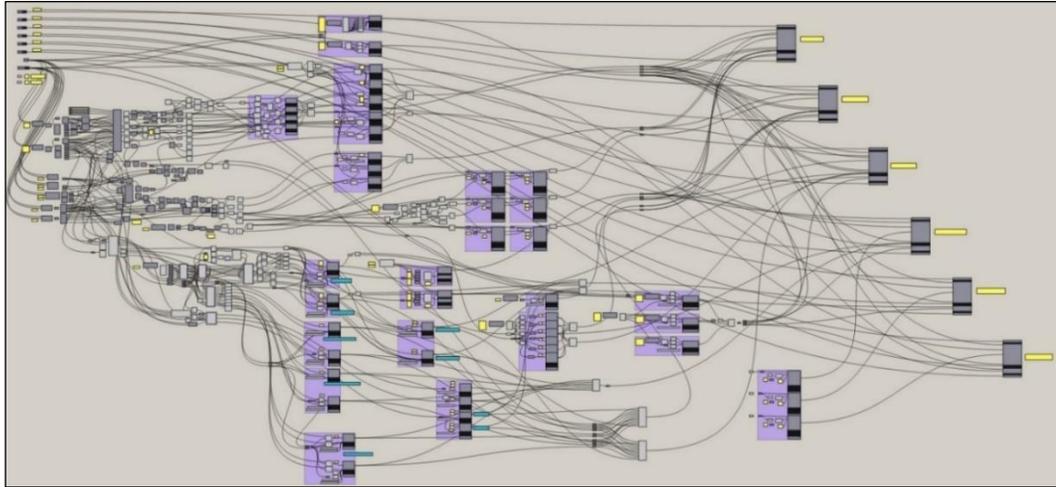


Figura 48. Vista general código Grasshopper estribo.



Figura 49. Botones para exportar modelos a RFem.

A continuación, se presentan estribos estándar de un modelo completo, modelo de muro espaldar/frontal y modelo de muro ala, con su geometría en Grasshopper y RFem.

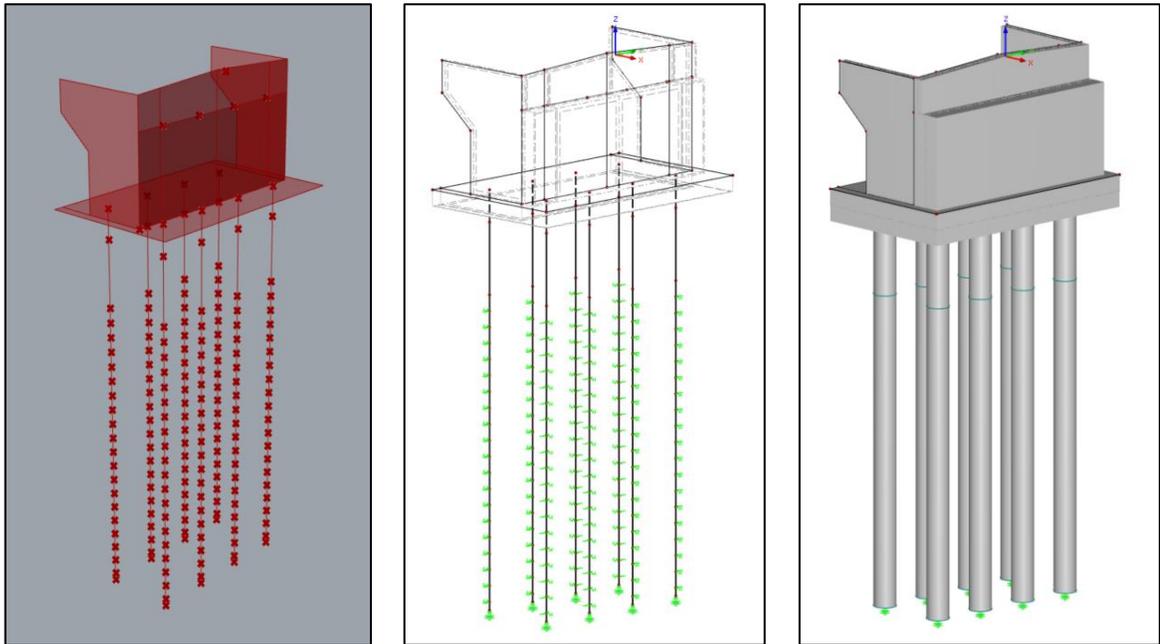


Figura 50 a), b) y c). Modelo completo de estribo en GH, RFem lineal y RFem extruído.

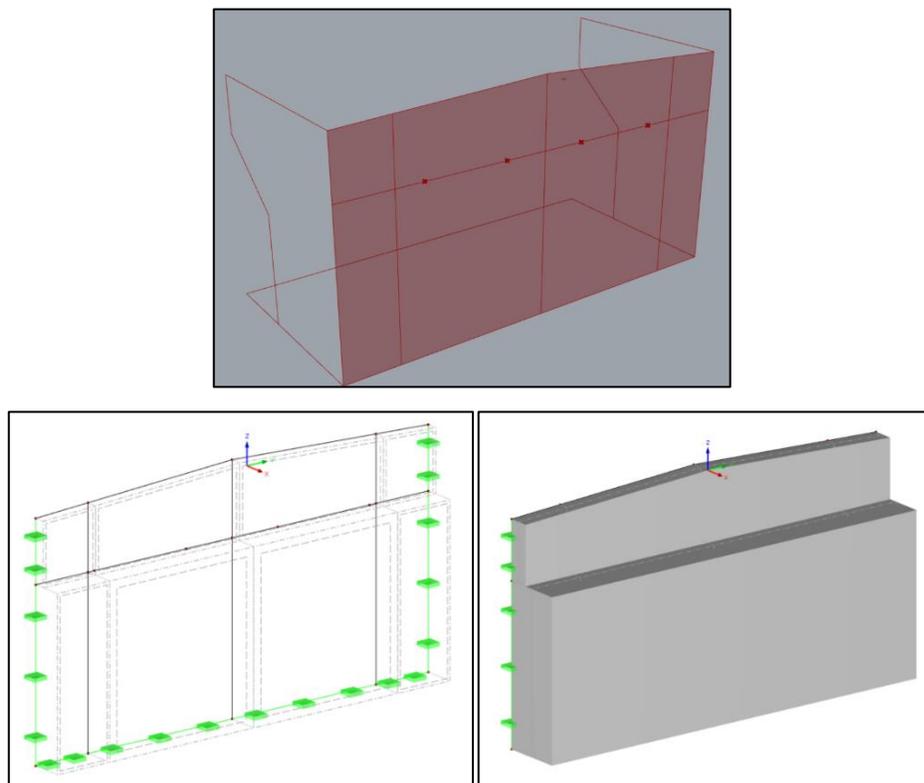


Figura 51 a), b) y c). Modelo de muro frontal en GH, RFem lineal y RFem extruído.

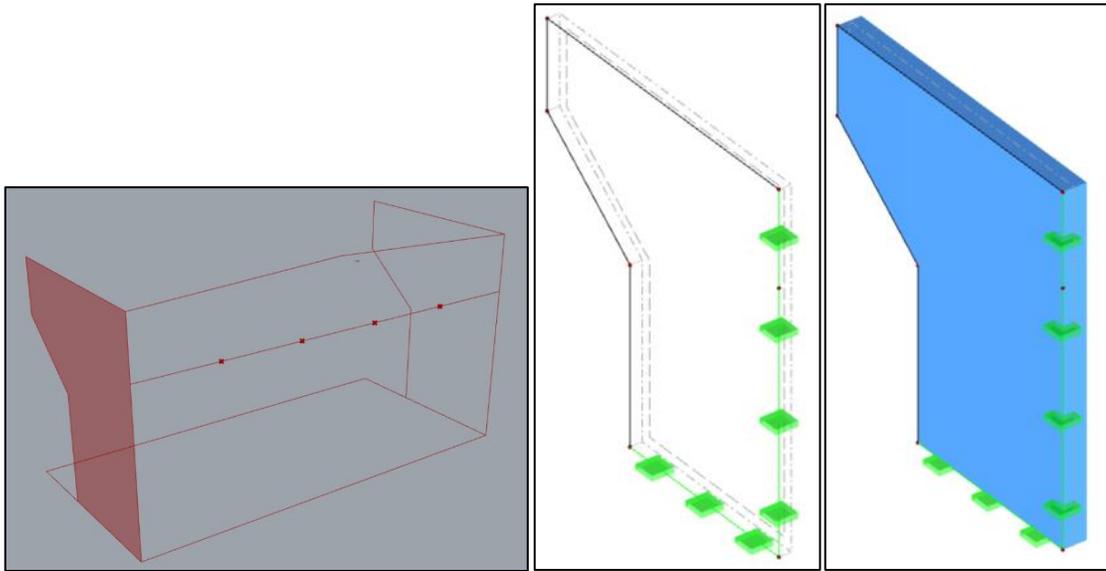


Figura 52 a), b) y c). Modelo de muro ala en GH, RFem lineal y RFem extruído.

A continuación, se presentan algunas imágenes de algunas fuerzas paramétricas agregadas a un modelo completo de estribo.

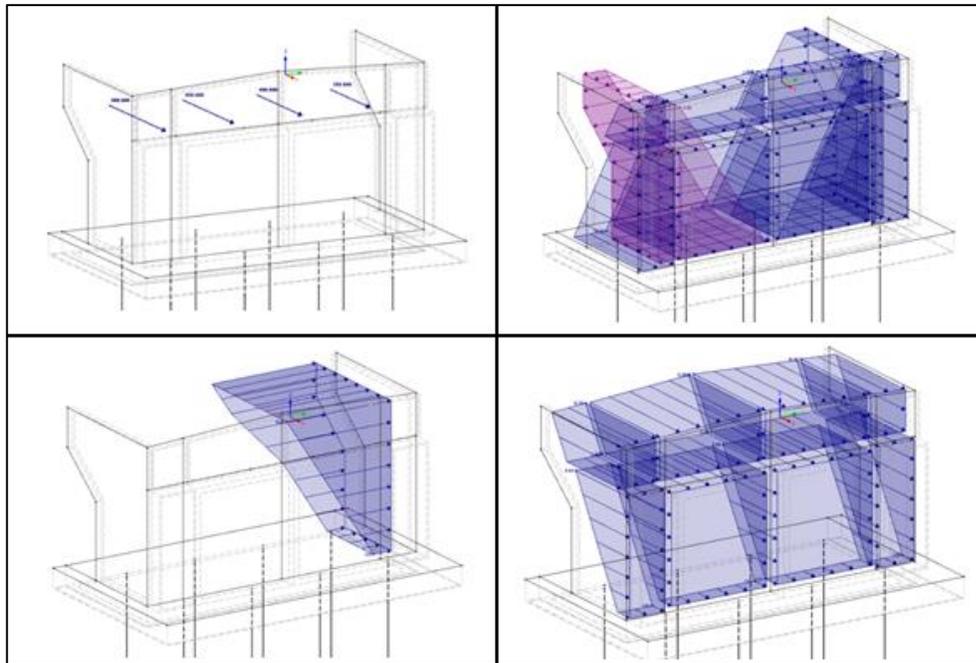


Figura 53 a), b), c) y d). Ejemplos de cargas aplicadas en RFem, correspondientes a carga sísmica de superestructura, empuje estático, empuje sísmico en ala (Eje Y), empuje sísmico en muro frontal y espaldar (Eje X).

3.1.8. EJEMPLOS DE EXPORTACIÓN DE ESTRIBOS

A continuación, se presentan 3 tipos de estribos exportados desde Grasshopper para proyectos de puentes actualmente en revisión. Estos estribos corresponden al estribo sur de los puentes Quepe y Pocoyán y el paso superior El Cobre. Una descripción más detallada de los proyectos se expone en el Anexo B.

➤ Estribo Sur Puente Quepe

El estribo sur del puente Quepe, ubicado en la provincia de Cautín, posee 5 placas de apoyo para vigas pretensadas, fundación directa y alas rectangulares sin aletas. Además, posee un esviaje de 14° . Las imágenes de Grasshopper y RFem se muestran a continuación.

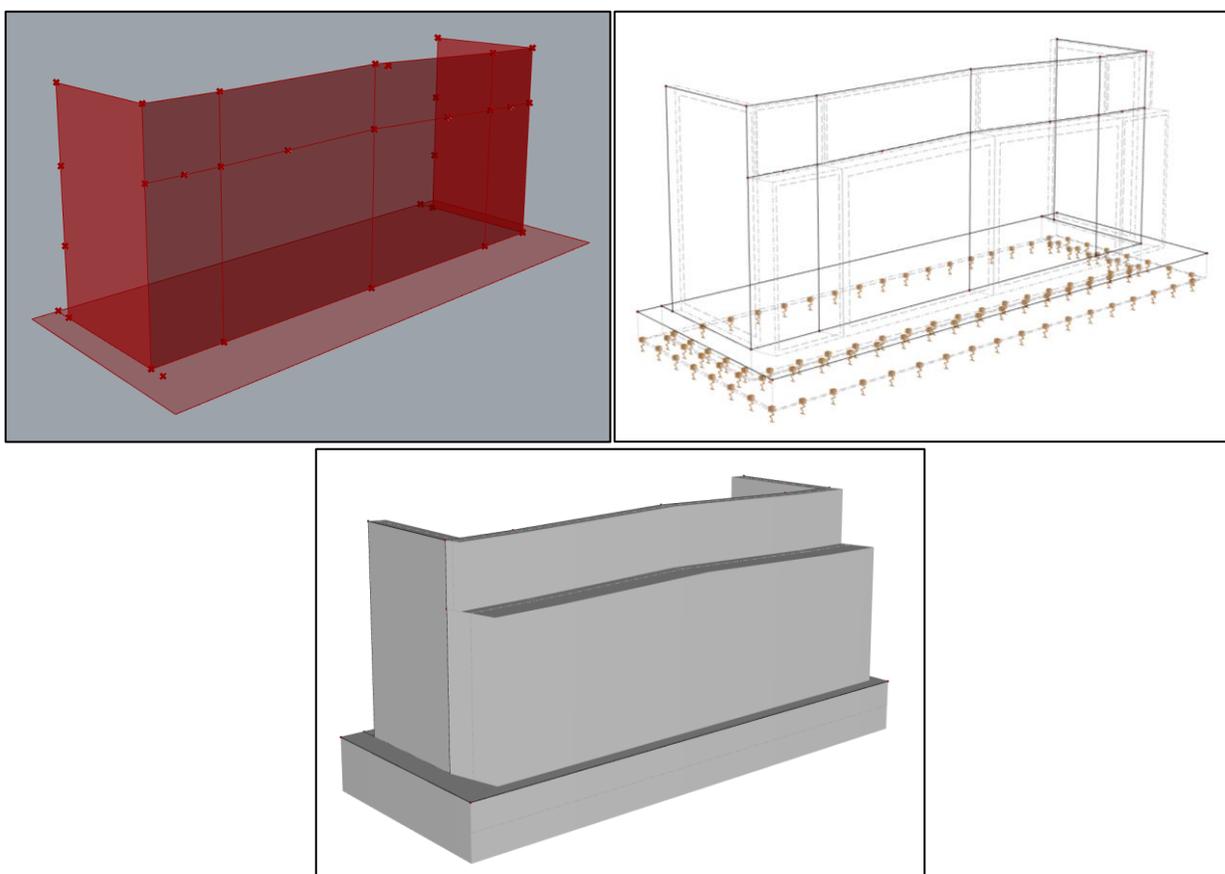


Figura 54 a), b) y c). Modelo de estribo sur del puente Quepe en GH, RFem lineal y RFem extruído.

➤ Estribo Sur Puente Pocoyán

El estribo sur del puente Pocoyán, ubicado en la provincia de Cautín, posee 5 placas de apoyo para vigas de acero, fundación con pilotes y alas con aletas. Además, posee una pendiente longitudinal de 4,6%. Las imágenes de Grasshopper y RFem se muestran a continuación.

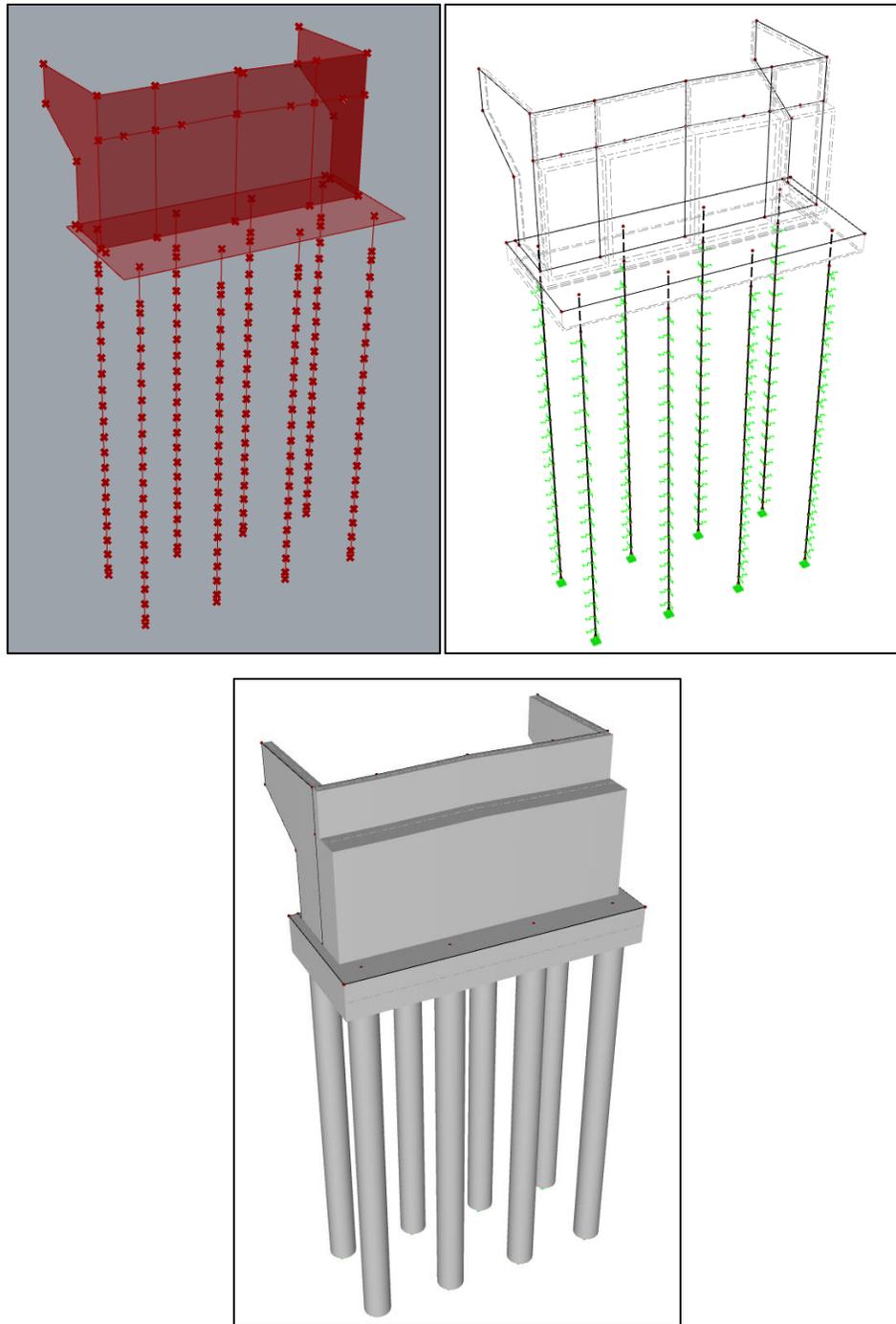


Figura 55 a), b) y c). Modelo de estribo sur del puente Pocoyán en GH, RFem lineal y RFem extruído.

➤ **Estribo Sur Paso Superior El Cobre**

El estribo sur del paso superior El Cobre, ubicado en la provincia de Cachapoal, posee 10 placas de apoyo para vigas pretensadas, fundación directa y alas rectangulares sin aletas. Además, posee un esviaje de 6° . Las imágenes de Grasshopper y RFem se muestran a continuación.

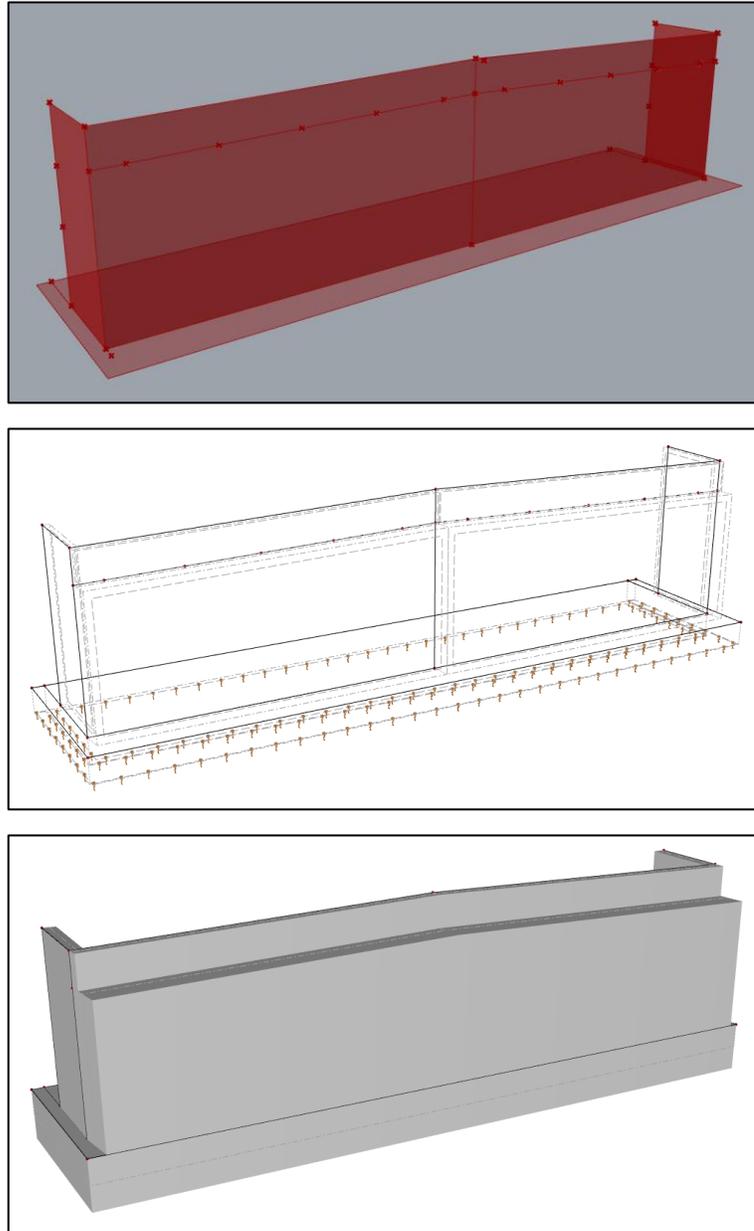


Figura 56 a), b) y c). Modelo de estribo sur del paso superior El Cobre en GH, RFem lineal y RFem extruído.

3.2. MODELO SUPERESTRUCTURA Y CEPAS

3.2.1. GEOMETRÍA

Para la modelación de la geometría se parte desde el punto $(0,0,-H)$, en donde este corresponde al punto del eje del estribo entrada desplazado en el eje Z, con H la altura del muro espaldar. Desde este punto se dibujan las calzadas y pasillos con sus respectivos peraltes, así como las vigas que recorren todo el tablero. De acuerdo al número de cepas ingresado y al largo de las vigas por tramo, se dibujan las vigas cabezales y placas de apoyo junto con pilotes y fundación si es que existe. Luego se modelan las placas de apoyo en los estribos según la altura de la viga entrante, y por último se dibujan las líneas de barreras a cada lado de las calzadas para posteriormente adicionarle carga de peso propio.

En la figura 57a se muestra el esqueleto del modelo de superestructura y cepas de pila/pilotes de un puente estándar usando el código de Grasshopper. La figura 57b muestra el mismo puente, pero con cepas columna/dado/pilotes.

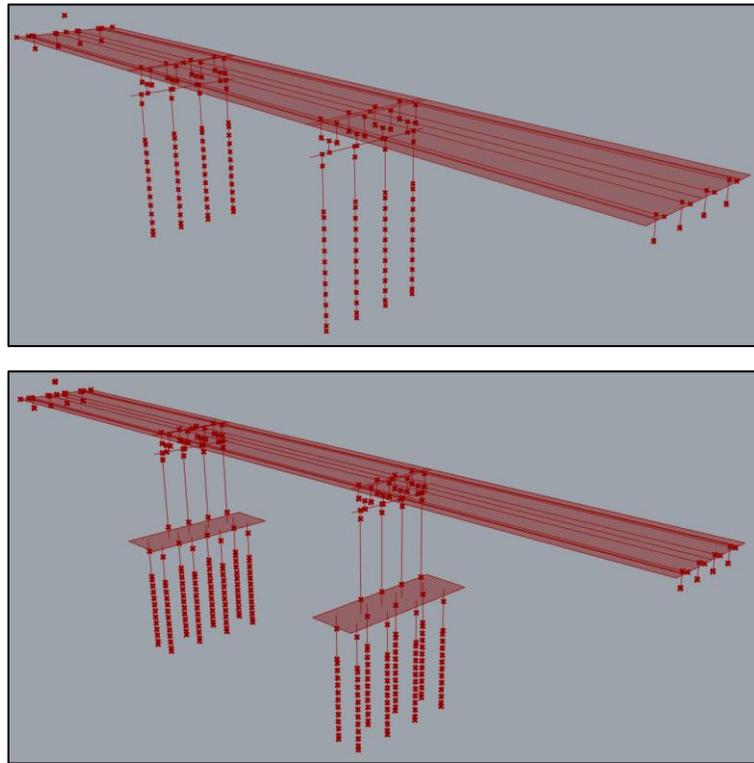


Figura 57 a) y b). Geometría de superestructura en Grasshopper con distintos tipos de cepa.

Para la programación de la geometría se usan principalmente componentes de puntos, líneas y superficies, así como pequeños componentes de Python. Cada cepa está dibujada desde un punto inicial ubicado en la línea del eje del tablero.

Los valores parametrizables en la generación de la geometría, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Peraltes y anchos de calzada y pasillos, con elección para el usuario de agregar cero, uno o dos pasillos.
- Ángulo de esviaje y pendiente longitudinal.
- Número de vigas con su altura y separación entre ellas.
- Número de tramos o número de cepas.
- Largos de tramos, ingresados como largo de viga en ese tramo (tramo se define como largo de viga más media loseta).
- Ancho de loseta.
- Ancho de barreras viales.
- Altura de placas de apoyo en cepas y estribos.
- Dimensiones viga cabezal de cepas (ancho, largo y altura).
- Elección de tipo de cepa. **Cepa tipo 1:** pila/pilote. **Cepa tipo 2:** columna/dado/pilote.
- Dimensiones pila pilote (sección de área y largo de profundidad) y separación transversal entre ellas [cepa tipo 1].
- Número de pila pilotes en eje transversal [cepa tipo 1].
- Dimensiones columnas (sección de área y largo de profundidad) [cepa tipo 2].
- Dimensiones dado de fundación (largo, ancho y espesor) [cepa tipo 2].
- Dimensiones pilotes bajo dado (sección de área y largo de profundidad) y separación longitudinal y transversal entre ellos [cepa tipo 2].
- Número de pilotes bajo dado en eje transversal y longitudinal [cepa tipo 2].

En la figura 58 y 59 se muestran dos diagramas del modelo general, uno de tablero y otro de cepa, con algunos de los parámetros que se pueden ingresar al código.

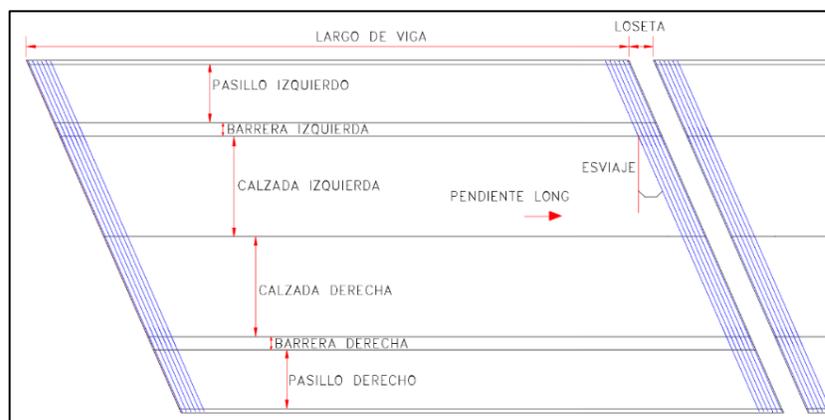


Figura 58. Diagrama de parámetros en la vista en planta del tablero de un puente.

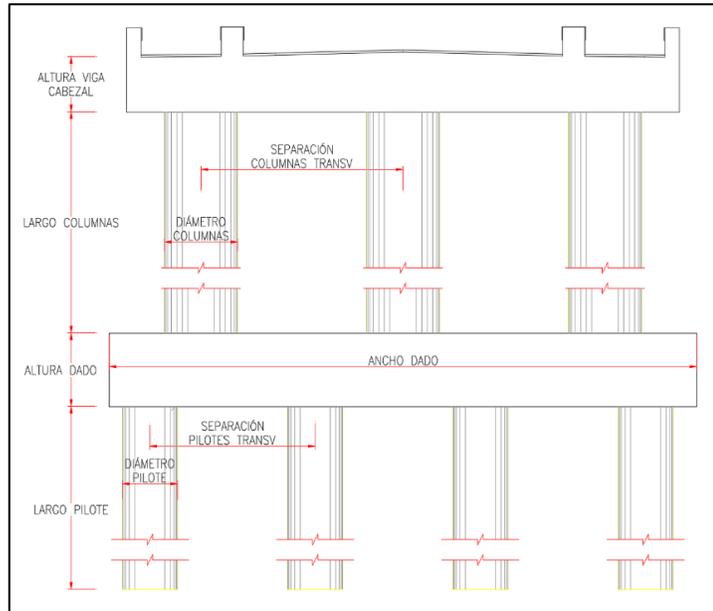


Figura 59. Diagrama de parámetros en la vista frontal de la cepa de un puente.

3.2.2. APOYOS

Los apoyos generados en el modelo de superestructura corresponden a los apoyos en la parte inferior de los pilotes, apoyos de resortes a lo largo del pilote para simular la interacción con el suelo, y apoyos empotrados en las placas de apoyo de estribos. Para la programación de la ubicación de los resortes en los pilotes, al igual que en el modelo de estribo, se utilizan componentes de “Curve Array” en Grasshopper, el cual dibuja puntos equiespaciados a lo largo de un elemento. El programa divide el pilote en “enterrado” y “no enterrado”, en donde se agregan resortes solo a la parte enterrada. En esta parte enterrada, el último resorte se ubica a $0,5 \cdot D$ de la parte inferior, con D la distancia entre resortes.

Los resortes siempre se generan en el pilote enterrado sin importar el tipo de cepa utilizado en el puente. Esto se expone en las figuras 60a y 60b, en donde se muestra la ubicación de resortes con $D = 1$ [m] en cada tipo de cepa.

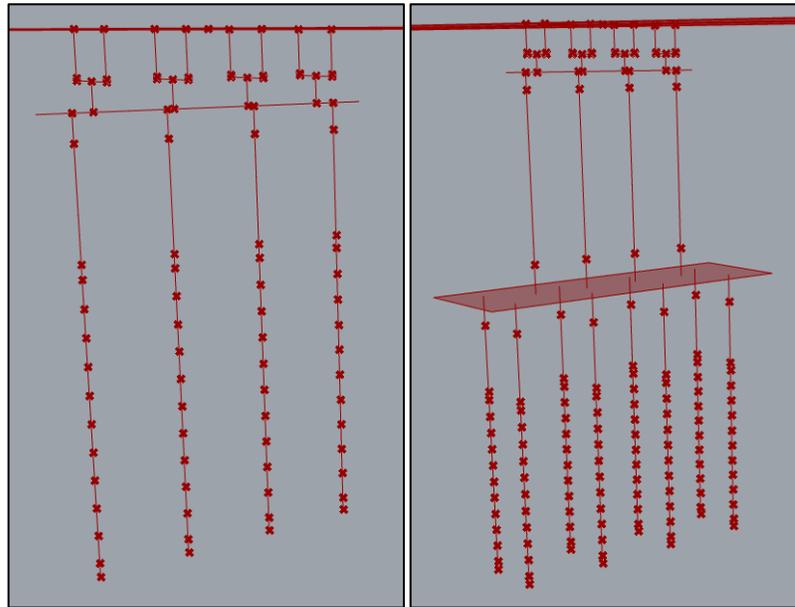


Figura 60 a) y b). Ubicación de resortes en los dos tipos de cepa.

Los valores de constante elástica de resortes son parametrizables y se ingresan en tablas de Excel. Este modelo tiene una capacidad para ingresar entre 1 y 50 cepas, según lo que requiera el puente, por lo que en el archivo Excel se tienen 50 tablas, una para cada cepa, para que cada una pueda tener su propia configuración de resortes. Cada una de estas tablas posee celdas paramétricas para ingresar el tipo de apoyo inferior del pilote (simple o resorte), largo de pilote no enterrado y valores de reducción por efecto grupo en ejes X e Y.

Para ordenar los valores de constante elástica y agregar el efecto grupo en cada cepa, se utiliza el mismo código del modelo de estribo, pero repetido 50 veces. Debido a la cantidad de componentes y cables utilizados en esta parte, se agrega un componente “Cluster” en Grasshopper, el cual se define como un código dentro del código. En la figura 61 se muestra el componente Cluster del código principal y en la figura 62 se muestra el “Cluster” dentro del código.

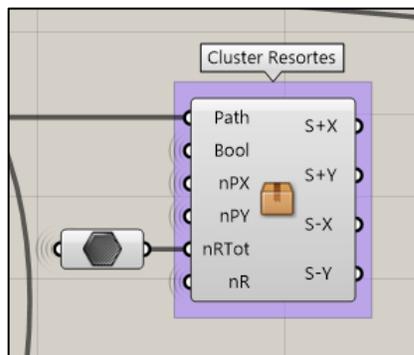


Figura 61. Componente Cluster del código Grasshopper.

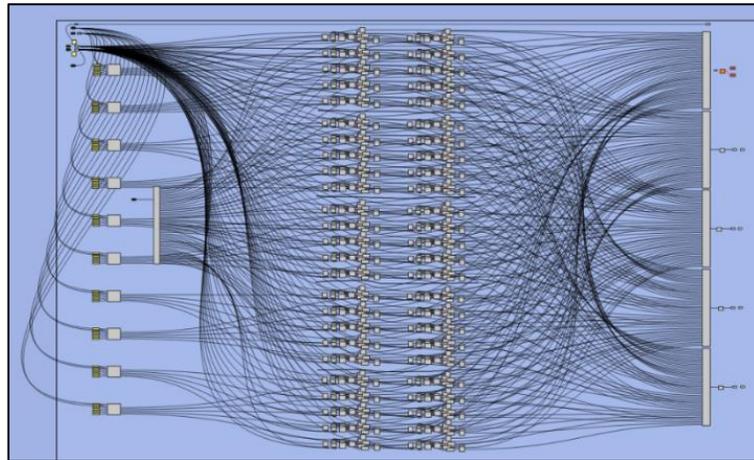


Figura 62. Código dentro del Cluster de Grasshopper.

Luego de ordenar los valores de constante para todos los resortes utilizando el Cluster, se exportan a RFem con los componentes de exportación de apoyos del Toolbox. En la figura 63 se muestran los componentes de exportación en el código Grasshopper.

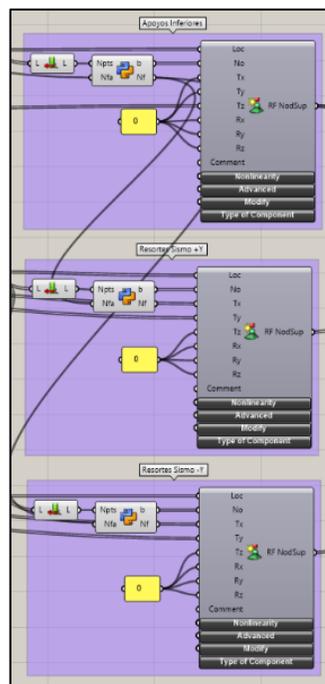


Figura 63. Componentes de exportación de apoyos de superestructura a RFem.

Los valores parametrizables en la generación de apoyos y resortes, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Largo de pilote enterrado y no enterrado para cada cepa.
- Elección de apoyo simple o resorte en punto inferior del pilote por cada cepa.

| Viga Hormigón | |
|---------------|------------|
| Nombre | Valor [mm] |
| h | 1800 |
| s | 150 |
| btl | 561.4 |
| ttl | 110 |
| bwtl | 175 |
| hwtl | 100 |
| bbi | 327.5 |
| tbi | 400 |
| bwbi | 75 |
| hwbi | 100 |
| btr | 561.4 |
| trr | 110 |
| bwtr | 175 |
| hwtr | 100 |
| bbr | 327.5 |
| tbr | 400 |
| bwbr | 75 |
| hwbr | 100 |

ITCU 1800/150/561.4/110/175/100/327.5/400/75/100/561.4/110/175/100/327.5/400/75/100

Figura 67. Tabla para nombrar secciones de viga de hormigón.

En la figura 68 se muestra un fragmento del código de Grasshopper con los componentes para exportar materiales y secciones a RFem.

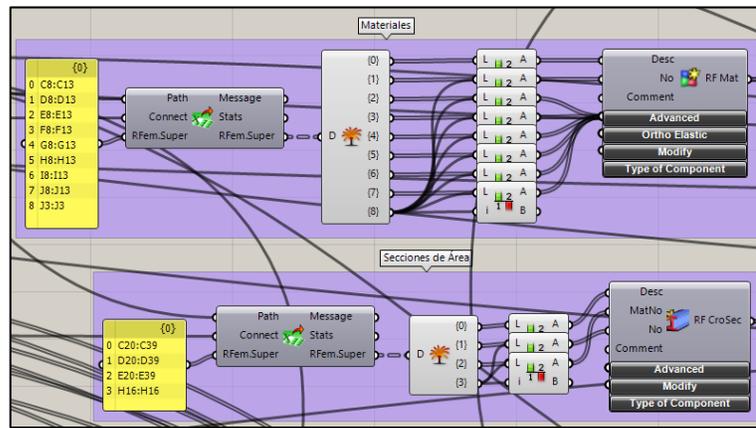


Figura 68. Componentes de exportación de materiales y secciones a RFem.

Los valores parametrizables en la generación de materiales y secciones, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Nombres de materiales.
- Datos E , μ , G , γ , α , γ_m por cada material a utilizar.
- Asignación de materiales a elementos y secciones de superestructura.
- Nombres de secciones para pilotes, vigas cabezal y vigas longitudinales.
- Asignación de material a cada sección utilizada.
- Asignación de sección a elementos de superestructura.

3.2.4. ASIGNACIÓN DE VIGAS POR VANO

Utilizando dos tablas de Excel se pueden asignar hasta 3 tipos de vigas diferentes a cada vano del puente. Para la definición de cada viga se usa la tabla de la figura 69, en la cual se asignan las secciones transversales y la longitud de cada una de estas a lo largo de la viga.

| | Viga Tipo 1 | | Viga Tipo 2 | | Viga Tipo 3 | |
|------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | Largo [mm] | Índice Secc. | Largo [mm] | Índice Secc. | Largo [mm] | Índice Secc. |
| Tramo de Viga N1 | 0 | - | 2000 | 4 | - | - |
| Tramo de Viga N2 | 0 | - | 3000 | 3 | - | - |
| Tramo de Viga N3 | 0 | - | 5000 | 2 | - | - |
| Tramo de Viga N4 | 50000 | 1 | 30000 | 1 | - | - |
| Tramo de Viga N5 | 0 | - | 5000 | 2 | - | - |
| Tramo de Viga N6 | 0 | - | 3000 | 3 | - | - |
| Tramo de Viga N7 | 0 | - | 2000 | 4 | - | - |
| Largo Total | 50000 | | 50000 | | 0 | |

Figura 69. Tabla de definición de vigas.

Para simplificar el ingreso de datos por el usuario en la tabla anterior, las secciones de la viga son definidas desde el centro hacia los extremos. Para vigas que poseen solo una sección transversal a lo largo del vano, solo se debe definir el largo de tramo número 4 como se muestra en la viga tipo 1 en la figura 69. Por otra parte, si la viga tiene diferentes secciones a lo largo del vano se deben definir las secciones a utilizar a lo largo de la viga utilizando los índices definidos en la tabla de secciones y agregar al lado izquierdo de los índices la longitud respectiva de la sección. Un ejemplo de esto se ve también en la figura 69 en la viga tipo 2 en donde se construye una viga simétrica con 4 tipos de sección diferente, formando una viga de largo 50 metros. Estos cambios de sección pueden ser causados por adición de suples o para aumentar resistencia, dependiendo de lo que decida el ingeniero.

En la figura 70 se muestra un diagrama de cómo se deben ingresar los datos en la tabla anterior para casos en los que las vigas poseen 1, 2, 3 o 4 secciones diferentes.

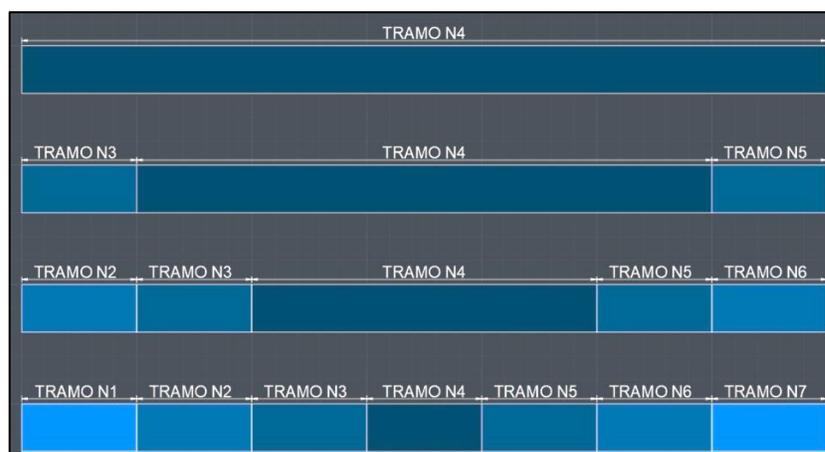


Figura 70. Diagramas de información para definición de vigas.

Una vez listo el paso de construcción de vigas, se debe definir qué tipo de viga tendrá cada vano. Para esto se utiliza la tabla de la figura 71, en donde se asigna el índice de viga en cada vano en orden ascendente. Esta tabla tiene capacidad para asignar vigas en un máximo de 50 vanos.

| Número de Vanos en Puente | |
|---------------------------|----------------|
| 0 | |
| Tipo de Viga por Vano | |
| Vano | Índice de viga |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |
| 6 | |
| 7 | |
| 8 | |
| 9 | |
| 10 | |

Figura 71. Tabla de asignación de vigas por vano.

En la figura 72 se muestra un fragmento del código Grasshopper que se utiliza para la exportación de las vigas a RFem.

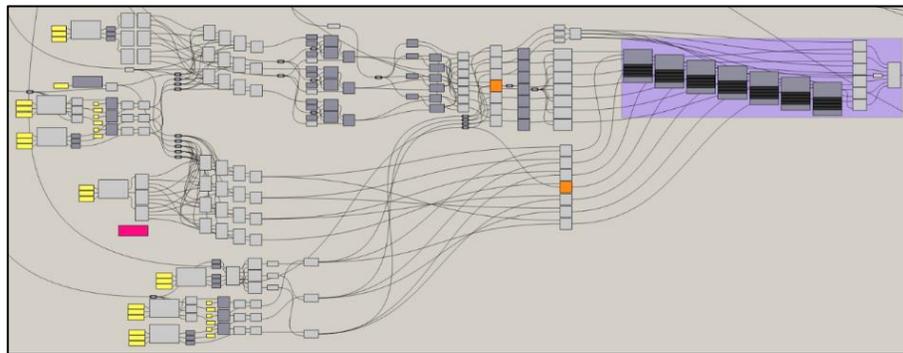


Figura 72. Fragmento de código de Grasshopper para generación de vigas.

Los valores parametrizables en la asignación de vigas a cada vano, cuyos valores pueden ser ingresados desde Excel, son:

- Largo de viga por tramo.
- Secciones de área y longitudes para tres tipos distintos de viga.
- Asignación de vigas a cada vano utilizando índices de cada viga.

3.2.5. CARGAS

Las cargas agregadas a la superestructura del puente corresponden a las cargas de peso propio, cargas de pavimento, barandas y barreras. Las cargas de peso propio se aplican en los elementos “sin peso”, los cuales en la superestructura corresponden al pilote enterrado y a la fundación (si es que existe). La carga de pavimento se agrega como carga superficial a lo largo de todo el tablero y las cargas de barreras y barandas se aplican de manera lineal en la división de pasillo-calzada y extremos de la losa respectivamente. En la figura 73 se muestra la tabla que se utiliza para ingresar el valor de las cargas a Grasshopper.

| Cargas | Valor [Ton , m] | Valor [kN , m] |
|-----------------|-----------------|----------------|
| Carga Pavimento | | |
| Carga Barandas | | |
| Carga Barreras | | |

Figura 73. Tabla de Excel para ingresar cargas al modelo de superestructura.

3.2.6. CASOS, COMBINACIONES Y RESULTADOS DE CARGA

Los nombres de casos de carga para el modelo de superestructura, al igual que el modelo estribo, no se ingresan paramétricamente, ya que son agregados directamente desde Grasshopper hacia RFem. Estos casos de carga ingresados a RFem son:

1. **Peso Propio:** Carga calculada como peso específico * sección de área de pilote o zapata.
2. **Pavimento:** Valor de carga parametrizable.
3. **Barandas:** Valor de carga parametrizable.
4. **Barreras:** Valor de carga parametrizable.

A diferencia de los casos de carga, las combinaciones y resultados de carga si pueden ser modificadas por el usuario siguiendo alguna norma sugerida por el ingeniero. En la figura 74a y 74b se muestran las tablas para ingresar los casos y resultados de carga al modelo con resultados de ejemplo siguiendo la norma AASHTO Std 2002, en donde los resultados de carga 2 y 3 (CR2 y CR3) corresponden al resultado de sismo longitudinal y transversal.

| Casos de Carga (CC) | |
|---------------------|-----------|
| Indice | Nombre |
| 1 | PP |
| 2 | Pavimento |
| 3 | Barandas |
| 4 | Barreras |

| Norma AASHTO Standard 2002 | | |
|----------------------------|--------------------------|---|
| Indice | Nombre | Resultados de carga |
| 1 | 1.35*PP+1.35*Pav | 1.35*CC1+1.35*CC2 |
| 4 | Rotura_1_max | 1.3*CC1+1.3*CC2+1.3*CC3+1.3*CC4+0.43*CR2+0.1*CR3 |
| 5 | Rotura_2_min | 0.98*CC1+0.98*CC2+0.98*CC3+0.98*CC4+0.43*CR2+0.1*CR3 |
| 6 | Rotura_3_max | 1.3*CC1+1.3*CC2+1.3*CC3+1.3*CC4+0.13*CR2+0.33*CR3 |
| 7 | Rotura_4_min | 0.98*CC1+0.98*CC2+0.98*CC3+0.98*CC4+0.13*CR2+0.33*CR3 |
| 8 | Pilotes_1_max | 1.3*CC1+1.3*CC2+1.3*CC3+1.3*CC4+1.3*CR2+0.39*CR3 |
| 9 | Pilotes_2_min | 0.98*CC1+0.98*CC2+0.98*CC3+0.98*CC4+1.3*CR2+0.39*CR3 |
| 10 | Pilotes_3_max | 1.3*CC1+1.3*CC2+1.3*CC3+1.3*CC4+0.39*CR2+1.3*CR3 |
| 11 | Pilotes_4_min | 0.98*CC1+0.98*CC2+0.98*CC3+0.98*CC4+0.39*CR2+1.3*CR3 |
| 12 | PP+EqX+0.3EqY | CC1+CO1+CR2+0.3*CR3 |
| 13 | PP+0.3EqX+EqY | CC1+CO1+0.3*CR2+CR3 |
| 14 | 1.25*DC+1.5*DW | 1.25*CC1+1.5*CO1 |
| 15 | Pilotes_1_max_nomayorado | CC1+CC2+CC3+CC4+CR2+0.3*CR3 |
| 16 | Pilotes_2_min_nomayorado | 0.75*CC1+0.75*CC2+0.75*CC3+0.75*CC4+CR2+0.3*CR3 |
| 17 | Pilotes_3_max_nomayorado | CC1+CC2+CC3+CC4+0.3*CR2+CR3 |
| 18 | Pilotes_4_min_nomayorado | 0.75*CC1+0.75*CC2+CC3+0.75*CC4+0.3*CR2+CR3 |
| 19 | | |
| 20 | | |
| 21 | | |
| 22 | | |
| 23 | | |
| 24 | | |

Figura 74 a) y b). Tabla de Excel para ingresar casos y resultados de carga al modelo.

En la figura 75 se muestra un fragmento del código de Grasshopper con los componentes de exportación de casos, combinaciones y resultados de carga al modelo RFem.

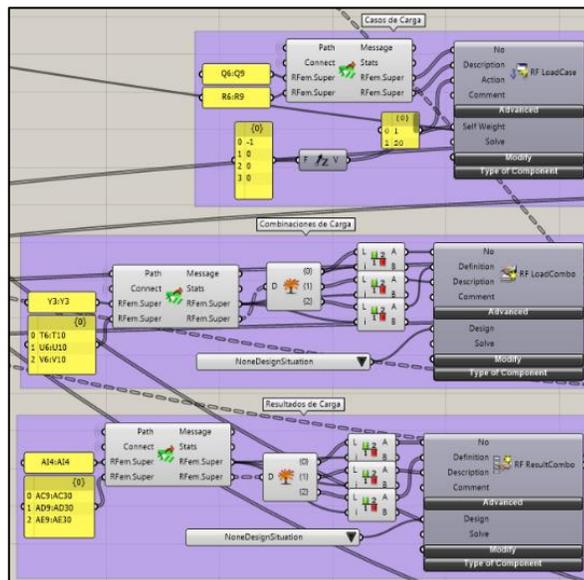


Figura 75. Fragmento del código Grasshopper para exportar casos, combinaciones y resultados de carga a RFem.

3.2.7. EXPORTACIÓN A RFEM

Incluyendo todo lo anterior, el código de superestructura está listo para exportarse al programa RFem. Al igual que en el código de estribo, se utiliza el componente “Set Data” incluido en el Toolbox. Con la ayuda de un componente botón, se exportan todos los datos al archivo RFem con el nombre indicado en el panel. El componente Set Data se muestra en la figura 76.

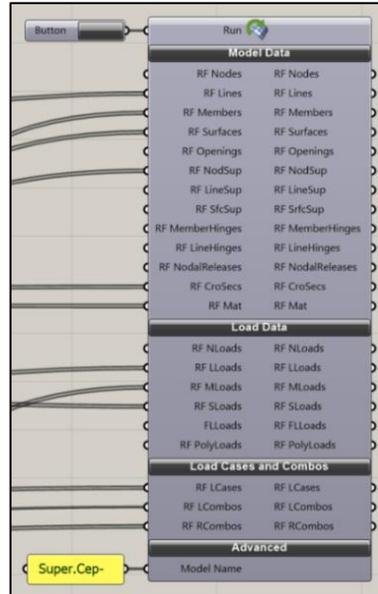


Figura 76. Componente Set Data en modelo superestructura Grasshopper.

Para exportar el modelo se debe tener abierto el modelo en RFem con el nombre indicado en el panel del componente en Grasshopper. Para el modelo de superestructura se crearon 2 posibles exportaciones a modelos diferentes, cada uno con su propio componente “Set Data”, con pequeñas diferencias. Los modelos creados son:

1. **Modelo General Sísmico +Y:** Modelo general de la superestructura y cepas aplicando efecto grupo en el sentido X positivo e Y positivo en resortes de pilotes.
2. **Modelo General Sísmico -Y:** Modelo general de la superestructura y cepas aplicando efecto grupo en el sentido X positivo e Y negativo en resortes de pilotes.

En la figura 77 se muestran los botones que activan la exportación de cada modelo a RFem. Estos se ubican en la esquina superior izquierda del código Grasshopper. En la figura 78 y 79 se muestra una vista general del código Grasshopper de superestructura cuando se elige una cepa pila/pilote o columna/dado/pilote respectivamente. Algunos componentes cambian a color naranja cuando no se utilizan.

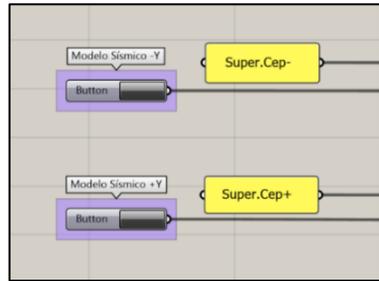


Figura 77. Botones para exportación a RFem.

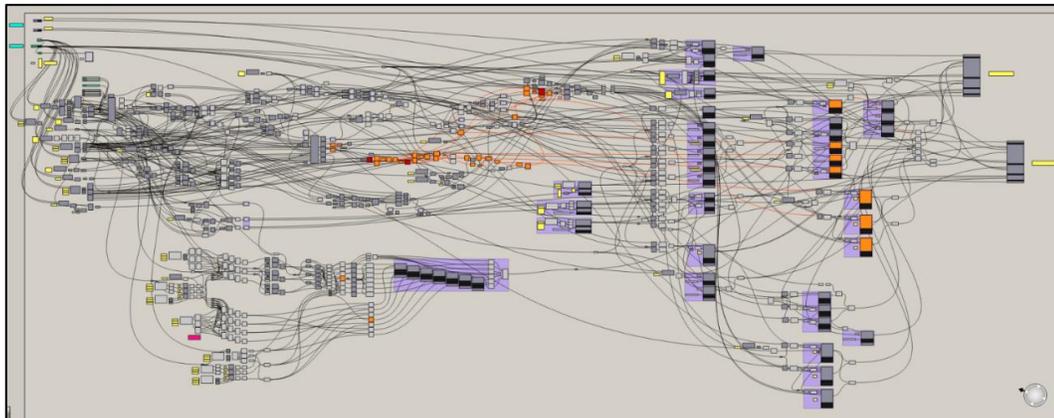


Figura 78. Vista general de código Grasshopper superestructura con cepas pila/pilote.

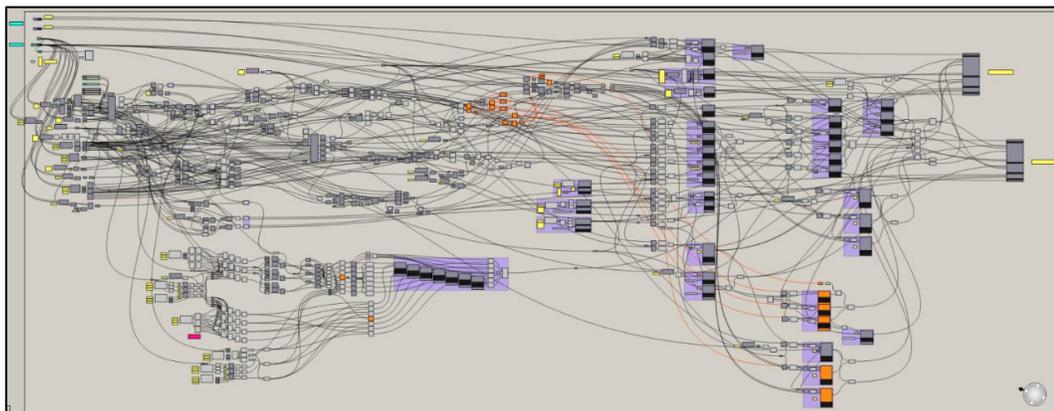


Figura 79. Vista general de código Grasshopper superestructura con cepas columna/dado/pilote.

A continuación, se presentan imágenes de modelos estándar de superestructura usando los dos tipos de cepas en Grasshopper y RFem. Este puente mostrado tiene 4 vigas longitudinales de acero, con cambios de sección en cada vano y cepas con 4 y 10 pilotes dependiendo del tipo de cepa.

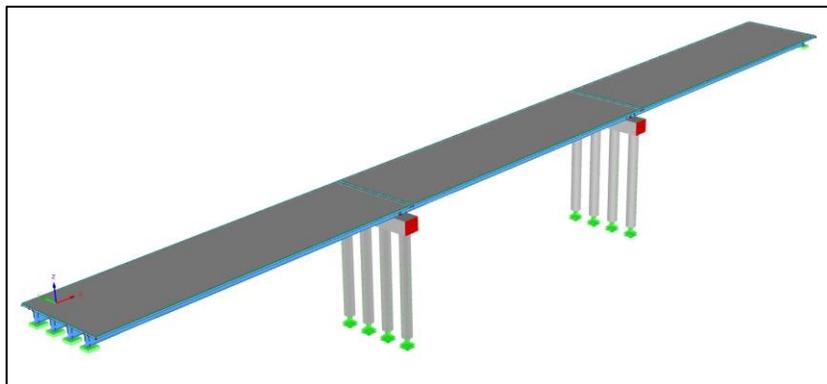
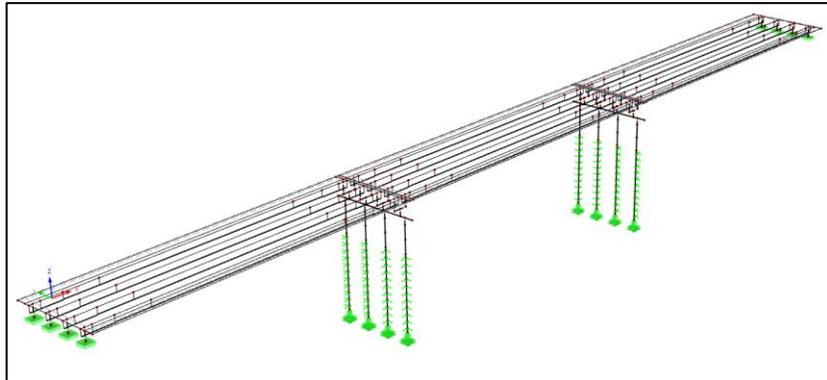
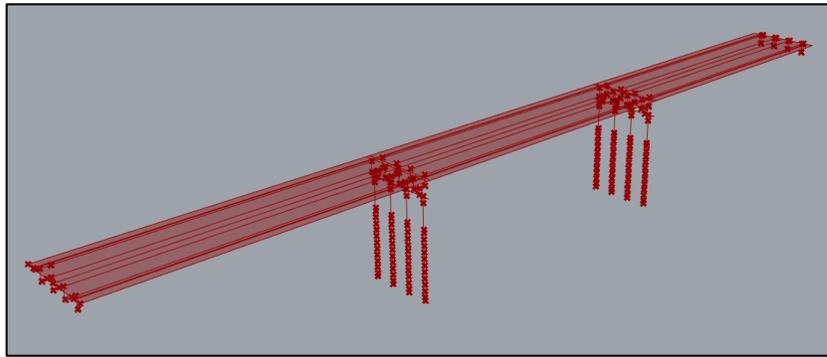


Figura 80 a), b) y c). Modelo de superestructura en GH, RFem lineal y RFem extruído para cepa pila/pilote.

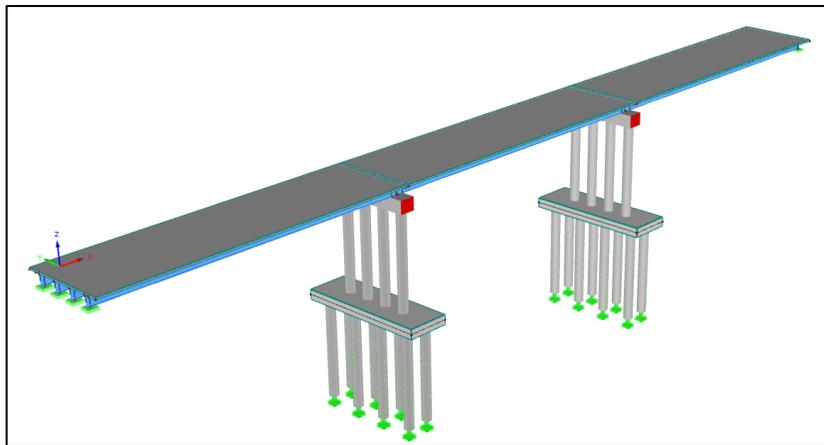
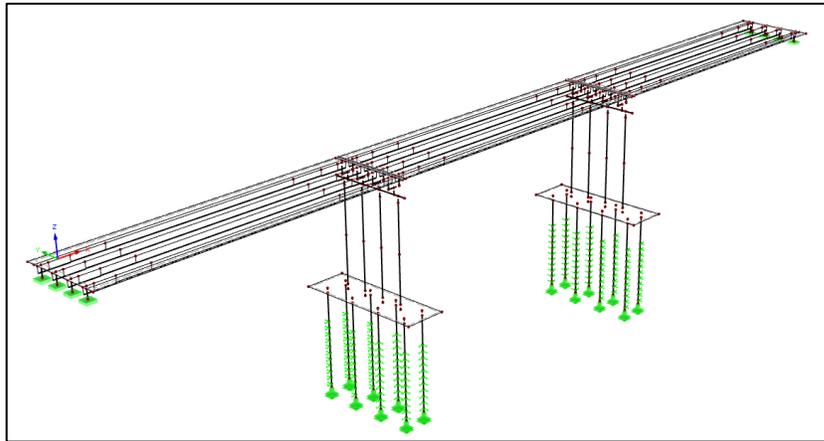
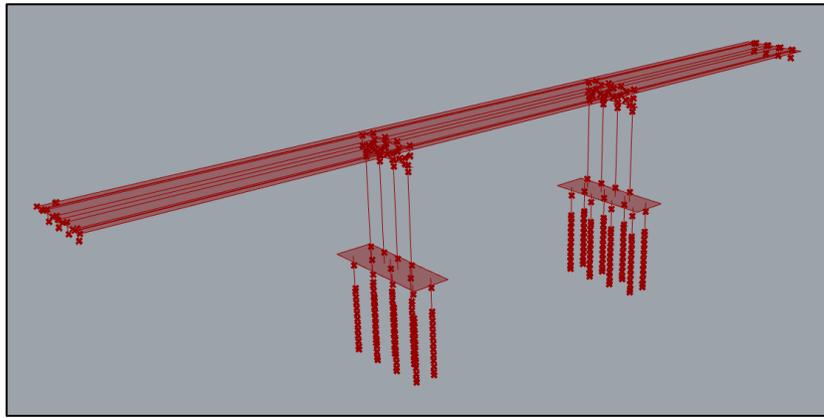


Figura 81 a), b) y c). Modelo de superestructura en GH, RFem lineal y RFem extruído para cepa columna/dado/pilote.

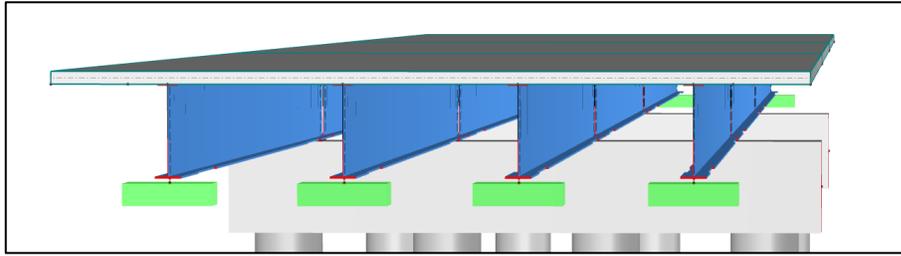


Figura 82. Modelo RFem extruído con acercamiento a las vigas de acero con cambios de sección.

A continuación, se presentan algunas imágenes de algunas fuerzas paramétricas agregadas al modelo de superestructura y cepas.

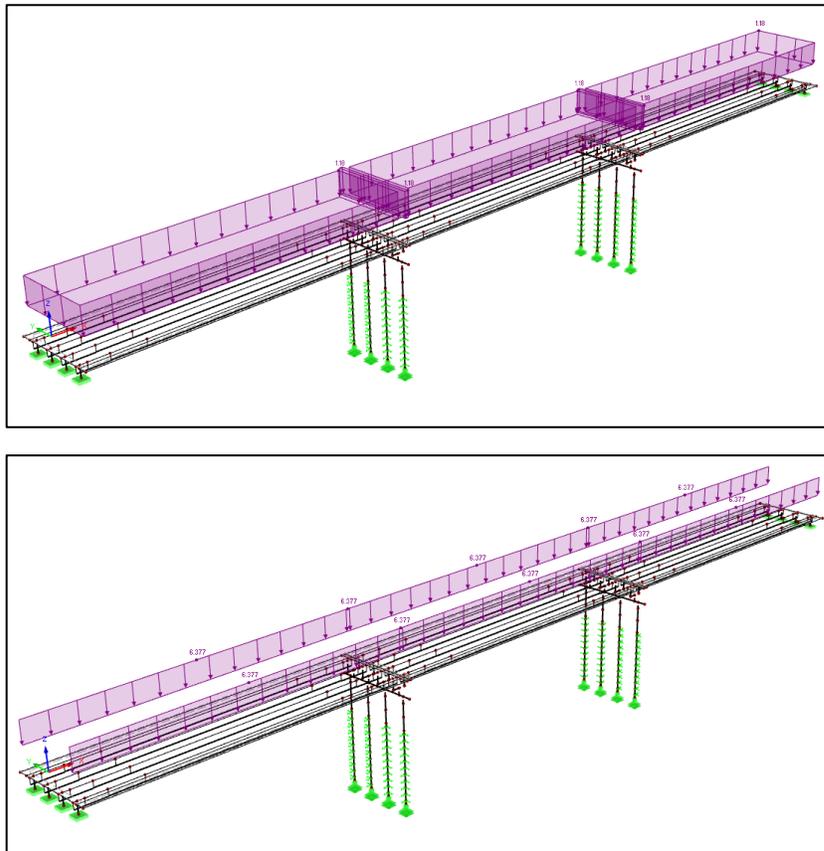


Figura 83 a) y b). Ejemplos de cargas aplicadas en RFem, correspondientes a peso de pavimento y carga de barreras viales.

Antes del cálculo, se deben realizar tres pasos de manera directa en RFem, ya que el Toolbox de Grasshopper aún no desarrolla todas las opciones que se necesitan para la exportación total del modelo. Estos pasos son:

- Rellenar manualmente los valores constantes en las placas de apoyo, modeladas como vigas de rigidez definible, en estribos y cepas. Estas constantes corresponden a rigidez a torsión, flexión, axial y cortante.
- Incluir manualmente el espectro sísmico correspondiente al proyecto.
- Incluir manualmente una fuerza de peso propio de barrera en el eje del tablero si es que existe.
- Aplicar manualmente la excentricidad de vigas para que queden ubicadas debajo del tablero, como se muestra en la figura 84.

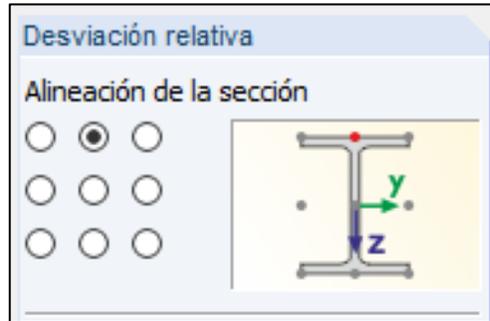


Figura 84. Alineación de vigas en RFem.

3.2.8. EJEMPLOS DE EXPORTACIÓN DE MODELOS GENERALES

A continuación, se presentan 3 tipos de modelos de superestructura y cepas exportados desde Grasshopper para proyectos de puentes actualmente en revisión. Estos modelos corresponden a los puentes Quepe y Pocoyán y al paso superior El Cobre. Una descripción más detallada de los proyectos se expone en el Anexo B.

➤ Modelo Puente Quepe

El modelo general del puente Quepe, ubicado en la provincia de Cautín, posee 5 vigas pretensadas, 2 pistas y 2 pasillos, 4 tramos y 3 cepas de tipo pila/pilote. Además, posee un esviaje de 14°. Las imágenes de Grasshopper y RFem se muestran a continuación.

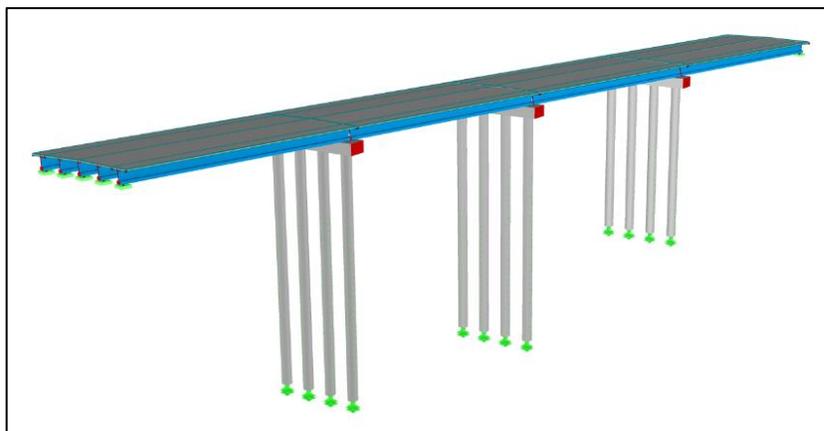
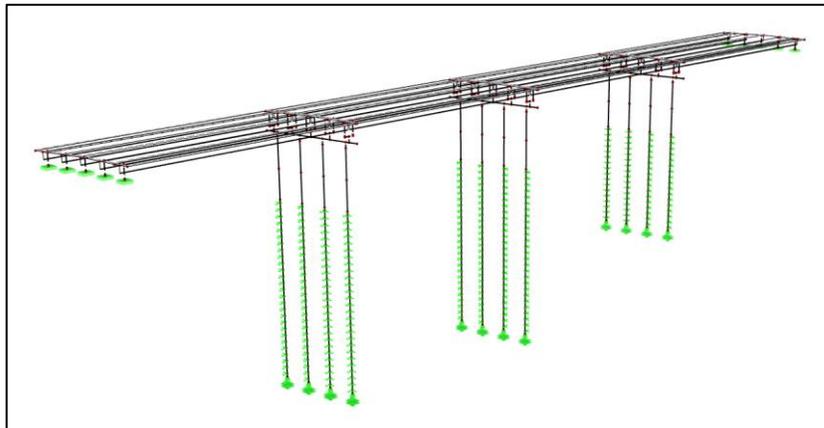
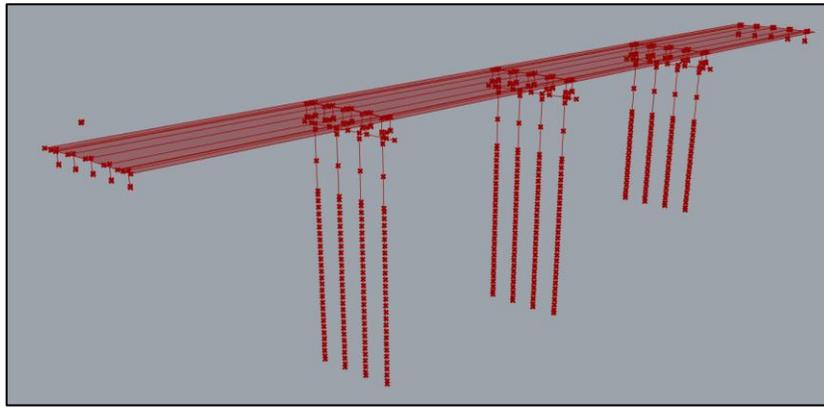


Figura 85 a), b) y c). Modelo general del puente Quepe en GH, RFem lineal y RFem extruído.

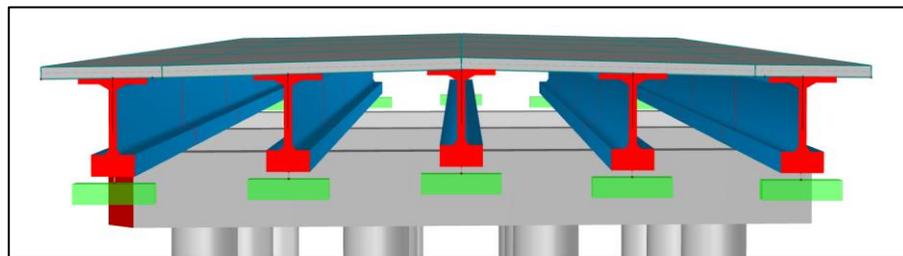


Figura 86 a), b) y c). Vigas del puente Quepe en modelo RFem extruído.

➤ Modelo Puente Pocoyán

El modelo general del puente Pocoyán, ubicado en la provincia de Cautín, posee 5 vigas de acero, 2 pistas, 1 pasillos y 1 ciclovía, 7 tramos y 6 cepas de tipo columna/dado/pilote. Además, posee una pendiente longitudinal de 4,6%. Las imágenes de Grasshopper y RFem se muestran a continuación.

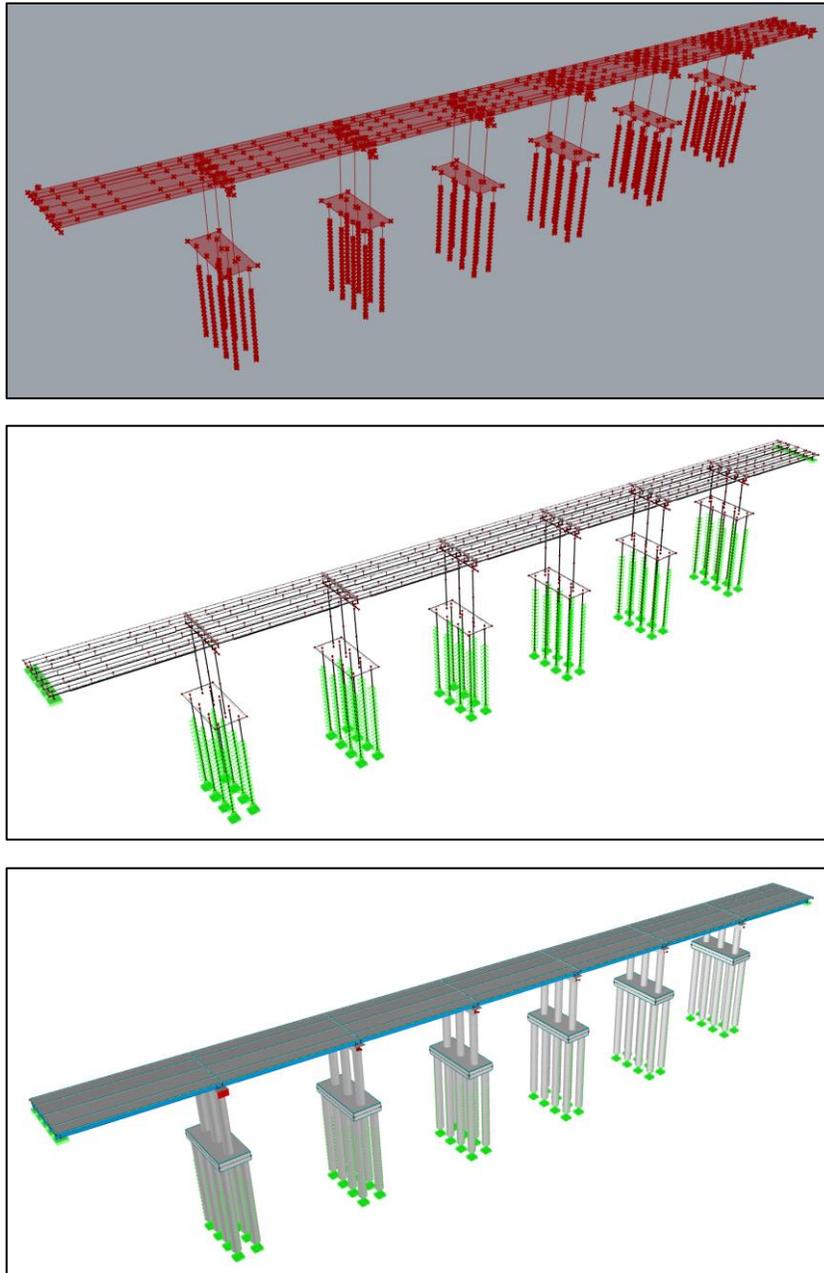


Figura 87 a), b) y c). Modelo general del puente Pocoyán en GH, RFem lineal y RFem extruído.

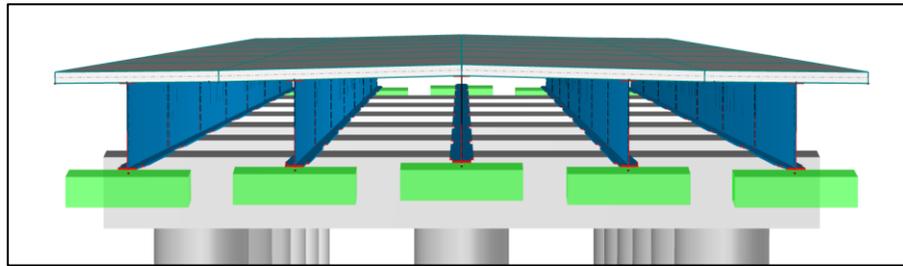


Figura 88 a), b) y c). Vigas del puente Pocoyán en modelo RFem extruído.

➤ **Modelo Paso Superior El Cobre**

El modelo general del paso superior El Cobre, ubicado en la provincia de Cachapoal, posee 10 vigas pretensadas, 6 pistas, 2 tramos y 1 cepa de tipo pila/pilote con dado de amarre. Además, posee un esviaje de 6°. Las imágenes de Grasshopper y RFem se muestran a continuación.

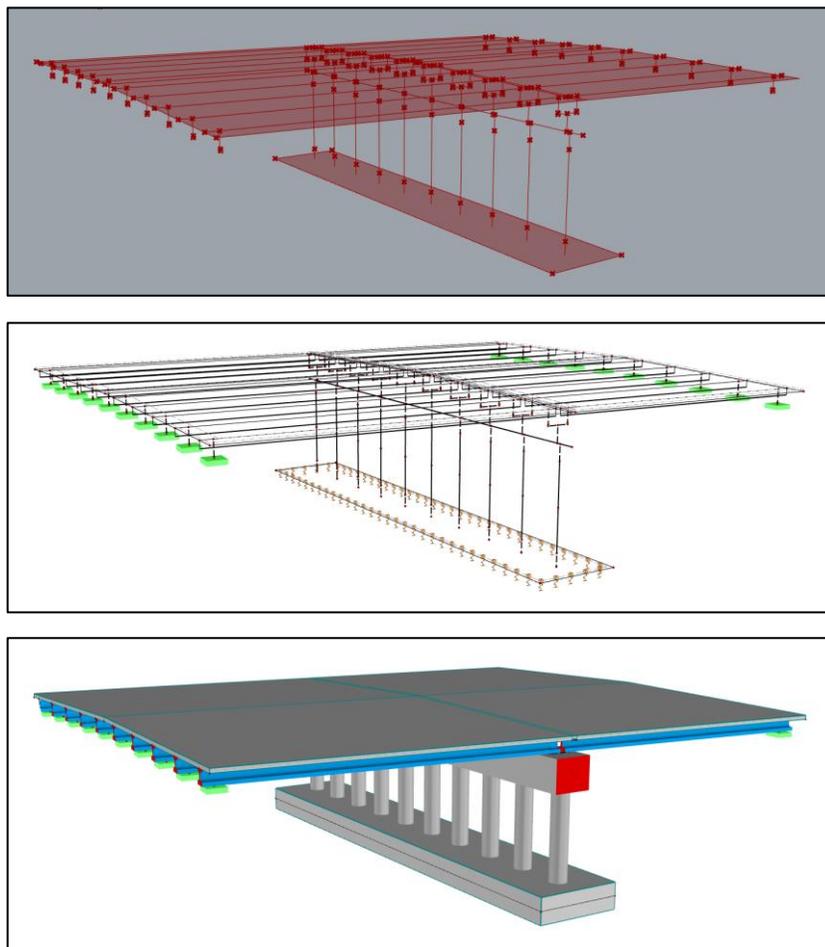


Figura 89 a), b) y c). Modelo general del paso superior El Cobre en GH, RFem lineal y RFem extruído.

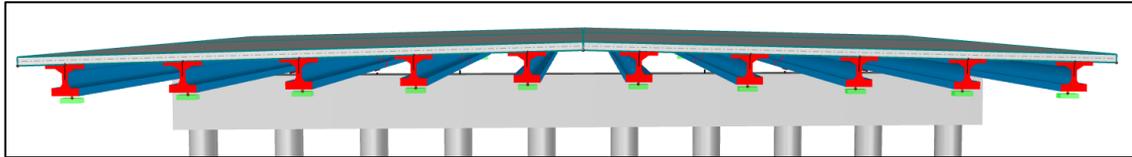


Figura 90 a), b) y c). Vigas del paso superior El Cobre en modelo RFem extruído.

4. COMPARACIÓN RESULTADOS RFEM/SAP2000

4.1. MODELO ESTRIBO

4.1.1. RESUMEN

Para comparar resultados entre los programas RFem y SAP, se procede a modelar y calcular el mismo estribo en ambos programas y luego analizar deformaciones, esfuerzos y momentos resultantes. Para este trabajo se utiliza el modelo del estribo sur del nuevo puente Cancura ubicado en la provincia de Osorno.

El modelo de RFem fue exportado desde Grasshopper (con datos provenientes de Excel) siguiendo la metodología de interoperabilidad explicada anteriormente, y el modelo de SAP fue copiado desde RFem. En las figuras 91a y 91b se muestra la vista general del estribo en ambos programas.

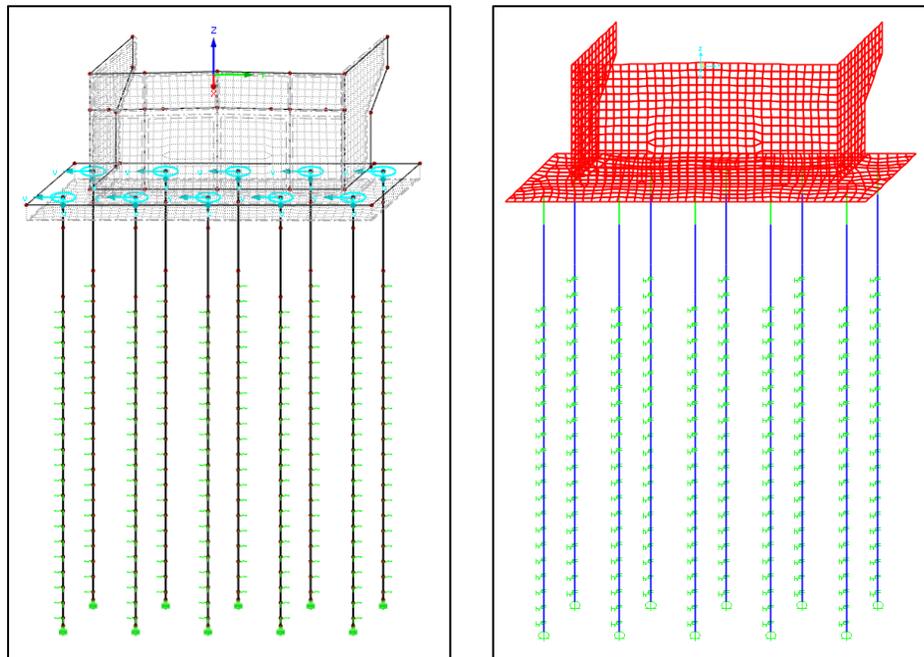


Figura 91 a) y b). Modelos del estribo sur del puente Cancura en RFem y SAP2000.

Los casos y combinaciones de carga utilizados en los siguientes capítulos para la comparación de resultados son:

- Casos de Carga
 - PP Relleno: Carga por peso propio de suelo de relleno
 - Super Sismo Y: Esfuerzo de sismo en eje transversal aplicado en apoyos de viga. Proveniente de la superestructura.
 - Empuje Estático Activo: Empuje en el estribo provocado por el suelo de relleno. Calculado con el método de Mononobe-Okabe.
 - Empuje Sísmico X: Empuje sísmico en el eje longitudinal del estribo provocado por el suelo de relleno.
- Combinaciones de Carga
 - Estático: Combinación de cargas estáticas con factor 1
 - Estático Rotura: Combinación mayorada de cargas estáticas
 - $0.3*X+Y$ sin mayorar: Combinación sísmica sin mayorar según manual de carreteras [23]. 30% sismo en eje X y 100% sismo en eje Y.
 - Rotura $0.3*X+Y$ Max: Combinación sísmica mayorada según manual de carreteras [23]. 30% sismo en eje X y 100% sismo en eje Y.
 - Rotura $X+0.3*Y$ Max: Combinación sísmica mayorada según manual de carreteras [23]. 100% sismo en eje X y 30% sismo en eje Y.

4.1.2. MOMENTO Y CARGA AXIAL EN PILOTES

En este capítulo se comparan los momentos y la carga axial en pilotes del estribo para los modelos en RFem y SAP. En la figura 92a y 92b se muestran los diagramas de los momentos obtenidos desde el caso de carga “Empuje Estático Activo” en los dos programas de cálculo.

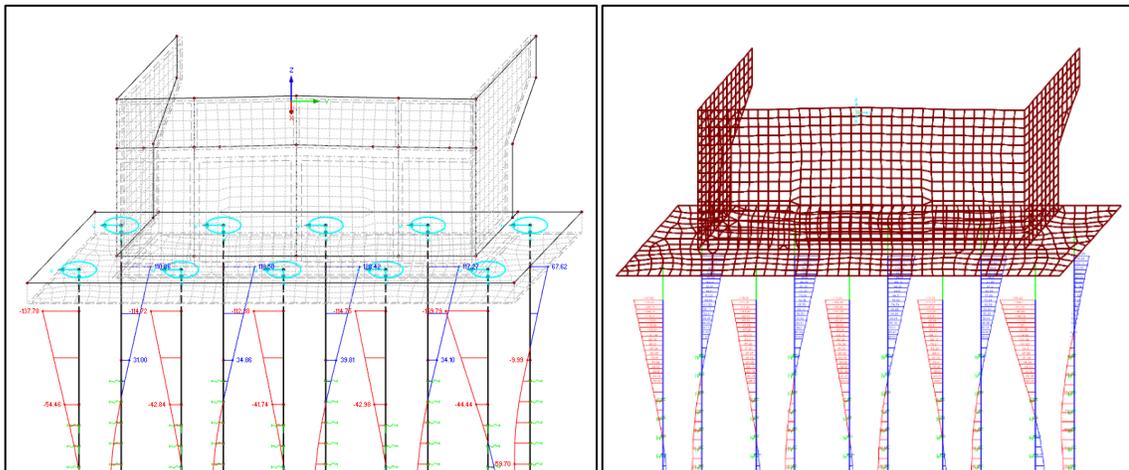


Figura 92 a) y b). Momentos de pilotes en RFem y SAP2000 para caso de carga “Empuje Estático Activo”.

A continuación, se presentan las tablas comparativas de momentos y carga axial en la parte superior del pilote para los casos de carga “Peso Propio Relleno”, “Sismo en el eje Y proveniente

de superestructura”, “Empuje Estático Activo” y “Empuje Sísmico en el eje X”; y las combinaciones “Estático Rotura” y “Rotura 0.3*X+Y Max”. Para la carga axial, momento en eje Y (M33) y momento en eje X (M22) se exponen los valores obtenidos en ambos programas de cálculo junto con el porcentaje de diferencia entre ellos. Los porcentajes obtenidos en su mayoría se ubican entre 0% y 4%, aunque existen algunas excepciones en donde el porcentaje de diferencia es mayor.

Tabla 1. Momentos y carga axial para caso “PP Relleno”.

| [kN*m] | N | | | M33 | | | M22 | | |
|-----------|----------|----------|------|---------|---------|-------|---------|---------|------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Pilote 1 | -238,91 | -243 | 1,71 | -49,43 | -54,51 | 10,28 | -73,73 | -77,92 | 5,68 |
| Pilote 2 | -449,65 | -448,23 | 0,32 | -90,07 | -90,22 | 0,17 | -33,92 | -33,7 | 0,65 |
| Pilote 3 | -505,55 | -503,3 | 0,45 | -117,15 | -115,35 | 1,54 | -10,82 | -11,22 | 3,7 |
| Pilote 4 | -502,95 | -500,44 | 0,5 | -99,57 | -98,37 | 1,21 | 10,4 | 9,4 | 9,62 |
| Pilote 5 | -346,23 | -351,4 | 1,49 | -49,89 | -56,34 | 12,93 | 85,06 | 90,25 | 6,1 |
| Pilote 6 | -1247,74 | -1258,5 | 0,86 | -43,55 | -49,19 | 12,95 | -105,61 | -104,25 | 1,29 |
| Pilote 7 | -1611,54 | -1605,33 | 0,39 | -97,83 | -97,34 | 0,5 | -62,71 | -61,18 | 2,44 |
| Pilote 8 | -1721,32 | -1709,42 | 0,69 | -115,88 | -114,87 | 0,87 | -12,26 | -11,92 | 2,77 |
| Pilote 9 | -1613,55 | -1606,76 | 0,42 | -94,51 | -95,64 | 1,2 | 47,88 | 45,98 | 3,97 |
| Pilote 10 | -1152,71 | -1163,81 | 0,96 | -54,44 | -56,68 | 4,11 | 148,41 | 146,29 | 1,43 |

Tabla 2. Momentos y carga axial para caso “Super Sismo Y”.

| [kN*m] | N | | | M33 | | | M22 | | |
|-----------|---------|---------|------|---------|---------|------|---------|---------|------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Pilote 1 | 524,01 | 529,9 | 1,12 | -167,8 | -173,8 | 3,58 | 890,83 | 902,75 | 1,34 |
| Pilote 2 | 250,71 | 255,44 | 1,89 | -100,95 | -100,82 | 0,13 | 916,64 | 924,54 | 0,86 |
| Pilote 3 | 7,61 | 8,18 | 7,49 | -13,97 | -13,8 | 1,22 | 919,99 | 927,81 | 0,85 |
| Pilote 4 | -232,37 | -236,2 | 1,65 | 80,15 | 80,97 | 1,02 | 917,33 | 924,51 | 0,78 |
| Pilote 5 | -527,13 | -533,71 | 1,25 | 171,99 | 177,89 | 3,43 | 1207,98 | 1231,78 | 1,97 |
| Pilote 6 | 420,58 | 418,3 | 0,54 | -117,61 | -118,77 | 0,99 | 841,75 | 850,65 | 1,06 |
| Pilote 7 | 171,53 | 172,17 | 0,37 | -57,4 | -57,16 | 0,42 | 875,81 | 884,78 | 1,02 |
| Pilote 8 | 15,39 | 14,99 | 2,60 | 23,47 | 24,7 | 5,24 | 884,56 | 893,13 | 0,97 |
| Pilote 9 | -148,59 | -149,16 | 0,38 | 106,11 | 106,63 | 0,49 | 867,44 | 876,09 | 1,00 |
| Pilote 10 | -481,74 | -479,9 | 0,38 | 170,08 | 171,43 | 0,79 | 1104,4 | 1127,7 | 2,11 |

Tabla 3. Momentos y carga axial para caso “Empuje Estático Activo”.

| [kN*m] | N | | | M33 | | | M22 | | |
|-----------|----------|----------|------|----------|----------|------|---------|---------|------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Pilote 1 | -700,65 | -722,99 | 3,19 | -834,43 | -842,98 | 1,02 | -137,78 | -137,89 | 0,08 |
| Pilote 2 | -918,08 | -934,52 | 1,79 | -1088,8 | -1107,9 | 1,76 | -114,72 | -115,31 | 0,51 |
| Pilote 3 | -1077,89 | -1084,98 | 0,66 | -1331,5 | -1359,6 | 2,11 | -112,38 | -113,23 | 0,76 |
| Pilote 4 | -1246,53 | -1242,41 | 0,33 | -1576,4 | -1610,2 | 2,14 | -114,75 | -115,72 | 0,85 |
| Pilote 5 | -1426,29 | -1418,04 | 0,58 | -1845,5 | -1881,1 | 1,93 | -159,79 | -166,22 | 4,02 |
| Pilote 6 | 1142,73 | 1170,35 | 2,42 | -644,81 | -639,94 | 0,76 | 110,86 | 109,49 | 1,24 |
| Pilote 7 | 1097,86 | 1113,15 | 1,39 | -818,73 | -820,54 | 0,22 | 118,58 | 118,45 | 0,11 |
| Pilote 8 | 1093,99 | 1098,93 | 0,45 | -985,16 | -990,82 | 0,57 | 128,42 | 128,5 | 0,06 |
| Pilote 9 | 1105,61 | 1100,09 | 0,5 | -1140,9 | -1150,6 | 0,85 | 117,27 | 119,76 | 2,12 |
| Pilote 10 | 929,23 | 920,41 | 0,95 | -1311,81 | -1322,13 | 0,79 | 67,62 | 70,85 | 4,78 |

Tabla 4. Momentos y carga axial para caso “Empuje Sísmico X”.

| [kN*m] | N | | | M33 | | | M22 | | |
|-----------|---------|---------|------|---------|---------|------|--------|--------|-------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Pilote 1 | -444,04 | -446,81 | 0,62 | -659,5 | -668,75 | 1,4 | -27,32 | -28,15 | 3,04 |
| Pilote 2 | -574,06 | -575,43 | 0,24 | -647,93 | -661,58 | 2,11 | -2,29 | -3,78 | 65,07 |
| Pilote 3 | -630,23 | -632,4 | 0,34 | -638,3 | -653,67 | 2,41 | 4,21 | 3,39 | 19,48 |
| Pilote 4 | -678,16 | -682,49 | 0,64 | -634,68 | -648,56 | 2,19 | 6,11 | 5,98 | 2,13 |
| Pilote 5 | -712,59 | -719,5 | 0,97 | -637,77 | -646,65 | 1,39 | 11,24 | 11,89 | 5,78 |
| Pilote 6 | 739,96 | 743,93 | 0,54 | -447,5 | -447,88 | 0,08 | -11,7 | -11,48 | 1,88 |
| Pilote 7 | 656,45 | 658,63 | 0,33 | -443,55 | -445,84 | 0,52 | -6,75 | -7,05 | 4,44 |
| Pilote 8 | 599,42 | 601,22 | 0,30 | -437,93 | -440,47 | 0,58 | -2,65 | -2,9 | 9,43 |
| Pilote 9 | 553,89 | 558 | 0,74 | -424,95 | -426,71 | 0,41 | -1,98 | -1,09 | 44,95 |
| Pilote 10 | 489,355 | 494,85 | 1,12 | -410,28 | -410,55 | 0,07 | -22,1 | -22,51 | 1,86 |

Tabla 5. Momentos y carga axial para combinación “Estático Rotura”.

| [kN*m] | N | | | M33 | | | M22 | | |
|-----------|----------|----------|------|----------|---------|------|---------|---------|------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Pilote 1 | -3758,31 | -3823,77 | 1,74 | -1152,6 | -1158,2 | 0,49 | -483,52 | -494,79 | 2,33 |
| Pilote 2 | -4944,04 | -4953,29 | 0,19 | -1512,8 | -1542,4 | 1,96 | -259,59 | -253,06 | 2,52 |
| Pilote 3 | -5322,75 | -5305,52 | 0,32 | -1865,2 | -1906,1 | 2,19 | -167,33 | -168,91 | 0,94 |
| Pilote 4 | -5506,87 | -5480,3 | 0,48 | -2154,7 | -2203,3 | 2,26 | -105,38 | -111,18 | 5,5 |
| Pilote 5 | -5226,75 | -5238,48 | 0,22 | -2453,7 | -2504,6 | 2,07 | 45,51 | 49,46 | 8,68 |
| Pilote 6 | -2238,26 | -2218,37 | 0,89 | -780,11 | -775,07 | 0,65 | -117,93 | -117,06 | 0,74 |
| Pilote 7 | -3033,25 | -2998,34 | 1,15 | -1070,6 | -1072,6 | 0,19 | 54,46 | 57,34 | 5,29 |
| Pilote 8 | -3182,86 | -3153,2 | 0,93 | -1303,6 | -1310,9 | 0,56 | 158,38 | 159,48 | 0,69 |
| Pilote 9 | -2956,29 | -2951,03 | 0,18 | -1491,3 | -1505,5 | 0,95 | 252,62 | 249,65 | 1,18 |
| Pilote 10 | -2236,52 | -2280,75 | 1,98 | -1692,48 | -1698,5 | 0,36 | 436,24 | 434,76 | 0,34 |

Tabla 6. Momentos y carga axial para combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”.

| [kN*m] | N | | | M33 | | | M22 | | |
|-----------|----------|----------|-------|----------|----------|------|---------|---------|------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Pilote 1 | -2726,39 | -2802,66 | 2,8 | -2788,2 | -2822,9 | 1,24 | 2711,09 | 2743,39 | 1,19 |
| Pilote 2 | -5007,54 | -5030,48 | 0,46 | -3379,2 | -3436,5 | 1,69 | 3061,29 | 3097,78 | 1,19 |
| Pilote 3 | -6313,54 | -6813,29 | 7,92 | -3896,5 | -3978,9 | 2,11 | 3155,6 | 3185,86 | 0,96 |
| Pilote 4 | -7491,23 | -7473,46 | 0,24 | -4343,6 | -4440,8 | 2,24 | 3179,28 | 3201,94 | 0,71 |
| Pilote 5 | -8617,81 | -8632,22 | 0,17 | -4835,6 | -4922,1 | 1,79 | 4358,69 | 4436,72 | 1,79 |
| Pilote 6 | 1727,71 | 1790,02 | 3,61 | -2008,6 | -1999,5 | 0,46 | 3346,9 | 3380,66 | 1,01 |
| Pilote 7 | 145,56 | 208,21 | 43,04 | -2431,5 | -2432 | 0,02 | 3634,81 | 3669,69 | 0,96 |
| Pilote 8 | -467,94 | -434,57 | 7,13 | -2710,5 | -2719,2 | 0,32 | 3773,88 | 3805,72 | 0,84 |
| Pilote 9 | -763,43 | -776,12 | 1,66 | -2914,8 | -2941,1 | 0,9 | 3762,98 | 3796,52 | 0,89 |
| Pilote 10 | -1767,99 | -1811,15 | 2,44 | -3222,52 | -3245,81 | 0,72 | 4759,81 | 4861,78 | 2,14 |

4.1.3. DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN PARA PILOTES

Usando los valores de momentos y carga axial obtenidos en el capítulo anterior, se pueden construir los diagramas de interacción admisibles para cada combinación de carga.

En este capítulo se comparan los diagramas obtenidos para la combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”. Para la creación de diagramas se supone una armadura con 30 barras longitudinales equidistantes de diámetro 32 [mm], la cual es admisible de manera precisa en ambos modelos.

En la figura 93 se muestra la armadura utilizada en los pilotes y en las figuras 94 y 95 se muestran los gráficos de interacción para SAP y RFem.

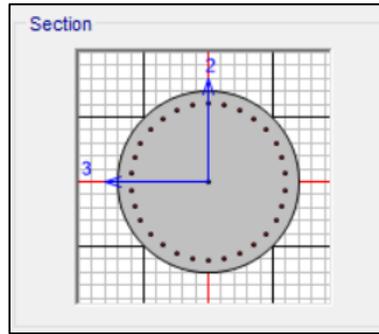


Figura 93. Diagrama de armadura en pilotes de estribo.

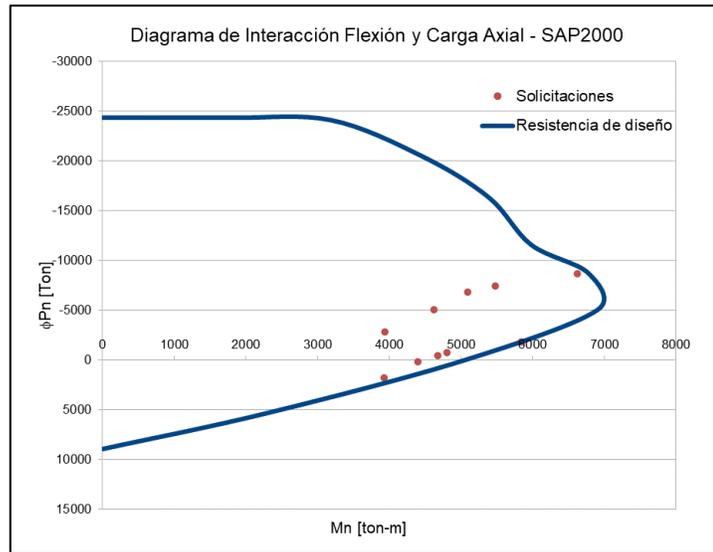


Figura 94. Diagrama de interacción de SAP2000 para combinación "Rotura $0.3*X+Y$ Max".

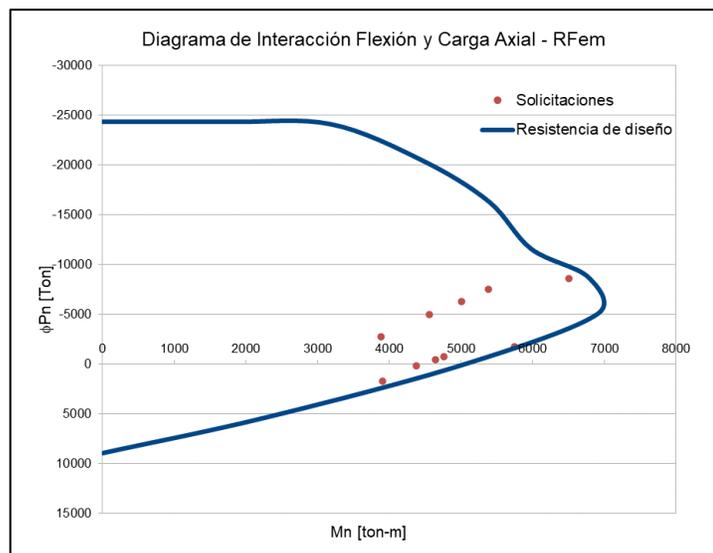


Figura 95. Diagrama de interacción de RFem para combinación "Rotura $0.3*X+Y$ Max".

4.1.4. REACCIONES EN APOYOS

A continuación, se presentan las tablas comparativas de reacciones de punta en el sello de fundación de los pilotes para los casos de carga “PP Relleno”, “Super Sismo Y”, “Empuje Estático Activo” y “Empuje Sísmico X”; y las combinaciones “Estático” y “0.3*X+Y sin mayorar”. Al igual que las tablas anteriores se exponen los valores obtenidos en RFem y SAP2000 junto con el porcentaje de diferencia. En este caso muy pocos casos sobrepasan el 3% de diferencia.

Tabla 7. Reacciones para caso “PP Relleno”.

| [kN] | RFEM | SAP | % |
|-----------|---------|---------|------|
| Pilote 1 | 238,91 | 243 | 1,71 |
| Pilote 2 | 449,65 | 448,23 | 0,32 |
| Pilote 3 | 505,55 | 503,3 | 0,45 |
| Pilote 4 | 502,95 | 500,44 | 0,50 |
| Pilote 5 | 346,23 | 351,4 | 1,49 |
| Pilote 6 | 1247,74 | 1258,5 | 0,86 |
| Pilote 7 | 1611,54 | 1605,33 | 0,39 |
| Pilote 8 | 1721,32 | 1709,42 | 0,69 |
| Pilote 9 | 1613,55 | 1606,76 | 0,42 |
| Pilote 10 | 1152,71 | 1163,81 | 0,96 |

Tabla 8. Reacciones para caso “Super Sismo Y”.

| [kN] | RFEM | SAP | % |
|-----------|---------|---------|-------|
| Pilote 1 | -524,01 | -529,9 | 1,12 |
| Pilote 2 | -250,71 | -255,44 | 1,89 |
| Pilote 3 | -7,16 | -8,18 | 14,25 |
| Pilote 4 | 232,37 | 236,2 | 1,65 |
| Pilote 5 | 527,13 | 533,71 | 1,25 |
| Pilote 6 | -420,58 | -418,3 | 0,54 |
| Pilote 7 | -171,53 | -172,17 | 0,37 |
| Pilote 8 | -15,39 | -14,99 | 2,60 |
| Pilote 9 | 148,59 | 149,16 | 0,38 |
| Pilote 10 | 481,74 | 479,9 | 0,38 |

Tabla 9. Reacciones para caso “Empuje Estático Activo”.

| [kN] | RFEM | SAP | % |
|-----------|----------|----------|------|
| Pilote 1 | 700,65 | 722,99 | 3,19 |
| Pilote 2 | 918,08 | 934,52 | 1,79 |
| Pilote 3 | 1077,89 | 1084,98 | 0,66 |
| Pilote 4 | 1246,53 | 1242,41 | 0,33 |
| Pilote 5 | 1426,29 | 1418,04 | 0,58 |
| Pilote 6 | -1142,73 | -1170,35 | 2,42 |
| Pilote 7 | -1097,86 | -1113,15 | 1,39 |
| Pilote 8 | -1093,99 | -1098,93 | 0,45 |
| Pilote 9 | -1105,61 | -1100,09 | 0,50 |
| Pilote 10 | -929,23 | -920,41 | 0,95 |

Tabla 10. Reacciones para caso “Empuje Sísmico X”.

| [kN] | RFEM | SAP | % |
|-----------|---------|---------|------|
| Pilote 1 | 444,04 | 446,81 | 0,62 |
| Pilote 2 | 574,06 | 575,43 | 0,24 |
| Pilote 3 | 630,23 | 632,4 | 0,34 |
| Pilote 4 | 678,16 | 682,49 | 0,64 |
| Pilote 5 | 712,59 | 719,5 | 0,97 |
| Pilote 6 | -739,96 | -743,93 | 0,54 |
| Pilote 7 | -656,45 | -658,63 | 0,33 |
| Pilote 8 | -599,43 | -601,22 | 0,30 |
| Pilote 9 | -553,89 | -558 | 0,74 |
| Pilote 10 | -489,35 | -494,85 | 1,12 |

Tabla 11. Reacciones para combinación “Estático”.

| [kN] | RFEM | SAP | % |
|-----------|---------|---------|------|
| Pilote 1 | 4563,96 | 4609,87 | 1,01 |
| Pilote 2 | 5375,93 | 5383,08 | 0,13 |
| Pilote 3 | 5646,76 | 5636,81 | 0,18 |
| Pilote 4 | 5793,75 | 5774,32 | 0,34 |
| Pilote 5 | 5644,96 | 5650,5 | 0,10 |
| Pilote 6 | 3142,82 | 3123,22 | 0,62 |
| Pilote 7 | 3636,66 | 3611,13 | 0,70 |
| Pilote 8 | 3722,8 | 3703,11 | 0,53 |
| Pilote 9 | 3586,03 | 3583,1 | 0,08 |
| Pilote 10 | 3184,56 | 3212,84 | 0,89 |

Tabla 12. Reacciones para combinación “0.3*X+Y sin mayorar”.

| [kN] | RFEM | SAP | % |
|-----------|---------|---------|------|
| Pilote 1 | 3961,19 | 4018,83 | 1,46 |
| Pilote 2 | 5715,92 | 5732,54 | 0,29 |
| Pilote 3 | 6720,54 | 6719,31 | 0,02 |
| Pilote 4 | 7626,45 | 7611,75 | 0,19 |
| Pilote 5 | 8493,05 | 8503,1 | 0,12 |
| Pilote 6 | 534,96 | 486 | 9,15 |
| Pilote 7 | 1752 | 1702,77 | 2,81 |
| Pilote 8 | 2223,92 | 2197,22 | 1,20 |
| Pilote 9 | 2451,23 | 2459,95 | 0,36 |
| Pilote 10 | 3223,96 | 3261,51 | 1,16 |

4.1.5. DEFORMACIÓN EN ALA

En este capítulo se comparan las deformaciones en el punto superior exterior del ala izquierda del estribo. En las figuras 96a, 96b, 97a y 97b se muestran los diagramas de deformaciones obtenidos desde el caso de carga “Empuje Estático Activo” y la combinación “0.3*X+Y sin mayorar” en los dos programas de cálculo.

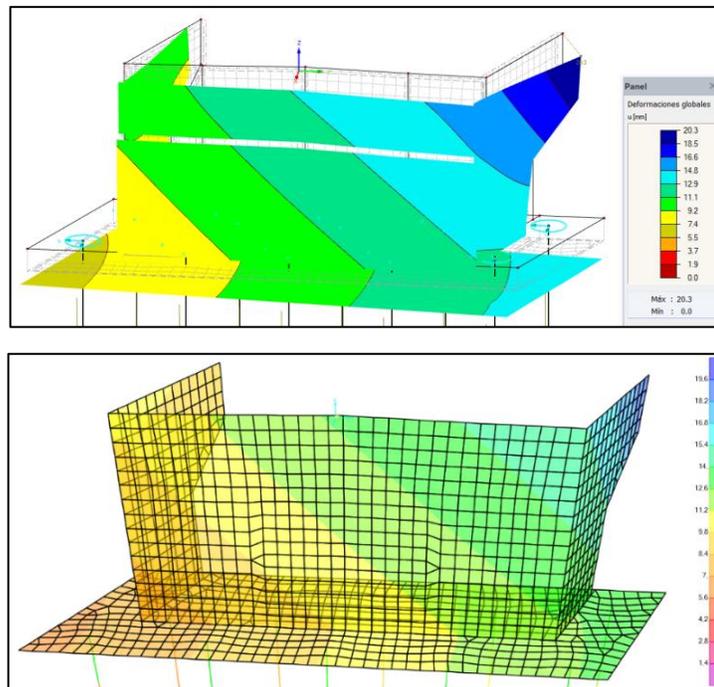


Figura 96 a) y b). Diagrama de deformación resultante en RFem y SAP2000 para caso de carga “Empuje Estático Activo”.

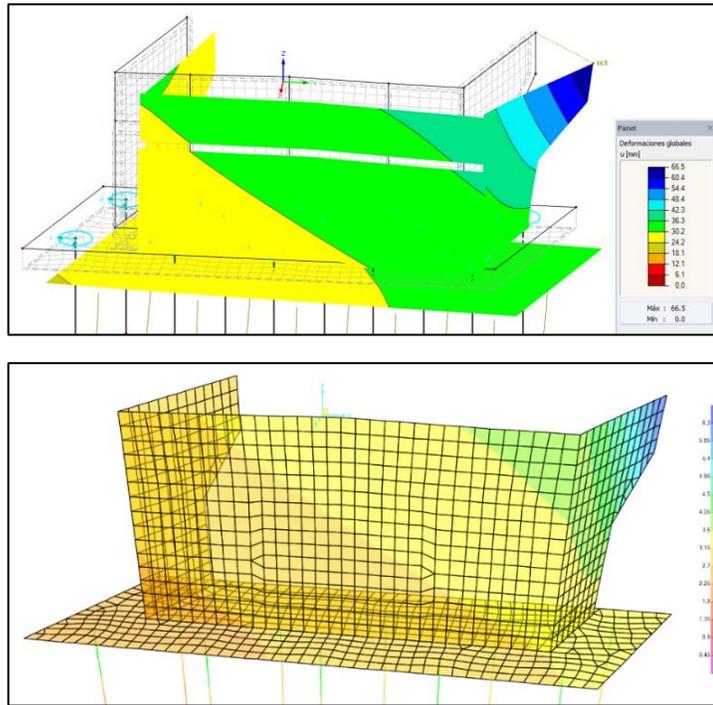


Figura 97 a) y b). Diagrama de deformación resultante en RFem y SAP2000 para combinación de carga “0.3*X+Y sin mayorar”.

A continuación, se presentan las tablas comparativas de deformaciones en el punto superior externo del ala para los casos de carga “PP Relleno”, “Super Sismo Y”, “Empuje Estático Activo” y “Empuje Sísmico X”; y las combinaciones “Estático” y “0.3*X+Y sin mayorar”. En este caso los porcentajes de diferencia son mucho mayores que las comparaciones anteriores, pero es esperable ya que se trabaja con números muy pequeños.

Tabla 13. Deformaciones para caso “PP Relleno”.

| [mm] | RFEM | SAP | % |
|-------|------|------|-------|
| Eje X | 2,5 | 2,49 | 0,40 |
| Eje Y | 0,1 | 0,13 | 30,00 |
| Eje Z | 1,3 | 1,28 | 1,54 |

Tabla 14. Deformaciones para caso “Super Sismo Y”.

| [mm] | RFEM | SAP | % |
|-------|------|------|-------|
| Eje X | 0,4 | 0,36 | 10,00 |
| Eje Y | 6,2 | 6,01 | 3,06 |
| Eje Z | 0,2 | 0,17 | 15,00 |

Tabla 15. Deformaciones para caso “Empuje Estático Activo”.

| [mm] | RFEM | SAP | % |
|-------|------|------|------|
| Eje X | 19 | 18,4 | 3,16 |
| Eje Y | 7,1 | 6,7 | 5,63 |
| Eje Z | 1,7 | 1,7 | 0,00 |

Tabla 16. Deformaciones para caso “Empuje Sísmico X”.

| [mm] | RFEM | SAP | % |
|-------|------|------|-------|
| Eje X | 6,5 | 6,4 | 1,54 |
| Eje Y | 0,1 | 0,04 | 60,00 |
| Eje Z | 1 | 0,97 | 3,00 |

Tabla 17. Deformaciones para combinación “Estático”.

| [mm] | RFEM | SAP | % |
|-------|------|-------|------|
| Eje X | 18,6 | 17,99 | 3,28 |
| Eje Y | 7,2 | 6,71 | 6,81 |
| Eje Z | 0,4 | 0,42 | 5,00 |

Tabla 18. Deformaciones para combinación “0.3*X+Y sin mayorar”.

| [mm] | RFEM | SAP | % |
|-------|------|-------|------|
| Eje X | 46,8 | 45,23 | 3,35 |
| Eje Y | 47,2 | 45,04 | 4,58 |
| Eje Z | 1 | 0,95 | 5,00 |

4.1.6. ESFUERZOS EN MURO ESPALDAR Y FRONTAL

En este capítulo se comparan los esfuerzos de tipo “Shell” en el muro espaldar y frontal en ambos programas de cálculo. En las figuras 98a y 98b se muestra el diagrama obtenido comparando el momento en el eje Y para la combinación de “Rotura 0.3*X +Y Max”.

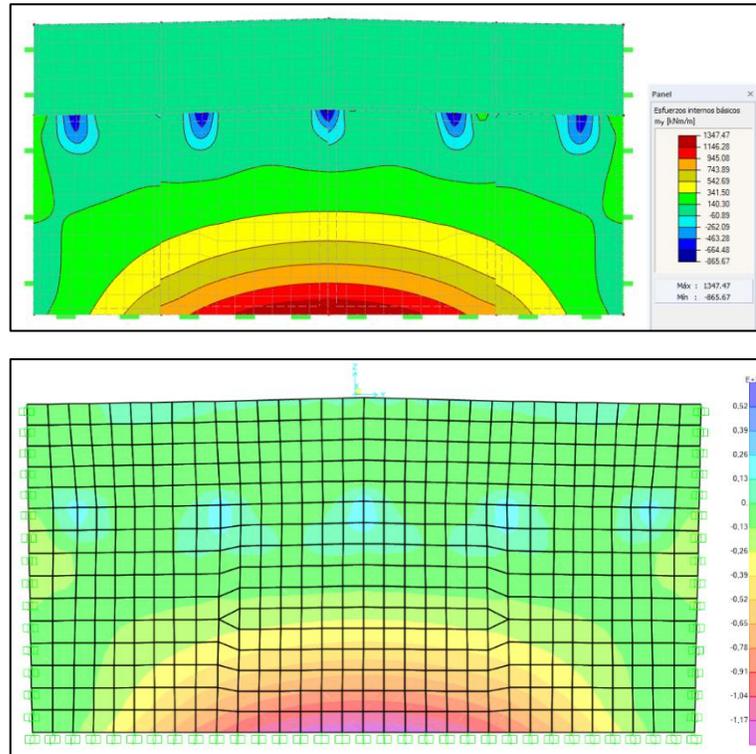


Figura 98 a) y b). Diagrama de esfuerzo de momento en eje Y para combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”.

En las tablas siguientes se comparan los valores de esfuerzo máximo y mínimo obtenidos para los esfuerzos en ambas direcciones de eje para la combinación “Rotura 0.3*X +Y Max”.

Tabla 19. Esfuerzos máximos y mínimos en muro frontal para momento en eje X.

| [kNm/m] | RFEM | SAP | % |
|---------|----------|----------|-------|
| Mín | -1283,25 | -1515,38 | 18,09 |
| Máx | 676,07 | 600,46 | 11,18 |

Tabla 20. Esfuerzos máximos y mínimos en muro frontal para momento en eje Y.

| [kNm/m] | RFEM | SAP | % |
|---------|----------|----------|-------|
| Mín | -1347,47 | -1288,78 | 4,36 |
| Máx | 865,67 | 617,47 | 28,67 |

4.1.7. ESFUERZOS EN MURO ALA

En este capítulo se comparan los esfuerzos de tipo “Shell” en el muro ala del lado izquierdo en ambos programas de cálculo. En las figuras 99a y 99b se muestra el diagrama obtenido comparando el momento en el eje Y para la combinación de “Rotura X+0.3*Y Max”.

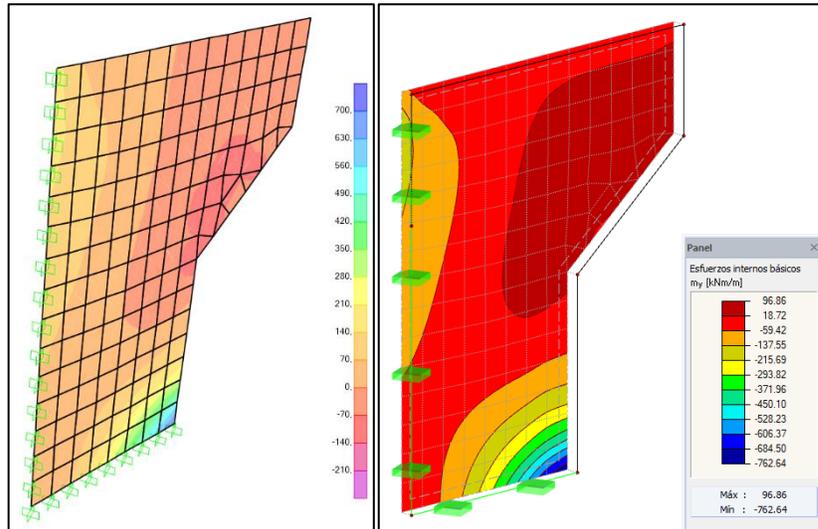


Figura 99 a) y b). Diagrama de esfuerzo Shell en ala de momento en eje Y para combinación “Rotura 0.3*X+Y Max”.

En las tablas siguientes se comparan los valores de esfuerzo máximo y mínimo obtenidos para los esfuerzos en ambas direcciones de eje para la combinación “Rotura 0.3*X +Y Max”

Tabla 21. Esfuerzos máximos y mínimos en muro ala para momento en eje X.

| [kNm/m] | RFEM | SAP | % |
|---------|--------|--------|-------|
| Mín | -19,5 | -28,8 | 47,69 |
| Máx | 832,26 | 832,34 | 0,01 |

Tabla 22. Esfuerzos máximos y mínimos en muro ala para momento en eje Y.

| [kNm/m] | RFEM | SAP | % |
|---------|--------|---------|-------|
| Mín | -96,86 | -135,74 | 40,14 |
| Máx | 762,64 | 729,35 | 4,37 |

4.2. MODELO SUPERESTRUCTURA Y CEPAS

4.2.1. RESUMEN

Al igual que el modelo de estribo, se comparan los modelos de superestructura y cepas en los programas RFem y SAP. Luego de calcular ambos modelos se analizan deformaciones, esfuerzos y momentos resultantes. En esta parte se utiliza el modelo general del nuevo puente Cancura ubicado en la provincia de Osorno.

El modelo de RFem fue exportado desde Grasshopper (con datos provenientes de Excel) siguiendo la metodología de interoperabilidad explicada al inicio del trabajo, y el modelo de SAP

fue copiado desde RFem. Las placas de apoyo fueron modeladas en SAP2000 con elementos “link”, equivalente a la viga de rigidez definible de RFem, agregando los mismos valores de rigidez que en RFem.

En las figuras 100a y 100b se muestra la vista general de la superestructura y cepas en ambos programas.

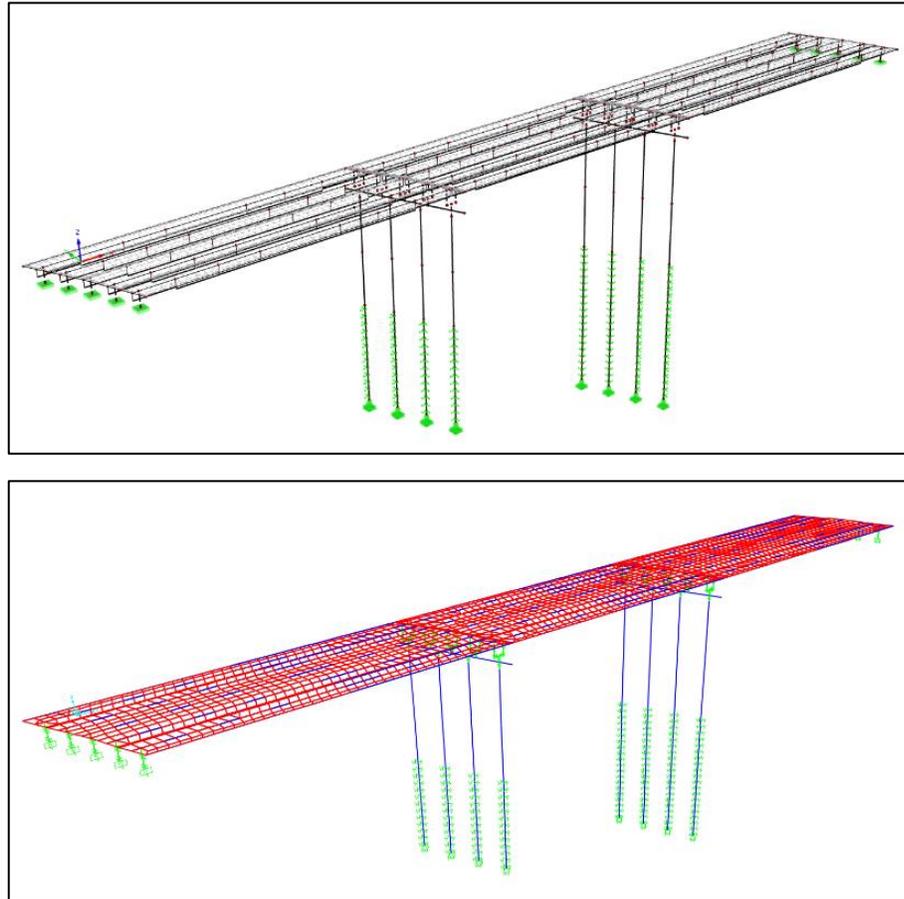


Figura 100 a) y b). Modelos de la superestructura del puente Cancura en RFem y SAP2000.

Los casos y combinaciones de carga utilizados en los siguientes capítulos para la comparación de resultados son:

- Casos de Carga
 - Peso Propio: Carga por peso propio de la superestructura y cepas.
 - Pavimento: Carga por pavimento sobre el tablero del puente.
- Combinaciones de Carga
 - Permanentes: Combinación estática con factor de multiplicación 1. Suma de casos de carga de peso propio, pavimento, barreras y barandas
- Resultados de Carga
 - Sismo X: Resultado de carga proveniente del análisis modal espectral en el eje X (transversal).

- Sismo Y: Resultado de carga proveniente del análisis modal espectral en el eje Y (longitudinal).
- PP+EqX+0.3*EqY: Resultado de carga de peso propio más esfuerzos sísmicos en ambos ejes. 30% en el eje Y y 100% en el eje X.
- PP+0.3*EqX+EqY: Resultado de carga de peso propio más esfuerzos sísmicos en ambos ejes. 100% en el eje Y y 30% en el eje X.

Se utiliza un espectro sísmico dado por el manual de carreteras para una zona sísmica 2 y tipo de suelo III. Las constantes de diseño se muestran en la tabla 45 en el anexo B. En la figura 101 se muestra el gráfico del espectro utilizado.

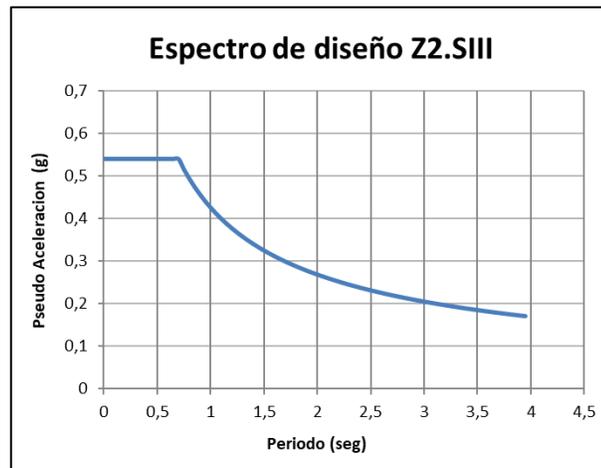


Figura 101. Espectro sísmico según manual de carreteras para Zona 2 y Suelo III.

4.2.2. MOMENTO EN PILA/PILOTES

En este capítulo se comparan los momentos y la carga axial en pila/pilotes de cepas para los modelos en RFem y SAP. En la figura 102a y 102b se muestran los diagramas de los momentos obtenidos desde el caso de carga “Peso Propio” en los dos programas de cálculo.

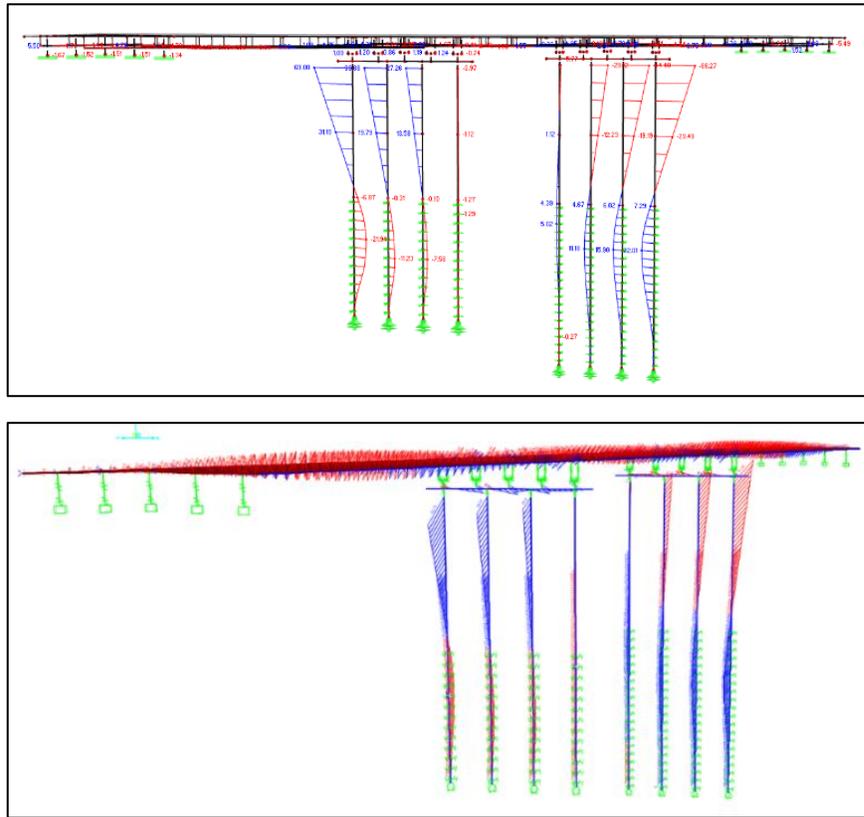


Figura 102 a) y b). Momento en eje X de pilotes en RFem y SAP2000 para caso de carga “Peso Propio”.

A continuación, se presentan las tablas comparativas de carga axial y momentos máximos (valor absoluto máximo) en la parte superior de la pila/pilote de cepas para los casos de carga “Peso Propio”, “Pavimento”; y para los resultados de carga “PP+EqX+0.3*EqY” y “PP+0.3*EqX+EqY”. Para la carga axial, momento en eje Y (M33) y momento en eje X (M22) se exponen los valores obtenidos en ambos programas de cálculo junto con el porcentaje de diferencia entre ellos. Algunos porcentajes de diferencia obtenidos son muchos mayores que en el modelo de estribo, pero se mantiene la tendencia de grandes porcentajes de diferencia en valores pequeños.

Tabla 23. Momentos y carga axial para caso “Peso Propio”

| [kN*m] | | N | | | M33 | | | M22 | | |
|--------|----------|---------|---------|------|--------|--------|------|--------|--------|-------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| C1 | Pilote 1 | -1255,4 | -1265 | 0,77 | -73,09 | -71,13 | 2,68 | 69,08 | 64,72 | 6,31 |
| | Pilote 2 | -1327,9 | -1325,3 | 0,20 | -71,07 | -69,6 | 2,07 | 39,88 | 38,07 | 4,54 |
| | Pilote 3 | -1324,7 | -1318,7 | 0,45 | -66,98 | -66,23 | 1,12 | 27,26 | 26,2 | 3,89 |
| | Pilote 4 | -1222 | -1220,5 | 0,13 | -68,62 | -68,18 | 0,64 | -0,97 | -0,05 | 94,85 |
| C2 | Pilote 1 | -1225,3 | -1223 | 0,19 | 70,84 | 70,4 | 0,62 | -2,14 | -3,04 | 42,06 |
| | Pilote 2 | -1319,5 | -1313,9 | 0,43 | 70,21 | 69,42 | 1,13 | -29,12 | -27,85 | 4,36 |
| | Pilote 3 | -1324,7 | -1321,9 | 0,21 | 74,14 | 72,7 | 1,94 | -44,4 | -42,06 | 5,27 |
| | Pilote 4 | -1258,8 | -1267,2 | 0,67 | 76,96 | 75,02 | 2,52 | -66,27 | -61,88 | 6,62 |

Tabla 24. Momentos y carga axial para caso "Pavimento".

| [kN*m] | | N | | | M33 | | | M22 | | |
|--------|----------|---------|---------|------|--------|--------|------|-------|-------|-------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| C1 | Pilote 1 | -154,1 | -155,62 | 0,99 | -11,73 | -11,37 | 3,07 | 10,31 | 9,5 | 7,86 |
| | Pilote 2 | -161,26 | -160,47 | 0,49 | -11,38 | -11,13 | 2,20 | 5,86 | 5,54 | 5,46 |
| | Pilote 3 | -160,79 | -159,5 | 0,80 | -10,39 | -10,28 | 1,06 | 4,71 | 4,57 | 2,97 |
| | Pilote 4 | -148,87 | -148,72 | 0,10 | -10,64 | -10,6 | 0,38 | 0,37 | 0,63 | 70,27 |
| C2 | Pilote 1 | -149,22 | -149 | 0,15 | 10,78 | 10,74 | 0,37 | -0,9 | -1,16 | 28,89 |
| | Pilote 2 | -160,25 | -159,05 | 0,75 | 10,73 | 10,61 | 1,12 | -4,93 | -4,76 | 3,45 |
| | Pilote 3 | -161,03 | -160,33 | 0,43 | 11,71 | 11,47 | 2,05 | -6,45 | -6,03 | 6,51 |
| | Pilote 4 | -154,42 | -155,85 | 0,93 | 12,22 | 11,87 | 2,86 | -9,73 | -8,92 | 8,32 |

Tabla 25. Momentos y carga axial para resultado de carga "PP+EqX+0.3*EqY".

| [kN*m] | | N | | | M33 | | | M22 | | |
|--------|----------|---------|---------|------|---------|---------|------|---------|---------|------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| C1 | Pilote 1 | -3210,1 | -3198,4 | 0,37 | -2374 | -2326,1 | 2,02 | 3900,52 | 3834,2 | 1,70 |
| | Pilote 2 | -1686,2 | -1686,6 | 0,02 | -2419,9 | -2373,3 | 1,93 | 3558,67 | 3495,21 | 1,78 |
| | Pilote 3 | -1796,3 | -1794,9 | 0,08 | -2372,2 | -2317,9 | 2,29 | 3607,76 | 3544,72 | 1,75 |
| | Pilote 4 | -3035,1 | -3009,7 | 0,84 | -2266 | -2223,9 | 1,86 | 3311,14 | 3259,83 | 1,55 |
| C2 | Pilote 1 | -3147,9 | -3125,4 | 0,71 | 2482,89 | 2442,29 | 1,64 | 3965,92 | 3889,37 | 1,93 |
| | Pilote 2 | -1744 | -1742,9 | 0,07 | 2539,57 | 2496,52 | 1,70 | 3709 | 3604,59 | 2,82 |
| | Pilote 3 | -1853 | -1852,3 | 0,04 | 2521,16 | 2476,84 | 1,76 | 3749,26 | 3640,65 | 2,90 |
| | Pilote 4 | -3081,1 | -3076,1 | 0,16 | 2419,19 | 2375,1 | 1,82 | 3484,42 | 3363,49 | 3,47 |

Tabla 26. Momentos y carga axial para resultado de carga "PP+0.3*EqX+EqY".

| [kN*m] | | N | | | M33 | | | M22 | | |
|--------|----------|---------|---------|------|---------|---------|------|---------|---------|------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| C1 | Pilote 1 | -3817,9 | -3808,9 | 0,23 | -2468,5 | -2431,8 | 1,49 | 5321,35 | 5258,51 | 1,18 |
| | Pilote 2 | -1686,1 | -1692 | 0,35 | -2526,6 | -2489,1 | 1,49 | 4852,8 | 4790,98 | 1,27 |
| | Pilote 3 | -1861,3 | -1864,3 | 0,16 | -2419,8 | -2385,3 | 1,43 | 4919,73 | 4858,31 | 1,25 |
| | Pilote 4 | -3593,5 | -3570,5 | 0,64 | -2188,1 | -2157,5 | 1,40 | 4522,47 | 4474,74 | 1,06 |
| C2 | Pilote 1 | -3743,6 | -3725,8 | 0,47 | 2509,5 | 2481,42 | 1,12 | 5440,04 | 5368,58 | 1,31 |
| | Pilote 2 | -1796,7 | -1799,6 | 0,16 | 2599,74 | 2566,18 | 1,29 | 5081,02 | 4980,39 | 1,98 |
| | Pilote 3 | -1943 | -1946 | 0,15 | 2544,1 | 2507,51 | 1,44 | 5136,25 | 5031,64 | 2,04 |
| | Pilote 4 | -3634,4 | -3635,1 | 0,02 | 2338,58 | 2301,78 | 1,57 | 4773,34 | 4657,93 | 2,42 |

4.2.3. DIAGRAMAS DE INTERACCIÓN PARA PILA/PILOTES EN CEPA DE ENTRADA.

Usando los valores de momentos y carga axial máximos para el resultado de carga “PP+0.3*EqX+EqY”, se pueden construir los diagramas de interacción admisibles para la pila/pilote de cepa. En la tabla 27 se muestran los valores obtenidos en ambos programas de cálculo.

Tabla 27. Valores máximos de momentos y carga axial para resultado de carga “PP+0.3*EqX+EqY”.

| [kN*m] | | N | | | M33 | | | M22 | | |
|--------|----------|---------|---------|------|---------|---------|------|---------|---------|------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| C1 | Pilote 1 | -3817,9 | -3808,9 | 0,23 | -2468,5 | -2431,8 | 1,49 | 5321,35 | 5258,51 | 1,18 |
| | Pilote 2 | -1686,1 | -1692 | 0,35 | -2526,6 | -2489,1 | 1,49 | 4852,8 | 4790,98 | 1,27 |
| | Pilote 3 | -1861,3 | -1864,3 | 0,16 | -2419,8 | -2385,3 | 1,43 | 4919,73 | 4858,31 | 1,25 |
| | Pilote 4 | -3593,5 | -3570,5 | 0,64 | -2188,1 | -2157,5 | 1,40 | 4522,47 | 4474,74 | 1,06 |

A continuación, se comparan los diagramas de interacción para los modelos en RFem y SAP. Para la creación de diagramas se supone una armadura con 30 barras longitudinales equidistantes de diámetro 32 [mm], la cual es admisible en ambos modelos. En la figura 103 se muestra la armadura utilizada en los pilotes y en las figuras 104 y 105 se muestran los gráficos de interacción para RFem y SAP.

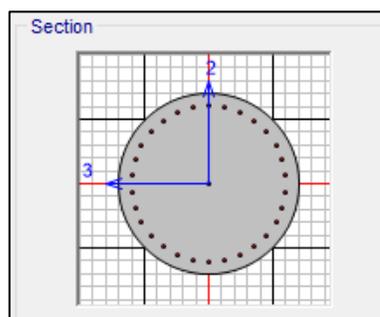


Figura 103. Diagrama de armadura de pilotes en cepa entrada.

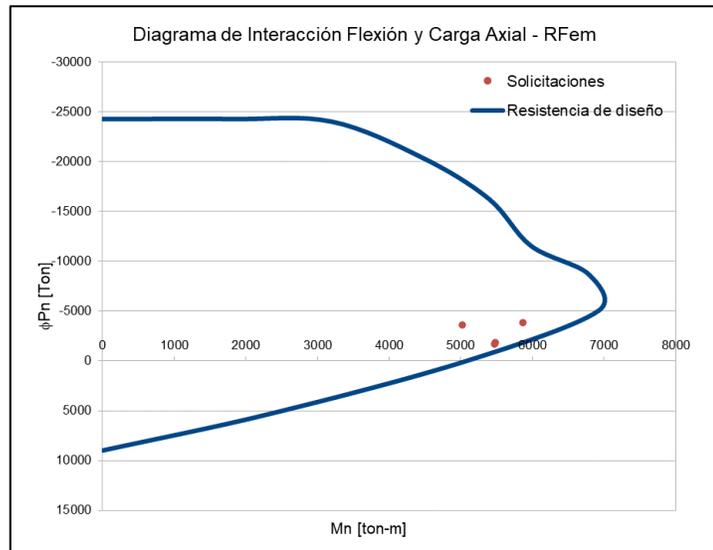


Figura 104. Diagrama de interacción de RFem para resultado de carga “PP+0.3*EqX+EqY”.

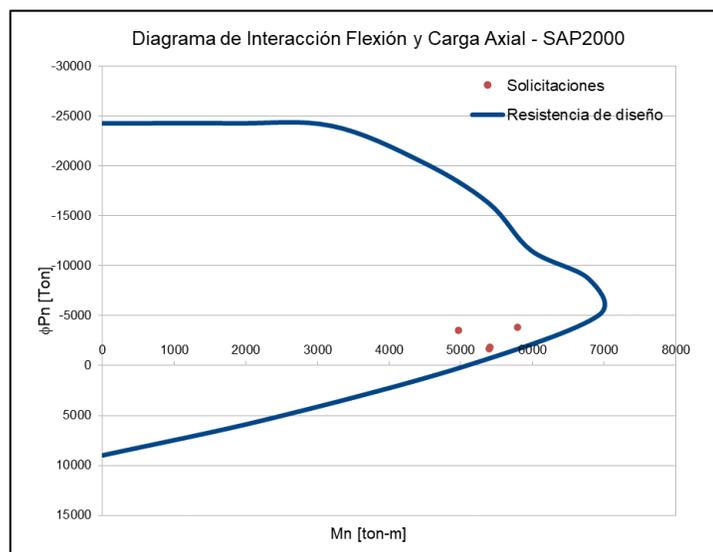


Figura 105. Diagrama de interacción de SAP para resultado de carga “PP+0.3*EqX+EqY”.

4.2.4. REACCIONES EN APOYOS

A continuación, se presentan las tablas comparativas de reacciones en las placas de apoyo de los estribos y de reacciones de punta en el sello de fundación de los pilotes en las cepas. La combinación de carga comparada es “Permanentes”, y los resultados de carga comparados son “Sismo X”, “Sismo Y”, “PP+EqX+0.3*EqY” y “PP+0.3*EqX+EqY”. Al igual que las tablas anteriores se exponen los valores obtenidos en RFem y SAP2000 junto con el porcentaje de diferencia. Las reacciones de punta en cepas presentan muy buenos resultados, pero en las reacciones en las placas de estribo se encontraron diferencias grandes, sobre todo en las reacciones en el eje Z. Esto se podría explicar por una posible diferencia en el elemento de rigidez definible (placa de apoyo) en los dos modelos.

Tabla 28. Reacciones para combinación “Permanentes” en estribos.

| [kN] | | Rx | | | Ry | | | Rz | | |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| EE | Viga 1 | 2,41 | 2,51 | 4,15 | 1,25 | 1,84 | 47,20 | 564,51 | 551,7 | 2,27 |
| | Viga 2 | 1,92 | 2,12 | 10,42 | 1,08 | 1,25 | 15,74 | 495,83 | 493,16 | 0,54 |
| | Viga 3 | 1,67 | 1,9 | 13,77 | 0,76 | 0,87 | 14,47 | 447,46 | 449,3 | 0,41 |
| | Viga 4 | 2,48 | 2,64 | 6,45 | 0,88 | 0,82 | 6,82 | 479,78 | 467,75 | 2,51 |
| | Viga 5 | 3,6 | 3,71 | 3,06 | -0,72 | -0,19 | 73,61 | 575,44 | 606,6 | 5,41 |
| ES | Viga 1 | -3,37 | -3,48 | 3,26 | 0,82 | 0,34 | 58,54 | 575,37 | 606,53 | 5,42 |
| | Viga 2 | -2,26 | -2,41 | 6,64 | -0,75 | -0,67 | 10,67 | 479,87 | 467,82 | 2,51 |
| | Viga 3 | -1,44 | -1,67 | 15,97 | -0,6 | -0,72 | 20,00 | 447,49 | 449,33 | 0,41 |
| | Viga 4 | -1,7 | -1,89 | 11,18 | -0,93 | -1,1 | 18,28 | 495,82 | 493,18 | 0,53 |
| | Viga 5 | -2,19 | -2,29 | 4,57 | -1,1 | -1,69 | 53,64 | 564,73 | 551,84 | 2,28 |

Tabla 29. Reacciones para resultado de carga “Sismo X” en estribos.

| [kN] | | Rx | | | Ry | | | Rz | | |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|-------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| EE | Viga 1 | 265,02 | 262,89 | 0,80 | 122,68 | 122,29 | 0,32 | 122,5 | 100,15 | 18,24 |
| | Viga 2 | 265,64 | 263,59 | 0,77 | 127,6 | 125,97 | 1,28 | 74,3 | 51,91 | 30,13 |
| | Viga 3 | 266,29 | 264,24 | 0,77 | 127,52 | 126,46 | 0,83 | 37,39 | 38,77 | 3,69 |
| | Viga 4 | 266,95 | 264,91 | 0,76 | 128,74 | 127,21 | 1,19 | 34,36 | 33,23 | 3,29 |
| | Viga 5 | 267,65 | 265,67 | 0,74 | 126,84 | 125,78 | 0,84 | 147,37 | 136,1 | 7,65 |
| ES | Viga 1 | 267,38 | 265,38 | 0,75 | 148,27 | 146,94 | 0,90 | 165,25 | 150,92 | 8,67 |
| | Viga 2 | 266,83 | 264,78 | 0,77 | 151,08 | 149,16 | 1,27 | 37,28 | 31,87 | 14,51 |
| | Viga 3 | 266,32 | 264,27 | 0,77 | 150,23 | 148,86 | 0,91 | 36,08 | 37,62 | 4,27 |
| | Viga 4 | 265,8 | 263,77 | 0,76 | 150,91 | 148,87 | 1,35 | 80,7 | 53,58 | 33,61 |
| | Viga 5 | 265,31 | 263,2 | 0,80 | 145,66 | 145,1 | 0,38 | 137,75 | 121,22 | 12,00 |

Tabla 30. Reacciones para resultado de carga “Sismo Y” en estribos.

| [kN] | | Rx | | | Ry | | | Rz | | |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|-------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| EE | Viga 1 | 152,63 | 150,35 | 1,49 | 196,16 | 196,6 | 0,22 | 199,71 | 181,61 | 9,06 |
| | Viga 2 | 152,33 | 150 | 1,53 | 203,89 | 202,44 | 0,71 | 83,81 | 46,28 | 44,78 |
| | Viga 3 | 152,05 | 149,71 | 1,54 | 203,68 | 203,15 | 0,26 | 20,95 | 22,67 | 8,21 |
| | Viga 4 | 151,85 | 149,49 | 1,55 | 205,56 | 204,26 | 0,63 | 50,98 | 23,84 | 53,24 |
| | Viga 5 | 151,69 | 149,29 | 1,58 | 202,38 | 201,83 | 0,27 | 203,77 | 186,96 | 8,25 |
| ES | Viga 1 | 152,39 | 149,99 | 1,57 | 237,56 | 236,85 | 0,30 | 237,18 | 215,81 | 9,01 |
| | Viga 2 | 152,24 | 149,89 | 1,54 | 242,21 | 240,6 | 0,66 | 59,42 | 25,4 | 57,25 |
| | Viga 3 | 152,09 | 149,74 | 1,55 | 240,93 | 240,21 | 0,30 | 20,64 | 22,82 | 10,56 |
| | Viga 4 | 151,98 | 149,64 | 1,54 | 242,12 | 240,29 | 0,76 | 98,65 | 52,95 | 46,33 |
| | Viga 5 | 151,86 | 149,56 | 1,51 | 233,82 | 234,3 | 0,21 | 239,07 | 214,77 | 10,16 |

Tabla 31. Reacciones de punta en cepas para resultado de carga “ $PP+EqX+0.3*EqY$ ”.

| [kN*m] | | Rz | | |
|--------|----------|---------|---------|------|
| | | RFEM | SAP | % |
| C1 | Pilote 1 | 4380,76 | 4367,8 | 0,30 |
| | Pilote 2 | 2856,69 | 2855,31 | 0,05 |
| | Pilote 3 | 2966,77 | 2963,69 | 0,10 |
| | Pilote 4 | 4205,68 | 4178,87 | 0,64 |
| C2 | Pilote 1 | 4752,14 | 4727,73 | 0,51 |
| | Pilote 2 | 3347,97 | 3344,9 | 0,09 |
| | Pilote 3 | 3456,97 | 3454,47 | 0,07 |
| | Pilote 4 | 4685,34 | 4678,69 | 0,14 |

Tabla 32. Reacciones de punta en cepas para resultado de carga “ $PP+0.3*EqX+EqY$ ”.

| [kN*m] | | Rz | | |
|--------|----------|---------|---------|------|
| | | RFEM | SAP | % |
| C1 | Pilote 1 | 4988,6 | 4978,35 | 0,21 |
| | Pilote 2 | 2856,54 | 2860,59 | 0,14 |
| | Pilote 3 | 3031,73 | 3033,45 | 0,06 |
| | Pilote 4 | 4764,24 | 4739,25 | 0,52 |
| C2 | Pilote 1 | 5348,01 | 5327,56 | 0,38 |
| | Pilote 2 | 3400,7 | 3401,48 | 0,02 |
| | Pilote 3 | 3547,02 | 3547,98 | 0,03 |
| | Pilote 4 | 5238,75 | 5237,36 | 0,03 |

4.2.5. DEFORMACIONES EN LOSA

En este capítulo se comparan las deformaciones en los extremos izquierdos de la losa. En las figuras 106a, 106b, 107a y 107b se muestran los diagramas de deformaciones obtenidos desde el caso de carga “Peso Propio” respecto al eje X (longitudinal) y al eje Z en los dos programas de cálculo.

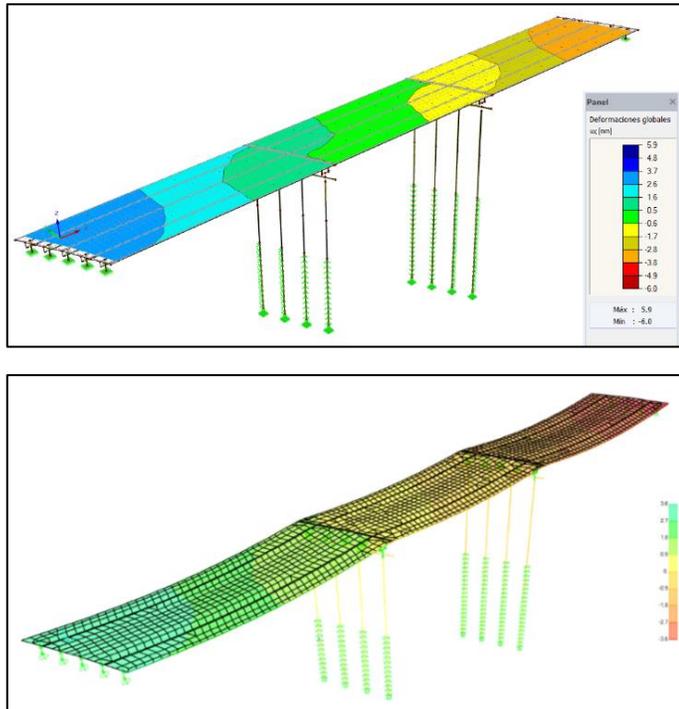


Figura 106 a) y b). Diagrama de deformación en RFem y SAP2000 para resultado de carga “Peso Propio” en el eje X.

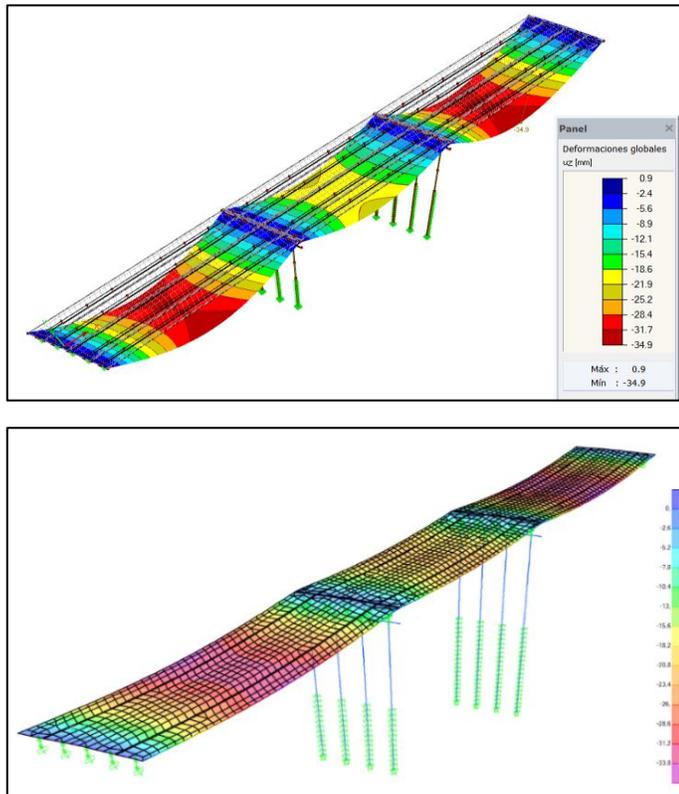


Figura 107 a) y b). Diagrama de deformación en RFem y SAP2000 para resultado de carga “Peso Propio” en el eje Z.

A continuación, se presentan las tablas comparativas de deformaciones en los puntos extremos izquierdos de la losa (Punto A: Lado entrada, Punto B: Lado salida) para los casos de carga “Peso Propio” y “Pavimento”; y para los resultados de carga “PP+EqX+0.3*EqY” y “PP+0.3*EqX+EqY”. Al igual que en el caso del estribo se tienen porcentajes grandes de diferencia ya que se trabaja con números muy pequeños.

Tabla 33. Deformaciones para caso “Peso Propio”.

| [mm] | Punto A | | | Punto B | | |
|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Eje X | 3,6 | 3,56 | 1,11 | 3,7 | 3,69 | 0,27 |
| Eje Y | 1,7 | 1,62 | 4,71 | 1,8 | 1,71 | 5,00 |
| Eje Z | 0,5 | 0,25 | 50,00 | 0,5 | 0,26 | 48,00 |

Tabla 34. Deformaciones para caso “Pavimento”.

| [mm] | Punto A | | | Punto B | | |
|-------|---------|------|-------|---------|------|------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Eje X | 0,6 | 0,58 | 3,33 | 0,6 | 0,61 | 1,67 |
| Eje Y | 0,3 | 0,26 | 13,33 | 0,3 | 0,28 | 6,67 |
| Eje Z | 0 | 0 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 |

*Tabla 35. Deformaciones para resultado de carga “PP+EqX+0.3*EqY”.*

| [mm] | Punto A | | | Punto B | | |
|-------|---------|-------|-------|---------|--------|-------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Eje X | 221,2 | 219,2 | 0,90 | -221,4 | -219,5 | 0,86 |
| Eje Y | 134 | 132,9 | 0,82 | -159,7 | -158,3 | 0,88 |
| Eje Z | 7,2 | 4,9 | 31,94 | 8,5 | 5,8 | 31,76 |

*Tabla 36. Deformaciones para resultado de carga “PP+0.3*EqX+EqY”.*

| [mm] | Punto A | | | Punto B | | |
|-------|---------|-------|-------|---------|--------|-------|
| | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| Eje X | 166,8 | 164,6 | 1,32 | -166,3 | -164,2 | 1,26 |
| Eje Y | 171,3 | 170,5 | 0,47 | -204,8 | -203,6 | 0,59 |
| Eje Z | 9,1 | 6,4 | 29,67 | 10,8 | 7,5 | 30,56 |

4.2.6. RESUMEN ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

Se realiza un análisis de convergencia refinando el mallado de los elementos placa del tablero para comprobar posibles diferencias en los resultados. En la figura 108a, 108b, 109a y 109b se muestra el cambio de mallado en RFem y SAP2000.

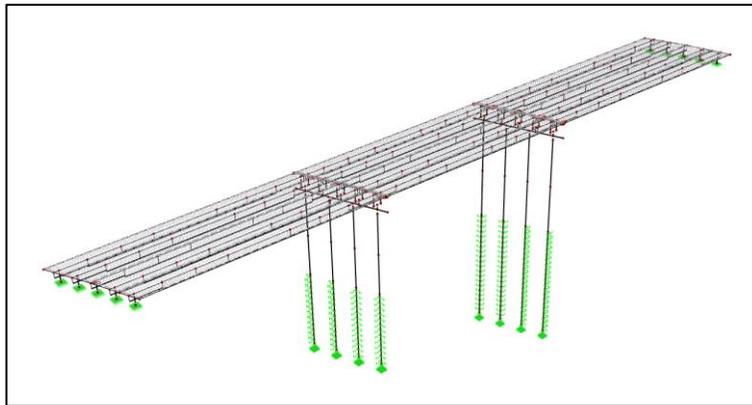
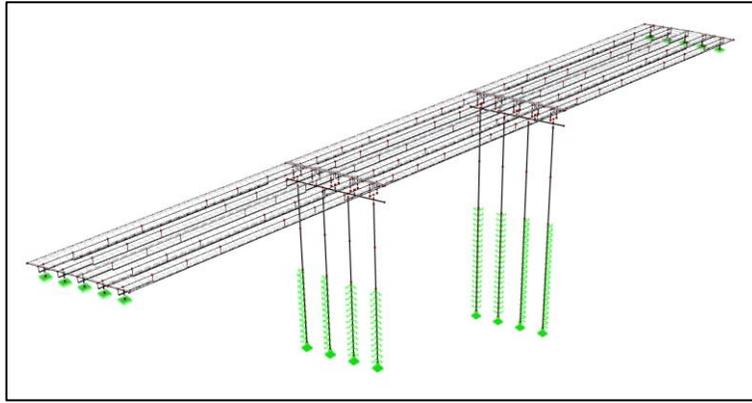


Figura 108 a) y b). Cambio de mallado en modelo RFem.

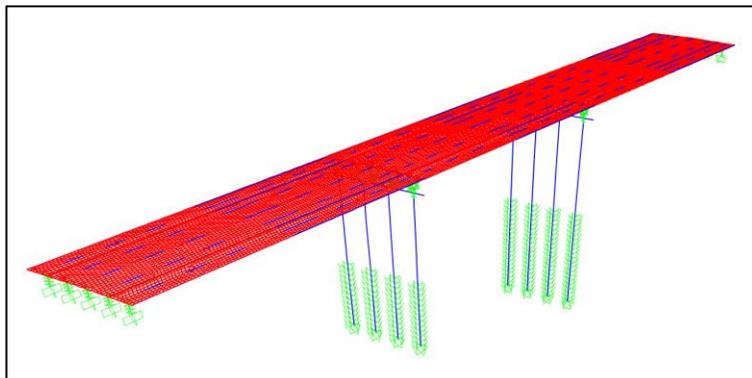
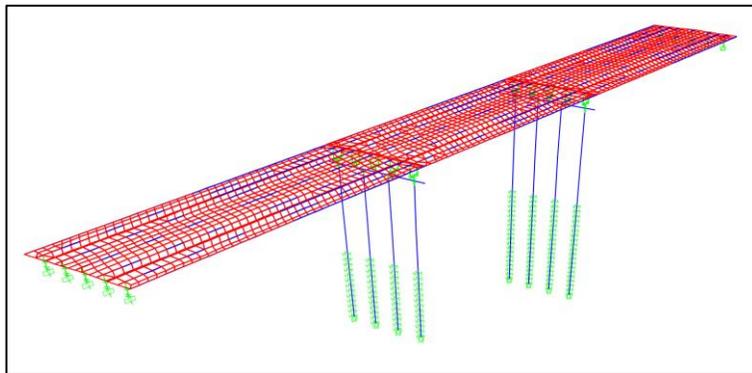


Figura 109 a) y b). Cambio de mallado en modelo SAP2000.

Con el nuevo mallado se procede a comparar las reacciones en los estribos, las cuales tuvieron la mayor diferencia en porcentaje en el análisis anterior. En las tablas 37, 38, y 39 se muestran las reacciones obtenidas.

Tabla 37. Reacciones para combinación “Permanentes” en estribos con nuevo mallado.

| [kN] | | Rx | | | Ry | | | Rz | | |
|------|--------|------|------|-------|------|------|-------|--------|--------|------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| EE | Viga 1 | 2,38 | 2,53 | 6,30 | 1,52 | 1,71 | 12,50 | 566,35 | 558,12 | 1,45 |
| | Viga 2 | 1,89 | 2,11 | 11,64 | 1,00 | 1,19 | 19,00 | 496,66 | 495,11 | 0,31 |
| | Viga 3 | 1,67 | 1,90 | 13,77 | 0,67 | 0,77 | 14,93 | 451,32 | 450,81 | 0,11 |
| | Viga 4 | 2,47 | 2,65 | 7,29 | 0,86 | 0,81 | 5,81 | 479,18 | 472,89 | 1,31 |
| | Viga 5 | 3,58 | 3,72 | 3,91 | 0,78 | 0,21 | 73,08 | 577,70 | 594,24 | 2,86 |
| ES | Viga 1 | 2,45 | 3,49 | 42,45 | 0,47 | 0,03 | 93,62 | 577,62 | 594,12 | 2,86 |
| | Viga 2 | 2,24 | 2,43 | 8,48 | 0,73 | 0,66 | 9,59 | 479,25 | 472,96 | 1,31 |
| | Viga 3 | 1,44 | 1,67 | 15,97 | 0,52 | 0,62 | 19,23 | 451,33 | 450,83 | 0,11 |
| | Viga 4 | 1,66 | 1,89 | 13,86 | 0,84 | 0,62 | 26,19 | 496,64 | 495,10 | 0,31 |
| | Viga 5 | 2,15 | 2,30 | 6,98 | 1,37 | 1,04 | 24,09 | 566,55 | 558,28 | 1,46 |

Tabla 38. Reacciones para combinación “Sismo X” en estribos con nuevo mallado.

| [kN] | | Rx | | | Ry | | | Rz | | |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|-------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| EE | Viga 1 | 265,08 | 263,24 | 0,69 | 122,82 | 123,03 | 0,17 | 109,99 | 103,45 | 5,95 |
| | Viga 2 | 265,7 | 263,95 | 0,66 | 128,74 | 126,75 | 1,55 | 68,35 | 55,9 | 18,22 |
| | Viga 3 | 266,35 | 264,61 | 0,65 | 128,87 | 127,26 | 1,25 | 36,6 | 37,74 | 3,11 |
| | Viga 4 | 267,01 | 265,29 | 0,64 | 129,83 | 128,01 | 1,40 | 32,11 | 31,48 | 1,96 |
| | Viga 5 | 267,71 | 266,05 | 0,62 | 127,46 | 126,52 | 0,74 | 144,5 | 139,48 | 3,47 |
| ES | Viga 1 | 267,45 | 265,75 | 0,64 | 149 | 147,76 | 0,83 | 161,96 | 155,21 | 4,17 |
| | Viga 2 | 266,9 | 265,15 | 0,66 | 152,36 | 150,07 | 1,50 | 33,83 | 30,69 | 9,28 |
| | Viga 3 | 266,38 | 264,64 | 0,65 | 151,82 | 149,77 | 1,35 | 35,3 | 36,56 | 3,57 |
| | Viga 4 | 265,86 | 264,13 | 0,65 | 152,27 | 149,74 | 1,66 | 73,76 | 58,69 | 20,43 |
| | Viga 5 | 265,37 | 263,56 | 0,68 | 145,83 | 145,92 | 0,06 | 134,7 | 125,71 | 6,67 |

Tabla 39. Reacciones para combinación “Sismo Y” en estribos con nuevo mallado.

| [kN] | | Rx | | | Ry | | | Rz | | |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|------|--------|--------|-------|
| | | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % | RFEM | SAP | % |
| EE | Viga 1 | 154,63 | 151,41 | 2,08 | 193,62 | 196,03 | 1,24 | 192,5 | 185,51 | 3,63 |
| | Viga 2 | 154,35 | 151,06 | 2,13 | 202,85 | 201,87 | 0,48 | 74,11 | 53,18 | 28,24 |
| | Viga 3 | 154,09 | 150,76 | 2,16 | 202,96 | 202,61 | 0,17 | 20,62 | 21,55 | 4,51 |
| | Viga 4 | 153,9 | 150,53 | 2,19 | 204,38 | 203,73 | 0,32 | 43,11 | 28,46 | 33,98 |
| | Viga 5 | 153,75 | 150,33 | 2,22 | 200,53 | 201,21 | 0,34 | 197,25 | 190,87 | 3,23 |
| ES | Viga 1 | 154,45 | 151,06 | 2,19 | 235,35 | 236,2 | 0,36 | 229,41 | 220,94 | 3,69 |
| | Viga 2 | 154,28 | 150,94 | 2,16 | 240,79 | 240,05 | 0,31 | 49,82 | 31,72 | 36,33 |
| | Viga 3 | 154,12 | 150,79 | 2,16 | 240,03 | 239,66 | 0,15 | 20,27 | 21,53 | 6,22 |
| | Viga 4 | 154,01 | 150,68 | 2,16 | 240,83 | 239,72 | 0,46 | 86,99 | 61,79 | 28,97 |
| | Viga 5 | 153,87 | 150,6 | 2,13 | 230,75 | 233,7 | 1,28 | 230,38 | 220,31 | 4,37 |

Los resultados obtenidos con el nuevo mallado difieren poco de los resultados con el mallado anterior, pero presentan una leve mejora. Los porcentajes en las reacciones de peso propio son grandes, pero para valores de fuerza pequeños. Sin embargo, las reacciones en eje Z para análisis sísmico no. Queda propuesto para futuras investigaciones seguir refinando el mallado y comprobar si las diferencias en los resultados disminuyen.

5. MODELACIÓN GENERATIVA

5.1. RESUMEN

En el último código de Grasshopper de este trabajo se utiliza el complemento Galápagos para optimizar vigas pretensadas con uso en puentes de vigas longitudinales. Para este código en particular se usan casi únicamente componentes Python, que ayudan a traspasar la utilidad de una planilla Excel de verificación de vigas a Grasshopper. Esta planilla de Excel, facilitada por la empresa Sincal, sigue la norma AASHTO Std 2002.

Algunas programaciones utilizadas de Python se muestran en los Anexos C y D, la vista general final del código Grasshopper se muestra en la figura 110 y la vista previa de la viga generada en la interfaz de Rhino se muestra en la figura 111.

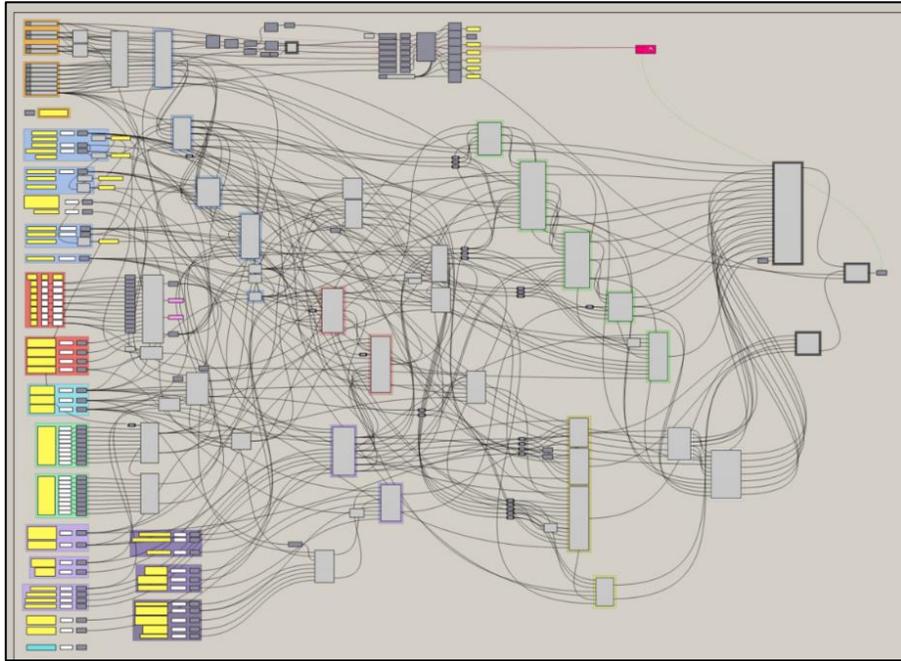


Figura 110. Vista general del código generativo de Grasshopper.

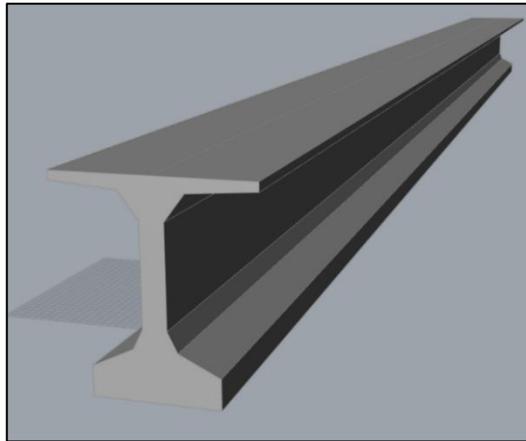


Figura 111. Vista previa de la viga en la interfaz de Rhino.

5.2. SOLICITACIONES Y RESTRICCIONES

Los valores inputs en el código generativo, a diferencia de los códigos anteriores, se agregan directamente en Grasshopper sin requerir de un archivo Excel externo. Los paneles para agregar valores se ubican en la parte izquierda del código y se reconocen por su color blanco. En la figura 112 se muestra un fragmento del código con algunos inputs constantes como la resistencia a compresión o la densidad del hormigón de la viga.

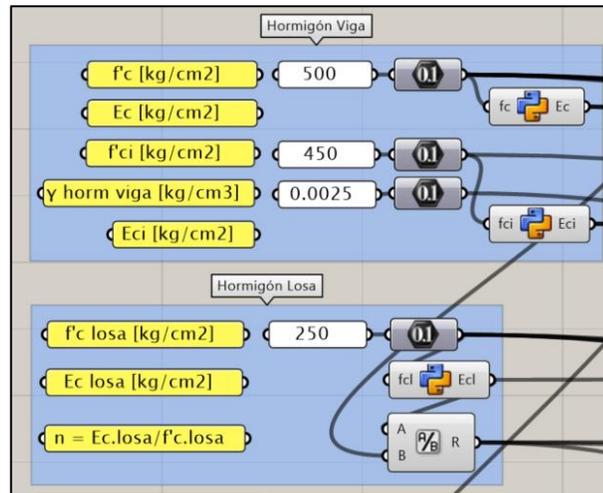


Figura 112. Ejemplos de input en Grasshopper.

Los valores inputs constantes que se deben agregar al programa se enumeran a continuación:

- Hormigón de viga
 - Resistencia a compresión ($f'c$)
 - Resistencia al destense ($f'ci$)
 - Densidad (γ)
- Hormigón de losa
 - Resistencia a compresión ($f'cl$)
- Acero pretensado
 - Resistencia última cables (fpu)
 - Módulo de Young (Es)
 - Tensión acero pretensado
 - Análisis de baja relajación (Si/No)
- Acero pasivo
 - Tensión de fluencia (fy)
- Tipo de análisis de viga (interior/exterior)
- Pendiente longitudinal del puente
- Cables pretensados
 - Posición de cables por filas (máximo 7 filas)
 - Cantidad de cables por fila
 - Espaciamiento mínimo
 - Recubrimiento mínimo
 - Cantidad de cables por fila
 - Área sección de cable
- Datos de acero pasivo de refuerzo a tracción y compresión
- Losa colaborante
 - Espesor losa
 - Ancho losa
- Vigas de puente
 - Separación entre vigas

- Largo de cálculo de viga
- Número de vigas
- Calzadas y pasillos
 - Ancho calzada
 - Espesor calzada
 - Sección adicional de área de pasillo
 - Ancho de pasillo
 - Posición borde de calzada
- Humedad ambiente
- Número de vías
- Factor de mayoración, según manual de carreteras [23]
- Porcentaje de utilización máximo (cota para restricciones)
- Asentamiento de cuñas
 - Acortamiento
 - Longitud anclaje
- Área de banco (A_b)
- Ancho de baranda
- Carga de camión
 - Distancia libre a rueda de camión
 - Separación entre ruedas
- Inputs de cargas
 - Cargas vivas según norma AASHTO Std 2002
 - Cargas travesaños
 - Cargas barreras

Usando todos los valores anteriores se calculan las tensiones por etapas, las cuales se verifican con las tensiones admisibles, que también son calculadas en el código Grasshopper. Las pérdidas instantáneas al tensionar se aplican en la primera etapa y las pérdidas diferidas de cables se aplican en la segunda etapa. Las tensiones calculadas se enumeran a continuación.

- Tensiones 1ra etapa: Etapa de transferencia / Corte de cables
 - Superior
 - Inferior
- Tensiones 2da etapa: Etapa de terreno / Adición de PP losa
 - Superior
 - Inferior
- Tensiones 3ra etapa: Etapa final / Fragüe losa y adición de terminaciones
 - Superior losa
 - Superior viga
 - Inferior viga
- Tensiones 4ta etapa: Etapa de servicio / Adición de cargas vivas
 - Superior losa
 - Superior viga
 - Inferior viga
- Tensión de acero

Así mismo, se calcula el momento solicitante y resistente, junto con la verificación de los límites de ductilidad.

- Verificación momento
 - Momento solicitante (M_u)
 - Momento resistente (ϕM_n)
- Verificación límites de ductilidad
 - Mínimo acero pretensado (M_{cr})
 - Máximo acero pretensado

En la figura 113a y 113b se muestran dos componentes Python los cuales ayudan a verificar que las tensiones solicitantes sean menores que las resistentes, y además calculan los porcentajes de utilidad de cada tensión.

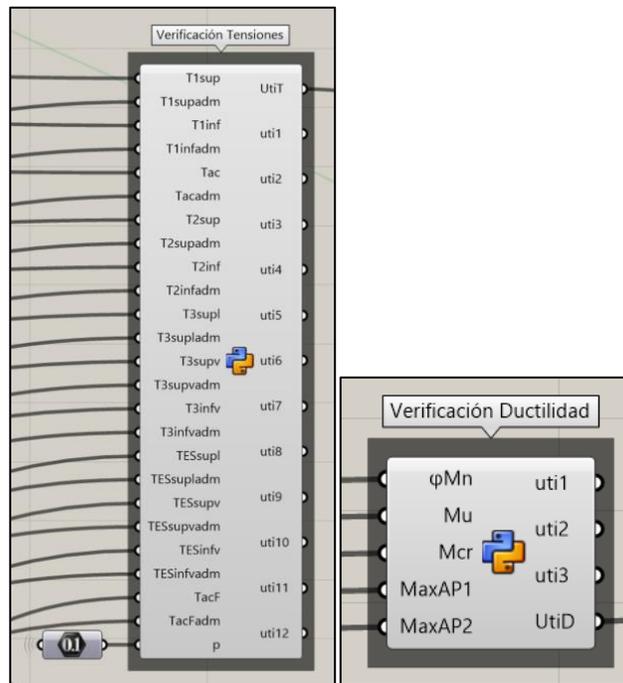


Figura 113 a) y b). Componentes de Python para verificación de tensiones y ductilidad.

5.3. OPTIMIZACIÓN CON GALÁPAGOS

Dados los valores constantes del puente y el cálculo de tensiones y momentos, Galápagos está listo para optimizar. El algoritmo de Galápagos funciona con inputs slider y con un único valor que se debe maximizar o minimizar cambiando los valores de los sliders antes mencionados. Este código tiene como inputs optimizables de slider a las medidas b_1 , b_4 , b_7 , d_1 y d_7 , que son algunas de las medidas que definen la sección transversal de la viga pretensada como se muestra en la figura 114.

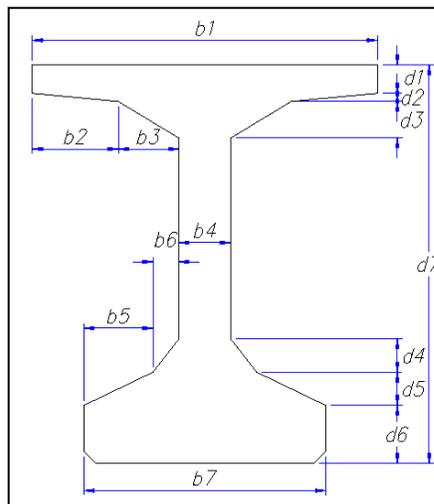


Figura 114. Esquema de medidas de viga enumeradas de b_1 a b_7 y d_1 a d_7 .

El valor para minimizar por Galápagos corresponde al valor total del área de sección transversal de la viga, definida por las medidas de la figura 100. Usando un componente Python se logra que el algoritmo minimice el área cumpliendo con los valores admisibles de tensiones y momentos, restricciones geométricas y límite de porcentaje de utilidad impuesto por el usuario. Las restricciones geométricas impuestas en el código, obtenidas desde especificaciones del MOP [26], se enumeran a continuación.

- Para vigas con altura mayor o igual a 2 [m], el espesor del alma debe tener 20 [cm] mínimo.
- Para vigas con altura entre 2 [m] y 1,3 [m], el espesor del alma debe tener 18 [cm] mínimo.
- Para vigas con altura menor a 1,3 [m], el espesor del alma debe tener 15 [cm] mínimo.
- Espesor mínimo de 7 [cm] en ala superior.

Junto con estas, se agregan:

- Medida b_1 no puede ser menor que $b_3 \cdot 2 + b_4$
- Medida b_7 no puede ser menor que $b_6 \cdot 2 + b_4$
- Medida d_7 no puede ser menor que $d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6$

En la figura 115 se muestra el componente Galápagos en el código Grasshopper, y en la figura 116 se muestra una imagen de la interfaz visual de Galápagos cuando está en funcionamiento.



Figura 115. Componente Galápagos.

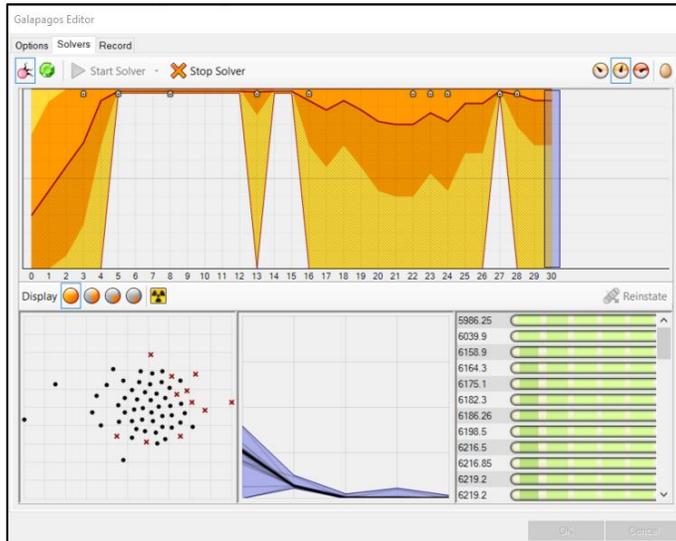


Figura 116. Interfaz visual de Galápagos en funcionamiento.

En la figura 117 se muestra un ejemplo de optimización de una viga que pasó de 7001,5 [cm²] a 6274 [cm²] cumpliendo todas las restricciones impuestas por el usuario y con un límite máximo de 97% de porcentaje de utilización.

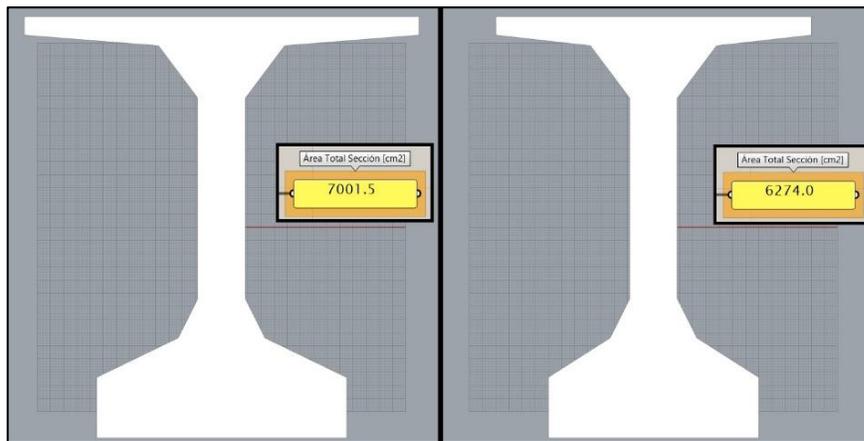


Figura 117. Optimización de área de viga.

En el anexo E se expone el estado tensional del ejemplo antes mencionado de la viga pretensada con los datos iniciales y con los datos de la iteración final. Después de la optimización por Galápagos es posible cambiar los valores de sliders (medidas de viga) con la idea de formar una viga similar en área que cumpla con los requisitos constructivos de la hormigonera. Con cada cambio de medida el valor de área y la comprobación de tensiones admisibles se actualizan en los paneles, por lo que es fácil para el usuario comprobar rápidamente si la viga es admisible o no.

Por último, el código Grasshopper posee una función de memoria, construida con diferentes componentes. Esta función permite grabar los mejores resultados obtenidos desde Galápagos, permitiéndole al usuario escoger una configuración de viga entre las 15 áreas mínimas (15 mejores

resultados). Cambiando el slider “Index” (figura 118) se pueden visualizar las medidas optimizadas de cada una de las 15 secciones en los paneles amarillos. El fragmento del código Grasshopper con esta función se muestra en la figura 118.

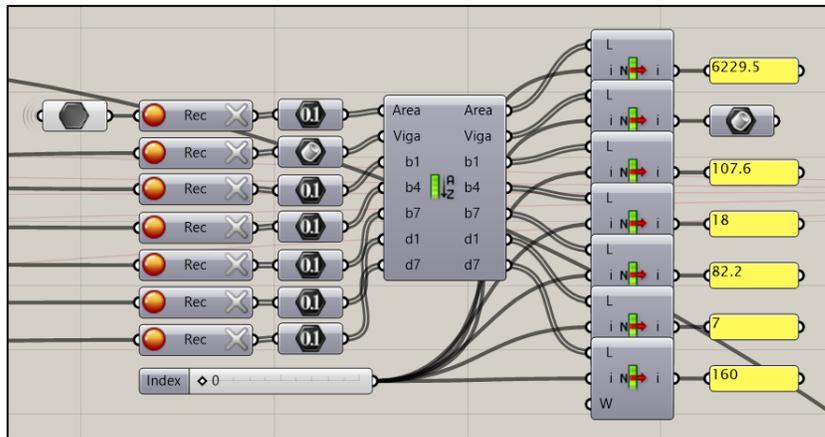


Figura 118. Función para memorizar resultados de optimización.

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Gracias a las funciones de interoperabilidad de los programas RFem y Rhinoceros, se desarrollaron los códigos de programación en Grasshopper correspondientes al modelo de estribo y al modelo general de superestructura y cepas. Estos modelos fueron utilizados en proyectos de puentes reales por la empresa Sincal con buenos resultados, demostrando la gran utilidad de la metodología y exponiendo sus ventajas y desventajas.

La mayor ventaja de los códigos paramétricos creados es el gran ahorro de tiempo que se logra en la etapa de modelación del puente con el programa de cálculo, que es cercano a un 80% respecto del tiempo original que toma realizar un modelo completo. Junto con esto, la parametrización permite cambiar un valor de medida de cualquier elemento del puente debido a cambios inesperados en el proyecto después de la etapa de revisión. Este cambio de valor se hace directamente en Excel y luego exportando el modelo de Grasshopper en RFem, sin necesidad de desdibujar o rehacer el modelo completo.

La mayor desventaja del código paramétrico es que solo sirve para modelar estructuras de similar tipología con los mismos componentes agregados previamente en el código. Para los puentes que tienen detalles particulares en su estructura, como por ejemplo dos tramos con diferente esviaje o dos cepas de diferente tipo, el código deja de ser completamente funcional. Es por esto que la utilidad del código en concesiones o proyectos de varios puentes similares es claramente mayor que en proyectos singulares. No obstante, en proyectos futuros se pueden ir incorporando nuevas tipologías de manera de abarcar casos mas especiales.

Para la validación de resultados se utilizaron las combinaciones de carga de la norma AASHTO Std 2002, ya que es la norma aún predominante en los proyectos de la dirección de vialidad del MOP, a pesar de la actualización constante al tipo LRFD.

En las tablas de comparación entre los programas de cálculo RFem y SAP2000 existieron muchas similitudes, pero también algunas diferencias. Los porcentajes de diferencia en los valores grandes de momento en pilotes son del orden de 1%, lo que se traduce en obtener diagramas de interacción muy similares en los dos programas y, por ende, la misma armadura requerida. Los resultados en combinaciones sísmicas y análisis modal espectral en el modelo general también cumplen las expectativas arrojando valores de porcentaje cercanos al 3%.

Por otra parte, existen algunos porcentajes de diferencia mayores en algunos momentos en pilotes y en valores de deformaciones máximas. Sin embargo, la mayoría de estas diferencias grandes se dan cuando se comparan valores pequeños o muy pequeños (en el caso de deformaciones), en donde la tolerancia de porcentaje cambia. Por ejemplo, en el caso de la tabla 40, existe un porcentaje de diferencia de 75% pero corresponde a una diferencia real de 0,15 [mm].

Por último, existe un grupo de porcentajes de diferencia altos que no siguen el patrón explicado anteriormente, como por ejemplo en las comparaciones de esfuerzos de momento en elementos placa, en donde el valor máximo es muy similar entre los dos programas, pero el valor mínimo no. Otro ejemplo son las reacciones en las placas de apoyo en estribos en donde se dan diferencias del orden del 25% en reacciones verticales aun incluyendo un refinamiento de mallado.

Es posible que estas diferencias se deban a los diferentes métodos de cálculo o a las definiciones de elementos que usan SAP y RFem, sobre todo en los elementos de rigidez definible

que modelan las placas de apoyo en estribo y cepas, que podrían presentar diferencias en las rigideces axiales y rotacionales.

Usando la información comparativa de este informe es factible el uso del programa RFem, pero no sin antes descubrir, usando futuros estudios, lo que causa las diferencias generales no despreciables generadas en ambos modelos. También debería utilizarse el método de cálculo iterativo en RFem y comparar los nuevos resultados para observar si existen cambios significativos con el método de cálculo directo, utilizado en este trabajo.

A diferencia de los modelos paramétricos, el código generativo con Galápagos no importa datos desde una planilla Excel externa, sino que todos los datos se ingresan con sliders desde el mismo código en Grasshopper, lo que lo hace más difícil de operar. Sin embargo, cumple su objetivo, es decir, optimiza de buena manera la sección de una viga pretensada de acuerdo a solicitudes del puente y de acuerdo a la normativa, ahorrando un porcentaje considerable de materiales.

Si se sigue el ejemplo de la viga optimizada en la figura 117, se ahorran 700 [cm²] aproximadamente en la sección transversal después de optimizarla, lo que se traduce, en una viga de 29 [m] de luz, en un ahorro de 2,03 [m³] de hormigón lo que equivale al 10% de los 20,3 [m³] que se necesitaban en un principio (con una sección de 7000 [cm²]).

El código generativo creado no puede exportar directamente la viga al programa RFem, ya que esto solo es posible con componentes del FEM Toolbox en Grasshopper, los cuales no fueron utilizados. Sin embargo, conociendo la forma de la viga optimizada, se puede agregar manualmente a RFem mediante la biblioteca de vigas por defecto, o mediante módulos adicionales como “Shape Massive”, y de esta manera trabajar conjuntamente con este código y con los modelos paramétricos para crear un modelo total del puente.

Se cumple el objetivo principal del trabajo, presentando las bases de una forma moderna de trabajo como lo es el diseño paramétrico y generativo usando la interoperabilidad entre Rhino (con Grasshopper) y RFem. La parametrización no solo puede usarse, como en este trabajo, en estructuras de puentes, sino que puede expandirse a muchas otras construcciones como lo son edificios, departamentos, casas o diseño industrial.

También los códigos paramétricos y generativos pueden mejorarse incluyendo cada vez más parámetros y más geometrías dependiendo de la estructura en estudio. En el caso de estructuras de puentes pueden agregarse más tipologías de estribos y cepas o más tipologías de vigas longitudinales, como vigas tipo cajón.

En nuestro país esta metodología sigue sin tomar fuerza en las empresas de ingeniería, ya sea por el precio de los programas nuevos o por conservar la metodología que ha funcionado de manera segura y confiable. Sin embargo, se espera que este trabajo, y los que le sigan, ayuden a mostrar las ventajas que ofrece la automatización paramétrica y que en un futuro cercano sea mucho más utilizada en Chile.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cisneros, M. (s.f.). Optimización de estructuras de acero utilizando diseño paramétrico y algoritmos genéticos en un entorno BIM. Escola de Camins, España.
- [2] Ohls, L. (2019). Parametric design process for pile slabs and foundations. Aalto University, Finlandia.
- [3] Viamonte, J. (2015). Diseño de un stand usando técnicas basadas en Smart Geometry y fabricación digital”. Universidad de Zaragoza, España.
- [4] Rodríguez, A. (2015). “Pabellón Paramétrico en Grasshopper”. [En línea]. Obtenido de: <https://www.youtube.com/watch?v=MqDlODqGkZ8>.
- [5] Granberg, A., Wahlstein, J. (2020). Parametric design and optimization of pipe bridges. KHT Royal Institute of Technology, Suecia.
- [6] Loja, J. (2014). Algoritmos genéticos como herramientas en el proceso de diseño generativo. Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.
- [7] Fransoy, P. (2020). “El Diseño Generativo: Ventajas, Aplicaciones y Desafíos”. [En línea]. Obtenido de: <https://www.bloquetech.com/el-diseno-generativo/>.
- [8] McNeel & Associates (s.f.). “Logotipos e Imágenes”. [En línea]. Obtenido de: <https://www.rhino3d.com/es/reseller/graphics/>.
- [9] McNeel Wiki. (s.f.). NURBS surfaces concepts. [En línea]. Obtenido de: <https://wiki.mcneel.com/rhino/nurbssurfaces>.
- [10] McNeel & Associates (s.f.). “Food4Rhino: Apps for Rhino and Grasshopper”. [En línea]. Obtenido de: <https://www.food4rhino.com/es>.
- [11] Bollinger+Grohmann (2020). “Proyecto Pasarela Tondo en Bruselas, Bélgica”. [En línea]. Obtenido de: [https://www.bollinger-grohmann.com/en.projects.tondo-footbridge.html](https://www.bollinger-grohmann.com/en/projects.tondo-footbridge.html).
- [12] Rutten, D. (s.f.). “Galapagos”. [En línea]. Obtenido de: <https://www.grasshopper3d.com/group/galapagos>.
- [13] Rutten, D. (2010). Evolutionary principles applied to problem solving. [En línea]. Obtenido de: <https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>.
- [14] Ovaneso, M. (2019). Integrated design systems. Häme University of Applied Sciences, Finlandia.
- [15] Dlubal Software, Inc. (s.f.). “Dlubal RFem: Software de análisis y dimensionamiento de estructuras”. [En línea]. Obtenido de: <https://www.dlubal.com/es>.
- [16] Loginov, I. (2020). Building information modelling in structural analysis. Häme University of Applied Sciences, Finlandia.
- [17] Sincal Ltda. (2021). Memoria de cálculo puente Cancura. Chile.
- [18] Claros, R., Meruvia, P. (2004). Apoyo didáctico en la enseñanza-aprendizaje de la asignatura de puentes. Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.

- [19] Sincal Ltda. (s.f.). “Proyecto reposición y construcción de puentes y losas en las provincias de Maipo, Talagante, Melipilla, Cordillera y Santiago”. [En línea]. Obtenido de: <https://sincal.cl/proyectos/>.
- [20] González, O. (2017). Evaluación del comportamiento de vigas de hormigón presforzado de puentes de 30 a 40 metros, diseñadas con AASHTO Standard Specification 2002, con la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2014 debido al cambio de carga viva. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.
- [21] Prieto, J., Tipán, R. (2010). Diseño definitivo comparativo del puente de 60 [m] de luz sobre el río Toachi en base a las normas AASHTO estándar y LRFD. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- [22] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2002). AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges 2002. EEUU.
- [23] Dirección de Vialidad, MOP. (2018). Manual de carreteras, Volumen N°3, Capítulo 3.1000, Puentes y Estructuras Afines. Chile.
- [24] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2014. EEUU.
- [25] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2017. EEUU.
- [26] Dirección de Vialidad, MOP. (2016). Nuevas disposiciones para el diseño de vigas prefabricadas. Chile.
- [27] Sincal Ltda. (2021). Memoria de cálculo puente Quepe. Chile.
- [28] Sincal Ltda. (2021). Memoria de cálculo puente Pocoyán. Chile.
- [29] Sincal Ltda. (2021). Memoria de cálculo paso superior El Cobre. Chile.
- [30] Oñate, W. (s.f.). “Colapso Puente Cancura”. [En línea]. Obtenido de: <https://es.scribd.com/document/423452725/Colapso-Puente-Cancura>.

ANEXOS

ANEXO A. CÓDIGO DE PYTHON PARA CÁLCULO DE EMPUJES EN ESTRIBO

```
"Determinación parámetro S según tipo de suelo"
if TipoS==1:
    S=0.9
if TipoS==2:
    S=1
if TipoS==3:
    S=1.2
if TipoS==4:
    S=1.3

"Determinación parámetro Cs, Ao y Kh según zona sísmica"
if ZS==1:
    A0=0.2
    Kh=S*A0/2
    Cs1=A0/2
if ZS==2:
    A0=0.3
    Kh=S*A0/2
    Cs1=A0/2
if ZS==3:
    A0=0.4
    Kh=S*A0/2
    Cs1=A0/2
Cs=Cs1

"Conversión a radianes"
phi_r=phi*(math.pi)/180
beta_r=beta*(math.pi)/180
i_r=i*(math.pi)/180

"Determinación de delta_f y theta"
delta_f=(phi/2)*(math.pi)/180
theta=math.atan(Cs)

"Determinación de Ko, Ke y Ks"
Ko=1-math.sin(phi_r)
Ke=((1/math.cos(beta_r)*math.cos(beta_r-phi_r))/(math.sqrt(math.cos(beta_r+delta_f))+math.sqrt((
math.sin(phi_r+delta_f)*math.sin(phi_r-i_r))/math.cos(beta_r-i_r))))**2*math.cos(beta_r)
Ks=((math.cos(phi_r-beta_r-theta))**2/(math.cos(theta)*(math.cos(beta_r))**2*math.cos(delta_f+beta_r+theta)
*(1+math.sqrt((math.sin(phi_r+delta_f)*math.sin(phi_r-i_r-theta))/(math.cos(delta_f+beta_r+theta)*math.cos(i_r-beta_r))))
**2))*math.cos(beta_r)

"Parámetros generales"
qE=0.61*gamma
qS=0.61*gamma
sigma_e1=Ke*qE*math.cos(delta_f)
sigma_o1=Ko*qE*math.cos(delta_f)
sigma_s=gamma*(HME+HMF+HF)*(Ks-Ke)*math.cos(delta_f)
sigma_sq=qS*sigma_s/(gamma*(HME+HMF+HF))

"Empuje Estático Activo"
sigma_e1=((Ke*vectZ)*gamma*math.cos(delta_f)+sigma_ei)*g
```

$$\sigma_{e2} = (K_e * (HME + \text{vect}Z)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{ei} * g$$

$$\sigma_{e3} = (K_e * (HME + \text{vect}Z)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{ei} * g$$

$$\sigma_{e4} = (K_e * (HME + HMF + \text{vect}Z)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{ei} * g$$

"Empuje Estático en Reposo"

$$\sigma_{o1} = (K_o * \text{vect}Z) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

$$\sigma_{o2} = (K_o * (HME + \text{vect}Z)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

$$\sigma_{o3} = (K_o * (HME + \text{vect}Z)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

$$\sigma_{o4} = (K_o * (HME + HMF + \text{vect}Z)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

"Empuje Sísmico"

$$\sigma_{s1} = (\gamma * (HME + HMF + HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

$$\sigma_{s2} = (\gamma * (HMF + HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

$$\sigma_{s3} = (\gamma * (HMF + HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

$$\sigma_{s4} = (\gamma * (HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

"Empuje Estático Activo en Ala Izquierda"

$$\sigma_{e1A1} = (K_e * (zE + HF/2 - (HA_{a1} + HF/2))) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{ei} * g$$

$$\sigma_{e2A1} = (K_e * (zE)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{ei} * g$$

"Empuje Estático en Reposo en Ala Izquierda"

$$\sigma_{o1A1} = (K_o * (zE + HF/2 - (HA_{a1} + HF/2))) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

$$\sigma_{o2A1} = (K_o * (zE)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

"Empuje Sísmico en Ala Izquierda"

$$\sigma_{s1A1} = (\gamma * (HA_{a1} + HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

$$\sigma_{s2A1} = (\gamma * (HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

"Empuje Estático Activo en Ala Derecha"

$$\sigma_{e1A2} = (K_e * (zE + HF/2 - (HA_{a2} + HF/2))) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{ei} * g$$

$$\sigma_{e2A2} = (K_e * (zE)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{ei} * g$$

"Empuje Estático en Reposo en Ala Derecha"

$$\sigma_{o1A2} = (K_o * (zE + HF/2 - (HA_{a2} + HF/2))) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

$$\sigma_{o2A2} = (K_o * (zE)) * \gamma * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{oi} * g$$

"Empuje Sísmico en Ala Derecha"

$$\sigma_{s1A2} = (\gamma * (HA_{a2} + HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

$$\sigma_{s2A2} = (\gamma * (HF/2)) * (K_s - K_e) * \mathbf{cos}(\delta f) + \sigma_{sq} * g$$

"Cargas constantes"

$$B_{Rell} = BM - eA * 2$$

$$P_{PRell} = \gamma * HM * g$$

$$S_{isRellM} = C_s * \gamma * LZ * g$$

$$S_{isRellAla} = C_s * \gamma * B_{Rell} * g / 2$$

ANEXO B. INFORMACIÓN Y PARÁMETROS IMPORTANTES DE PROYECTOS DE PUENTES EJEMPLIFICADOS.

PUENTE QUEPE

UBICACIÓN: A partir del Dm 12.180,00 de la Ruta S-51, Provincia de Cautín, IX Región de la Araucanía, Chile.

DATOS GENERALES: Esta obra corresponde a un puente para tránsito normal de carretera. Tiene una longitud total de 140,0 [m] en cuatro tramos, simplemente apoyados. Se consideran losetas de continuidad en ciertos tramos específicos. El puente tiene un esviaje de 14,0° con respecto al eje transversal del mismo. [27]

La superestructura tiene un pavimento asfáltico que presenta un espesor de 5 [cm], el cual considera un bombeo transversal doble de 2.5%. Se tiene además una losa de hormigón armado de 22 [cm] de espesor la cual se apoya en cinco vigas de hormigón pretensadas. El ancho total del tablero transversalmente es de 15,4 [m], que incluye una calzada de 11,0 [m] y dos pasillos de 1,67 [m]. En dicho ancho, se tienen dos barreras tipo F alta sin pasamanos y dos barandas metálicas peatonales. [27]

PUENTE POCOYÁN

UBICACIÓN: A partir del Dm 1.999,87 de la Ruta S-648, Provincia de Cautín, IX Región de la Araucanía, Chile.

DATOS GENERALES: Esta obra corresponde a un puente para tránsito normal de carretera. Tiene una longitud total de 223,27 [m] en siete tramos, simplemente apoyados. Se consideran losetas de continuidad en ciertos tramos específicos. El puente no presenta esviaje. [28]

La superestructura tiene un pavimento asfáltico que presenta un espesor de 5 cm, el cual considera un bombeo transversal doble de 2.5%. Se tiene además una losa de hormigón armado de 21 [cm] de espesor la cual se apoya en cinco vigas de acero. El ancho total típico del tablero transversalmente es de 15,06 [m], que incluye una calzada de 9,0 [m] y dos pasillos de 2,5 [m]. En dicho ancho se tienen dos barreras tipo F alta sin pasamanos y dos barandas metálicas peatonales. [28]

PASO SUPERIOR EL COBRE

UBICACIÓN: A partir del Dm 302,62 de la Ruta 5, Provincia de Cachapoal, VI Región de O'Higgins, Chile.

DATOS GENERALES: Esta obra corresponde a un paso superior de carretera. Tiene una longitud total de 35,27 [m] en dos tramos, simplemente apoyados. Se consideran losetas de continuidad en

ciertos tramos específicos. [29] Presenta un esviaje de $6,0^\circ$ con respecto al eje transversal del mismo.

La superestructura tiene un pavimento de hormigón que presenta un espesor de 5 [cm], el cual considera un bombeo transversal doble de 2.5%. Se tiene además una losa de hormigón armado de 21 [cm] de espesor la cual se apoya en diez vigas de hormigón pretensado. El ancho total del tablero transversalmente es de 28,72 [m], que incluye una calzada de 25 [m]. En dicho ancho, se tienen dos barreras tipo F alta sin pasamanos. [29]

PUENTE CANCURA

UBICACIÓN: A partir del Dm 24.600,00 de la Ruta U-55-V, Provincia de Osorno, X Región de Los Lagos, Chile.

DATOS GENERALES: Esta obra corresponde a un puente para tránsito normal de carretera. Tiene una longitud total de 115,45 m en tres tramos, simplemente apoyados. Se consideran losetas de continuidad en ciertos tramos específicos. El puente tiene esviaje de $23,69^\circ$ con respecto al eje transversal del mismo. [17]

La superestructura tiene un pavimento asfáltico que presenta un espesor de 5cm, el cual considera un bombeo transversal doble de 2.5%. Se tiene además una losa de hormigón armado de 21 cm de espesor la cual se apoya en cinco vigas de acero. El ancho total típico del tablero transversalmente es de 14,06 m, que incluye una calzada de 8,0 m y dos pasillos de 2,5 m. En dicho ancho se tienen dos barreras tipo F alta sin pasamanos y dos barandas metálicas peatonales. [17]

COLAPSO EN 2018: En junio de 2018 la infraestructura del puente Cancura se encontraba en trabajos de mantención, en donde a pesar de la reparación, el puente seguía en funcionamiento. Luego de dos semanas de labores de mantención, exactamente el 23 de junio del 2018, la estructura colapsa provocando que un segmento del puente cayera a las aguas del río Rahue. Este evento fue la causa del triste fallecimiento de Germán Mancilla, ingeniero agrícola de 24 años, además de otros seis lesionados [30].

La falla se le atribuye a una socavación en las cepas, en donde se socava un sector más que otro, generando una inclinación en la fundación, lo que produce a su vez, una menor cantidad de apoyo de los tableros [30]. Se proyecta el inicio de obras del nuevo puente Cancura a fines del primer semestre de 2022.

PARÁMETROS IMPORTANTES

A continuación, se presentan distintas tablas que contienen la mayor parte de los parámetros utilizados para los modelos de estribo y generales de cada uno de los puentes ejemplificados a lo largo del trabajo.

Tabla 40. Parámetros generales de puentes utilizados.

| GENERAL | QUEPE | POCOYÁN | EL COBRE | CANCURA |
|-------------------------------|--------------|---------|--------------|-------------|
| Nº de vigas [] | 5 | 5 | 10 | 5 |
| Separación entre vigas [mm] | 3300 | 3100 | 2950 | 3000 |
| Perfil sección viga [] | Pretensada I | Acero I | Pretensada I | Acero I |
| Largo de viga [mm] | 34740 | 31590 | 19020/15670 | 39680/34710 |
| Número de tramos [] | 4 | 7 | 2 | 3 |
| Espesor losa [mm] | 220 | 210 | 210 | 220 |
| Ancho calzada izquierda [mm] | 5500 | 4500 | 14000 | 4000 |
| Ancho calzada derecha [mm] | 5500 | 4500 | 14000 | 4000 |
| Ancho pasillo izquierdo [mm] | 1840 | 2670 | - | 3030 |
| Ancho pasillo derecho [mm] | 1840 | 2670 | - | 3030 |
| Peralte calzada izquierda [%] | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Peralte calzada derecha [%] | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Peralte pasillo izquierdo [%] | 1,0 | 1,0 | - | 1,5 |
| Peralte pasillo derecho [%] | 1,0 | 1,0 | - | 1,5 |
| Angulo esviaje [°] | 14 | 0 | 6 | 23,69 |
| Pendiente longitudinal [%] | 0 | 4,604 | 0 | 0 |

Tabla 41. Parámetros del estribo sur de puentes utilizados.

| ESTRIBO | QUEPE | POCOYÁN | EL COBRE | CANCURA |
|--|-------|---------|----------|---------|
| Largo ala estribo sur [mm] | 4300 | 2800 | 3750 | 3900 |
| Espesor ala estribo sur [mm] | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Espesor muro espaldar [mm] | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Altura muro espaldar [mm] | 1685 | 2230 | 1269 | 2360 |
| Espesor muro frontal [mm] | 1200 | 1500 | 1300 | 1500 |
| Altura muro frontal [mm] | 4315 | 5770 | 5781 | 5350 |
| Ancho Aleta [mm] | - | 3870 | - | 2500 |
| Altura 1 Aleta [mm] | - | 2100 | - | 2000 |
| Altura 2 Aleta [mm] | - | 2000 | - | 2000 |
| Ancho fundación (Transv) [mm] | 17000 | 16000 | 28865 | 20810 |
| Largo fundación (Long) [mm] | 7000 | 7000 | 8000 | 6600 |
| Espesor fundación [mm] | 1500 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Nº de pilotes en dirección long [] | - | 2 | - | 2 |
| Nº de pilotes en dirección transv [] | - | 4 | - | 5 |
| Nº total pilotes [] | - | 8 | - | 10 |
| Separación pilotes dirección long [mm] | - | 5000 | - | 4120 |
| Separación pilotes dirección transv [mm] | - | 4500 | - | 4370 |
| Radio pilote [mm] | - | 750 | - | 750 |
| Largo pilotes [mm] | - | 20000 | - | 26000 |
| Largo pilotes no enterrados [mm] | - | 2000 | - | 4500 |
| Junta dilatación [mm] | 220 | 270 | 145 | 300 |

Tabla 42. Parámetros de cepas de puentes utilizados.

| CEPA | QUEPE | POCOYÁN | EL COBRE | CANCURA |
|--|--------------|----------------------|----------------------|----------------|
| Número de cepas [] | 3 | 6 | 1 | 2 |
| Ancho viga cabezal [mm] | 2800 | 2400 | 2200 | 2500 |
| Altura viga cabezal [mm] | 1680 | 1500 | 1860 | 1500 |
| Tipo de cepa [] | Pila/Pilote | Columna/Dado /Pilote | Pila/Pilote con dado | Pila/Pilote |
| N° de pila-pilotes // N° columnas [] | 4 | 3 | 10 | 4 |
| Separación pila/pilote // Separación columnas [mm] | 4000 | 5500 | 3000 | 4000 |
| Radio pila/pilote // Radio columnas [mm] | 750 | 1000 | 500 | 750 |
| Largo pila/pilote // Largo columnas [m] (por cepa) | 36/36/26 | 14,5/14/14/14/12/8 | 5 | 27/37 |
| Largo pila no enterrada [m] (por cepa) | 9/9/9 | - | - | 14/17 |
| Ancho fundación (Transv) [mm] | - | 16000 | 30410 | - |
| Largo fundación (Long) [mm] | - | 7000 | 5000 | - |
| Espesor fundación [mm] | - | 2000 | 1500 | - |
| N° de pilotes bajo dado en dirección long | - | 2 | - | - |
| N° de pilotes bajo dado en dirección transv | - | 4 | - | - |
| N° total pilotes bajo dado | - | 8 | - | - |
| Separación pilotes dirección long [mm] | - | 4500 | - | - |
| Separación pilotes dirección transv [mm] | - | 4500 | - | - |
| Radio pilotes bajo dado [mm] | - | 750 | - | - |
| Largo pilotes bajo dado [m] (por cepa) | - | 22/22/22/22/22/22 | - | - |
| Largo pilote no enterrado [m] (por cepa) | - | 5/4/4/3/4/4 | - | - |
| Separación resortes [mm] | 1000 | 1000 | - | 1000 |
| Ancho Loseta [mm] | 260 | 270 | 290 | 290 |

Tabla 43. Tipos de hormigón y acero en los puentes utilizados.

| MATERIALES | QUEPE | POCOYÁN | EL COBRE | CANCURA |
|-------------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|
| Hormigón 1 | G25 | G25 | G25 | G25 |
| Hormigón 2 | G30 | - | G50 | - |
| Hormigón 3 | G45 | - | - | - |
| Acero | - | A572M Gr50 | - | A572M Gr50 |

Tabla 44. Parámetros de suelo de relleno de puentes utilizados.

| DATOS DE SUELO DE RELLENO | QUEPE | POCOYÁN | EL COBRE | CANCURA |
|------------------------------|-------|---------|----------|---------|
| ϕ [°] | 37 | 37 | 37 | 37 |
| δf [°] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| i [°] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| β [°] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| γ [T/m ³] | 2 | 2 | 1,9 | 2 |
| C [T/m ²] | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 45. Parámetros para generación de espectro sísmico en puentes utilizados.

| DATOS PARA ESPECTRO SÍSMICO | QUEPE | POCOYÁN | EL COBRE | CANCURA |
|-----------------------------|-------|---------|----------|---------|
| Tipo de Suelo [] | III | III | II | III |
| Zona Sísmica [] | 2 | 3 | 2 | 2 |
| A_0 [g] | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| I [] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| K_1 [] | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S [] | 1,2 | 1,2 | 1 | 1,2 |
| K_2 [] | 1,182 | 1,182 | 0,672 | 1,182 |
| T_1 [] | 0,7 | 0,7 | 0,3 | 0,7 |

ANEXO C. CÓDIGOS DE PYTHON PARA CÁLCULOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y CÁLCULOS DE CARGAS VIVAS, CARGAS MUERTAS Y MOMENTOS.

"Calculo propiedades mecánicas para sección bruta"

```

a1=b4*d7
a2=(b1-b4)/2*d1*2
a3=b2*d2
a4=b3*d2*2
a5=b3*d3
a6=b6*d4
a7=d5*b6*2
a8=b5*d5
a9=(b7-b4)/2*d6*2
yg1=d7/2
yg2=d7-d1/2
yg3=d7-d1-d2/3
yg4=d7-d1-d2/2
yg5=d7-d1-d2-d3/3
yg6=d6+d5+d4/3
yg7=d6+d5/2
yg8=d6+d5/3
yg9=d6/2
ATot=a1+a2+a3+a4+a5+a6+a7+a8+a9
Yg=(yg1*a1+yg2*a2+yg3*a3+yg4*a4+yg5*a5+yg6*a6+yg7*a7+yg8*a8+yg9*a9)/ATot
i1=(b4*d7**3)/12
i2=((b1-b4)/2*(d1**3)*2)/12
i3=(b2*(d2**3)*2)/36
i4=(b3*(d2**3)*2)/12
i5=(b3*(d3**3)*2)/36
i6=(b6*(d4**3)*2)/36
i7=(b6*(d5**3)*2)/12
i8=(b5*(d5**3)*2)/36
i9=((b7-b4)/2*(d6**3)*2)/12
iy1=i1+a1*(Yg-yg1)**2
iy2=i2+a2*(Yg-yg2)**2
iy3=i3+a3*(Yg-yg3)**2
iy4=i4+a4*(Yg-yg4)**2
iy5=i5+a5*(Yg-yg5)**2
iy6=i6+a6*(Yg-yg6)**2
iy7=i7+a7*(Yg-yg7)**2
iy8=i8+a8*(Yg-yg8)**2
iy9=i9+a9*(Yg-yg9)**2
ITot=iy1+iy2+iy3+iy4+iy5+iy6+iy7+iy8+iy9
Aw=b4*d7
Ws=ITot/(d7-Yg)
Wi=ITot/Yg

```

"Calculo propiedades mecánicas para sección con cables"

```

nmenos1=Es/Eci-1
Ag=Ah+As*nmenos1
Ygg=(Ygh*Ah+cg*As*nmenos1)/(Ah+As*nmenos1)
Ig=Ih+As*nmenos1*(Ygh-cg)**2

```

$$W_{sg} = I_g / (d_7 - Y_{gg})$$

$$W_{ig} = I_g / Y_{gg}$$

"Calculo propiedades mecánicas para sección con losa"

$$A_{losa} = A_g + e_{losa} * B_{colab} * n$$

$$Y_{glosa} = (Y_{gg} * A_g + B_{colab} * e_{losa} * n * (d_7 + e_{losa} / 2)) / A_{losa}$$

$$I_{losa} = I_g + A_g * (Y_{gg} - Y_{glosa})^2 + B_{colab} * e_{losa}^3 / 12 * n + B_{colab} * e_{losa} * n * (d_7 + e_{losa} / 2 - Y_{glosa})^2$$

$$W_{sl} = I_{losa} / (e_{losa} + d_7 - Y_{glosa})$$

$$W_{sc} = I_{losa} / (d_7 - Y_{glosa})$$

$$W_{ic} = I_{losa} / Y_{glosa}$$

"Calculo sección con acero pasivo"

$$A_{sp} = A_b + (A_{sT} + A_{sC}) * n$$

$$Y_{gp} = (A_b * Y_{gb} + A_{sT} * n * Y_{gT} + A_{sC} * n * Y_{gC}) / A_{sp}$$

$$I_p = I_b + A_b * (Y_{gb} - Y_{gp})^2 + A_{sT} * (Y_{gT} - Y_{gp})^2 + A_{sC} * (Y_{gC} - Y_{gp})^2$$

$$I_{acpr} = I_p + A_{sp} * (Y_{gp} - Y_{gg})^2 + A_s * (CG - Y_{gg})^2$$

"Asentamiento de cuñas"

$$dc = D / 10 * E_s * A_s / L_a / 100 / 1000$$

"Acortamiento banco"

$$db = 0.5 * (P_o - dc) / (E_{ci} * a_b) * E_s * A_s$$

"Iteración pérdidas instantáneas"

$$cont = 1$$

$$P_i = 0$$

while cont <= 40:

if cont > 40:

break

else:

$$f_{cir} = P_i * 1000 * (1 / A_g + e_{cable}^2 / I_g) - M_{viga} * e_{cable} / I_g$$

$$ES = E_s / E_{ci} * f_{cir} * A_s / 1000$$

$$PITot = dc + db + ES$$

$$P_{i1} = P_o - PITot$$

$$P_i = P_{i1}$$

$$cont += 1$$

$$R_{iinst} = P_i / P_o$$

"Creep"

$$SH = (17000 * 0.07 - 150 * 0.07 * h_{amb}) * A_s / 1000$$

"Fluencia lenta"

$$f_{cds} = (M_{losa} + M_{trav}) * e_{cable} / I_g + (M_{pav} + M_{barr}) * e_{cable} / I_{losa}$$

$$CRc = (12 * f_{cir} - 7 * f_{cds}) * A_s / 1000$$

"Relajacion del acero"

if bajaR == 1:

$$f_{CR} = 1$$

else:

$$f_{CR} = 4$$

$$CRs = (5000 * 0.07 * A_s / 1000 - 0.1 * ES - 0.05 * (SH + CRc)) * f_{CR}$$

$$PDTot = SH + CRc + CRs$$

$$Pse = P_o - PITot - PDTot$$

$$R_{idif} = Pse / P_o$$

"Cálculo Momentos"

$$pesov = \gamma * A_{brut}$$

$$M_{viga} = pesov * (L_c^2) / 8$$

$$pesol = \max(\gamma * s * e_{losap}, \gamma * B_{losa} / n_{viga} * e_{losap})$$

$$M_{losa} = pesol * (L_c^2) / 8$$

$$pav = \gamma * B_{calz} * e_{calz} / n_{viga}$$

$$M_{pav} = pav * (L_c^2) / 8$$

```

Mbarr=barr*(Lc**2)/8
pas=γ*Apas/nviga
Mpas=pas*(Lc**2)/8
Mtrav=trav*(Lc)/400*100000
"Cálculo Cargas Vivas"
I=min(50/(Lc/30.5+125),0.3)+1
if nvias<=2:
    fR=1
else:
    if nvias==3:
        fR=0.9
    else:
        fR=0.75
if fDp==0:
    MqL=qL*Lc**2/8
else:
    MqL=qL*Lc**2/8*fDp
if 0<=L2/L1 and L2/L1<=0.333 and L1>=28:
    Mvc1=72*L2*((L1-L2)-9.33)/L1
else:
    if 0.333<L2/L1 and L2/L1<=0.5 and L1>=28:
        Mvc1=72*L2*((L1-L2)-4.67)/L1-112
    else:
        Mvc1=-1
Mvc=Mvc1*0.13825*100000*1/2
Msc=I*fM*fR*fD*Mvc
ML=Msc+MqL

```

ANEXO D. CÓDIGOS DE PYTHON PARA VERIFICACIÓN DE TENSIONES Y MOMENTOS ADMISIBLES DE VIGA.

"Al pretensionar"

$$T_{prsup} = \frac{\pi \cdot 1000}{A_g - e_{cable} \cdot \pi \cdot 1000} \cdot W_{sg}$$

$$T_{prin} = \frac{\pi \cdot 1000}{A_g + e_{cable} \cdot \pi \cdot 1000} \cdot W_{ig}$$

"Debido a PP de viga pretensada"

$$T_{ppsups} = \frac{M_{viga}}{W_s}$$

$$T_{ppin} = -\frac{M_{viga}}{W_i}$$

"Primera Etapa"

$$T1_{sup} = T_{prsup} + T_{ppsups}$$

$$T1_{inf} = T_{prin} + T_{ppin}$$

"Tensión acero"

$$CompP = T_{pa} \cdot f_{pu} \cdot A_s$$

$$T_{ac} = T_{pa} \cdot f_{pu} \cdot R_i + \frac{CompP + M_{viga}}{I_g} \cdot (Y_{gg} - lin1c)$$

"Tensión debido a cables pretensados"

$$T_{prsup} = \frac{P_{se} \cdot 1000}{A_g - e_{cable} \cdot W_{sg}} \cdot P_{se} \cdot 1000$$

$$T_{prin} = \frac{P_{se} \cdot 1000}{A_g + e_{cable} \cdot W_{ig}} \cdot P_{se} \cdot 1000$$

"Tensión debido a pp losa y travesaño"

$$T_{ppsups} = \frac{(M_{losa} + M_{trav})}{W_{sg}}$$

$$T_{ppin} = -\frac{(M_{losa} + M_{trav})}{W_{ig}}$$

"Tensiones Totales"

$$T2_{sup} = T_{prsup} + T_{ppsups} + T_{ppsups1}$$

$$T2_{inf} = T_{prin} + T_{ppin} + T_{ppin1}$$

"Debido al pp de las terminaciones"

$$T_{ppsups1} = \frac{(M_{pav} + M_{barr} + M_{pas})}{W_{s1}}$$

$$T_{ppsupsv} = \frac{(M_{pav} + M_{barr} + M_{pas})}{W_{sc}}$$

$$T_{ppin} = -\frac{(M_{pav} + M_{barr} + M_{pas})}{W_{ic}}$$

"Tensiones Totales"

$$T3_{sup1} = T_{ppsups1}$$

$$T3_{supv} = T_{ppsupsv} + T_{ppsups1} + T_{ppsups2} + T_{prsup}$$

$$T3_{in} = T_{ppin} + T_{ppin1} + T_{ppin2} + T_{prin}$$

"Tensiones debido a camión AASHTO Std 2002"

$$T_{csup1} = \frac{ML}{W_{s1}}$$

$$T_{csupv} = \frac{ML}{W_{sc}}$$

$$T_{cin} = -\frac{ML}{W_{ic}}$$

"Tensiones Totales"

$$TES_{sup1} = T_{csup1} + T3_{sup1}$$

$$TES_{supv} = T_{csupv} + T3_{supv}$$

$$TES_{in} = T_{cin} + T3_{in}$$

"Tensión acero"

$$T_{ac} = T_{pa} \cdot f_{pu} + \frac{(-MPT + M_{viga} + M_{losa})}{I_{pret}} \cdot (Y_{gg} - lin1c) + \frac{(M_{pav} + ML)}{I_{losa}} \cdot (Y_{gl} - lin1c)$$

"Cálculo Mu"

$$M_u = 1.3 \cdot (M_{viga} + M_{losa} + M_{pav} + M_{barr} + M_{pas} + M_{trav} + 1.67 \cdot M_{sc})$$

"Cálculo Mcr"

$$M_{cr} = (f_r + f_{pe}) \cdot W_{ic} - (M_{losa} + M_{pav} + M_{barr} + M_{pas} + M_{trav}) \cdot \left(\frac{W_{ic}}{W_i - 1} \right)$$

"Cálculo ϕM_n "

if $EN < EN_f$:

$$\phi M_n = 0.95 \cdot (A_s \cdot f_{su} \cdot d \cdot (1 - 0.6 \cdot (\rho \cdot f_{su} / f_c + D \cdot \rho_s \cdot f_y / f_c)) + A_s \cdot f_y \cdot dt \cdot (1 - 0.6 \cdot (1/D \cdot \rho \cdot f_{su} / f_c + \rho_s \cdot f_y / f_c)))$$

else:

$$\phi M_n = 0.95 \cdot (A_s \cdot f_{su} \cdot d \cdot (1 - 0.6 \cdot (A_s \cdot f_{su} / (b \cdot p \cdot d \cdot f_{cl}))) + A_s \cdot f_y \cdot (dt - d) + 0.85 \cdot f_{cl} \cdot (b - b_p) \cdot e_{losa} \cdot (d - 0.5 \cdot e_{losa}))$$

"Cálculo máximo acero pretensado "

$Max1 = \rho * f_{su} / f_c + \rho_s * f_y / f_c * D$

$Max2 = 0.36 * \beta$

"Tensiones Admisibles"

"En transferencia"

$\sigma_c = 0.6 * f_{ci}$

$\sigma_t = -\min(200, 0.5 * 0.8 * \text{math.sqrt}(f_{ci}))$

if bajaR==1:

$\text{tracAP} = 0.75 * f_{pu}$

else:

$\text{tracAP} = 0.7 * f_{pu}$

"En servicio"

$\sigma_{c\text{consc}} = 0.6 * f_c$

$\sigma_{c\text{sinsc}} = 0.4 * f_c$

$\text{losainsit} = 0.4 * f_{cl}$

$\text{tracH} = -0.5 * 1.6 * \text{math.sqrt}(f_c)$

$\sigma_{\text{tap}} = 0.8 * f_{pu}$

ANEXO E. ESTADO TENSIONAL EN EL EJEMPLO DE VIGA PRETENSADA OPTIMIZADA CON GRASSHOPPER.

A continuación, se presentan los estados tensionales del ejemplo de optimización de una viga pretensada expuesta en el capítulo 5 usando la metodología generativa. La iteración inicial presenta una sección de área de 7001.5 [cm²] y la final una sección de 6274 [cm²]. Cabe destacar que el tipo de análisis de la viga fue de tipo interior con cables de acero para pretensado de baja relajación. Además, se dejaron constantes el número y espaciamiento de cables en la viga.

Tabla 46. Medidas de la sección de la viga pretensada

| MEDIDA [mm] | IT. 0 | IT. F |
|-------------|-------|-------|
| b1 | 150 | 120 |
| b2 | 51 | 36 |
| b3 | 15 | 15 |
| b4 | 18 | 18 |
| b5 | 31 | 23,5 |
| b6 | 7,5 | 7,5 |
| b7 | 95 | 80 |
| d1 | 7 | 7 |
| d2 | 4 | 4 |
| d3 | 20 | 20 |
| d4 | 15 | 15 |
| d5 | 15 | 15 |
| d6 | 23 | 23 |
| d7 | 160 | 160 |

Tabla 47. Comparación de áreas de sección en la viga pretensada.

| VALOR [cm ²] | IT. 0 | IT. F | % REDUCCIÓN |
|--------------------------|--------|-------|-------------|
| Área Sección | 7001,5 | 6274 | 10,39% |

Tabla 48. Estado tensional de viga pretensada en 1ra etapa.

| VALOR [Kgf/cm ²] | IT. 0 | IT. F |
|------------------------------|---------|---------|
| Superior | 14,36 | 5,54 |
| Superior Adm | 270 | 270 |
| % Utilización Sup | 5,4% | 2,1% |
| Inferior | 76,15 | 202,8 |
| Inferior Adm | 270 | 270 |
| % Utilización Inf | 65,3% | 75,1% |
| Tensión Acero | 13065,2 | 12945,1 |
| Tensión Acero Adm | 14237,3 | 14237,3 |
| % Utilización T.Ac. | 91,8% | 90,9% |

Tabla 49. Estado tensional de viga pretensada en 2da etapa.

| VALOR [Kgf/cm ²] | IT. 0 | IT. F |
|------------------------------|-------|--------|
| Superior | 70,75 | 71,18 |
| Superior Adm | 200 | 200 |
| % Utilización Sup | 35,4% | 35,6% |
| Inferior | 98,37 | 109,79 |
| Inferior Adm | 200 | 200 |
| % Utilización Inf | 49,2% | 54,9% |

Tabla 50. Estado tensional de viga pretensada en 3ra etapa.

| VALOR [Kgf/cm ²] | IT. 0 | IT. F |
|------------------------------|-------|-------|
| Superior Losa | 8,45 | 8,96 |
| Superior Losa Adm | 100 | 100 |
| % Util Sup Losa | 8,5% | 9,0% |
| Superior Viga | 76,97 | 77,69 |
| Superior Viga Adm | 200 | 200 |
| % Util Sup Viga | 38,5% | 38,8% |
| Inferior Viga | 86,77 | 96,72 |
| Inferior Viga Adm | 200 | 200 |
| % Util Inf Viga | 43,4% | 48,4% |

Tabla 51. Estado tensional de viga pretensada en 4ta etapa.

| VALOR [Kgf/cm ²] | IT. 0 | IT. F |
|------------------------------|---------|---------|
| Superior Losa | 40,8 | 43,28 |
| Superior Losa Adm | 100 | 100 |
| % Util Sup Losa | 40,9% | 43,3% |
| Superior Viga | 100,79 | 102,63 |
| Superior Viga Adm | 300 | 300 |
| % Util Sup Viga | 33,6% | 34,2% |
| Inferior Viga | 42,31 | 46,64 |
| Inferior Viga Adm | 300 | 300 |
| % Util Inf Viga | 14,2% | 15,6% |
| Tensión Acero | 14239,1 | 14230,9 |
| Tensión Acero Adm | 15186,4 | 15186,4 |
| % Utilización T.Ac. | 93,8% | 93,7% |