

Maestría en Ingeniería Civil

**Desarrollo de una herramienta computacional para
conceptualización y elaboración de diagramas momento
curvatura en secciones de concreto reforzado**

Kenny Martín Sánchez Becerra

Bogotá, D.C., 13 de Febrero de 2018



**Desarrollo de una herramienta computacional para
conceptualización y elaboración de diagramas momento
curvatura en secciones de concreto reforzado**

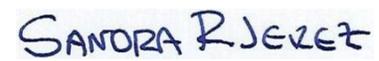
**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Estructuras**

**Sandra Rocío Jerez Barbosa
Director**

Bogotá, D.C., 13 de Febrero de 2018



La tesis de maestría titulada “Desarrollo de una herramienta computacional para conceptualización y elaboración de diagramas momento curvatura en secciones de concreto reforzado”, presentada por Kenny Martín Sánchez Becerra, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.



Director de la tesis

Sandra Rocío Jerez Barbosa

Jurado

Sandra Patricia Aguilar Cardona

Jurado

Héctor Fabio Cadavid Rengifo

Bogotá, D.C., 13 de febrero de 2018

Resumen

En los últimos tiempos la ingeniería estructural ha visto la necesidad de incursionar de forma activa en el estudio del comportamiento inelástico de las estructuras, esto, debido a que es la forma en que cualquier estructura convencional, analizada y diseñada bajo los códigos de diseño y construcción actuales, se comportará ante los desplazamientos inducidos por los movimientos sísmicos del terreno.

El estudio de la inelasticidad en las estructuras se realiza generalmente por medio de modelos matemáticos de tipo no lineal, en los cuales la plasticidad de toda la estructura se concentra en puntos específicos (rótulas plásticas) los cuales dependen de la configuración de refuerzo y concreto que posean.

Los diagramas momento curvatura se encargan de caracterizar las rótulas plásticas prediciendo la curvatura máxima, el momento máximo y el mecanismo de falla de la sección transversal, además, son parte esencial de un análisis no lineal y se relacionan directamente con la precisión de los resultados del mismo.

La herramienta computacional Momento_Curvatura V 1.0 nace como respuesta a la problemática de buscar alternativas para la conceptualización y construcción de los diagramas momento curvatura. Es un software que permite la conceptualización de los diagramas momento curvatura en secciones convencionales de concreto reforzado mediante un análisis paso a paso. Además, permite la construcción de grandes volúmenes de diagramas de manera rápida, sencilla y confiable mediante el análisis por elementos finitos.

Con el fin de obtener un alto nivel de confiabilidad, la herramienta se sometió a una fase de verificación y validación logrando depurar el mayor número de errores en la programación de la misma. Para la verificación se realizó la comparación de resultados con respecto al software Xtract, encontrando que las diferencias no son significativas. Simultáneamente fue objeto de pruebas con estudiantes de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito con el fin de tener el mayor nivel de versatilidad posible para con el usuario.

Se logró transmitir a la comunidad académica una herramienta computacional que permite la conceptualización y materialización de diagramas momento curvatura para secciones convencionales de concreto reforzado, los cuales, son base fundamental para el acercamiento al comportamiento real de una estructura que se ve sometida a los efectos que genera un evento sísmico, claro está, a través de modelos matemáticos de tipo no lineal.

Advertencia:

No se garantiza que la herramienta Momento Curvatura v1.0 se encuentre acorde y/o cumpla con los requisitos de cualquier norma o reglamento en particular. **Este es un software de uso académico.** Al usar la herramienta para otro tipo de uso, el usuario se hace responsable de los datos de entrada y salida y del uso que haga de ellos. El autor rechaza cualquier tipo de responsabilidad directa o indirecta resultante del uso de la herramienta Momento Curvatura v1.0.

Índice general

Resumen	4
Índice general	6
Índice de figuras	8
Introducción	11
Capítulo I: Problema	13
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo general:	13
1.2.2 Objetivos específicos:	14
1.3 Justificación:	14
1.3.1 Método manual	15
1.3.2 Método asistido por computador	15
Capítulo II: Marco Teórico	17
2.1 Antecedentes	17
2.1.1 Programas de análisis	17
2.2 Descripción de materiales y sus modelos constitutivos	18
2.2.1 Concreto confinado e inconfinado	18
2.2.2 Acero de refuerzo	27
2.2.3 Concreto confinado con Fibras FRP	28
Capítulo IV: Desarrollo de la herramienta	33
3.1 Metodología:	33
3.1.1 Módulo de conceptualización	33
3.1.2 Módulo de ejecución	56
Capítulo V: Verificación y validación de la herramienta	65
4.1 Verificación de usabilidad de la herramienta	65
4.2 Banco de pruebas	65
4.3 Fase de verificación y validación	66
Capítulo VI: Conclusiones Y Recomendaciones	71
Capítulo VII: Referencias Y Bibliografía	74

Anexos	77
A. Etapa de verificación y validación	77
Columnas cuadradas	77
Columnas rectangulares A	83
Columnas rectangulares B	89
Columnas circulares	95
Vigas	101
B. Secciones banco de pruebas	107
Viga 1	107
Viga 2	109
Columna 1	111
Columna 2	113
Columna circular 1	115
Columna circular 2	117
C. Encuesta	119
D. Manual de instalación momento curvatura	121

Índice de figuras

Figura 1. Modelo de Kent y Park (1971).	20
Figura 2. Sección de una viga típica, deformaciones y esfuerzos.	21
Figura 3. Modelo de Mander.	24
Figura 4. Esfuerzos laterales de confinamiento en columna circular.	25
Figura 5. Esfuerzos laterales de confinamiento en columna circular.	26
Figura 6. Nomograma para estimar el factor de confinamiento K.	27
Figura 7. Acción de la fibra FRP en el concreto.	30
Figura 8. Módulo de Conceptualización. Fuente: Elaboración propia	34
Figura 9. Definición del concreto en módulo de conceptualización.	35
Figura 10. Definición del acero en módulo de conceptualización.	36
Figura 11. Paso 1 de 5, módulo de conceptualización.	37
Figura 12. Sección viga, diagrama de deformaciones.	37
Figura 13. Sección viga, sección trasformada.	38
Figura 14. Paso 2 de 5, módulo de conceptualización.	40
Figura 15. Sección de viga, fisurada y trasformada.	41
Figura 16. Paso 3 de 5, módulo de conceptualización.	42
Figura 17. Diagrama de fuerzas según Kent y Park (1971), acero superior en compresión.	43
Figura 18. Diagrama de fuerzas según Kent y Park (1971), acero superior en tracción.	45
Figura 19. Paso 4 de 5, módulo de conceptualización.	47
Figura 20. Diagrama de fuerzas- bloque de compresión, acero superior en compresión.	48
Figura 21. Diagrama de fuerzas- bloque de compresión, acero superior en tracción.	50
Figura 22. Paso 5 de 5, módulo de conceptualización.	52
Figura 23. Diagrama de fuerzas según Mander confinado.	53
Figura 24. Nomograma para encontrar el coeficiente β .	54
Figura 25. Nomograma para encontrar la relación $\alpha \beta$.	54
Figura 26. Ventana principal, módulo de ejecución.	57
Figura 27. Sección viga, módulo de ejecución.	58
Figura 28. Materiales de la sección, módulo de ejecución.	59
Figura 29. Materiales de la sección, definición del concreto confinado.	60
Figura 30. Definición modelo Mander, módulo de ejecución.	61
Figura 31. Definición modelo Lam, Teng et al. (2009, módulo de ejecución.	62
Figura 32. Definición de materiales adicionales con OpenSees.	63
Figura 33. Curva construida, mecanismo de falla.	64
Figura 34. Visualización mecanismo de falla y exportar datos.	64
Figura 35. Banco de pruebas para cualquier sección del módulo de ejecución.	66
Figura 36. Parámetros característicos en la curva momento curvatura.	67
Figura 37. Diferencia en curvatura máxima vs Xtract.	67
Figura 38. Diferencia en momento máximo vs Xtract.	68
Figura 39. Comparación columna circular. Refuerzo convencional vs FRP	69
Figura 40. Comparación columna rectangular A. Refuerzo convencional vs FRP	69
Figura 41. Comparación columna rectangular B. Refuerzo convencional vs FRP	70
Figura 42. Comparación columna cuadrada. Refuerzo convencional vs FRP	70
Figura 43. Columna cuadrada, sección 1.	77
Figura 44. Columna cuadrada, sección 2.	77

Figura 45. Columna cuadrada, sección 3.	78
Figura 46. Columna cuadrada, sección 4.	78
Figura 47. Columna cuadrada, sección 5.	79
Figura 48. Columna cuadrada, sección 6.	79
Figura 49. Columna cuadrada, sección 7.	80
Figura 50. Columna cuadrada, sección 8.	80
Figura 51. Columna cuadrada, sección 9.	81
Figura 52. Columna cuadrada, sección 10.	81
Figura 53. Columna cuadrada, sección 11.	82
Figura 54. Columna cuadrada, sección 12.	82
Figura 55. Columna rectangular A, sección 1.	83
Figura 56. Columna rectangular A, sección 2	83
Figura 57. Columna rectangular A, sección 3	84
Figura 58. Columna rectangular A, sección 4	84
Figura 59. Columna rectangular A, sección 5	85
Figura 60. Columna rectangular A, sección 6	85
Figura 61. Columna rectangular A, sección 7	86
Figura 62. Columna rectangular A, sección 8	86
Figura 63. Columna rectangular A, sección 9	87
Figura 64. Columna rectangular A, sección 10	87
Figura 65. Columna rectangular A, sección 11	88
Figura 66. Columna rectangular A, sección 12	88
Figura 67. Columna rectangular B, sección 1	89
Figura 68. Columna rectangular B, sección 2	89
Figura 69. Columna rectangular B, sección 3	90
Figura 70. Columna rectangular B, sección 4	90
Figura 71. Columna rectangular B, sección 5	91
Figura 72. Columna rectangular B, sección 6	91
Figura 73. Columna rectangular B, sección 7	92
Figura 74. Columna rectangular B, sección 8	92
Figura 75. Columna rectangular B, sección 9	93
Figura 76. Columna rectangular B, sección 10	93
Figura 77. Columna rectangular B, sección 11	94
Figura 78. Columna rectangular B, sección 12	94
Figura 79. Columna circular, sección 1	95
Figura 80. Columna circular, sección 2	95
Figura 81. Columna circular, sección 3	96
Figura 82. Columna circular, sección 4	96
Figura 83. Columna circular, sección 5	97
Figura 84. Columna circular, sección 6	97
Figura 85. Columna circular, sección 7	98
Figura 86. Columna circular, sección 8	98
Figura 87. Columna circular, sección 9	99
Figura 88. Columna circular, sección 10	99
Figura 89. Columna circular, sección 11	100

Figura 90. Columna circular, sección 12	100
Figura 91. Viga, sección 1	101
Figura 92. Viga, sección 2	101
Figura 93. Viga, sección 3	102
Figura 94. Viga, sección 4	102
Figura 95. Viga, sección 5	103
Figura 96. Viga, sección 6	103
Figura 97. Viga, sección 7	104
Figura 98. Viga, sección 8	104
Figura 99. Viga, sección 9	105
Figura 100. Viga, sección 10	105
Figura 101. Viga, sección 11	106
Figura 102. Viga, sección 12	106
Figura 103. Definición de la geometría, sección 1, banco de pruebas	107
Figura 104. Definición de materiales, sección 1, banco de pruebas	107
Figura 105. Definición concreto Mander, sección 1, banco de pruebas	108
Figura 106. Resultados sección 1, banco de pruebas	108
Figura 107. Definición de la geometría, sección 2, banco de pruebas	109
Figura 108. Definición de materiales, sección 2, banco de pruebas	109
Figura 109. Definición concreto Mander, sección 2, banco de pruebas	110
Figura 110. Resultados sección 2, banco de pruebas	110
Figura 111. Definición de la geometría, sección 3, banco de pruebas	111
Figura 112. Definición de materiales, sección 3, banco de pruebas	111
Figura 113. Definición concreto Mander, sección 3, banco de pruebas	112
Figura 114. Resultados sección 3, banco de pruebas	112
Figura 115. Definición de la geometría, sección 4, banco de pruebas	113
Figura 116. Definición de materiales, sección 4, banco de pruebas	113
Figura 117. Definición concreto Mander, sección 4, banco de pruebas	114
Figura 118. Resultados sección 4, banco de pruebas	114
Figura 119. Definición de la geometría, sección 5, banco de pruebas	115
Figura 120. Definición de materiales, sección 5, banco de pruebas	115
Figura 121. Definición concreto Mander, sección 5, banco de pruebas	116
Figura 122. Resultados sección 5, banco de pruebas	116
Figura 123. Definición de la geometría, sección 6, banco de pruebas	117
Figura 124. Definición de materiales, sección 6, banco de pruebas	117
Figura 125. Definición concreto Mander, sección 6, banco de pruebas	118
Figura 126. Resultados sección 6, banco de pruebas	118

Introducción

En diversos reglamentos y códigos de diseño sismo resistente actuales como el American Concrete Institute, ACI-318-14 (ACI, 2015), el Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10 (AIS, 2010), o la norma chilena NCh 433 Of1996 Mod.2012 (INN, 2012), la filosofía de análisis y diseño sísmico de la mayoría de los sistemas estructurales, está orientada particularmente a la protección de la vida; sin embargo, aunque también se pretende proteger el patrimonio, es aceptable un cierto nivel de daño ante el sismo de diseño, el cual va a permitir la disipación de la energía a través de grandes deformaciones en los elementos del sistema estructural (incursión en el rango inelástico de los miembros del sistema estructural). Por esta razón, se hace necesario el estudio del comportamiento inelástico tanto en los sistemas estructurales como en los elementos que los componen, si se quiere tener una aproximación al comportamiento esperado de la estructura e identificar qué elementos requieren mayor atención y detallado.

Un análisis inelástico sobre una estructura requiere de un modelo no lineal en el que se identifiquen claramente los elementos, sus materiales y la forma en la que se representará el comportamiento inelástico de éstos. Existen dos tipos diferentes de modelos matemáticos para representar dicho comportamiento, los de plasticidad distribuida y los de plasticidad concentrada. En los de plasticidad distribuida, las propiedades no lineales de los materiales se describen de forma continua en la longitud total del elemento. Eso significa que el modelo debe ser capaz de identificar la localización en la longitud en la que el comportamiento pasa de ser elástico a inelástico, calcular los esfuerzos normales y cortantes en ese punto e integrarlos en el área para calcular las fuerzas internas (corte, axial, momento).

En los de plasticidad concentrada solo algunos puntos en cada elemento del sistema estructural representan la plasticidad del mismo, por lo que el analista debe saber a priori en dónde se desarrollarán las deformaciones inelásticas. Este modelo es más fácil de implementar y requiere recursos computacionales reducidos en comparación con el modelo de plasticidad distribuida; todo esto hace que sea un método ideal cuando se trata de sistemas estructurales con un gran número de elementos.

Para realizar el análisis inelástico por medio de un modelo de plasticidad concentrada, es indispensable describir el comportamiento del elemento en los puntos en los que se concentrará la plasticidad. Es aquí donde los diagramas momento curvatura se hacen necesarios, ya que ellos representan la relación entre el momento flector y la curvatura desarrollados en una sección determinada de un elemento sometido a flexión. Esta relación se describe desde el rango elástico hasta la falla de la sección, lo que permite tener una descripción completa del comportamiento del elemento y a partir de éste, de la estructura.

La construcción de diagramas momento curvatura suele ser un tema de difícil comprensión en los cursos dedicados al análisis inelástico. Por un lado, no se cuenta con la bibliografía suficiente y por otro, las herramientas computacionales usadas en la práctica no son adecuadas para este fin. Así mismo, éstas herramientas son cerradas, no son flexibles pues trabajan con unos pocos modelos de comportamiento y no permiten una rápida definición de la sección transversal. Algunas cuentan con licencias cuyos costos son elevados para un uso académico y aquellas que son libres, requieren conocimientos avanzados en programación.

Se requiere entonces una alternativa para la construcción de diagramas momento curvatura mediante un método asistido por computador y de acceso libre a la comunidad académica, donde se tenga la posibilidad de aprender, de construir paso a paso los diagramas momento – curvatura y de obtener resultados confiables para llevar a cabo análisis inelásticos completos, teniendo en cuenta diferentes modelos constitutivos de los materiales.

Como contribución a una solución con las características mencionadas, este trabajo presenta el desarrollo de una herramienta que permite construir diagramas de momento – curvatura para secciones en concreto reforzado, por el método manual paso a paso y también por elementos finitos, para obtener curvas con buenos modelos constitutivos en corto tiempo. De hecho, incorpora también un modelo para el concreto confinado con fibras de tipo FRP (Fiber reinforced polymer).

Capítulo I: Problema

1.1 Planteamiento del problema

Usualmente, el estudio del comportamiento inelástico de las estructuras se trata a nivel de cursos de profundización o de posgrado, en el que los estudiantes deben ya tener una buena comprensión del comportamiento, análisis y diseño elásticos. A partir de la experiencia de profesores y estudiantes en diferentes universidades, se ha encontrado que la comprensión y elaboración de diagramas momento curvatura es uno de los problemas de enseñanza – aprendizaje más frecuente; adicionalmente, la bibliografía existente para desarrollar este tema no es suficiente, haciendo aún más compleja la enseñanza, el desarrollo y la investigación en temas sobre el comportamiento inelástico en estructuras de concreto reforzado.

Si bien existen programas comerciales reconocidos para la elaboración de los diagramas momento curvatura, éstos tienen numerosos inconvenientes: i) son herramientas cerradas que no cuentan con interfaces didácticas que permitan saber cómo se construyen los diagramas (i.e. cómo se llega a cada punto, a cada estado límite y cómo se calculan los momentos y las curvaturas); ii) en muchos casos, la configuración de del refuerzo longitudinal se hace barra por barra, proceso que toma mucho tiempo y es susceptible a errores; y, iii) sus licencias son costosas, limitando el acceso de estudiantes. En cuanto a programas de libre acceso, los inconvenientes son los mismos, sumados a la carencia de una interface gráfica y el requisito de conocimientos de programación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general:

Contribuir a la conceptualización del análisis inelástico en sistemas estructurales de concreto reforzado mediante una herramienta abierta y accesible que permita la construcción de diagramas momento curvatura.

1.2.2 Objetivos específicos:

- ✓ Mejorar los procesos de enseñanza aprendizaje sobre el comportamiento inelástico de secciones de concreto reforzado y su representación mediante diagramas de momento curvatura.
- ✓ Brindar una herramienta asistida por computador a estudiantes de pregrado y postgrado que facilite la comprensión del comportamiento inelástico en secciones de concreto reforzado mediante interfaces didácticas que muestren paso a paso los diferentes estados límite de la sección.
- ✓ Desarrollar una herramienta flexible que permita diferentes configuraciones de refuerzo usadas convencionalmente en el diseño y la construcción de estructuras de concreto reforzado en Colombia.
- ✓ Incluir como alternativa en la herramienta un modelo que permita el estudio inelástico de secciones en concreto reforzado confinadas con fibras tipo FRP (Fiber reinforced polymer).
- ✓ Incentivar el uso de herramientas informáticas de código abierto para extender la investigación de problemas en ingeniería estructural.

1.3 Justificación:

El diagrama momento - curvatura puede construirse mediante dos métodos. Método manual o método asistido por computador.

El método manual consiste en analizar la sección transversal sometida a flexión creciente, calculando el momento y la curvatura en cada punto en donde produzcan estados límite de esfuerzos en los materiales; estos estados pueden ser la fisuración por esfuerzos de tensión en el concreto o la fluencia del acero de refuerzo a tensión, por ejemplo.

El método asistido por computador lo realiza una gran variedad de programas disponibles en el mercado de software de estructuras, consiguiendo resolver el estado de esfuerzos en la sección, mediante el análisis por la teoría de elementos finitos, dando como resultado la curvatura de la sección transversal en tantos puntos como el usuario desee.

Los métodos para la construcción del diagrama momento - curvatura tienen los siguientes inconvenientes:

1.3.1 Método manual

- ✓ Es un procedimiento extenso ya que se debe realizar un cálculo detallado para cada punto del diagrama, aplicando en la mayoría de los casos, grandes simplificaciones, reduciendo el diagrama a tan solo 3 o 4 puntos.
- ✓ Los modelos que describen el acero de refuerzo en los métodos manuales, generalmente son modelos simplificados (elasto-plásticos perfectos) para hacer más sencillo el cálculo de cada punto del diagrama momento curvatura.
- ✓ Cuando se utilizan modelos constitutivos simplificados (como un modelo elasto-plástico perfecto) el diagrama final puede no ajustarse bien a lo que realmente ocurre en la sección de concreto reforzado. Esto puede solucionarse utilizando un mejor modelo pero con un alto costo en tiempo y dificultad en el análisis.

1.3.2 Método asistido por computador

- ✓ Los programas existentes como XTRACT de la Compañía TCR (TRC, 2007) y SAP2000 y/o ETABS de la compañía *Computers and Structures* (CSI, 2010) poseen costos elevados en sus licencias de funcionamiento lo cual limita el acceso de los mismos a estudiantes.
- ✓ Existen programas de uso libre y código abierto tales como CUMBIA, desarrollado por Luis A. Montejó (Montejó L. A., 2007); sin embargo, éste se limita a usar un solo modelo constitutivo y además requiere que el usuario posea suficientes conocimientos de programación ya que carece de una interfaz gráfica.
- ✓ Los programas mencionados anteriormente no están enfocados a la investigación y desarrollo del análisis inelástico de estructuras, por lo tanto las opciones respecto a los modelos constitutivos que poseen son muy limitadas.

Es claro que el método manual es indispensable para entender la relación momento curvatura, sin embargo, para obtener grandes volúmenes de diagramas que tengan un índice de confiabilidad alto, se requiere del método asistido por computador mediante programas especializados.

Se requiere entonces una alternativa para la construcción de diagramas momento curvatura mediante un método asistido por computador y de acceso libre a la comunidad académica, donde se tenga la posibilidad de comparar resultados confiables, teniendo en cuenta diferentes modelos constitutivos de los materiales, desde los más comúnmente utilizados como el de Mander et al. (1988), hasta los más recientes como el de Lam, Teng, et al. (2009), el cual incorpora la posibilidad de tener en cuenta un confinamiento para el concreto de tipo FRP (Fiber reinforced polymer). Con el desarrollo de esta nueva alternativa se contribuye a la conceptualización de la inelasticidad en el concreto reforzado, brindando al estudiante de pregrado y posgrado una herramienta didáctica para su fácil entendimiento e incentivando el uso de herramientas informáticas y de código abierto para extender la investigación de problemas en ingeniería estructural.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Antecedentes

Los antecedentes analizados para este proyecto conciernen los programas existentes que construyen diagramas de momento curvatura y los modelos constitutivos de los materiales objeto de este estudio, a saber, concreto confinado, confinado, acero de refuerzo y fibras.

2.1.1 Programas de análisis

Se analizaron algunos de los programas existentes de uso general y específico pensando en la accesibilidad del programa, en la facilidad de utilización y en si tenían alguna característica didáctica que permitiera a los usuarios comprender mejor los diferentes factores que afectan los diagramas momento – curvatura. Los resultados son los siguientes:

- ✓ **SAP2000** – (CSI, 2010) Es un programa comercial con licencia de pago que cuenta con una gran variedad de opciones para el análisis elástico e inelástico de estructuras; es uno de los programas más utilizados en las Américas. Sin embargo, cuando se trata de hacer un análisis de plasticidad concentrada, el proceso para construir el diagrama momento curvatura de cada sección se convierte en una tarea dispendiosa ya que la opción que da el programa (Section Designer) es aún precaria en comparación con otras mencionadas más adelante y no permite integrar directamente el diagrama construido al elemento analizado. Por esta razón, muchas veces se prefiere construir los diagramas momento curvatura en otro software y posteriormente usar SAP2000 para completar el análisis. Esto es válido para casi cualquier programa de uso general para análisis de estructuras.

- ✓ **XTRACT** – (TRC, 2007) Es un programa comercial con licencia de pago, probablemente el más utilizado para análisis de secciones. En éste la modelación de secciones se hace exclusivamente por medio de modelos de fibras obteniendo diagramas de interacción P-M y diagramas momento

curvatura. Una de las grandes desventajas, tiene que ver con la interfaz, ya que la definición de una sección convencional en ciertos casos puede ser una tarea bastante tediosa, por otro lado, es un software cuya licencia de funcionamiento posee un costo elevado.

- ✓ **CUMBIA** – (Montejo, L. A. 2007) Es una herramienta desarrollada por Luis A. Montejo que consiste en una colección de rutinas programadas en MatLab para secciones rectangulares y circulares de concreto reforzado. Construye diagramas momento curvatura y diagramas de interacción P-M; sin embargo, una de sus mayores limitantes es que no cuenta con una interfaz gráfica de usuario lo cual limita el acceso de un buen número de usuarios, ya que estos deben contar con conocimientos avanzados en programación; además de lo anterior, el número de modelos constitutivos de materiales disponibles en la sección de concreto reforzado es limitado.

2.2 Descripción de materiales y sus modelos constitutivos

En este aparte se recopilaron los modelos constitutivos de los materiales que hacen parte de la sección de concreto reforzado, así como aquellos que se utilizan actualmente para describir el comportamiento de secciones reforzadas con fibras FRP. Es importante resaltar que los modelos constitutivos son la base de los resultados finales en los diagramas momento curvatura, por esta razón los resultados pueden variar dependiendo de qué modelo constitutivo se esté utilizando.

A continuación, se describen los modelos constitutivos de los materiales de una sección convencional de concreto reforzado que fueron usados en el desarrollo del módulo de conceptualización y ejecución.

2.2.1 Concreto confinado e inconfinado

Dependiendo de la ubicación dentro de la sección, el concreto puede tener dos comportamientos diferentes, confinado e inconfinado. Considerando como

independientes al concreto confinado e inconfinado, se hace necesario buscar una relación esfuerzo – deformación y de forma matemática poder simular el comportamiento físico de cada material, por supuesto, bajo una comparación basada en ensayos experimentales; todo lo anterior se conoce como modelo constitutivo del material.

Debido a que el modelo de Mander et al. (1988) para concreto confinado e inconfinado solo provee los parámetros del bloque de compresiones para las deformaciones últimas, se opta por utilizar un modelo adicional, Kent y Park (1971), el cual, revela la magnitud de la fuerza de compresión y el centro de aplicación dentro del área comprimida no solo para deformaciones últimas.

2.2.1.1 Modelo de Kent y Park (1971)

A continuación se presentan la definición de variables y la formulación del modelo.

Parámetro	Definición
b	Ancho de la sección.
c	Profundidad del eje neutro.
ρ_s	Cuantía de refuerzo transversal.
S_h	Separación de estribos.
f_c	Esfuerzo a compresión del concreto.
f'_c	Esfuerzo máximo a compresión del concreto.
ϵ_c	Deformación unitaria del concreto a compresión.
ϵ_0	Deformación unitaria asociada a la máxima compresión del concreto.
ϵ_{50u}	Deformación unitaria al 50% de la máxima compresión del concreto inconfinado en la parte descendente de la curva.
ϵ_{50c}	Deformación unitaria al 50% de la máxima compresión del concreto confinado en la parte descendente de la curva.
ϵ_{20c}	Deformación unitaria al 20% de la máxima compresión del concreto confinado en la parte descendente de la curva.

Este modelo describe el esfuerzo a compresión f_c del concreto en tres regiones AB, BC y CD dependiendo de la deformación unitaria, ε_c .

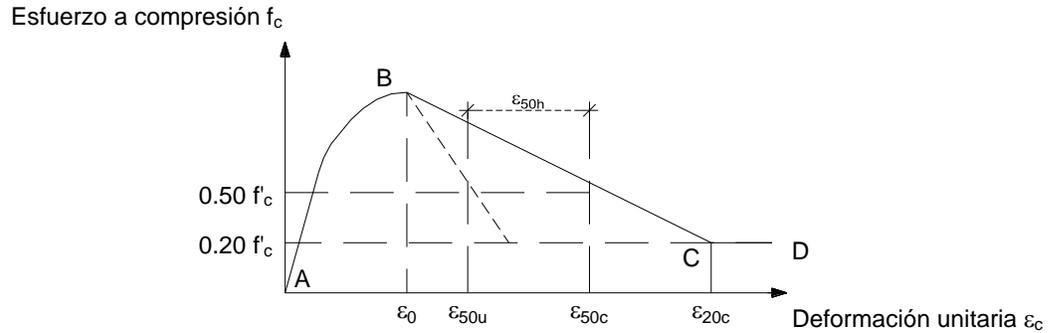


Figura 1. Modelo de Kent y Park (1971).
Fuente: Elaboración propia

La región AB definida por una deformación del concreto ε_c entre 0 y la deformación máxima asociada al esfuerzo máximo a compresión f'_c , ε_0

$$f_c = f'_c * \left[\frac{2 * \varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

La región BC definida por una deformación del concreto ε_c entre ε_0 y ε_{20c}

$$f_c = f'_c * [1 - Z * (\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \quad (2)$$

La región CD definida por una deformación del concreto ε_c mayor a ε_{20c}

$$f_c = 0.20 * f'_c \quad (3)$$

Donde se definen los siguientes parámetros:

$$Z = \frac{0.50}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_0} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + \varepsilon_0 * f'_c}{f'_c - 1000} \quad (f'_c \text{ en psi}) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} * \rho_s * \sqrt{\frac{b}{s_h}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{20c} = \frac{0.8}{Z} + \varepsilon_0 \quad (7)$$

Como se mencionó anteriormente este modelo nos permite saber la magnitud de la fuerza de compresión en el concreto y el centroide del área comprimida donde actúa dicha fuerza.

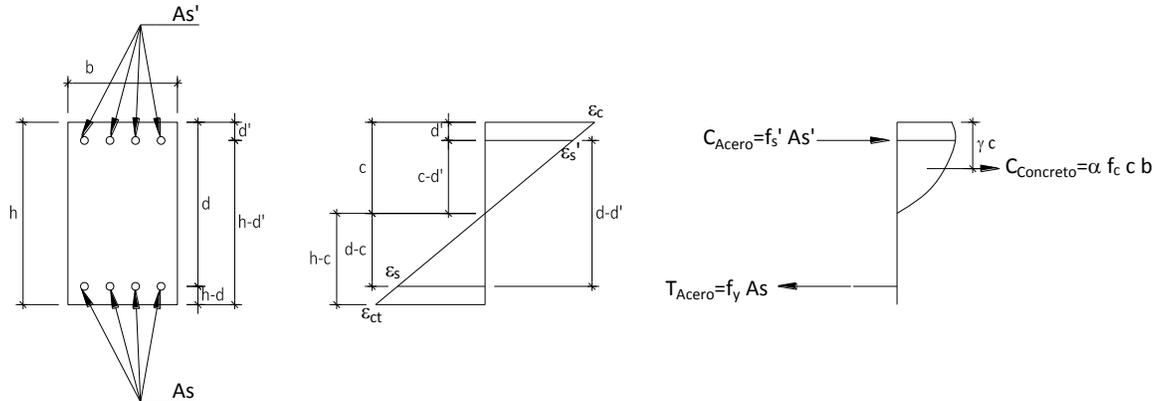


Figura 2. Sección de una viga típica, deformaciones y esfuerzos.
Fuente: Elaboración propia

Los factores α y γ revelan a la magnitud de la fuerza de compresión en el concreto y el centro de aplicación de la misma respectivamente. Están dados para cada región como:

Región AB

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2}{3 * \varepsilon_0^2} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{4 * \varepsilon_0 - \varepsilon_c}{12 * \varepsilon_0 - 4 * \varepsilon_c} \quad (9)$$

Región BC

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_0}{3 * \varepsilon_c} + Z * \left(\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0^2}{2 * \varepsilon_c} - \frac{\varepsilon_c}{2} \right) \quad (10)$$

$$\gamma = 1 - \frac{1}{\alpha} * \left[\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon_0^2}{12 * \varepsilon_c^2} + Z * \left(\frac{\varepsilon_0}{2} - \frac{\varepsilon_c}{3} - \frac{\varepsilon_0^3}{6 * \varepsilon_c^2} \right) \right] \quad (11)$$

Región CD (cuando no existe confinamiento)

$$\alpha = \frac{1}{\varepsilon_c} * \left(\frac{2 * \varepsilon_0}{3} + \frac{0.48}{Z} \right) \quad (12)$$

$$\gamma = 1 - \frac{1}{\alpha * \varepsilon_c^2} * \left[\frac{5 * \varepsilon_0^2}{12} + \frac{0.48 * \varepsilon_0}{Z} + \frac{0.448}{3 * Z^2} \right] \quad (13)$$

Región CD (cuando existe confinamiento)

$$\alpha = \frac{1.40 * \varepsilon_0}{3 * \varepsilon_c} + \frac{0.32}{Z * \varepsilon_c} + 0.20 \quad (14)$$

$$\gamma = 1 - \frac{1}{\alpha * \varepsilon_c^2} * \left[\frac{3.8 * \varepsilon_0^2}{12} + \frac{0.32 * \varepsilon_0}{Z} + \frac{0.256}{3 * Z^2} + 0.10 * \varepsilon_c^2 \right] \quad (15)$$

2.2.1.2 Modelo de Mander

A continuación se presentan la definición de variables y la formulación del modelo.

Parámetro	Definición
b_c	Dimensión del núcleo del concreto en dirección x.
d_c	Dimensión del núcleo del concreto en dirección y.
d_s	Diámetro de la espiral.
s'	Espaciamiento libre entre espirales o estribos.
s	Espaciamiento entre espirales o estribos.
f_c	Esfuerzo de compresión en el concreto.
f'_c	Esfuerzo máximo de compresión en el concreto confinado.
f'_{cc}	Esfuerzo máximo de compresión en el concreto confinado.
ε_{co}	Deformación asociada al máximo esfuerzo de compresión en el concreto.
ε_{cu}	Deformación última del concreto confinado.
ε_{cc}	Deformación asociada al máximo esfuerzo del concreto confinado.
E_c	Módulo de elasticidad del concreto.
E_{sec}	Módulo de elasticidad secante del concreto.

f_l	Esfuerzo lateral de confinamiento.
f'_l	Esfuerzo lateral efectivo de confinamiento.
k_e	Coefficiente de efectividad de confinamiento.
ρ_s	Cuantía transversal de refuerzo.
f_y	Esfuerzo de fluencia del acero longitudinal.
F_{yh}	Esfuerzo de fluencia del acero transversal.
A_{sp}	Área de acero transversal.
ρ_{cc}	Cuantía longitudinal de acero con respecto al núcleo.
w	Espaciamiento de barras longitudinales en una sección rectangular.
w'_i	Espaciamiento libre de barras longitudinales en una sección rectangular.
K	Relación del esfuerzo confinado.

El modelo de Mander et al. (1988), está definido por una curva continua a diferencia del de Kent y Park (1971); este, contempla un incremento en la resistencia a la compresión del concreto confinado, tiene en cuenta un incremento en las deformaciones del mismo debido al confinamiento de la sección; además propone que la deformación unitaria última ε_{cu} se alcanzará en el instante en que se presente la primera fractura en el acero transversal. A continuación se presentan las ecuaciones que describen el modelo:

$$f'_c = \frac{f'_{cc} * x * r}{r - 1 + x^r} \quad (16)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 * \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (18)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (19)$$

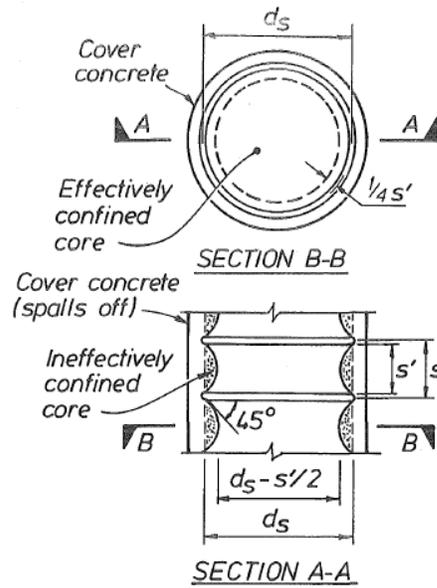


Figura 4. Esfuerzos laterales de confinamiento en columna circular.
Fuente: Mander et al. (1988)

$$f'_l = f_l * k_e \quad (21)$$

$$f_l = \frac{1}{2} * \rho_s * f_{yh} \quad (22)$$

$$\rho_s = \frac{4 * A_{sp}}{d_s * s} \quad (23)$$

Para estribos circulares se tiene:

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 * d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad (24)$$

Para espirales se tiene:

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2 * d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad (25)$$

El esfuerzo a compresión del concreto confinado para una sección circular está dado por:

$$f'_{cc} = f'_{c0} * \left(-1.254 + 2.254 * \sqrt{1 + \frac{7.94 * f'_l}{f'_{c0}}} - 2 * \frac{f'_l}{f'_{c0}} \right) \quad (26)$$

Para secciones rectangulares las presiones laterales de confinamiento y la resistencia a la compresión del concreto confinado se definen con las siguientes ecuaciones:

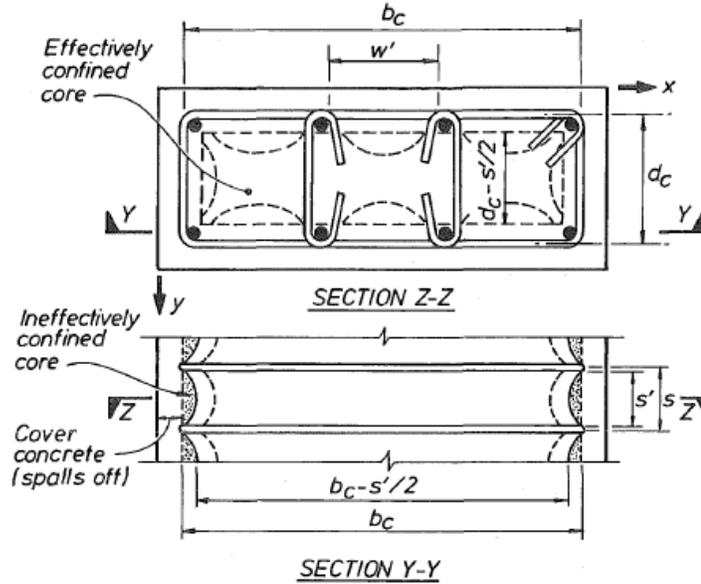


Figura 5. Esfuerzos laterales de confinamiento en columna circular.
Fuente: Mander et al. (1988)

$$f'_{lx} = f_{lx} * k_e \quad ; \quad f'_{ly} = f_{ly} * k_e \quad (27)$$

$$f_{lx} = \rho_x * f_{yh} \quad ; \quad f_{ly} = \rho_y * f_{yh} \quad (28)$$

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{s * d_c} \quad ; \quad \rho_y = \frac{A_{sy}}{s * b_c} \quad (29)$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6 * b_c * d_c}\right) * \left(1 - \frac{s'}{2 * b_c}\right) * \left(1 - \frac{s'}{2 * d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (30)$$

El esfuerzo a compresión del concreto confinado para una sección rectangular está dado por:

$$f'_{cc} = K * f'_{c0} \tag{31}$$

Donde el factor K puede ser estimado mediante el siguiente nomograma:

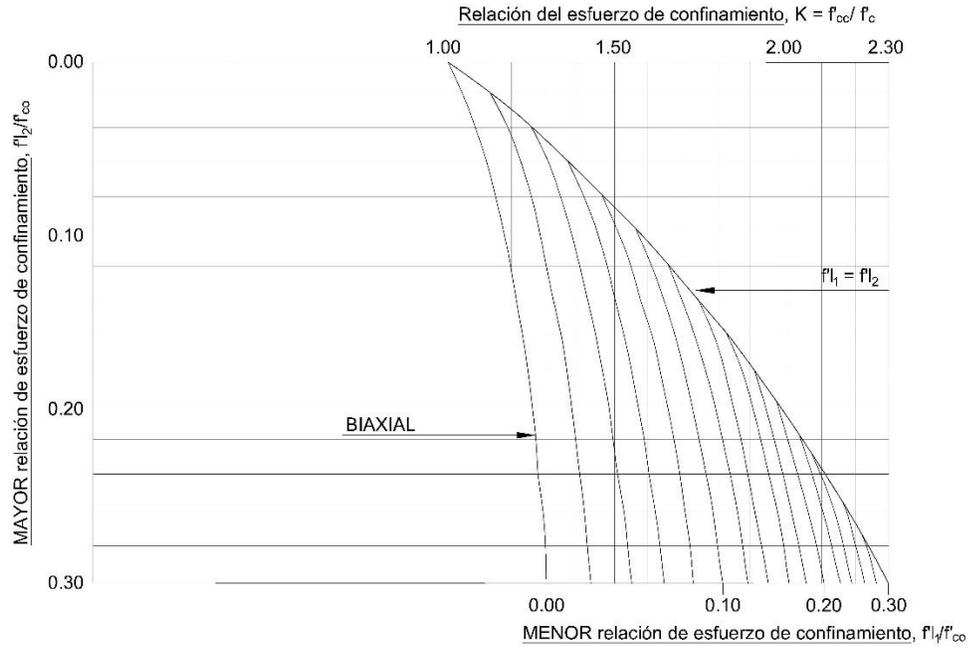


Figura 6. Nomograma para estimar el factor de confinamiento K.
Fuente: Mande et al.(1988)

El esfuerzo de confinamiento se calcula con la ecuación (32), reemplazando la presión efectiva de confinamiento de la sección circular por el promedio de las presiones efectivas de confinamiento de la sección rectangular.

$$f'_{l} = 0.5 * (f'_{lx} + f'_{ly}) \tag{32}$$

2.2.2 Acero de refuerzo

A continuación, se presentan la definición de variables y la formulación del modelo.

Parámetro	Definición
f_s	Esfuerzo en el acero de refuerzo.
f_y	Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.

f_{su}	Esfuerzo último del acero de refuerzo.
ε_s	Deformación en el acero de refuerzo.
ε_{su}	Deformación última en el acero de refuerzo.
ε_{sh}	Deformación al inicio de la deformación por endurecimiento en el acero de refuerzo.
E_s	Módulo de elasticidad del acero.

El modelo constitutivo que describe el comportamiento del acero de refuerzo corresponde al modelo bilineal con endurecimiento por deformación parabólico en el que se identifican claramente 3 secciones (Thompson y Park, 1978)

- ✓ Material elástico, cuando la deformación del acero ϵ_s es menor a la deformación de fluencia ϵ_y

$$f_s = E_s * \epsilon_s \quad (33)$$

- ✓ Material en fluencia, cuando la deformación del acero ϵ_s varía entre la deformación de fluencia ϵ_y y la deformación a la cual empieza el endurecimiento por deformación ϵ_{sh} , y,

$$f_s = f_y \quad (34)$$

- ✓ Material con endurecimiento por deformación, cuando la deformación del acero ϵ_s es superior a la deformación a la cual empieza el endurecimiento por deformación ϵ_{sh}

$$f_s = f_{su} + (f_y - f_{su}) * \left(\frac{\epsilon_{su} - \epsilon_s}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sh}} \right)^2 \quad (35)$$

2.2.3 Concreto confinado con Fibras FRP

A continuación, se presentan la definición de variables y la formulación del modelo.

Parámetro	Definición
f_i	Esfuerzo de confinamiento provisto por la camisa FRP.
f'_{co}	Esfuerzo de compresión máximo del concreto inconfinado.

E_{frp}	Módulo de elasticidad de la camisa FRP.
t	Espesor de la camisa FRP.
ϵ_h	Deformación de ruptura de la camisa FRP.
D	Diámetro del cilindro de concreto confinado
k_e	Factor de corrección de la fibra FRP.
ϵ_h	Deformación de ruptura de la camisa FRP sin corregir.
ρ_k	Relación de rigidez.
ρ_e	Relación de deformación.
ϵ_{co}	Deformación asociada al máximo esfuerzo de compresión en el concreto.
ϵ_t	Deformación de transición de la curva.
E_c	Módulo de elasticidad del concreto
E_2	Pendiente de la curva en el segundo tramo
ka, kb	Factores de forma para secciones rectangulares

El modelo que describe el comportamiento del concreto confinado con fibras FRP propuesto por Lam, Teng, et al. (2009), es un modelo esfuerzo – deformación orientado al diseño y obedece a un refinamiento del modelo presentado por Lam y Teng (2003) que hace parte de la base teórica del documento ACI 440.2 R 08, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete (ACI, 2008).

A continuación, se describen las variables y la formulación del modelo de Lam, Teng, et al. (2009).

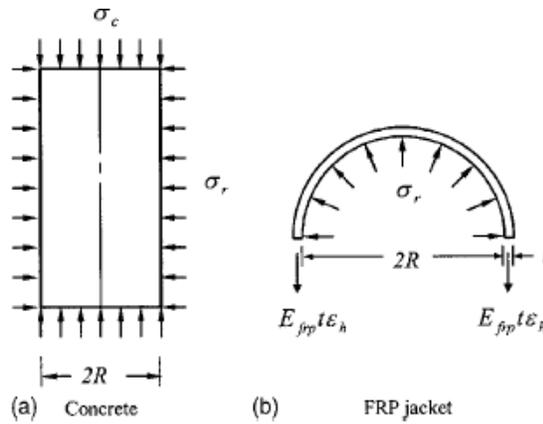


Figura 7. Acción de la fibra FRP en el concreto.
Fuente: Lam, Teng, et al. (2009).

El esfuerzo de confinamiento lateral está dado por:

$$f_l = \frac{2E_{frp}t\epsilon_h}{D} \quad (36)$$

Se debe tener en cuenta que la deformación de la fibra debe ser afectada por un factor de corrección k_e , el cual disminuye la capacidad de deformación de la misma, ya que este factor tiene en cuenta la resina con la que se cura la lámina en el concreto.

$$\epsilon_h = k_e \epsilon_f \quad (37)$$

El valor de k_e fue calibrado experimentalmente mediante ensayos en columnas de mediana y gran escala por Carey y Harries (2005) y se determinó que dicho factor puede variar entre 0.57 y 0.61.

La relación de confinamiento es igual a la relación de rigidez multiplicada por la relación de deformación:

$$\frac{f_l}{f'_{co}} = \rho_k \rho_e \quad (38)$$

$$\rho_k = \frac{2E_{frp}t}{(f'_{co}/\epsilon_{co})D} \quad (39)$$

$$\rho_e = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_{co}} \quad (40)$$

La deformación del concreto ε_{co} puede ser tomada de la siguiente forma (Popovics 1973):

$$\varepsilon_{co} = 9.37 \times 10^{-4} \sqrt{f'_{co}} \quad (41)$$

La deformación de transición entre la primera y la segunda porción de la curva está dada por:

$$\varepsilon_t = \frac{2 f'_c}{(E_c - E_2)} \quad (42)$$

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_{co}}{\varepsilon_{cu}} \quad (43)$$

La deformación última del concreto confinado con fibras está dada por:

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{co} [1.75 + 6.5 k_b \rho_k^{0.80} \rho_e^{1.45}] \quad (44)$$

$$f'_{cu} = f'_{co} [1 + 3.5 (k_a \rho_k \rho_e - 0.01 \rho_e)] \quad (45)$$

La ecuación anterior está sujeta a las siguientes consideraciones:

$$f'_{cu} = \begin{cases} \text{Minimo } 0.85 f'_{co} & \text{si } \rho_k > 0.00 \\ 0.85 f'_{co} & \text{si } \rho_k = 0.00 \end{cases} \quad (46)$$

La máxima resistencia del concreto confinado con fibras está dada por:

$$f'_{cc} = \begin{cases} f'_{co} [1 + 3.5 (k_a \rho_k \rho_e - 0.01 \rho_e)] & \text{si } \rho_k \geq 0.01 \\ f'_{co} & \text{si } \rho_k < 0.01 \end{cases} \quad (47)$$

En las ecuaciones (44) a (47) k_a y k_b son factores de forma cuando se estudian secciones rectangulares y se toman como la unidad cuando se trata de secciones circulares. Es importante resaltar que los factores de forma para secciones rectangulares son válidos para secciones con la relación $h/b < 2.00$ y para dimensiones de h o b menores a 900 mm.

El diámetro equivalente para secciones rectangulares es el siguiente:

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (48)$$

Los factores k_a y k_b se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (49)$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^{0.5} \quad (50)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b - 2r_c)^2 \right] \rho_g}{3A_g - \rho_g} \quad (51)$$

Es importante aclarar que, aunque se trate de una sección rectangular, los bordes o esquinas de la sección transversal siempre deben ser redondeados con un radio mínimo igual a 2.00 cm, esto para prevenir una falla por desgarramiento de la fibra de refuerzo.

Así entonces, la resistencia a la compresión de una sección de concreto confinado con fibras para una deformación ε_c está dada por:

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f'_{co}} \varepsilon_c & (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t) \\ f'_{co} + E_2 \varepsilon_c & \text{si } \rho_k \geq 0.01 \\ f'_{co} - \frac{f'_{co} - f'_u}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} (\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}) & \text{si } \rho_k < 0.01 \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t) \end{cases} \quad (52)$$

Capítulo IV: Desarrollo de la herramienta

3.1 Metodología:

La herramienta Momento curvatura V1.0 está constituida por dos módulos llamados *Conceptualización* y *Ejecución*. El módulo de conceptualización, tal como su nombre lo indica, permite al usuario desarrollar paso a paso el diagrama momento curvatura de una sección tipo viga por el método manual, guiándolo a través de ventanas interactivas y mostrando información clave para la comprensión de las fuerzas internas que actúan sobre la sección definida, a medida que el momento flexionante aumenta, y mostrando finalmente cual es el mecanismo de falla para la combinación de refuerzo y dimensiones de sección transversal seleccionadas.

Por otro lado, el módulo de ejecución permite al usuario construir diagramas momento curvatura para secciones tipo viga y columna, con y sin carga axial constante. Este módulo trabaja a partir de un modelo de fibras y resuelve la sección mediante la teoría de elementos finitos, dando como resultado diagramas con un alto índice de confiabilidad. Debido a que el módulo de ejecución fue idealizado para generar grandes volúmenes de diagramas y posteriormente incorporarlos a un análisis de plasticidad concentrada, se incluyó la bilinealización del diagrama para facilitar de esta manera la inserción de las propiedades de las rótulas plásticas.

3.1.1 Módulo de conceptualización

El módulo de conceptualización tiene como objetivo principal facilitar el aprendizaje en cuanto a la construcción del diagrama momento curvatura se refiere. Dicho módulo se construyó para una sección tipo viga con una configuración de refuerzo arbitraria. El diagrama en este módulo consta de 5 puntos en los que se realiza un equilibrio para poder encontrar el momento resistente y la curvatura.

En cada etapa de la construcción de la curva siempre se muestra un panel con deformaciones y esfuerzos para cada material, el diagrama de deformaciones

unitarias de la sección, el momento y la curvatura asociada a la etapa en estudio y finalmente el diagrama momento curvatura. A continuación, se presenta un ejemplo típico y se explica el procedimiento que realiza el módulo de conceptualización para la construcción del diagrama momento curvatura.

Inicialmente se definen variables generales como la geometría, recubrimientos, distribución de refuerzo longitudinal superior e inferior, distribución de refuerzo transversal y diámetro de refuerzos.

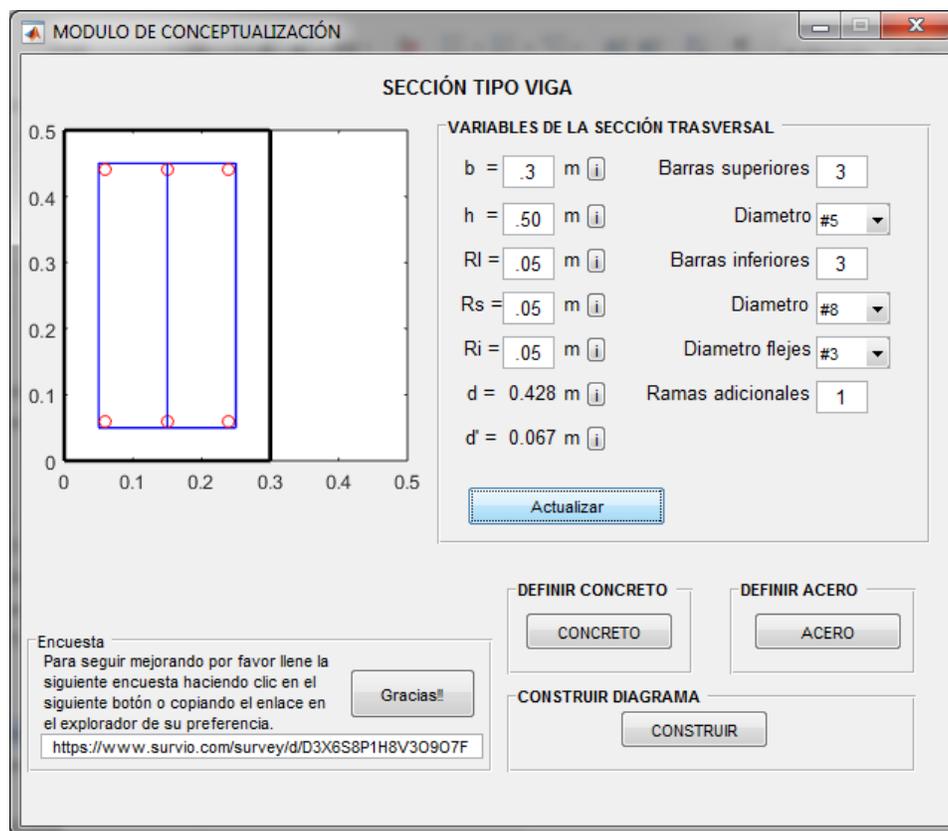


Figura 8. Modulo de Conceptualización. Fuente: Elaboración propia

Una vez actualizada la sección se puede proceder con la definición del concreto y del acero de refuerzo.

El módulo para la definición del concreto arroja como resultado la curva esfuerzo deformación del concreto confinado e inconfinado con base en el modelo de Mander et al. (1988); los parámetros que se deben definir son:

- ✓ Resistencia a la compresión del concreto confinado.
- ✓ Separación de los estribos.

Los demás parámetros se calculan automáticamente mediante el botón “Establecer valores para sección definida”. Si se requiere es posible modificar cada uno de los parámetros. Posteriormente se presiona el botón calcular para graficar los diagramas y mostrar los resultados del modelo de Mander et al. (1988).

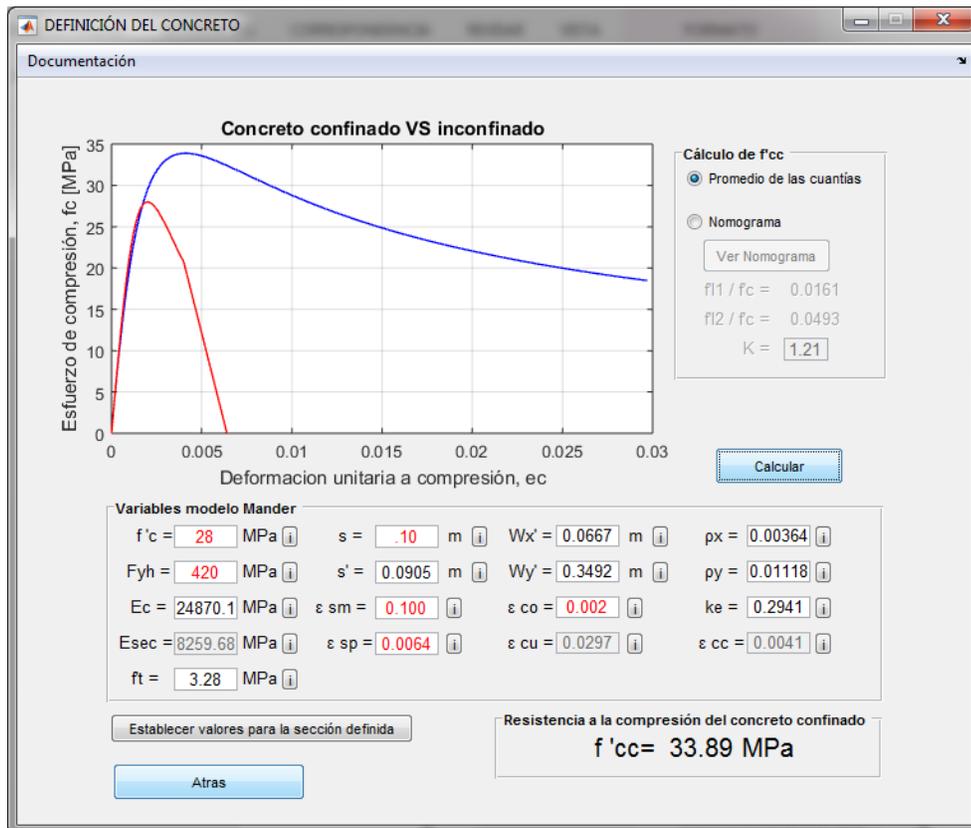


Figura 9. Definición del concreto en módulo de conceptualización.
Fuente: Elaboración Propia

El cálculo de f'_{cc} es posible realizarlo mediante el promedio de las cuantías (ecuación (32)) o a través del nomograma de esfuerzos laterales de confinamiento.

El módulo para la definición del acero arroja como resultado la curva esfuerzo deformación, la cual posee un comportamiento bilineal con endurecimiento por

deformación parabólico y con simetría en la respuesta a tracción y a compresión. Se deben definir los siguientes parámetros para el cálculo de la curva:

- ✓ Módulo de elasticidad del acero de refuerzo.
- ✓ Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.
- ✓ Resistencia última del acero de refuerzo.
- ✓ Deformación unitaria para el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.
- ✓ Deformación unitaria justo antes de iniciar el endurecimiento por deformación.
- ✓ Máxima deformación unitaria del acero de refuerzo.

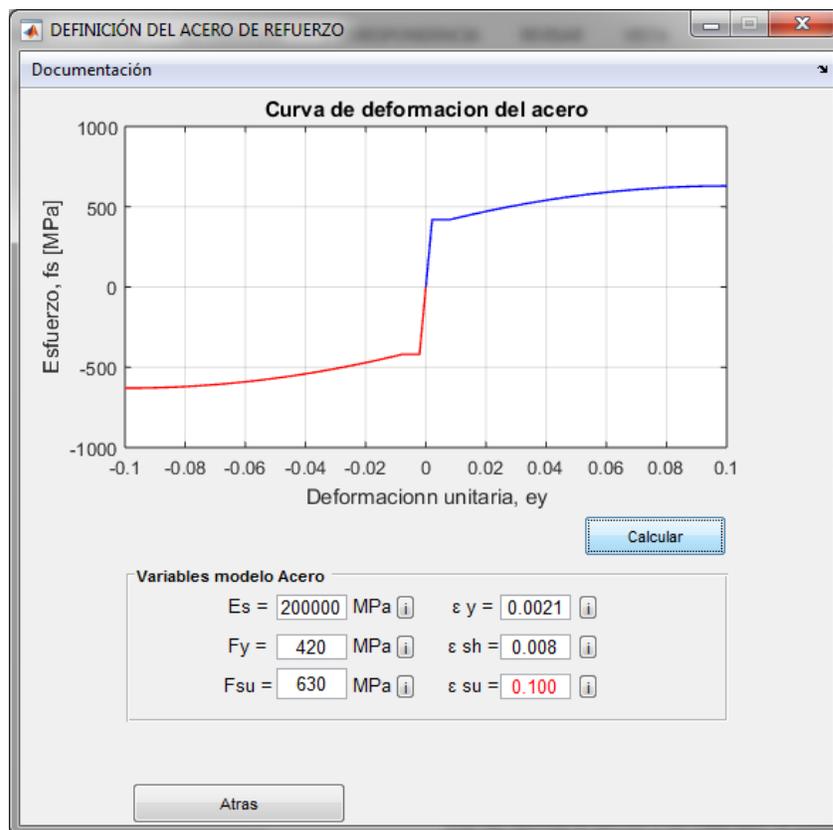


Figura 10. Definición del acero en módulo de conceptualización.
Fuente: Elaboración Propia

Una vez definida la sección y los materiales se puede proceder con la construcción de la curva que se divide en 5 pasos.

3.1.1.1 Paso 1 de 5

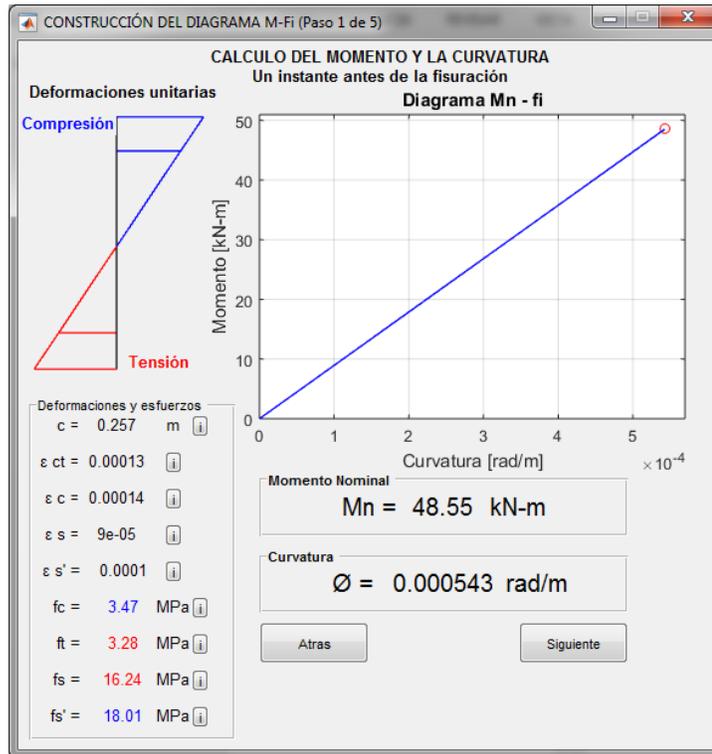


Figura 11. Paso 1 de 5, módulo de conceptualización.
Fuente: Elaboración propia

El primer paso corresponde al instante en que el concreto a tracción alcanza su máximo esfuerzo y no se ha fisurado, con esta suposición se resuelve el estado de esfuerzos y deformaciones de la sección considerando que se comporta elásticamente.

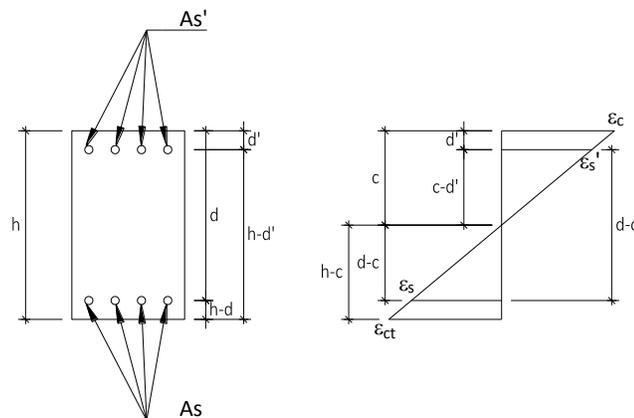


Figura 12. Sección viga, diagrama de deformaciones.
Fuente: Elaboración propia

El eje neutro se encuentra calculando momentos con respecto al mismo usando el método de la sección trasformada

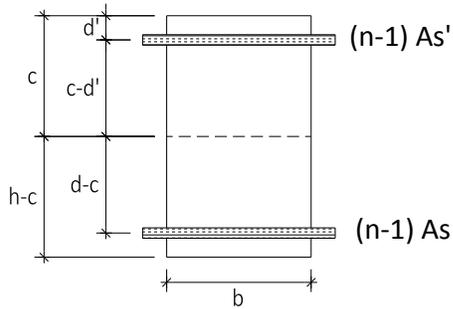


Figura 13. Sección viga, sección trasformada.
Fuente: Elaboración propia

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (53)$$

$$b * c * \frac{c}{2} + (n - 1) * As' * (c - d') = b * (h - c) * \frac{(h - c)}{2} + (n - 1) * As * (d - c) \quad (54)$$

$$c = \frac{b * h^2 + 2 * (d * As + As' * d') * (n - 1)}{2 * (b * h + (n - 1) * (As + As'))} \quad (55)$$

Una vez encontrada la posición del eje neutro se pueden encontrar todas deformaciones y todos los esfuerzos asociados a tales deformaciones utilizando triángulos semejantes sobre el diagrama de deformaciones

Concreto a tracción

Considerando que el esfuerzo máximo a tracción del concreto está dado por:

$$f_t = 0.62 \lambda \sqrt{f'_c} \quad (\text{NSR-10 C.9-10}) \quad (56)$$

$$\varepsilon_{ct} = \frac{f_t}{E_c} \quad (57)$$

Concreto a compresión

$$\varepsilon_c = \frac{c * \varepsilon_{ct}}{(h - c)} \quad (58)$$

$$f_c = \varepsilon_c * E_c \quad (59)$$

Acero a tracción

$$\varepsilon_s = \frac{(d - c) * \varepsilon_{ct}}{(h - c)} \quad (60)$$

$$f_s = \varepsilon_s * (n - 1) * E_c \quad (61)$$

Acero a compresión

$$\varepsilon_s' = \frac{(c - d') * \varepsilon_s}{(d - c)} \quad (62)$$

$$f_s' = \varepsilon_s' * (n - 1) * E_c \quad (63)$$

Conociendo la inercia de la sección compuesta con respecto al eje neutro se puede encontrar el momento nominal con respecto al esfuerzo en cualquier fibra:

$$I = \frac{b * c^3}{3} + \frac{b * (h - c)^3}{3} + (n - 1) * A_s * (d - c)^2 + (n - 1) * A_s' * (c - d')^2 \quad (64)$$

$$Mn = \frac{I \sigma}{y} = \frac{I f_c}{c} = \frac{I f_t}{(h - c)} \quad (65)$$

La curvatura se encuentra de la siguiente forma

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\varepsilon_c}{c}\right) \quad (66)$$

Sin embargo, al tratarse de ángulos muy pequeños es válida la aproximación:

$$\phi = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad (67)$$

3.1.1.2 Paso 2 de 5

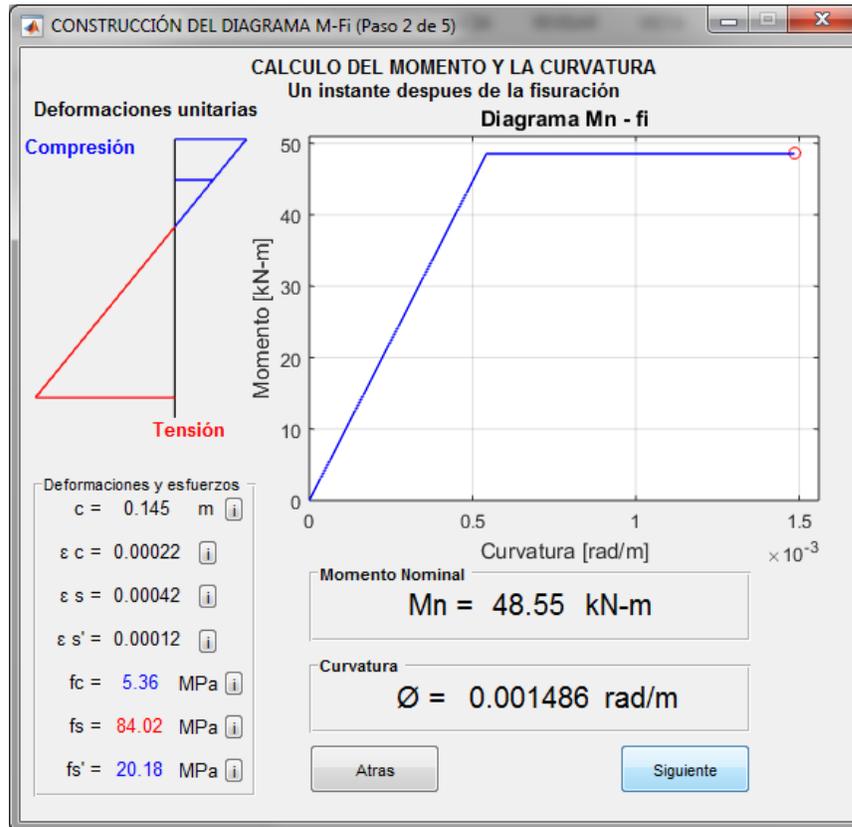


Figura 14. Paso 2 de 5, módulo de conceptualización.
Fuente: Elaboración propia

El paso 2 corresponde al instante después de que el concreto a tracción llega a su máximo esfuerzo. Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Cuando la fibra más lejana de concreto a tracción llegue a su valor máximo de esfuerzo, (ver ecuación (56)) se asumirá que todo el concreto por debajo del eje neutro se encuentra fisurado y por lo tanto no aporta inercia en la sección considerada.
- ✓ La sección sufre un aumento en sus deformaciones y disminuye su inercia, sin embargo, el momento se considera igual al del punto anterior.
- ✓ Los materiales de la sección en cuestión continúan en su rango elástico.
- ✓ A pesar de la pérdida del concreto por debajo del eje neutro se considera que las secciones planas permanecen planas y por tal razón el diagrama triangular de deformaciones sigue siendo válido.

De nuevo iniciamos encontrando la posición del eje neutro con las nuevas condiciones de la sección fisurada.

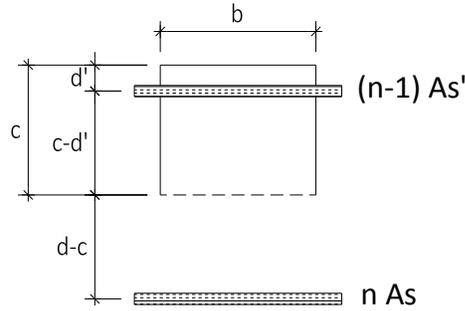


Figura 15. Sección de viga, fisurada y transformada.
Fuente: Elaboración propia

$$b * c * \frac{c}{2} + (n - 1) * As' * (c - d') = n * As * (d - c) \quad (68)$$

$$c = \frac{\pm \sqrt{2 * b * (d * n * As + (n - 1) * As' * d') + (n * (As' + As) - As')^2 - n * (As + As') + As'}}{b} \quad (69)$$

Conociendo la inercia de la sección compuesta con respecto al eje neutro, la inercia se puede calcular de la siguiente manera:

$$I = \frac{b * c^3}{3} + n * As * (d - c)^2 + (n - 1) * As' * (c - d')^2 \quad (70)$$

De manera similar al punto anterior se puede encontrar el esfuerzo en la fibra superior e inferior más lejana mediante la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{Mn c}{I} \quad \text{ó} \quad f_s = \frac{Mn (d - c) n}{I} \quad (71)$$

Posteriormente se calculan las deformaciones correspondientes a la sección:

$$\varepsilon_c = \frac{f_c}{E_c} ; \quad \varepsilon_s = \frac{f_s}{E_s} ; \quad \varepsilon_s' = \frac{(c - d') * \varepsilon_s}{(d - c)} \quad (72)$$

$$f_s' = \varepsilon_s' * (n - 1) * E_c \quad (73)$$

Finalmente la curvatura se encuentra con las ecuaciones (66) o (67) del paso 1.

3.1.1.3 Paso 3 de 5

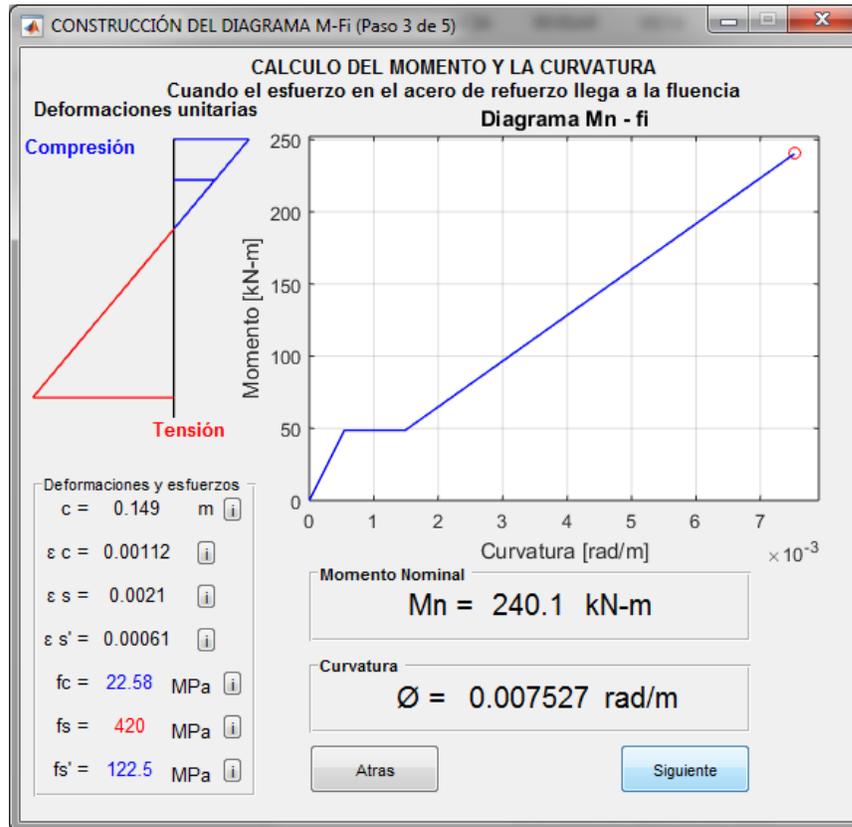


Figura 16. Paso 3 de 5, módulo de conceptualización.
Fuente: Elaboración propia

El paso 3 corresponde al instante en el que el acero inferior alcanza el valor del esfuerzo de fluencia. Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ El concreto podría tener un comportamiento plástico (dependiendo de la cuantía de refuerzo de la sección).
- ✓ Al existir la posibilidad de que el concreto se comporte plásticamente se opta por utilizar el modelo de Kent y Park (1971) el cual describe el comportamiento a compresión del concreto confinado y da la ubicación aproximada del centroide del área de concreto comprimida para la ubicación de la fuerza resultante.
- ✓ El acero superior podría estar o no en tracción (dependiendo de la cuantía de refuerzo de la sección).

- ✓ El esfuerzo en el acero obedece a un modelo constitutivo bilineal con endurecimiento por deformación parabólico.
- ✓ A pesar de la pérdida del concreto por debajo del eje neutro y la posibilidad de que el concreto se comporte plásticamente se considera que las secciones planas permanecen planas y por tal razón el diagrama de deformaciones sigue siendo válido.

Caso 1 – Acero superior a compresión

De acuerdo con el equilibrio de fuerzas en las condiciones mencionadas anteriormente se tiene:

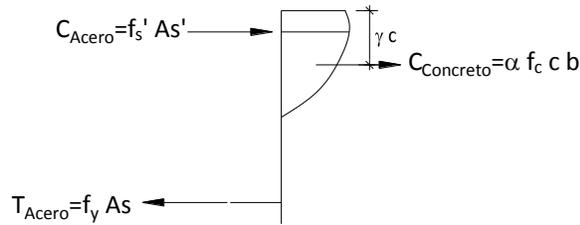


Figura 17. Diagrama de fuerzas según Kent y Park (1971), acero superior en compresión.
Fuente: Elaboración propia

$$f_y * A_s = f_s' * A_{s'} + \alpha * f_c * c * b \quad (74)$$

Las deformaciones a compresión y el esfuerzo en el acero pueden calcularse como:

$$\varepsilon_{s'} = \frac{(c - d') * \varepsilon_y}{(d - c)} ; f_s' = E_s * \varepsilon_{s'} ; \varepsilon_c = \frac{c * \varepsilon_y}{(d - c)} \quad (75)$$

Por equilibrio se tiene:

$$f_y * A_s = \left(E_s * \left(\frac{(c - d') * \varepsilon_y}{(d - c)} \right) \right) * A_{s'} + \alpha(c) * f_c * c * b \quad (76)$$

Donde el termino α es un factor del modelo de Kent y Park (1971) y está en función de la profundidad del eje neutro c ecuación (8), (10), (12), o (14) siendo esta la única incógnita.

Una vez encontrada la profundidad del eje neutro, c , se procede a resolver la sección encontrando deformaciones, esfuerzos y fuerzas resultantes.

Concreto

Dependiendo de la magnitud de la deformación ε_c se aplicará la ecuación (1) o (2) para encontrar el esfuerzo a compresión de la fibra más alejada al eje neutro. Para la fuerza de compresión se tiene:

$$F_{comp.c} = \alpha * f_c * c * b \quad (77)$$

Que se aplica a una distancia $\gamma * c$ medida desde la fibra en compresión más alejada del eje neutro.

Acero inferior a tracción

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} \quad (78)$$

$$f_s = \varepsilon_s * E_s \quad (79)$$

$$F_{tracc.s} = f_y * A_s \quad (80)$$

Acero superior a compresión

$$F_{comp.s'} = f'_s * A_s' \quad (81)$$

Es posible encontrar el momento nominal de la siguiente forma

$$Mn = F_{comp.c} * (d - \gamma * c) + F_{comp.s'} * (d - d') \quad (82)$$

Finalmente, la curvatura se encuentra con las ecuaciones (66) o (67) del paso 1

Caso 2 – Acero superior a tracción

En este caso y de acuerdo con el equilibrio de fuerzas con las condiciones mencionadas anteriormente se encuentra:

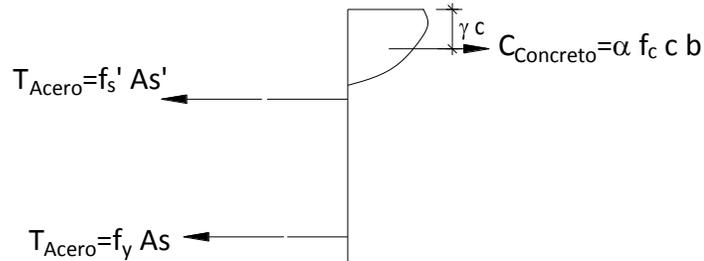


Figura 18. Diagrama de fuerzas según Kent y Park (1971), acero superior en tracción.
Fuente: Elaboración propia

$$f_y \cdot A_s + f'_s \cdot A_s' = \alpha \cdot f_c \cdot c \cdot b \quad (83)$$

$$\varepsilon_s' = \frac{(d' - c) \cdot \varepsilon_y}{(d - c)} ; f'_s = E_s \cdot \varepsilon_s' ; \varepsilon_c = \frac{c \cdot \varepsilon_y}{(d - c)} \quad (84)$$

Se tiene:

$$f_y \cdot A_s + \left(E_s \cdot \left(\frac{(c - d') \cdot \varepsilon_y}{(d - c)} \right) \right) \cdot A_s' + \alpha(c) \cdot f_c = \alpha(c) \cdot f_c \cdot c \cdot b \quad (85)$$

Como antes, una vez encontrada la profundidad del eje neutro, c , se procede a resolver la sección encontrando deformaciones, esfuerzos y fuerzas resultantes.

Concreto

Dependiendo de la magnitud de la deformación ε_c se aplicará la ecuación (1) o (2) para encontrar el esfuerzo a compresión de la fibra más alejada del eje neutro.

Para la fuerza de compresión se tiene:

$$F_{comp.c} = \alpha * f_c * c * b \quad (86)$$

Aplicada a la distancia $\gamma * c$ medida desde la fibra en compresión más alejada del eje neutro.

Acero inferior a tracción

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} \quad (87)$$

$$f_y = \varepsilon_s * E_s \quad (88)$$

$$F_{tracc.s} = f_y * A_s \quad (89)$$

Acero superior a tracción

$$F_{tracc.s'} = f'_s * A_s' \quad (90)$$

Puede encontrarse el momento nominal de la siguiente forma:

$$Mn = F_{tracc.s} * (d - \gamma * c) + F_{tracc.s'} * (d' - \gamma * c) \quad (91)$$

Finalmente, la curvatura se encuentra con las ecuaciones (66) o (67) del paso 1.

3.1.1.4 Paso 4 de 5

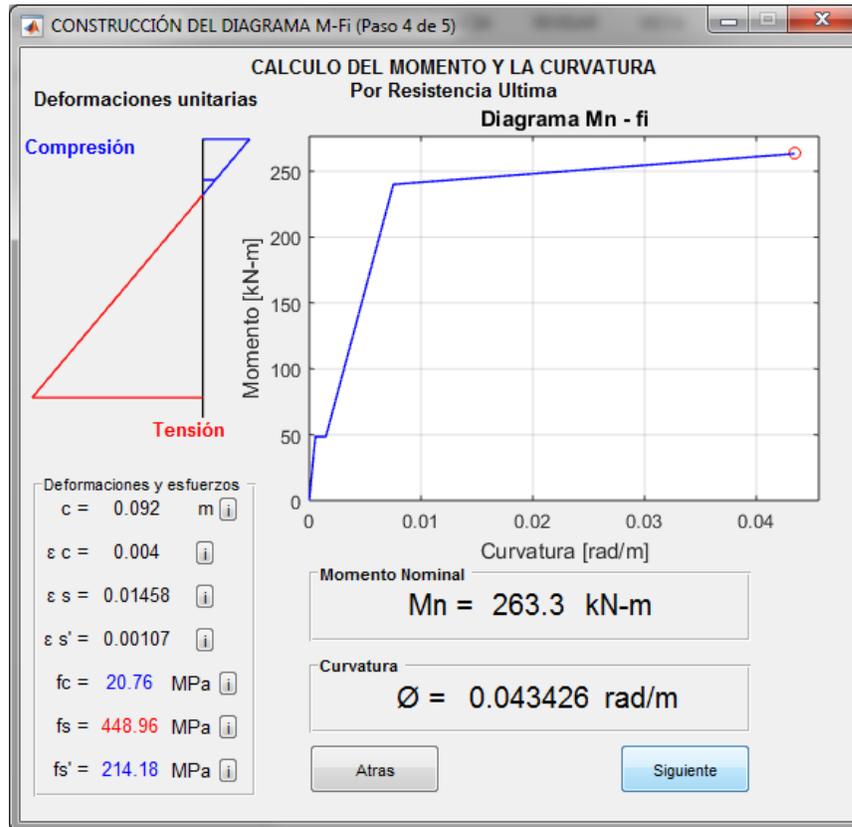


Figura 19. Paso 4 de 5, módulo de conceptualización.
Fuente: Elaboración propia

El paso 4 corresponde al instante en el que el concreto confinado llega a la deformación última. Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ El concreto tiene un comportamiento plástico y es válida la consideración del diagrama de esfuerzos como un bloque rectangular de compresión (bloque de compresión de Whitney).
- ✓ Para describir el comportamiento del concreto confinado se utilizará el modelo de Mander et al. (1988).
- ✓ El esfuerzo en el acero obedece a un modelo constitutivo bilineal con endurecimiento por deformación parabólico.
- ✓ El acero superior podría tener un esfuerzo mayor al de fluencia y podría estar o no en tracción (dependiendo de la deformación y la cuantía de refuerzo de la sección).

- ✓ El acero inferior podría tener un esfuerzo mayor al de fluencia dependiendo de la deformación.
- ✓ A pesar de la pérdida del concreto por debajo del eje neutro y el comportamiento plástico del concreto, se considera que las secciones planas permanecen planas y por tal razón el diagrama de deformaciones sigue siendo válido.

Caso 1 – Acero superior a compresión

De acuerdo con el equilibrio de fuerzas bajo las condiciones mencionadas anteriormente se tiene:

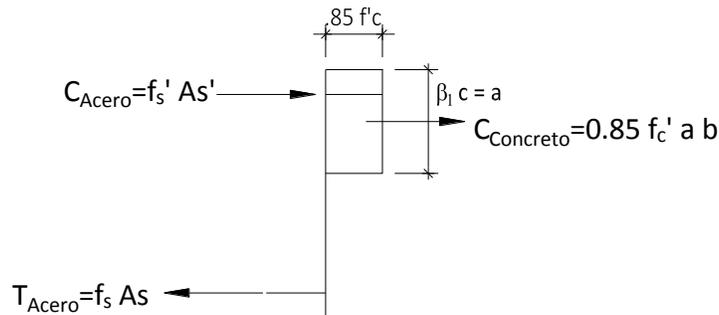


Figura 20. Diagrama de fuerzas- bloque de compresión, acero superior en compresión.
Fuente: Elaboración propia

$$f_s * A_s = f'_s * A_s' + 0.85 * f'_c * a * b \quad (92)$$

Conociendo que:

$$\varepsilon_s = \frac{(d - c) * \varepsilon_c}{c} ; \varepsilon_s' = \frac{(c - d') * \varepsilon_s}{(d - c)} ; \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad (93)$$

Se tiene:

$$f_s(c) * A_s = f'_s(c) * A_s' + 0.85 * f'_c * a * b \quad (94)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 * \left[\frac{f'_c - 28}{7} \right] \geq 0.65 \text{ [MPa]} \quad (95)$$

$$a = \beta_1 * c \quad (96)$$

Como ya se conoce, el esfuerzo en el acero inferior y superior depende de la deformación en el mismo, ecuaciones (33), (34) y (35) y a su vez la deformación en el acero superior e inferior depende de la profundidad del eje neutro, por lo que finalmente y como puede observarse en la ecuación (96) los esfuerzos en el acero inferior y superior son funciones de la profundidad del eje neutro c , donde es evidente que c es la única incógnita.

Una vez encontrada la profundidad del eje neutro c se procede a resolver la sección encontrando deformaciones, esfuerzos y fuerzas.

Concreto

La fuerza de compresión se calcula como:

$$F_{comp.c} = 0.85 * f_c' * a * b \quad (97)$$

Aplicada a una distancia $a/2$ medida desde la fibra en compresión más alejada del eje neutro

Acero inferior a tracción

Dependiendo de la deformación en el acero inferior se encontrará el esfuerzo en el mismo con las ecuaciones (33), (34) o (35). La fuerza en el acero inferior está dada por:

$$F_{tracc.s} = f_s * A_s \quad (98)$$

Acero superior a compresión

Dependiendo de la deformación en el acero superior se encontrará el esfuerzo en el mismo con las ecuaciones (33), (34) o (35). La fuerza en el acero superior está dada por:

$$F_{comp.s'} = f'_s * A_s' \quad (99)$$

Puede encontrarse el momento nominal de la siguiente forma:

$$Mn = F_{comp.c} * \left(d - \frac{a}{2}\right) + F_{comp.s'} * (d - d') \quad (100)$$

Finalmente la curvatura se encuentra con la misma ecuación (66) o (67) del paso 1.

Caso 2 – Acero superior a tracción

De acuerdo con el equilibrio de fuerzas con las condiciones mencionadas anteriormente se encuentra:

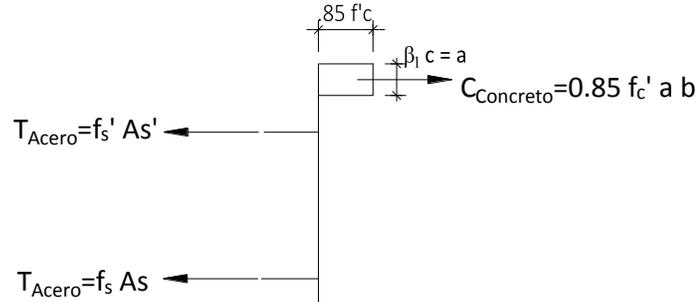


Figura 21. Diagrama de fuerzas-bloque de compresión, acero superior en tracción.
Fuente: Elaboración propia

$$f_s * A_s + f'_s * A_s' = 0.85 * f'_c * a * b \quad (101)$$

Conociendo que:

$$\varepsilon_s = \frac{(d - c) * \varepsilon_c}{c} ; \varepsilon_s' = \frac{(d' - c) * \varepsilon_s}{(d - c)} ; \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad (102)$$

Se tiene:

$$f_s(c) * A_s + f'_s(c) * A_s' = 0.85 * f'_c * a * b \quad (103)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 * \left[\frac{f'_c - 28}{7} \right] \geq 0.65 \quad [MPa] \quad (104)$$

$$a = \beta_1 * c \quad (105)$$

Como se ha realizado en los pasos anteriores se calcula la profundidad del eje neutro c y una vez encontrada se resuelve la sección encontrando deformaciones, esfuerzos y fuerzas.

Concreto

Para la fuerza de compresión se tiene:

$$F_{comp.c} = 0.85 * f_c' * a * b \quad (106)$$

Aplicada a una distancia $a/2$ medida desde la fibra en compresión más alejada del eje neutro

Acero inferior a tracción

Dependiendo de la deformación en el acero inferior se encontrará el esfuerzo en el mismo con las ecuaciones (33), (34) o (35). La fuerza en el acero inferior está dada por:

$$F_{tracc.s} = f_s * A_s \quad (107)$$

Acero superior a tracción

Dependiendo de la deformación en el acero superior se encontrará el esfuerzo en el mismo con las ecuaciones (33), (34) o (35). La fuerza en el acero superior está dada por:

$$F_{tracc.s'} = f_s' * A_s' \quad (108)$$

Se puede encontrar el momento nominal de la siguiente forma:

$$Mn = F_{tracc.s} * \left(d - \frac{a}{2}\right) + F_{tracc.s'} * \left(d' - \frac{a}{2}\right) \quad (109)$$

Finalmente la curvatura se encuentra con la misma ecuación (66) o (67) del paso 1.

3.1.1.5 Paso 5 de 5

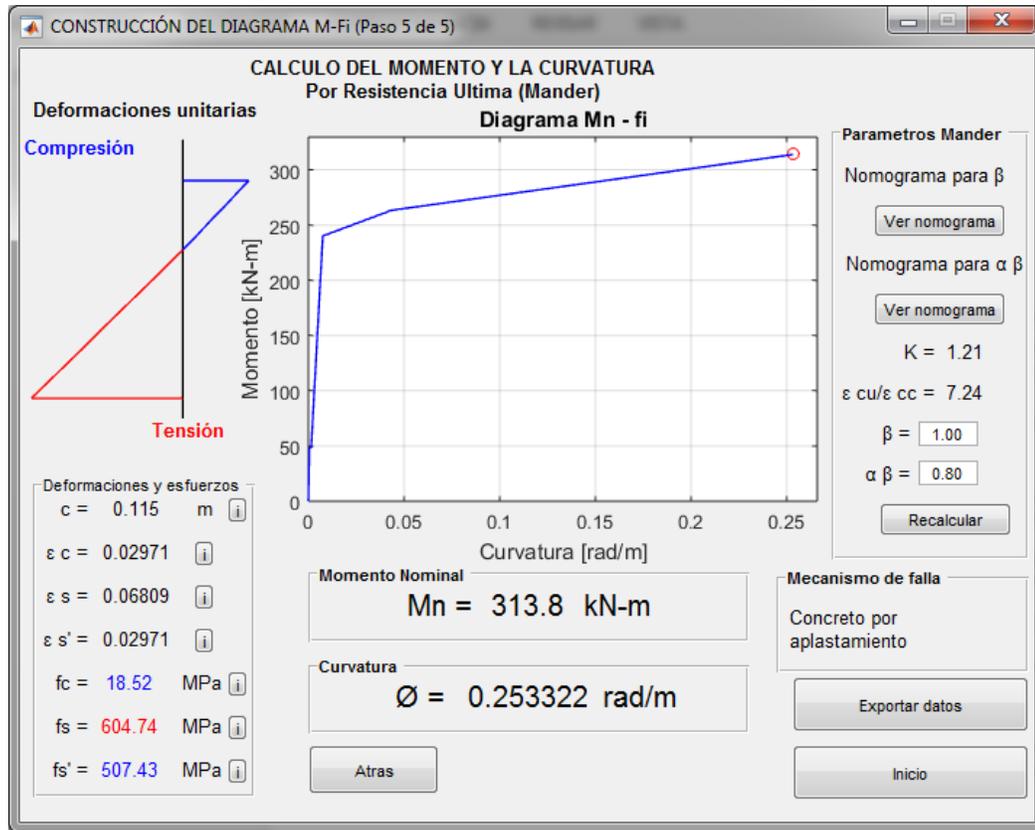


Figura 22. Paso 5 de 5, módulo de conceptualización.
Fuente: Elaboración propia

En el paso 5 se da a conocer el mecanismo de falla de la sección y se muestra la opción “Exportar datos” la cual crea un archivo .xls con la recopilación de todas la variables involucradas en la construcción de la curva y sus puntos.

Este último paso corresponde al instante en el que el concreto confinado llega a la deformación última. Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ El concreto tiene un comportamiento plástico y es válida la aproximación del esfuerzo a un bloque rectangular de compresión (bloque de compresión de Whitney modificado por Mander et al. (1988))
- ✓ El concreto confinado ha llegado a la deformación de descascaramiento (spalling), por lo tanto no se tiene en cuenta el concreto confinado perteneciente al recubrimiento superior.

- ✓ Para describir el comportamiento del concreto confinado se utilizará el modelo de Mander et al. (1988)
- ✓ El esfuerzo en el acero obedece a un modelo constitutivo bilineal con endurecimiento por deformación parabólico.
- ✓ El acero superior podría tener un esfuerzo mayor al de fluencia.
- ✓ El acero inferior podría tener un esfuerzo mayor al de fluencia.
- ✓ A pesar de la pérdida del concreto bajo del eje neutro y el recubrimiento superior, se considera que las secciones planas permanecen planas y por tal razón el diagrama de deformaciones sigue siendo válido.

Realizando un equilibrio de fuerzas con las condiciones mencionadas anteriormente se tiene:

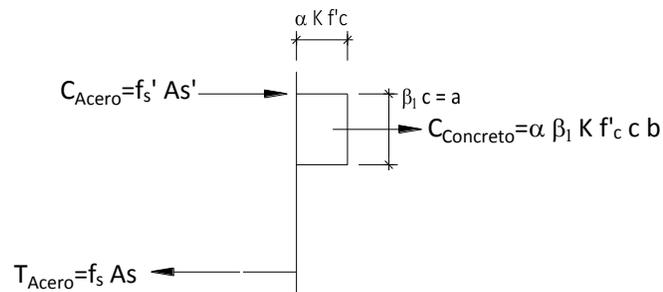


Figura 23. Diagrama de fuerzas según Mander confinado.
Fuente: Elaboración propia

$$f_s * A_s = f_s' * A_s' + \alpha * \beta_1 * K * f_c' * c * b \quad (110)$$

Conociendo que

$$\varepsilon_s = \frac{((d - rec. sup) - c) * \varepsilon_{cu}}{c} ; \varepsilon_s' = \varepsilon_{cu} ; \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad (111)$$

Se tiene:

$$f_s(c) * A_s = f_s'(c) * A_s' + \alpha * \beta_1 * K * f_c' * c * b \quad (112)$$

De las anteriores ecuaciones se calcula la profundidad del eje neutro, c.

Los factores α y β_1 se pueden encontrar con los nomogramas dados en el modelo de Mander et al. (1988), los cuales básicamente dependen de la relación entre deformaciones máximas del concreto confinado e inconfinado y del coeficiente de confinamiento efectivo K , que corresponde a la relación entre f'_{cc} y f'_c .

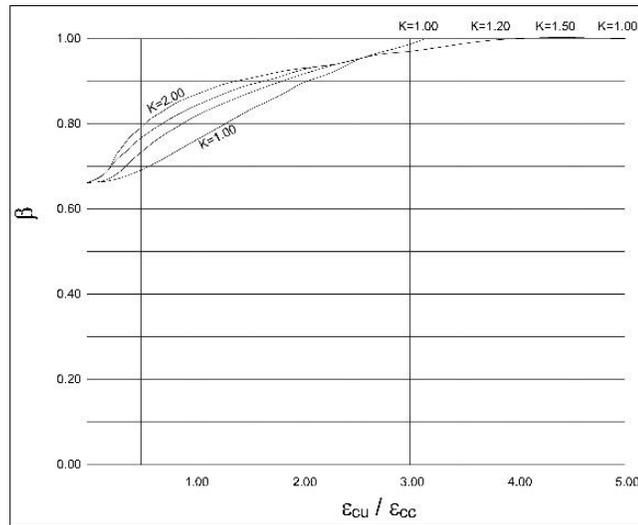


Figura 24. Nomograma para encontrar el coeficiente β .
Fuente: Mander et al. (1988)

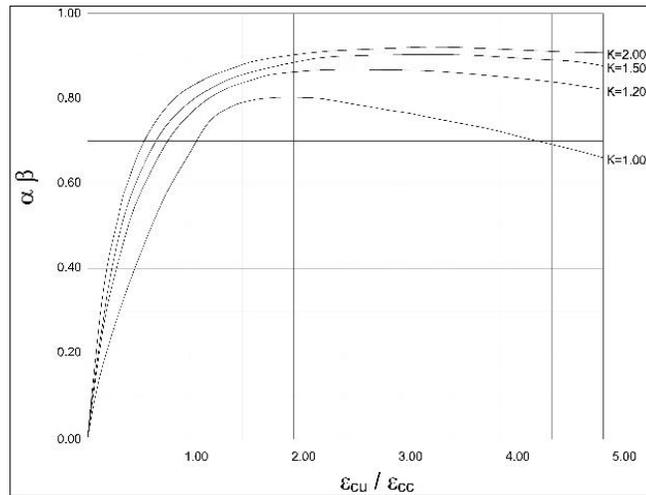


Figura 25. Nomograma para encontrar la relación $\alpha\beta$.
Fuente: Mander et al. (1988)

Una vez encontrada la profundidad del eje neutro c se procede a resolver la sección encontrando deformaciones, esfuerzos y fuerzas.

Concreto

Para la fuerza de compresión se tiene:

$$F_{comp.c} = \alpha * \beta_1 * K * f'_c * c * b = \alpha * K * f'_c * a * b \quad (113)$$

Aplicada a una distancia $a/2$ medida desde la fibra en compresión más alejada del eje neutro

Acero inferior a tracción

Dependiendo de la deformación en el acero inferior se encontrará el esfuerzo en el mismo con las ecuaciones (33), (34) o (35). La fuerza en el acero inferior está dada por:

$$F_{tracc.s} = f_s * A_s \quad (114)$$

Acero superior a compresión

Debido a que el acero superior se encuentra ubicado prácticamente a la misma altura de la fibra de concreto más comprimida, se considera válido tomar la deformación del acero a compresión igual a la máxima deformación del concreto confinado, la cual, depende en este caso del modelo de Mander et al. (1988). Dependiendo de la deformación en el acero superior se encontrará su esfuerzo con las ecuaciones (33), (34) o (35). La fuerza en el acero superior está dada por:

$$F_{tracc.s'} = f'_s * A_s' \quad (115)$$

El momento nominal se calcula de la siguiente forma:

$$Mn = F_{tracc.s'} * (d - rec.sup) + F_{comp.c} * \left((d - rec.sup) - \frac{a}{2} \right) \quad (116)$$

Finalmente la curvatura se encuentra con la misma ecuación (66) o (67) del paso 1

3.1.2 Módulo de ejecución

Como se dijo anteriormente, el módulo de ejecución está concebido para producir y bilinealizar diagramas de momento – curvatura para diferentes secciones en vigas y columnas de concreto reforzado. En este módulo los diagramas se calculan a partir de un modelo de plasticidad distribuida representado por fibras, por lo que el análisis estructural debe llevarse a cabo con una herramienta apropiada. Con este fin, se escogió el software OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) desarrollado en la Universidad de Berkeley. Este es un software de código abierto especialmente diseñado para simular el comportamiento sísmico de sistemas estructurales y geotécnicos, basado en el lenguaje Tcl/Tk.

El módulo en cuestión consta de tres fases:

- ✓ Preprocesamiento
- ✓ Procesamiento
- ✓ Posprocesamiento

La fase de preprocesamiento, se realiza directamente dentro de MatLab y se encarga de recibir, ordenar y guardar todos los datos de entrada de la sección que se analizará; además, construye cada uno de los archivos .tcl que serán analizados posteriormente por OpenSees.

La fase de procesamiento se encarga de analizar la sección definida por medio de los archivos .tcl creados anteriormente. En esta fase OpenSees interpreta la sección como un modelo de fibras y la resuelve por elementos finitos, para luego crear un archivo de salida con los datos del análisis.

La fase de posprocesamiento es la encargada de organizar los datos de salida de la fase de procesamiento, mostrando finalmente al usuario, y de nuevo mediante MatLab, datos como el propio diagrama momento curvatura, el mecanismo de falla de la sección y, para cada material, los esfuerzos y deformaciones máximas en la fibra más alejada del eje neutro durante todo el análisis. La mayoría de programas de análisis estructural requieren diagramas momento curvatura bilinealizados para

caracterizar las rótulas plásticas; por esta razón se realiza la bilinealización del diagrama momento curvatura por medio de la metodología descrita en ATC-40, en la que el área bajo la curva no linealizada es igual a la de la curva bilinealizada.

A continuación, se presenta un ejemplo típico y se explica el procedimiento que realiza el módulo de ejecución para la construcción de la curva momento curvatura de una sección tipo viga.

Al entrar al módulo de ejecución aparecerá una ventana donde se aprecian los tipos de sección estructural disponibles para analizar. Para este caso se selecciona sección tipo viga con el fin de hacer una comparación directa con el módulo de conceptualización.

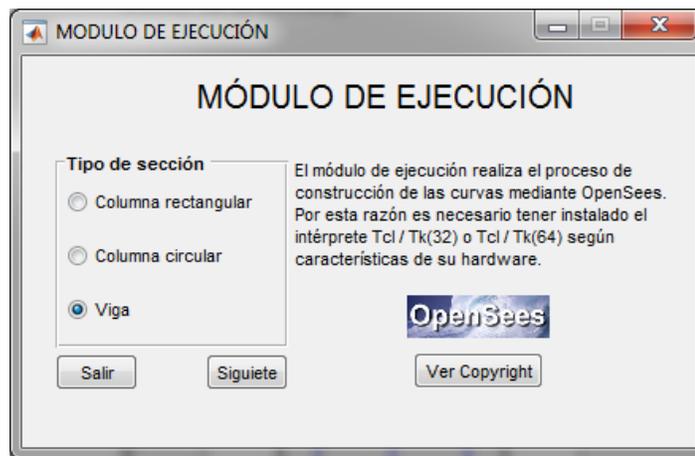


Figura 26. Ventana principal, módulo de ejecución.
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente definimos variables generales como la geometría, recubrimiento, distribución de refuerzo longitudinal superior e inferior, distribución de refuerzo transversal y diámetro de refuerzos. Adicional a lo anterior, y, debido a que la sección se resuelve por medio de la teoría de elementos finitos, se recomienda revisar la discretización, ya que para secciones con determinadas dimensiones es innecesario manejar el mínimo tamaño de fibra ofrecido por el programa.

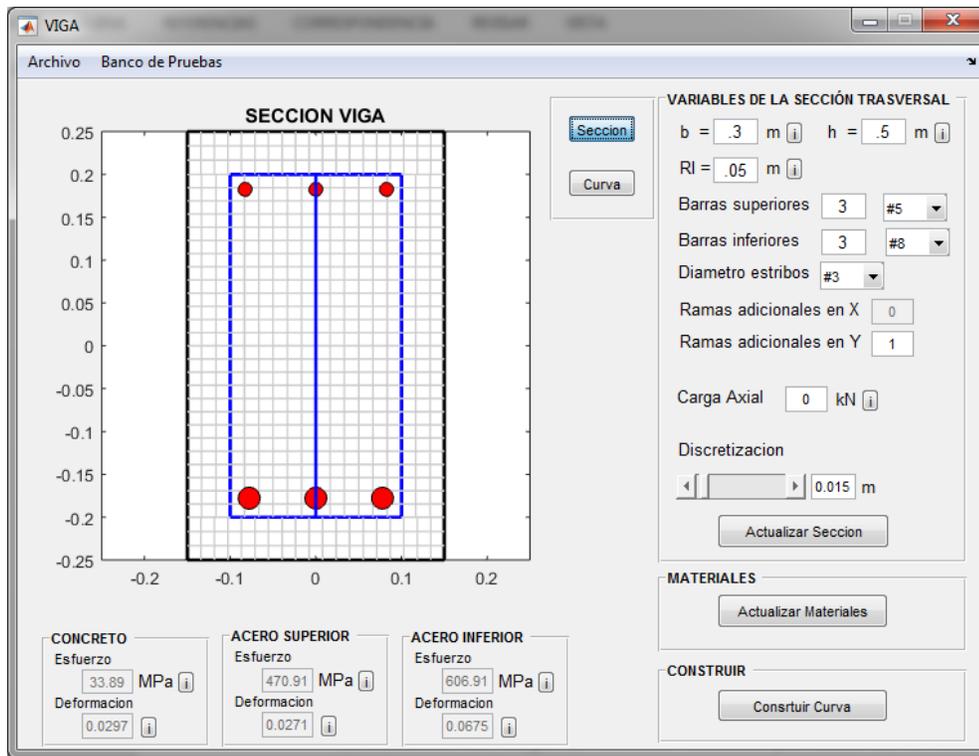


Figura 27. Sección viga, módulo de ejecución.
 Fuente: Elaboración propia

Una vez definidas todas las variables se actualiza la sección y se procede a revisar los materiales que la componen.

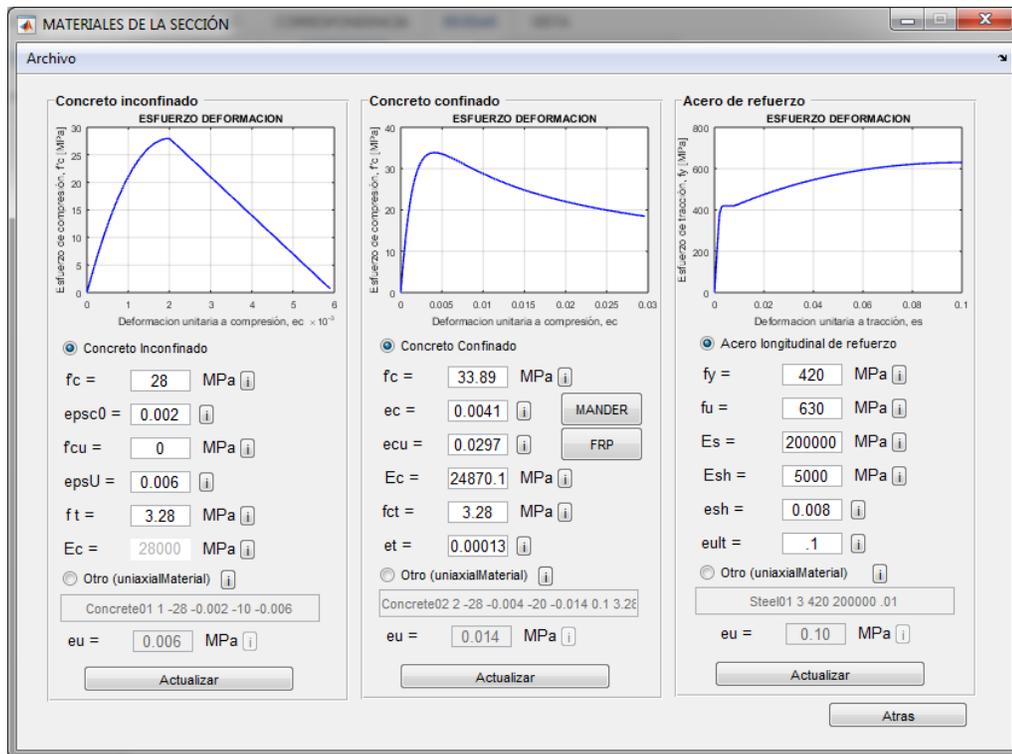


Figura 28. Materiales de la sección, módulo de ejecución.
Fuente: Elaboración propia

En la ventana Materiales de la Sección se podrán definir los materiales que componen la sección estructural. Es importante mencionar que los materiales usados en el análisis son materiales uniaxiales, los cuales basan su comportamiento en un modelo específico definido por OpenSees.

3.1.2.1 Concreto confinado

El concreto confinado se define mediante el material uniaxialMaterial Concrete02, el cual está basado en el modelo de Kent y Park (1971). Las variables que requiere este modelo son las siguientes:

- ✓ $f'c$ = Resistencia a la compresión del concreto confinado
- ✓ $epsc0$ = Deformación para la máxima resistencia del concreto confinado
- ✓ $f'cu$ = Resistencia última a compresión del concreto confinado
- ✓ $epsU$ = Deformación para la resistencia última del concreto confinado

✓ f_t = Resistencia a la tracción del concreto inconfinado

3.1.2.2 Concreto Confinado

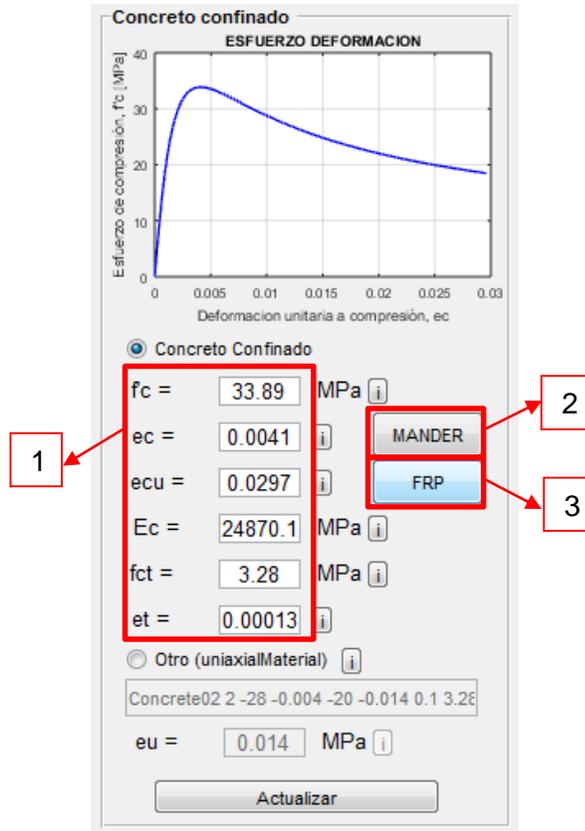


Figura 29. Materiales de la sección, definición del concreto confinado.
Fuente: Elaboración propia

El concreto confinado se puede definir de tres formas, la primera, insertando los valores en los campos requeridos (recuadro número 1), la segunda, con ayuda del botón Mander (recuadro número 2), el cual nos ayuda a llenar el recuadro número 1 con las variables definidas por el modelo de Mander et al. (1988), y la tercera, con ayuda del botón FRP (recuadro número 3), el cual define un concreto confinado con fibras siguiendo el modelo de Lam, Teng, et al. (2009)



Figura 30. Definición modelo Mander, módulo de ejecución.
Fuente: Elaboración propia

Se observa que los valores del modelo de Mander et al. (1988) son los mismos calculados en el ejemplo dado para el módulo de conceptualización.

Cuando se define el concreto confinado con el modelo de Mander et al. (1988), la modelación de este material en OpenSees, se realiza mediante el material uniaxialMaterial Concrete04 el cual está basado en el modelo Popovics (1973) que es la base del modelo de Mander y cuando se define el concreto FRP, la modelación de este material en OpenSees se realiza con el material uniaxialMaterial Concrete01 el cual se asemeja bastante al modelo de Lam, Teng, et al. (2009).

Las variables que requiere el modelo de Mander et al. (1988) (recuadro 1) son:

- ✓ $f'c$ = Resistencia a la compresión del concreto confinado
- ✓ ϵ_c = Deformación para la máxima resistencia del concreto confinado
- ✓ ϵ_{cu} = Deformación máxima del concreto confinado
- ✓ E_c = Modulo de elasticidad del concreto
- ✓ f'_{ct} = Resistencia a la tracción del concreto confinado
- ✓ ϵ_t = Deformación máxima del concreto en tracción

Las variables que requiere el concreto FRP son:

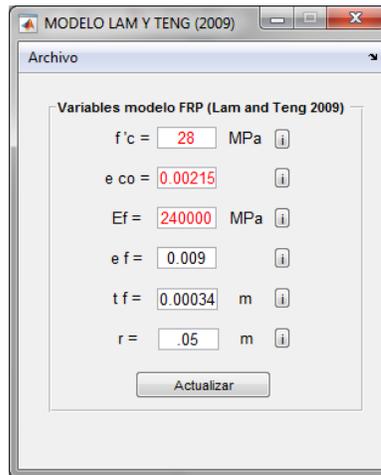


Figura 31. Definición modelo Lam, Teng et al. (2009, módulo de ejecución.
Fuente: Elaboración propia

- ✓ $f'c$ = Resistencia a la compresión del concreto
- ✓ e_{co} = Deformación unitaria para la máxima resistencia a compresión del concreto
- ✓ E_f = Modulo de elasticidad para la fibra de refuerzo
- ✓ e_f = Deformación unitaria máxima a tracción de la fibra (fibra curada)
- ✓ t_f = Deformación unitaria máxima a tracción de la fibra (fibra curada)
- ✓ r = Radio de curvatura de la fibra en secciones rectangulares

3.1.2.3 Acero de refuerzo

El acero de refuerzo se define mediante el material uniaxial Material Reinforcing Steel, el cual se ajusta al modelo de Thompson y Park (1978) para el acero (bilineal con endurecimiento por deformación parabólico). Las variables que requiere este modelo son las siguientes:

- ✓ f_y = Esfuerzo de fluencia del acero
- ✓ f_u = Esfuerzo de rotura del acero
- ✓ E_s = Modulo de elasticidad del acero
- ✓ E_{sh} = Modulo de elasticidad tangente al inicio de la parábola de endurecimiento por deformación

- ✓ esh = Deformación en la que inicia el endurecimiento por deformación
- ✓ eult = Deformación de rotura del acero

Como opción adicional, es posible definir cada material de la sección de concreto, con cualquiera de los materiales uniaxiales de los que dispone OpenSees. Solo hace falta picar el botón “otro” y definir el material como lo especifica el manual de OpenSees para cada material. Se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El Material TAG, que es el identificador del material dentro de OpenSees siempre deberá corresponder como se muestra a continuación:
 - ✓ 1 para el concreto confinado
 - ✓ 2 para el concreto confinado
 - ✓ 3 para el acero de refuerzo
2. La caja de texto eu debe llenarse con la deformación última de cada material, sin importar que esta información se repita en la caja de texto anterior.

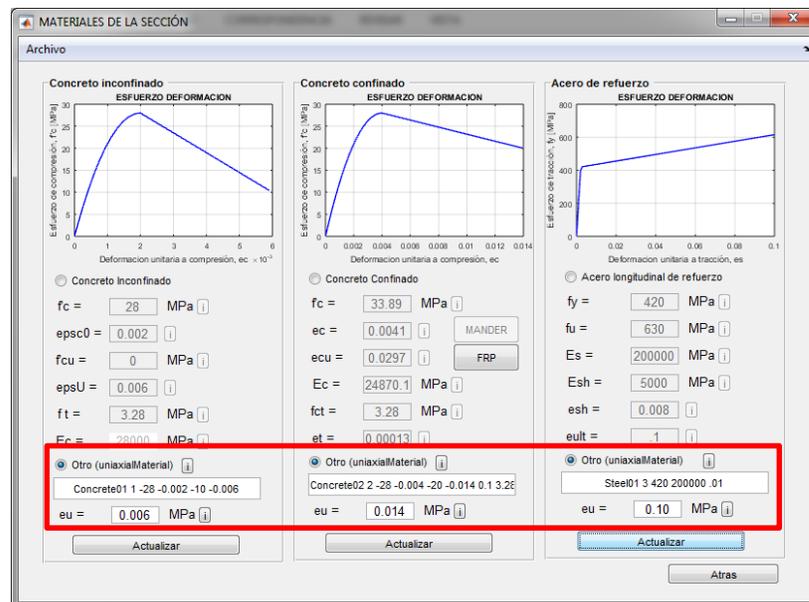


Figura 32. Definición de materiales adicionales con OpenSees.
Fuente: Elaboración propia

Una vez definidos y actualizados los materiales se puede regresar a la ventana inicial y proceder con la construcción del diagrama momento curvatura.

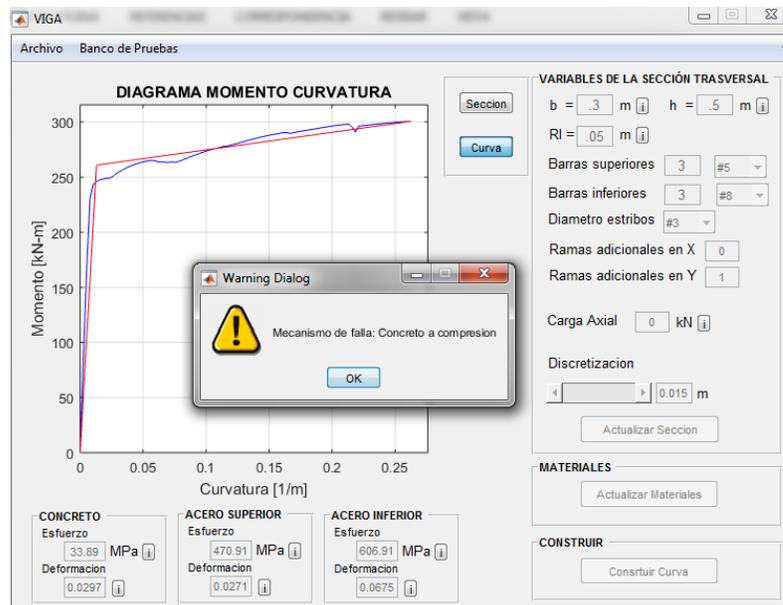


Figura 33. Curva construida, mecanismo de falla.
Fuente: Elaboración propia

Posterior a la ejecución del análisis el posible visualizar el mecanismo de falla e importar los datos de salida a un archivo .xls los cuales incluyen información general de la sección y los puntos del diagrama momento curvatura con y sin la bilinealización.

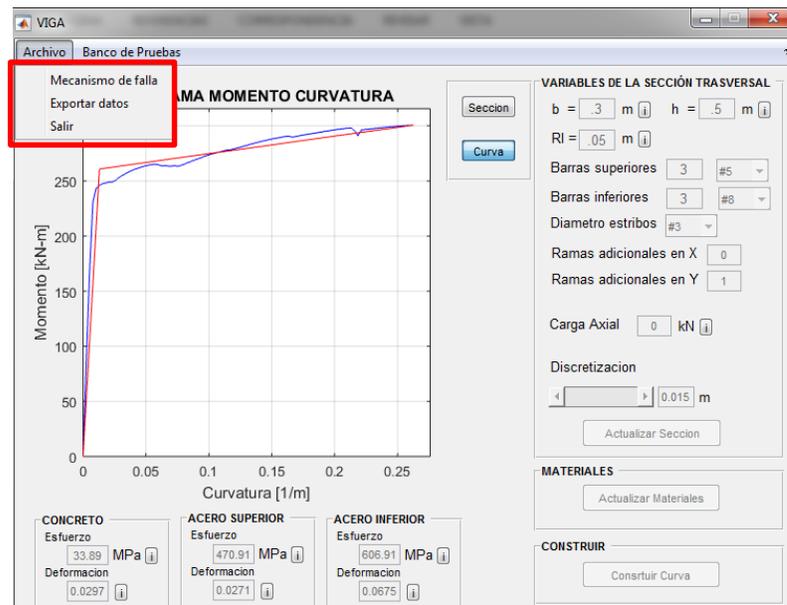


Figura 34. Visualización mecanismo de falla y exportar datos.
Fuente: Elaboración propia

Capítulo V: Verificación y validación de la herramienta

4.1 Verificación de usabilidad de la herramienta

En el marco del curso de evaluación y reforzamiento de estructuras (2017-1) se realizaron pruebas con la ayuda de 10 estudiantes de posgrado y 2 de pregrado, esto con el fin de verificar qué tan efectivo es el módulo de conceptualización y de intentar medir la usabilidad de la herramienta. Se realizó también una encuesta electrónica (anexo C) a los estudiantes, la cual arrojó resultados satisfactorios, debido a que la mayoría de los estudiantes indicó haber reforzado los conocimientos vistos en clase mediante el módulo de conceptualización y manifestó que la herramienta fue muy didáctica y sencilla de usar. Es importante anotar que los estudiantes tenían la opción de utilizar SAP2000 o XTRACT pero escogieron trabajar con la herramienta propuesta dada su facilidad de utilización.

Además, existió una retroalimentación por parte de los estudiantes que contribuyó en gran medida a mejorar la usabilidad de la herramienta. Algunos aspectos que se mejoraron gracias a la retroalimentación fueron:

- ✓ Se crearon botones de información para describir qué significaba cada variable
- ✓ Se realizó una asociación de colores en los diagramas de deformación unitaria dependiendo del estado de esfuerzo del material (compresión - tensión)
- ✓ Se mostraron todos los esfuerzos y deformaciones de los materiales que hacen parte de la sección en estudio.
- ✓ Se implementaron ayudas para evitar que el usuario ingrese datos inconsistentes y si lo hace, se establecieron alertas que le ayudan a corregir los datos, esto con el fin de reducir respuestas inesperadas de la herramienta.

4.2 Banco de pruebas

Debido a que la programación en el módulo de ejecución de la herramienta es muy extensa, se decidió construir un banco de pruebas, que consiste en el análisis predeterminado de un número de secciones con características invariables, para de esta manera poder visualizar

con mayor facilidad cualquier cambio o mejora futura una vez se requiera modificar el código de la aplicación. En el anexo A se encuentran los resultados de cada una de las secciones del banco de pruebas.

Para ejecutar una sección del banco de pruebas, se debe dirigir a la opción banco de pruebas ubicada en el menú superior de cualquier sección del módulo de ejecución.

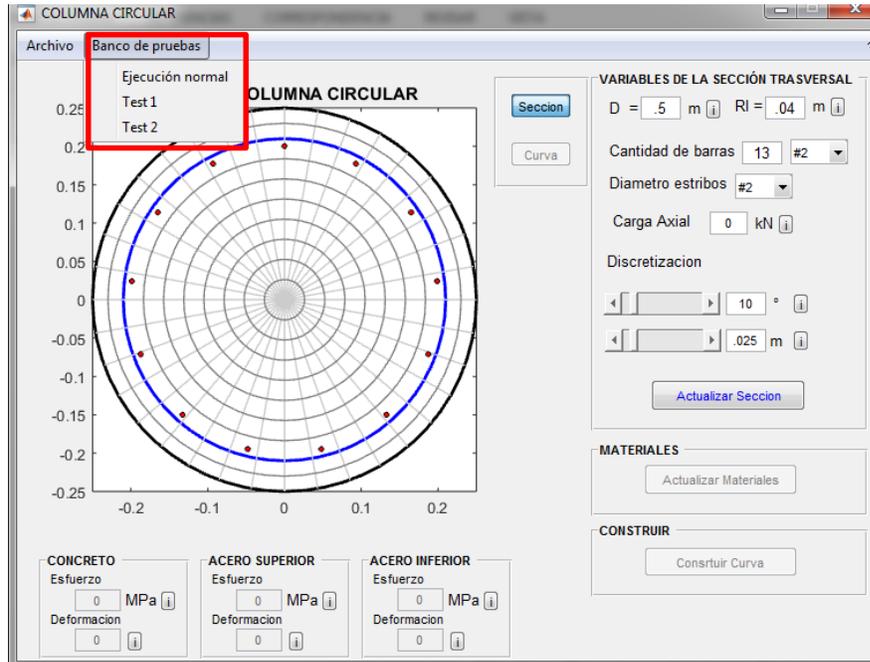


Figura 35. Banco de pruebas para cualquier sección del módulo de ejecución.
Fuente: Elaboración propia

4.3 Fase de verificación y validación

Para la etapa de verificación se analizaron 60 diferentes tipos de secciones en concreto reforzado, teniendo en cuenta un patrón aleatorio en la mayoría de las variables que pueden intervenir en la construcción de cada curva. Posteriormente se proporcionaron los datos de las 60 secciones al programa Xtract y se compararon los diagramas construidos con los dos programas. La comparación se realizó a través de 2 parámetros característicos del diagrama momento curvatura.

- ✓ Curvatura máxima
- ✓ Momento máximo

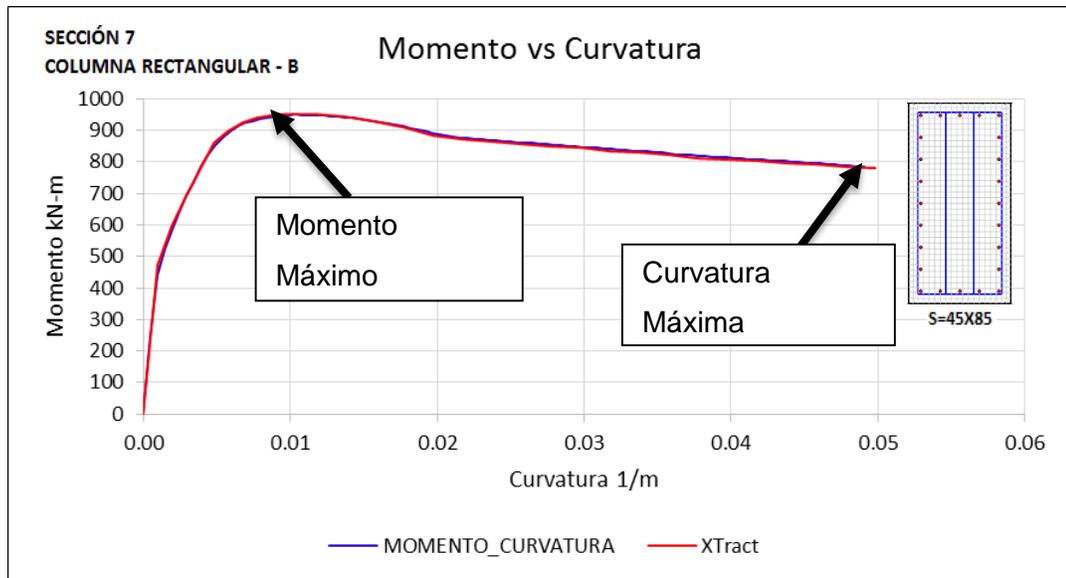


Figura 36. Parámetros característicos en la curva momento curvatura.
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados de la etapa de verificación.

Para el parámetro Curvatura máxima respecto a la curva construida con Xtract

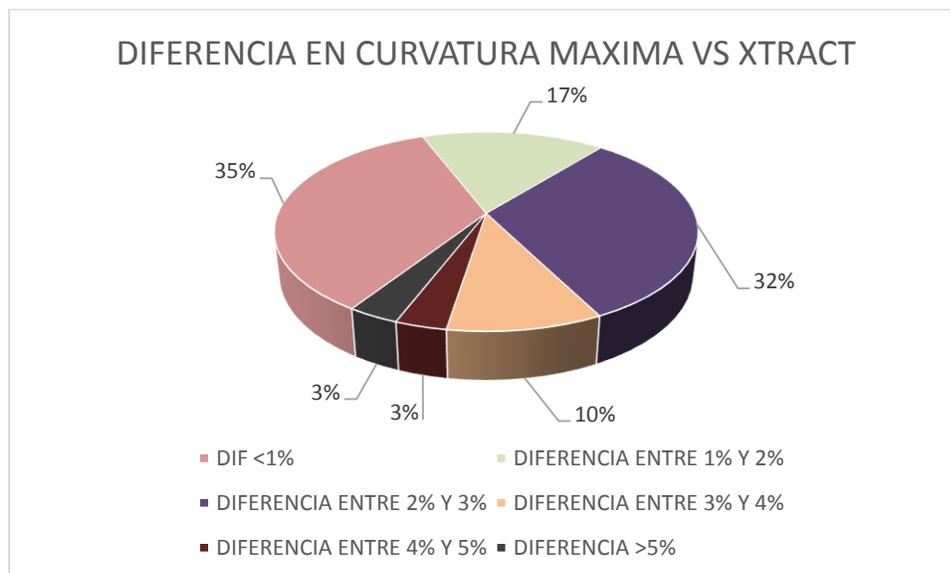


Figura 37. Diferencia en curvatura máxima vs XTract.

Fuente: Elaboración propia

- ✓ El 35% de las secciones analizadas presentan una diferencia menor al 1%
- ✓ El 17% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 1% y el 2%
- ✓ El 32% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 2% y el 3%
- ✓ El 10% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 3% y el 4%
- ✓ El 3% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 4% y el 5%
- ✓ El 3% de las secciones analizadas presentan una diferencia mayor al 5%
- ✓ La mayor diferencia correspondió a un 6.76%

Para el parámetro Momento máximo respecto a la curva construida con Xtract

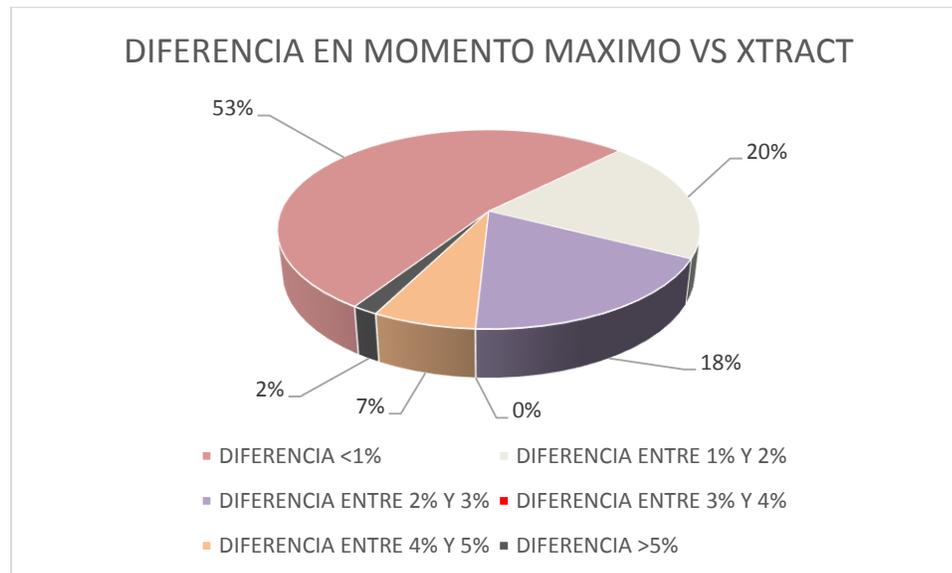
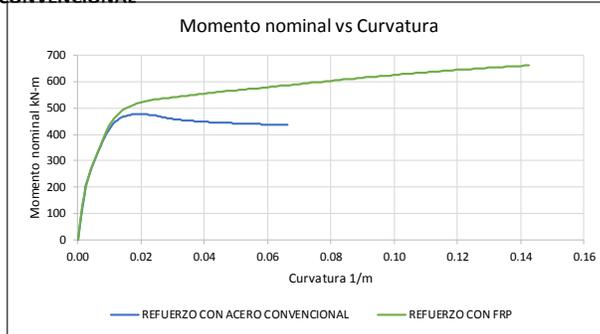
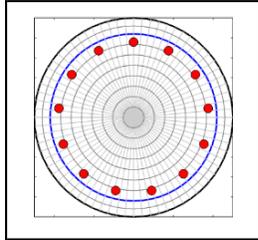


Figura 38. Diferencia en momento máximo vs Xtract.
Fuente: Elaboración propia

- ✓ El 53% de las secciones analizadas presentan una diferencia menor al 1%
- ✓ El 20% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 2% y el 3%
- ✓ El 18% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 3% y el 4%
- ✓ El 0% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 4% y el 5%
- ✓ El 7% de las secciones analizadas presentan una diferencia entre el 4% y el 5%
- ✓ El 2% de las secciones analizadas presentan una diferencia mayor al 5%
- ✓ La mayor diferencia correspondió a un 5.64%

Como parte del proceso de validación se realizó el ejercicio de comparar secciones con reforzamiento tradicional con acero y con FRP. A continuación, se presentan 4 secciones en donde se comparó el comportamiento de los dos tipos de confinamiento.

COLUMNA CIRCULAR - FRP VS REFUERZO CONVENCIONAL



D=50	13#7	Cuantía
As	50.31 cm ²	2.56%
Ag	1963.50 cm ²	
P _{n max}	5666 kN	30 % P _n
P _{aplicada}	1700 kN	
Estribos	#3	
Separación	15 cm	
f'c	28 MPa	
f'cc	32.53 MPa	
ecu	0.0123	

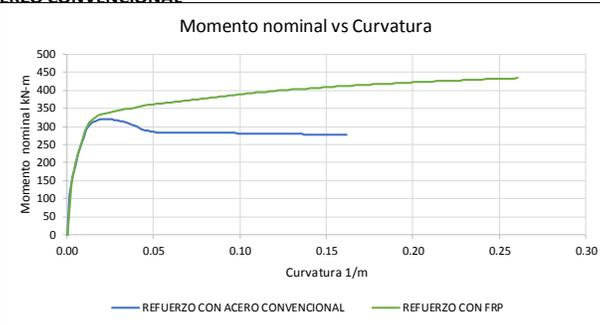
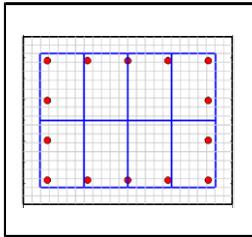
PROPIEDADES FRP	
Ef	240000 MPa
ef	0.009
tf	1.000 mm
r	-

Mecanismo de falla refuerzo con acero convencional
Falla Concreto a compresión

Mecanismo de falla refuerzo con FRP
Falla Concreto a compresión

Figura 39. Comparación columna circular. Refuerzo convencional vs FRP
Fuente: Elaboración propia

COLUMNA RECTANGULAR A - FRP VS REFUERZO CONVENCIONAL



S=50X40	12#5	Cuantía
As	27.86 cm ²	1.39%
Ag	2000.00 cm ²	
P _{n max}	5630 kN	21 % P _n
P _{aplicada}	1200 kN	
Estribos	#3	
Separación	20 cm	
f'c	28 MPa	
f'cc	22.63 MPa	
ecu	0.0104	

PROPIEDADES FRP	
Ef	240000 MPa
ef	0.0090
tf	1.00 mm
r	5 cm

Mecanismo de falla refuerzo con acero convencional
Falla Concreto a compresión

Mecanismo de falla refuerzo con FRP
Falla Concreto a compresión

Figura 40. Comparación columna rectangular A. Refuerzo convencional vs FRP
Fuente: Elaboración propia

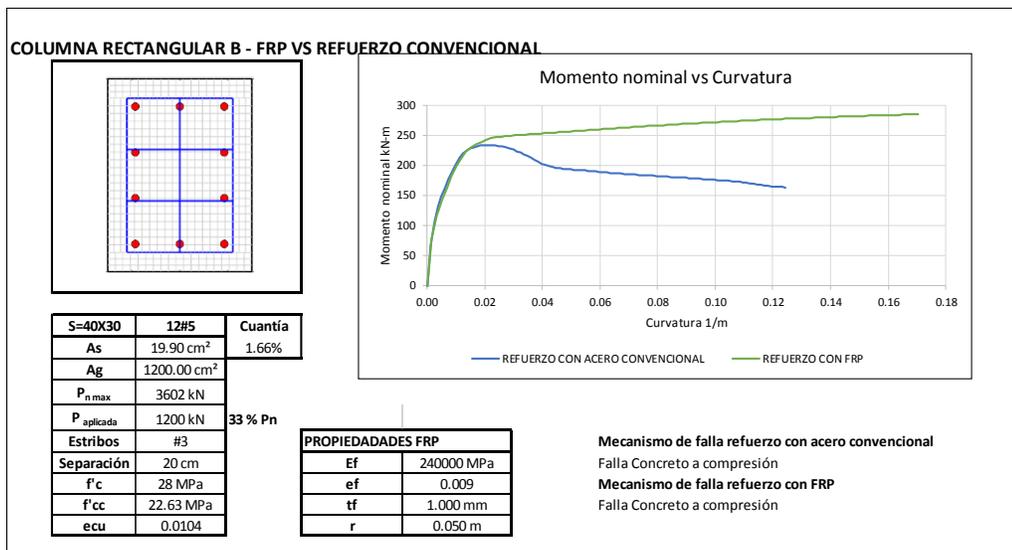


Figura 41. Comparación columna rectangular B. Refuerzo convencional vs FRP
Fuente: Elaboración propia

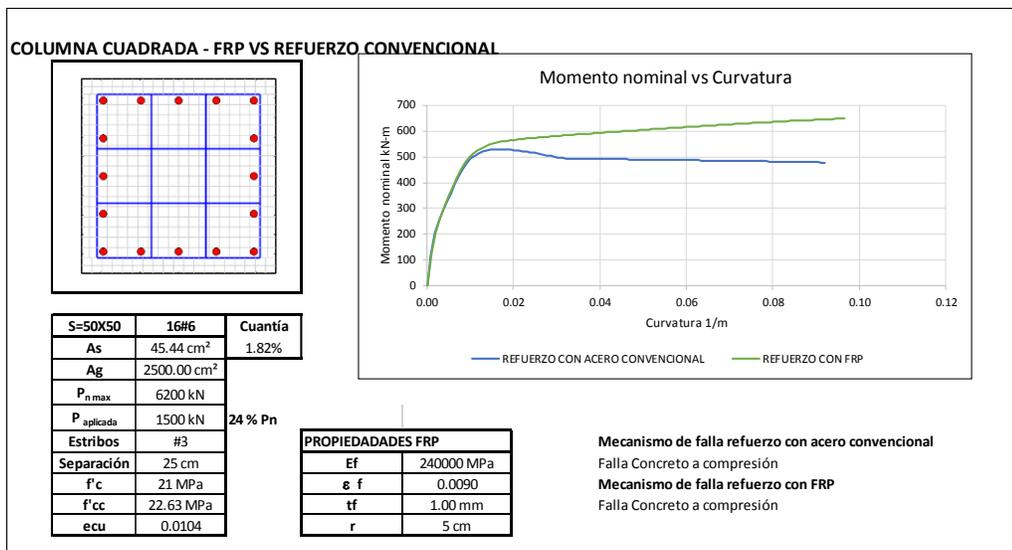


Figura 42. Comparación columna cuadrada. Refuerzo convencional vs FRP
Fuente: Elaboración propia

Se observan claramente las cualidades del reforzamiento con FRP, apreciando en todos los casos estudiados y dependiendo del espesor de la camisa, un aumento del momento resistente y un aumento de la curvatura de falla.

Capítulo VI: Conclusiones Y Recomendaciones

Como resultado del presente trabajo, se logró preparar para la comunidad académica una herramienta computacional que permite la conceptualización y materialización de diagramas momento curvatura para secciones convencionales de concreto reforzado, los cuales, son base fundamental para el acercamiento al comportamiento real de una estructura que se ve sometida a los efectos que genera un evento sísmico, claro está, a través de modelos matemáticos de tipo no lineal.

En la construcción de la interfaz gráfica principal (pre-procesamiento y post-procesamiento) se concluyó que MatLab fue una excelente alternativa debido a la sencilla integración con otro software como OpenSees (procesamiento) y a la facilidad en su entorno de programación.

Para representar los materiales en la sección de concreto reforzado se utilizaron los modelos constitutivos más utilizados en el medio. Aunque modelos como los de Mander et al. (1988) o Kent y Park (1971), no son modelos recientes, es importante resaltar que tampoco son modelos obsoletos, ya que son la base teórica de muchos de los modelos para concreto confinado usados actualmente.

Se incorporó la posibilidad de analizar una sección con confinamiento FRP utilizando el modelo de Lam, Teng, et al. (2009); además, se dejó abierta la posibilidad para definir dentro de la herramienta un gran número de modelos adicionales en caso de llegar a ser requeridos, por ejemplo, al utilizar materiales no convencionales en la sección.

En comparación con los programas que existen actualmente para la construcción de los diagramas en cuestión, se logró implementar una alternativa que brinda mayor compatibilidad con usuarios que no poseen conocimientos profundos en el tema, ayudándolos en la comprensión de los diagramas y posteriormente, gracias a la bilinealización realizada dentro de la herramienta, materializando el diagrama para ser usado de manera rápida y sencilla en un análisis no lineal.

En la etapa de verificación y validación se usó el software Xtract V3.0.9 para establecer los valores de referencia. Se compararon 60 diferentes tipos de secciones transversales de concreto reforzado, modificando las variables de los diagramas tales como carga axial, cuantía de refuerzo longitudinal y cuantía de refuerzo horizontal, pudiendo concluir para el muestreo seleccionado que el 80% de las muestras presentó un porcentaje de diferencia menor al 3% en los dos parámetros de comparación (momento máximo y curvatura máxima) y tan solo el 3 % de las muestras supero el porcentaje de diferencia en un 5% pero en ningún caso fue superior al 7%. Los porcentajes de diferencia mencionados se consideran aceptables ya que responden a diferencias en la discretización del modelo de fibras para el análisis por elementos finitos: i) al número de fibras, y ii) al tipo de elemento finito (cuadrangular vs triangular) utilizado para caracterizar las fibras en los análisis. Es importante anotar que, en el análisis no lineal completo de una estructura, representado en su curva de capacidad, no se encuentra diferencia entre trabajar con las curvas generadas por XTRACT o las generadas con la herramienta propuesta.

Debido a que la herramienta se diseñó pensando en que debía tener un alto nivel de versatilidad para el usuario, los tiempos en la definición de secciones convencionales de concreto reforzado, son mucho menores comparados con programas comerciales, además, es clave mencionar que la generación de datos de salida se realiza a través de archivos .xls lo cual permite al usuario, facilidad a la hora de manipular la información.

Para optimizar los recursos computacionales se recomienda realizar una calibración de la discretización, la cual, se puede realizar corriendo el análisis de una sección específica y verificando hasta qué tamaño de fibra los resultados se consideran semejantes.

La herramienta cuenta con instaladores para sistemas operativos a partir de Microsoft Windows 7 o superior de 32 o 64 bits.

Se propone que, en proyectos posteriores basados en este trabajo, se elabore una fase de verificación formal incluyendo una certificación de los algoritmos utilizados, creando estrategias para la para la verificación exhaustiva, con el fin de que con la variación de cualquier parámetro siempre existan resultados consistentes.

Se alienta a la comunidad académica a adelantar proyectos similares a este, esperando que en el futuro la herramienta pueda contar con módulos adicionales para secciones de acero y para muros de concreto considerando los elementos de borde. Es indispensable usar el banco de pruebas para revisiones y/o modificaciones futuras a la versión actual.

Capítulo VII: Referencias Y Bibliografía

American Concrete Institute (ACI). (2005). *“Building code requirements for structural concrete and commentary.”* ACI-318, Farmington Hills, Mich.

American Concrete Institute (ACI). (2008). *“Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.”* ACI-440 2R, Farmington Hills, Mich.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2012. *‘Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10’*. Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. Colombia, Bogotá D.C.

Carey, S. A., and Harries, K. A. (2005). *“Axial behavior and modeling of confined small-, medium-, and large-scale circular sections with carbón fiber-reinforced polymer jackets.”* ACI Struct. J., 102(4), 596– 604.

Carlos Aire, Ravindra Gettu, Joan Ramón Casas, Severino Marques y Dilze Marques. (2004). *‘Modelo Del Comportamiento Tensión-Deformación De Concreto Confinado Con FRP’*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro, 2004

Charles Chadwell, M.S., Lee Fishman, M.S., Troy Swenson, M.S. UCFYBER V2.1 (1999), *“Cross section analysis program for structural engineers”*

CSI, *“SAP2000 V14.2.4 (2010), Integrated Software for Structural Analysis and Design”* Computers and Structures Inc., Berkeley, California.

CSI, *“ETABS V9.7.2 (2010), Integrated Software for Structural Analysis and Design”* Computers and Structures Inc., Berkeley, California.

J. B. Mander, M. J. N. Priestley and R. Park. (1988). *‘Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete’*. Journal of Structural Engineering Vol 114 No. 8, August, 1988

Kent, D.C., and Park, R. (1971). "*Flexural members with confined concrete.*" Journal of the Structural Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 97(ST7), 1969-1990.

Lam, L., and Teng, J. G. 2003. "*Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete.*" Construction and Building Materials, Volume 17, Issues 6–7, September–October 2003, Pages 471-489

Lam, L., Teng J. G., Jienag T., Luo Y. Z. (2009), "*Refinement of a Design-Oriented Stress–Strain Model for FRP-Confined Concrete*". Journal of Composites for Construction, Volume 13 Issue 4 - August 2009

Lulia C. Mihai, Anthony D. Jefferson, Paul Lyons. (2016). "*A plastic-damage constitutive model for the finite element analysis of fibre reinforced concrete*". Engineering Structures, Volume 159, July 2016, Pages 35-62

Mander, M. J. N. Priestley and R. Park. (1988). "*Over Stress-Strain Behavior of Confined Concrete*", Journal of Structural Engineering, Volume 114 Issue 8 - September 1988

MathWorks (2015). MatLab, "Matrix Laboratory", R2015b (2015)

Mazzoni, S., & McKenna, F. (2017). "*Open system for earthquake engineering simulation user manual*", Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley

Mazzoni, S., & McKenna, F. (2017). OpenSees Wiki. Recuperado el 20 de Noviembre de 2017, de http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Examples_Manual

Montejo, L. A., and Kowalsky, M. J., (2007) "*CUMBIA - Set of Codes for the Analysis of Reinforced Concrete Members*" CFL Technical Report No. IS-07-01, Department of Civil Construction and Environmental Engineering, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2007, 40 pp.

NCh 4333 Of 1996 Mod. 2012 (2012), “*Norma Chilena Oficial – Diseño Sísmico de Edificios*”, Instituto nacional de normalización (INN), Santiago, Chile

Paulay, T. and Priestley, M.J.N., (1992) “*Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*”, John Wiley & Sons, USA 1992, 744 pp

Popovics, S. (1973). “*Numerical approach to the complete stress-strain relation for concrete.*” *Cem. Concr. Res.*, 3(5), 583–599.

Thompson K. J., and Park R. (1978). ‘*Stress – Strain model for grade 275 Reinforcing Steel with cyclic loading*’. *Bulletin of the New Zealand national society for earthquake engineering*, Vol 11, No 2, June 1978

TRC and Charles Chadwell, Ph.D., P.E. XTRACT V3.0.9 (2007), “*Cross section analysis program for structural engineers*”

Yu T., Zhang B., Teng J.G. (2015). ‘*Unified cyclic stress–strain model for normal and high strength concrete confined with FRP*’. *Engineering Structures*, Volume 102, 1 November 2015, Pages 189-201

Anexos

A. Etapa de verificación y validación

A continuación, se presentan los resultados de la etapa de verificación y validación

Columnas cuadradas

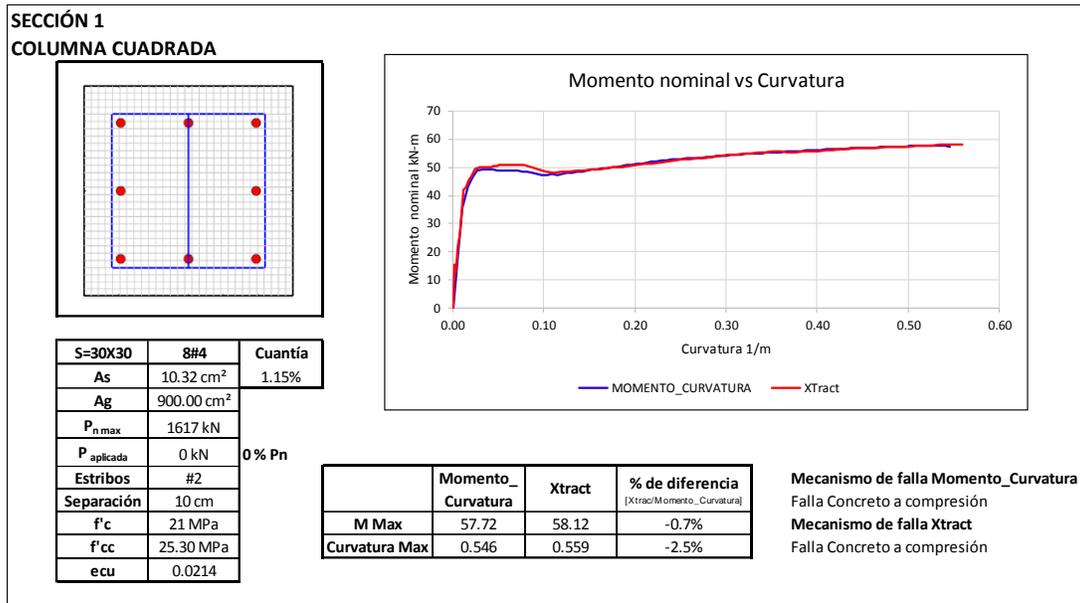


Figura 43. Columna cuadrada, sección 1.
Fuente: Elaboración propia

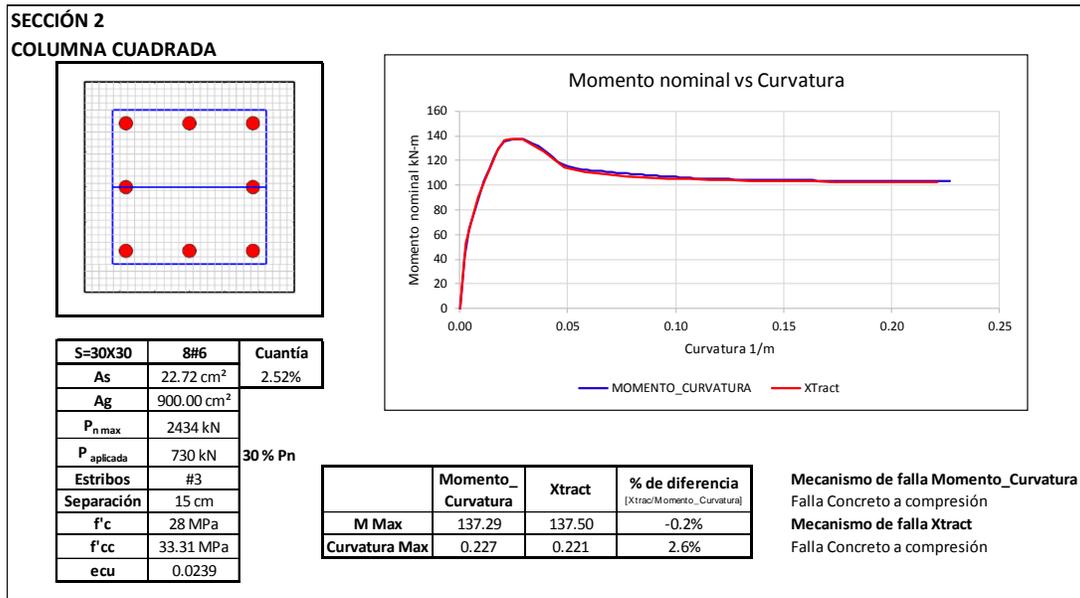


Figura 44. Columna cuadrada, sección 2.
Fuente: Elaboración propia

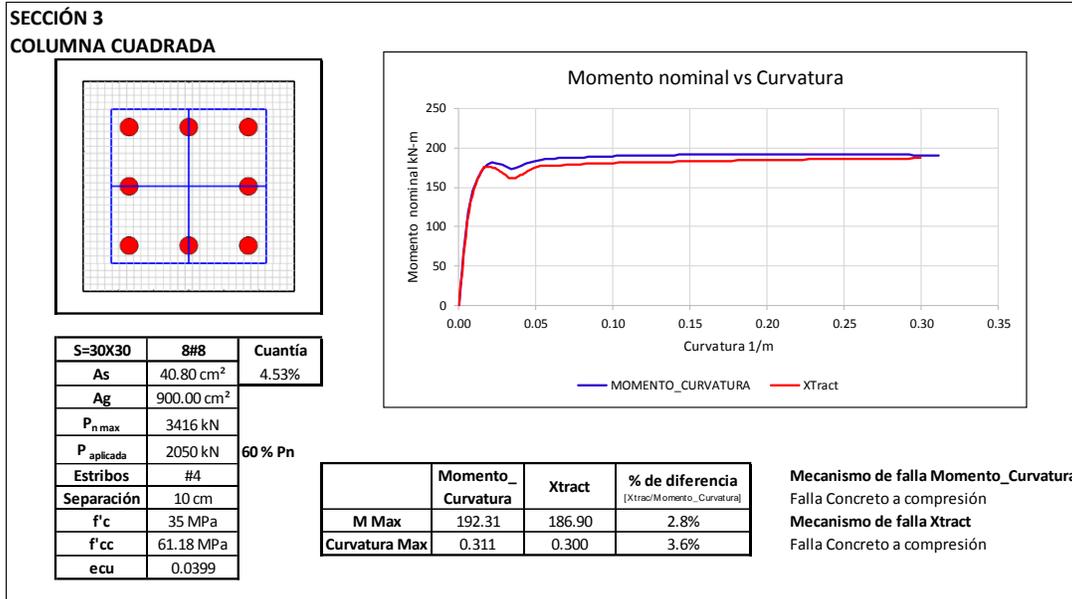


Figura 45. Columna cuadrada, sección 3.
Fuente: Elaboración propia

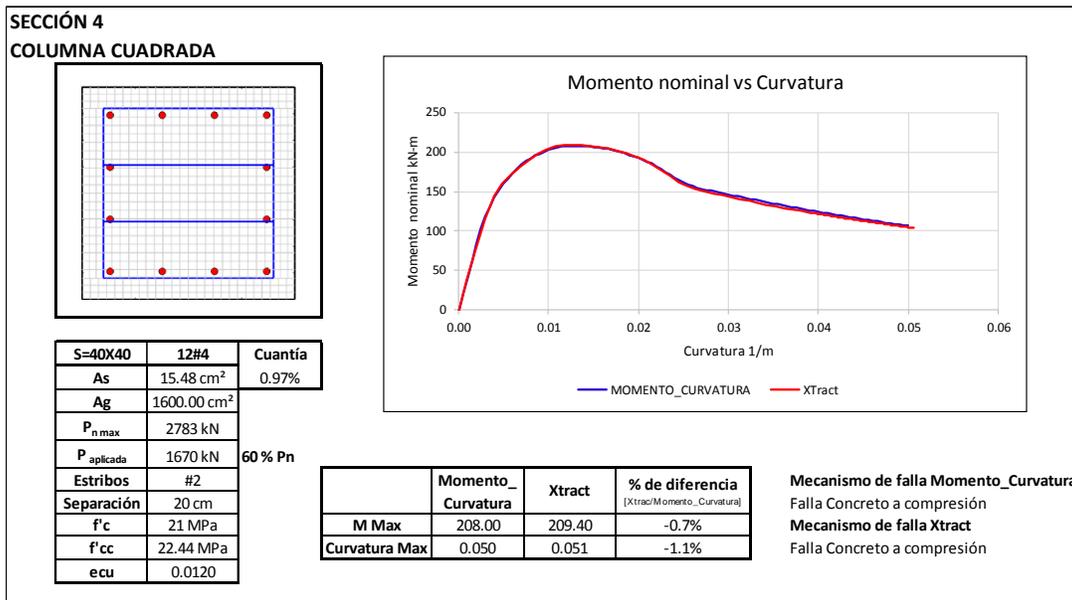


Figura 46. Columna cuadrada, sección 4.
Fuente: Elaboración propia

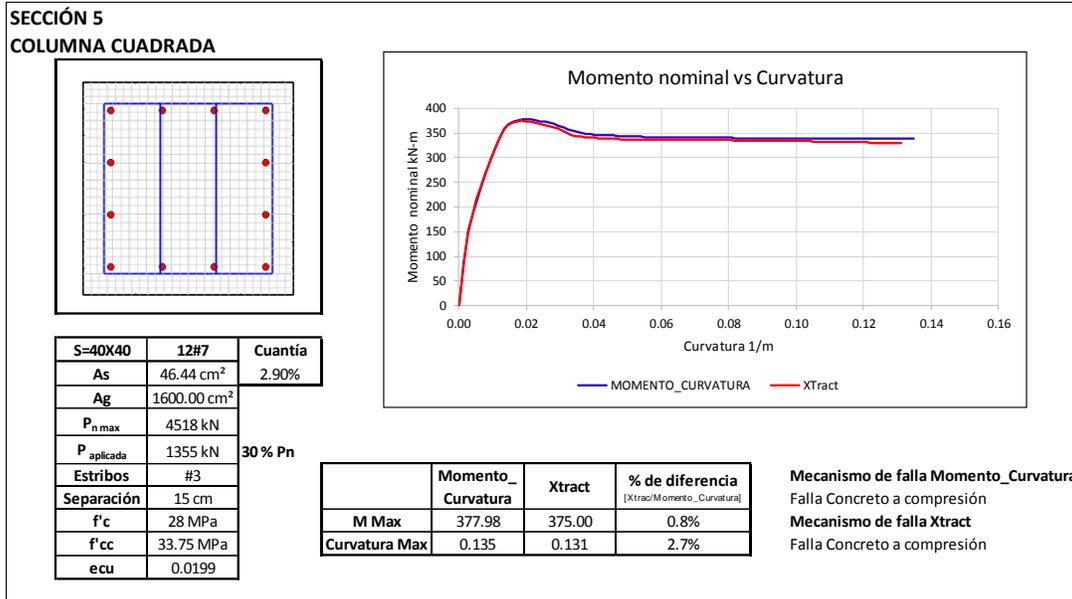


Figura 47. Columna cuadrada, sección 5.
Fuente: Elaboración propia

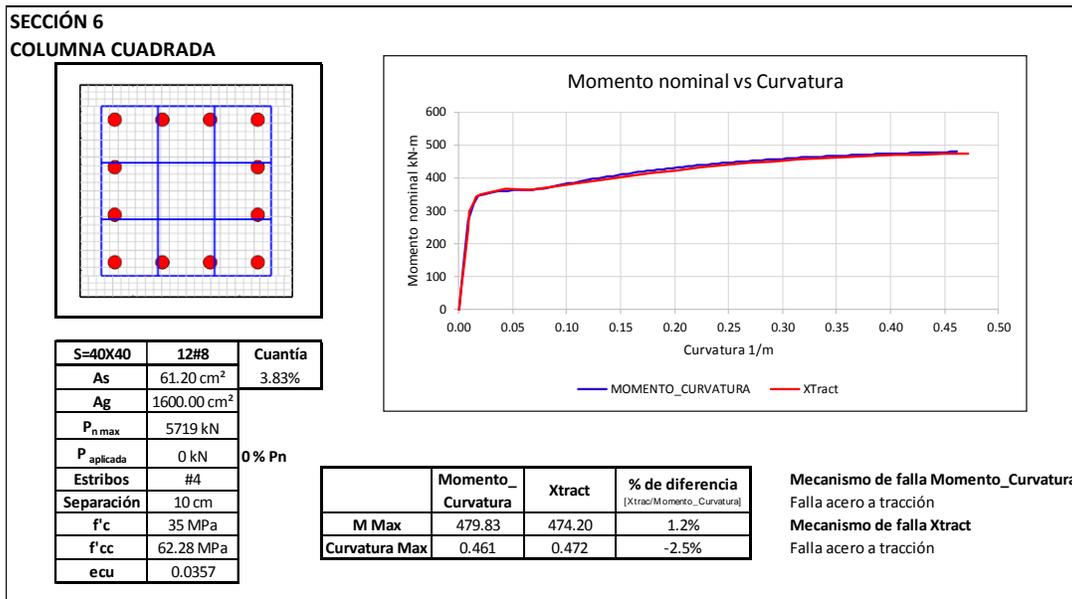


Figura 48. Columna cuadrada, sección 6.
Fuente: Elaboración propia

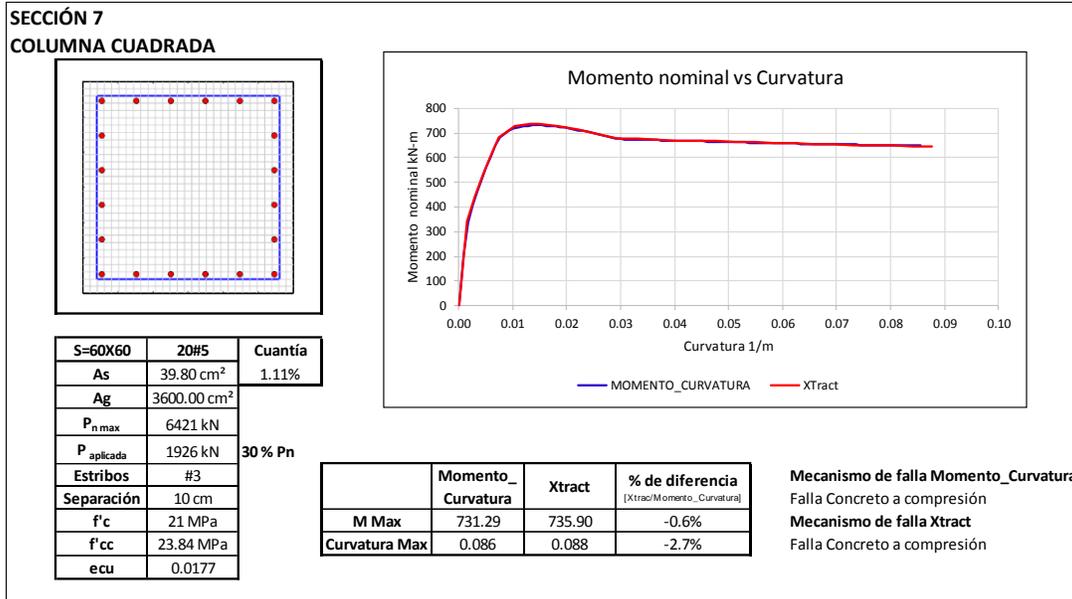


Figura 49. Columna cuadrada, sección 7.
Fuente: Elaboración propia

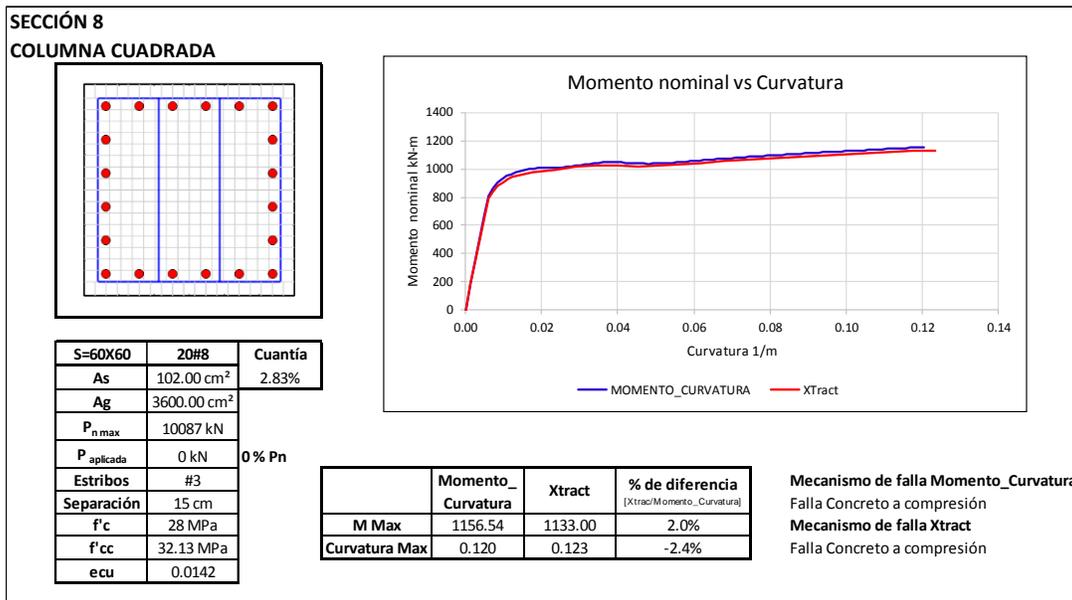


Figura 50. Columna cuadrada, sección 8.
Fuente: Elaboración propia

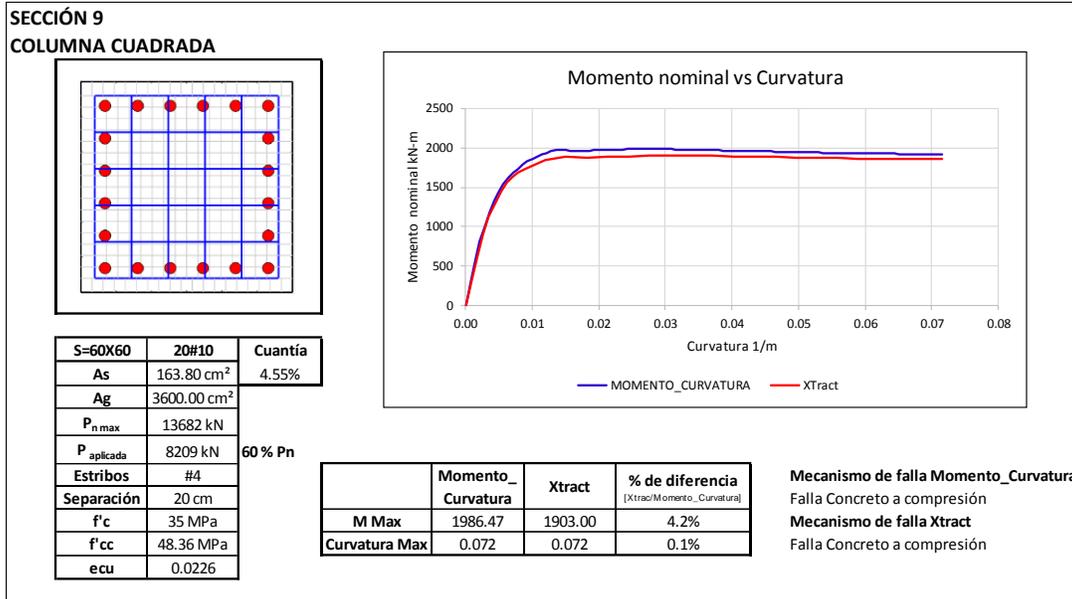


Figura 51. Columna cuadrada, sección 9.
Fuente: Elaboración propia

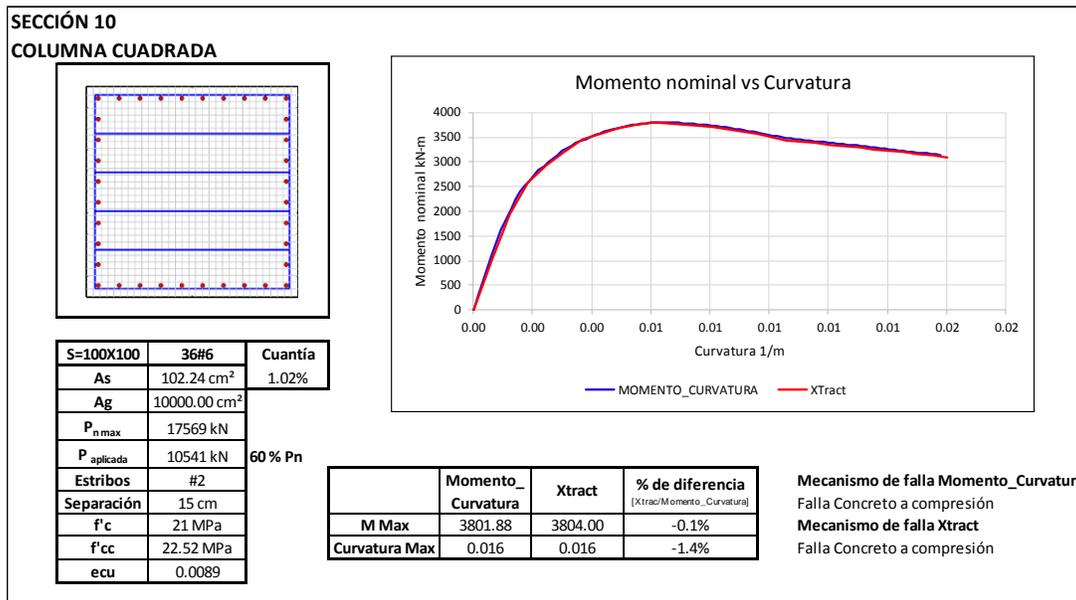
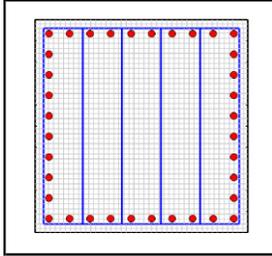


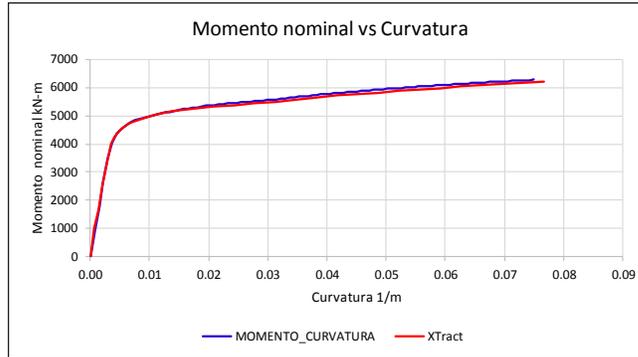
Figura 52. Columna cuadrada, sección 10.
Fuente: Elaboración propia

SECCIÓN 11

COLUMNA CUADRADA



S=100X100	36#10	Cuantía
As	294.84 cm ²	2.95%
Ag	10000.00 cm ²	
P _{n max}	28385 kN	
P aplicada	0 kN	0% Pn
Estribos	#3	
Separación	10 cm	
f'c	28 MPa	
f'cc	33.51 MPa	
ecu	0.0150	



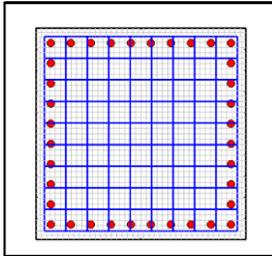
	Momento_Curvatura	Xtract	% de diferencia [Xtract/Momento_Curvatura]
M Max	6279.15	6205.00	1.2%
Curvatura Max	0.075	0.077	-2.2%

Mecanismo de falla Momento_Curvatura
Falla Concreto a compresión
Mecanismo de falla Xtract
Falla Concreto a compresión

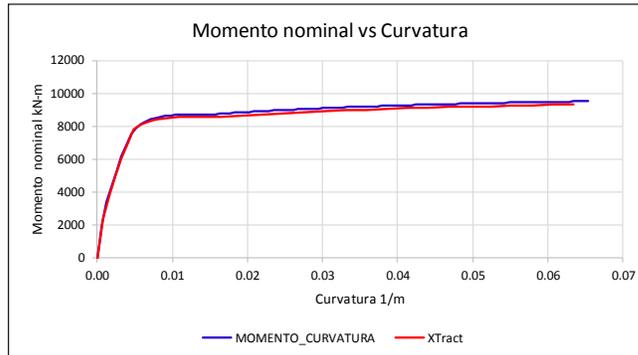
Figura 53. Columna cuadrada, sección 11.
Fuente: Elaboración propia

SECCIÓN 12

COLUMNA CUADRADA



S=100X100	36#11	Cuantía
As	362.16 cm ²	3.62%
Ag	10000.00 cm ²	
P _{n max}	35107 kN	
P aplicada	10532 kN	30% Pn
Estribos	#4	
Separación	20 cm	
f'c	35 MPa	
f'cc	49.74 MPa	
ecu	0.0208	



	Momento_Curvatura	Xtract	% de diferencia [Xtract/Momento_Curvatura]
M Max	9526.19	9352.00	1.8%
Curvatura Max	0.065	0.063	3.0%

Mecanismo de falla Momento_Curvatura
Falla Concreto a compresión
Mecanismo de falla Xtract
Falla Concreto a compresión

Figura 54. Columna cuadrada, sección 12.
Fuente: Elaboración propia

Columnas rectangulares A

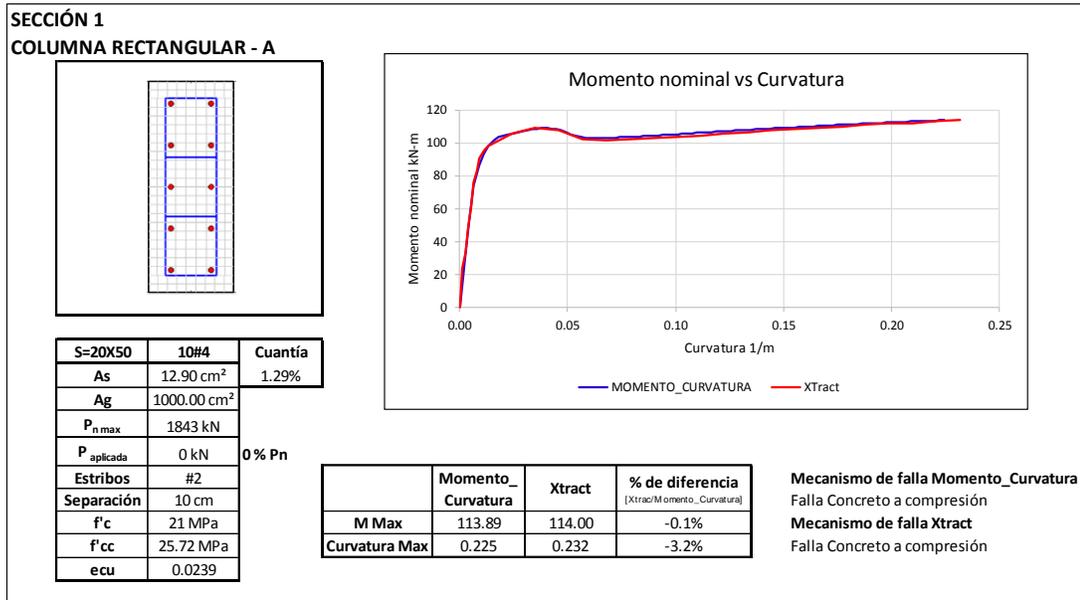


Figura 55. Columna rectangular A, sección 1.
Fuente: Elaboración propia

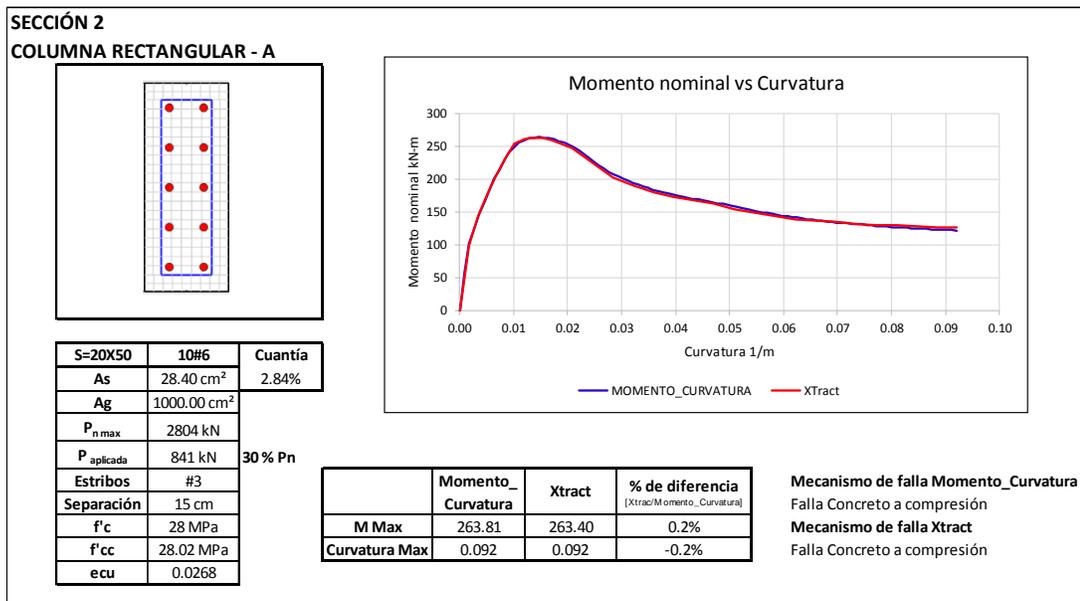


Figura 56. Columna rectangular A, sección 2
Fuente: Elaboración propia

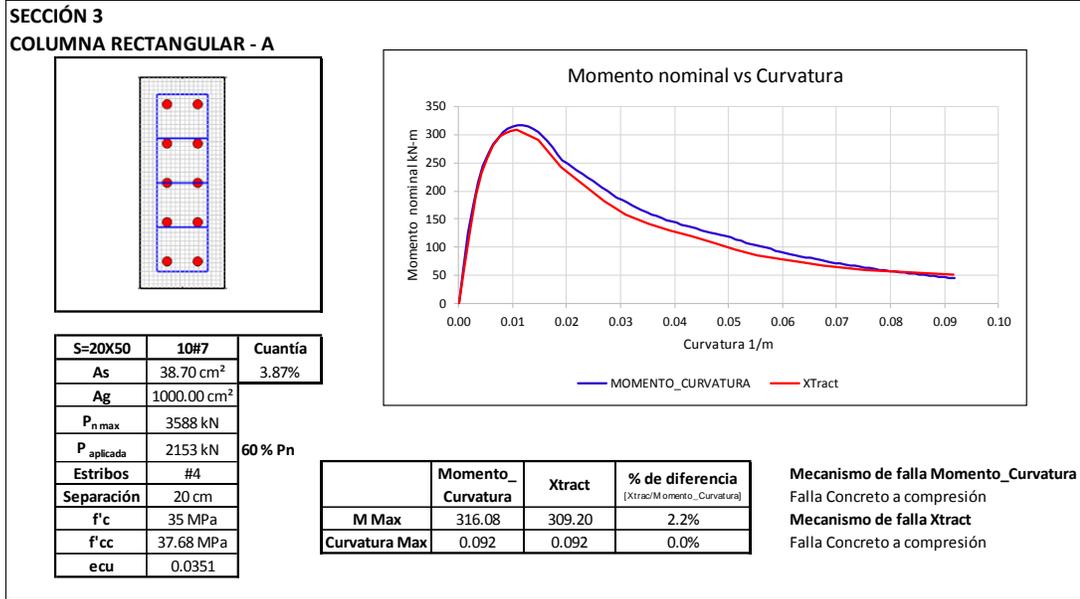


Figura 57. Columna rectangular A, sección 3
Fuente: Elaboración propia

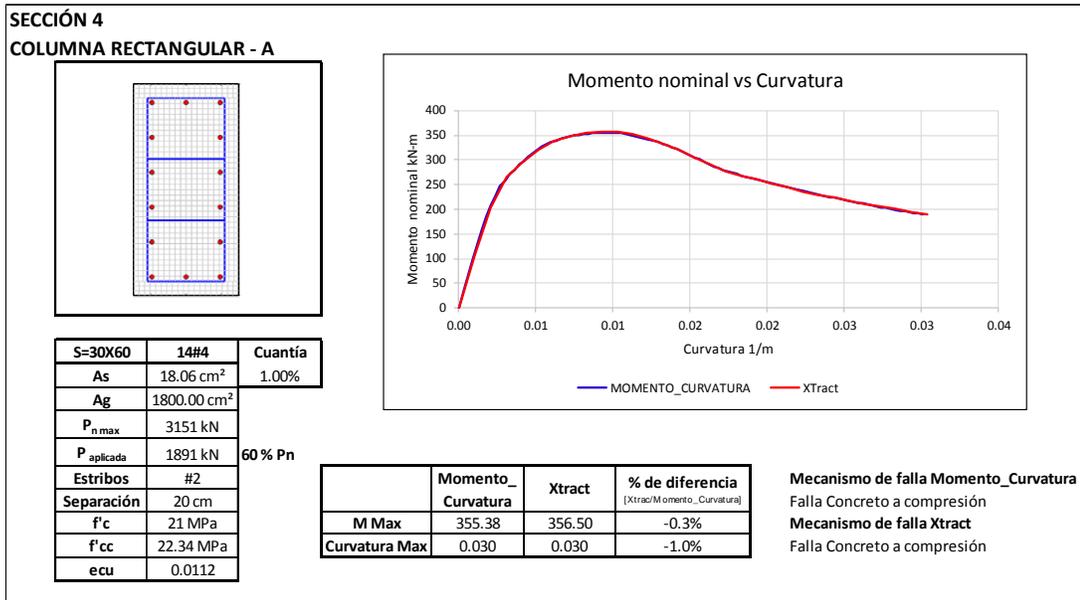


Figura 58. Columna rectangular A, sección 4
Fuente: Elaboración propia

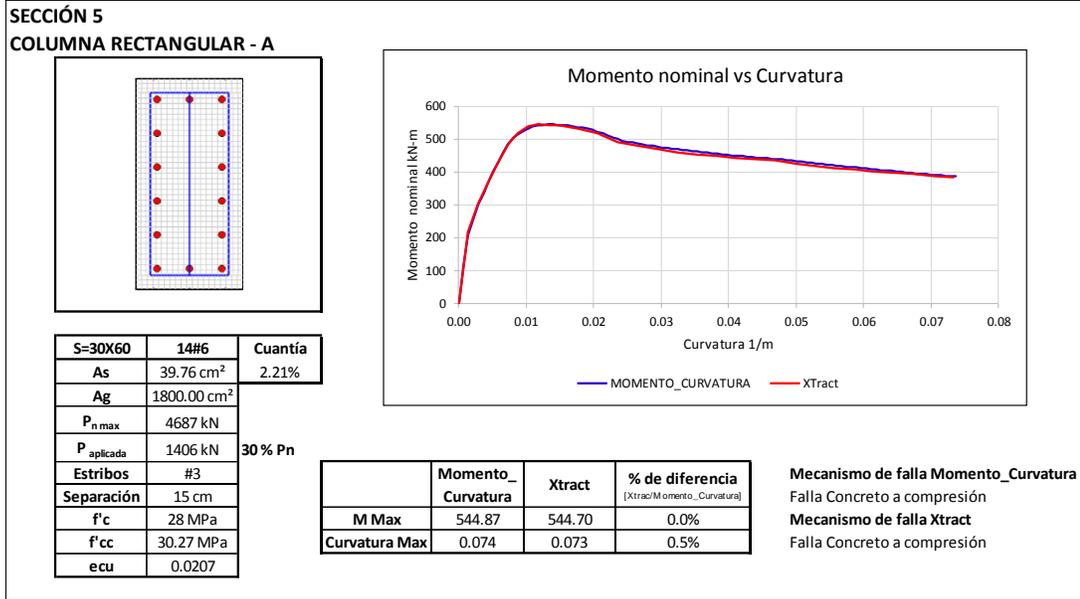


Figura 59. Columna rectangular A, sección 5
Fuente: Elaboración propia

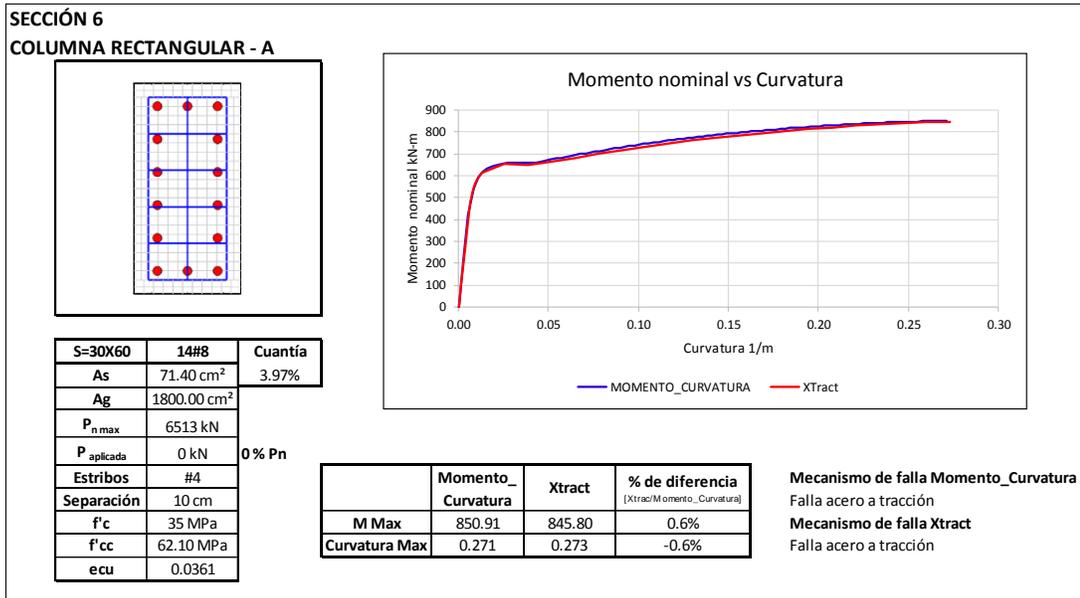


Figura 60. Columna rectangular A, sección 6
Fuente: Elaboración propia

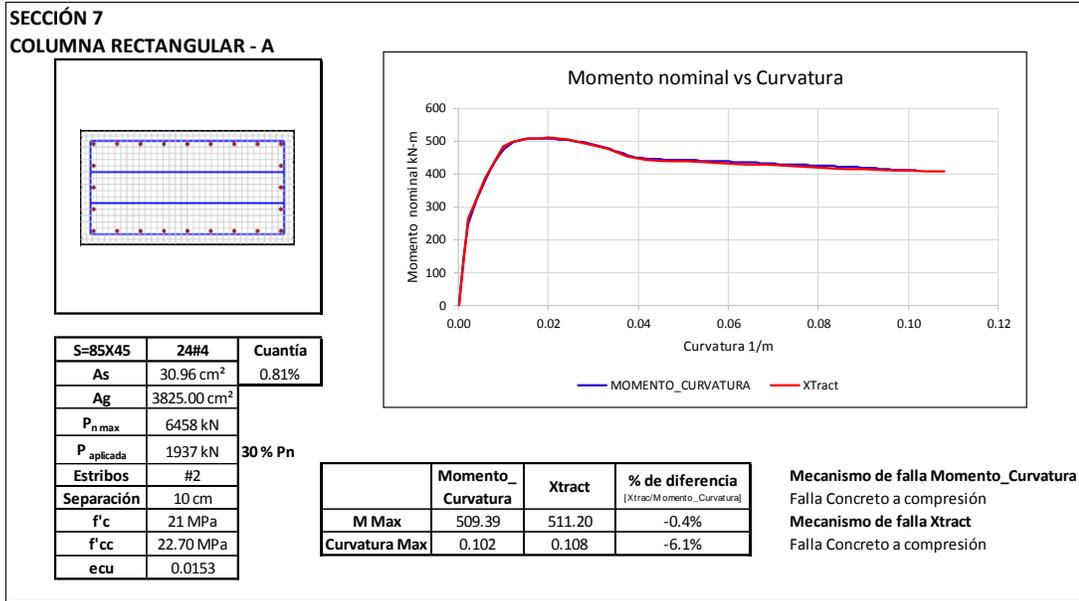


Figura 61. Columna rectangular A, sección 7
Fuente: Elaboración propia

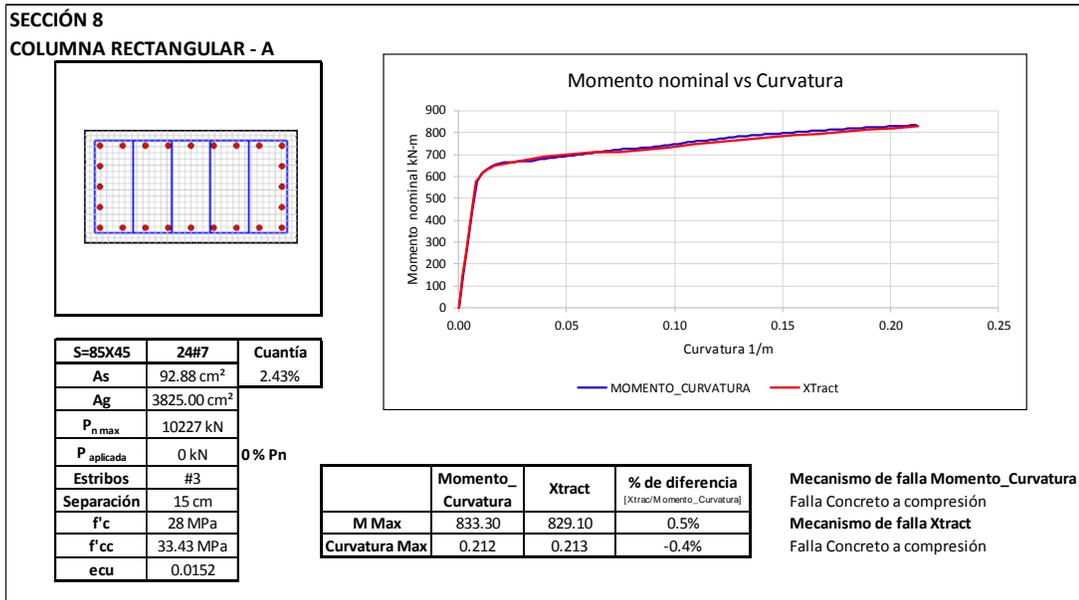


Figura 62. Columna rectangular A, sección 8
Fuente: Elaboración propia

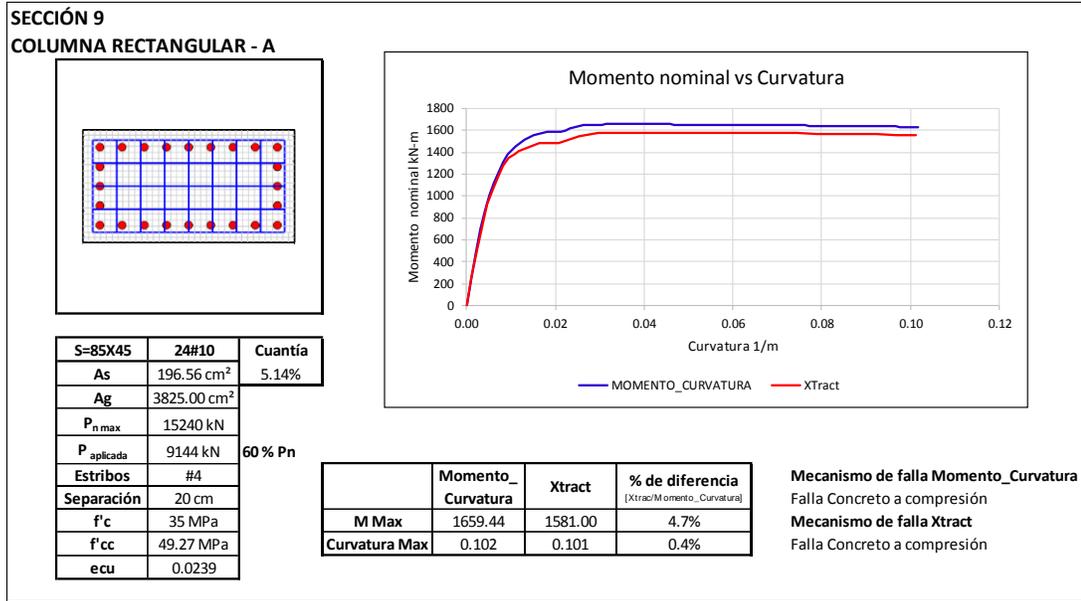


Figura 63. Columna rectangular A, sección 9
Fuente: Elaboración propia

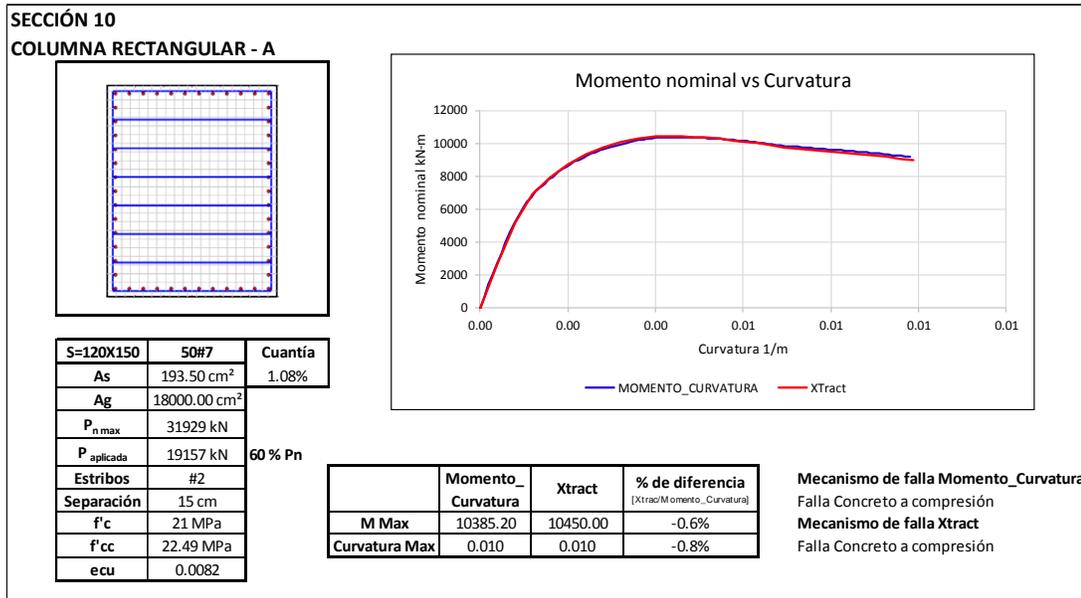


Figura 64. Columna rectangular A, sección 10
Fuente: Elaboración propia

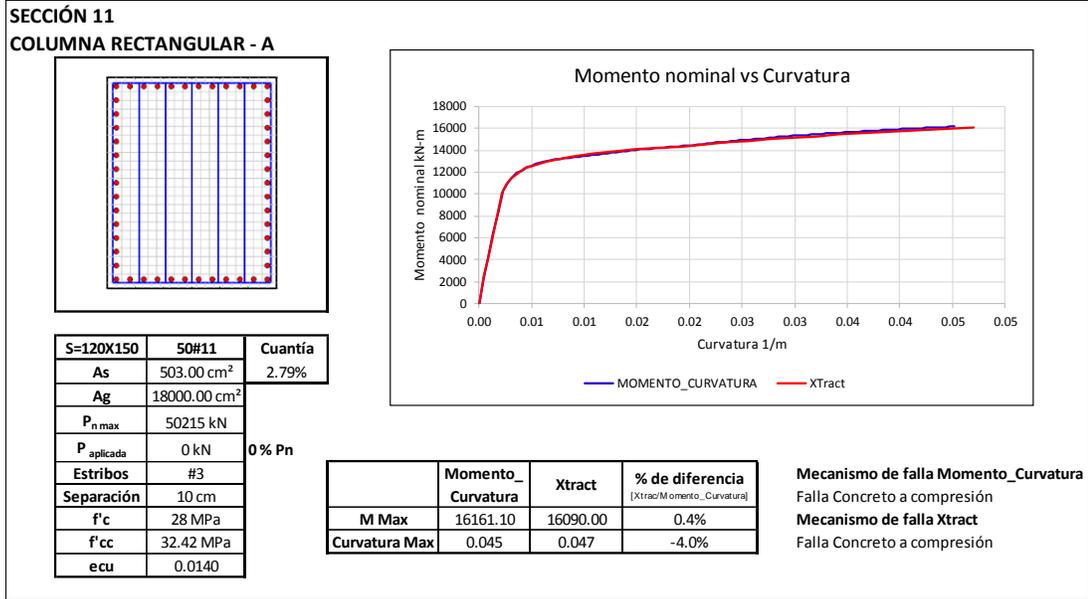


Figura 65. Columna rectangular A, sección 11
Fuente: Elaboración propia

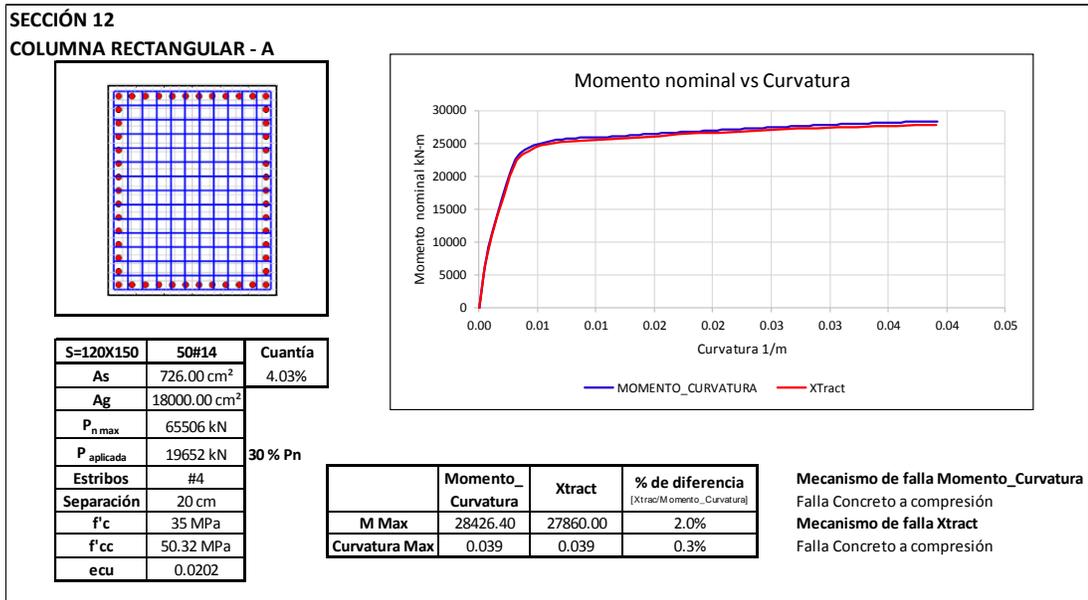


Figura 66. Columna rectangular A, sección 12
Fuente: Elaboración propia

Columnas rectangulares B

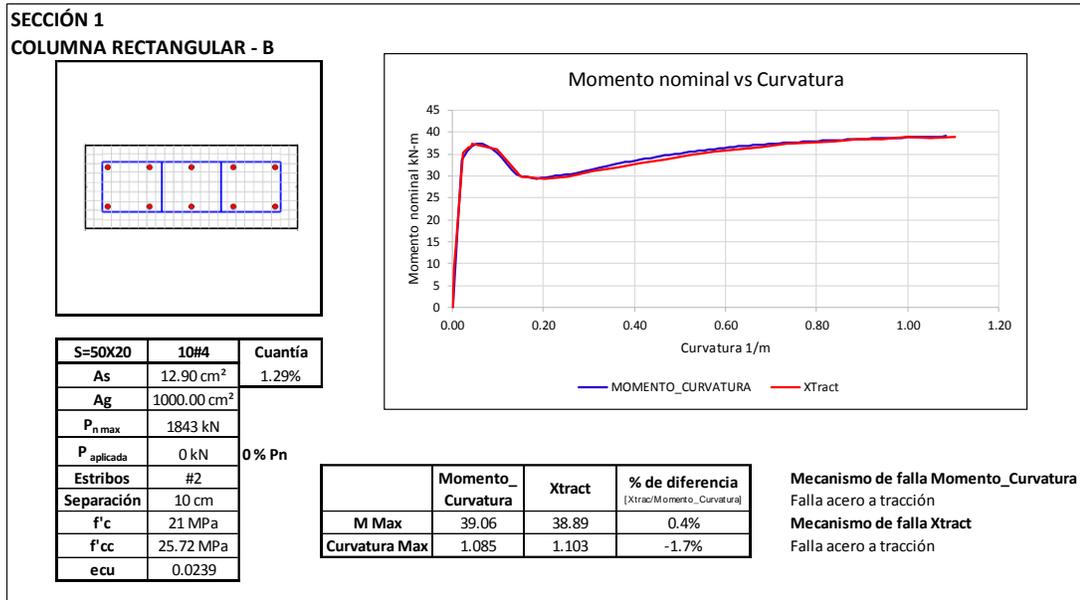


Figura 67. Columna rectangular B, sección 1
Fuente: Elaboración propia

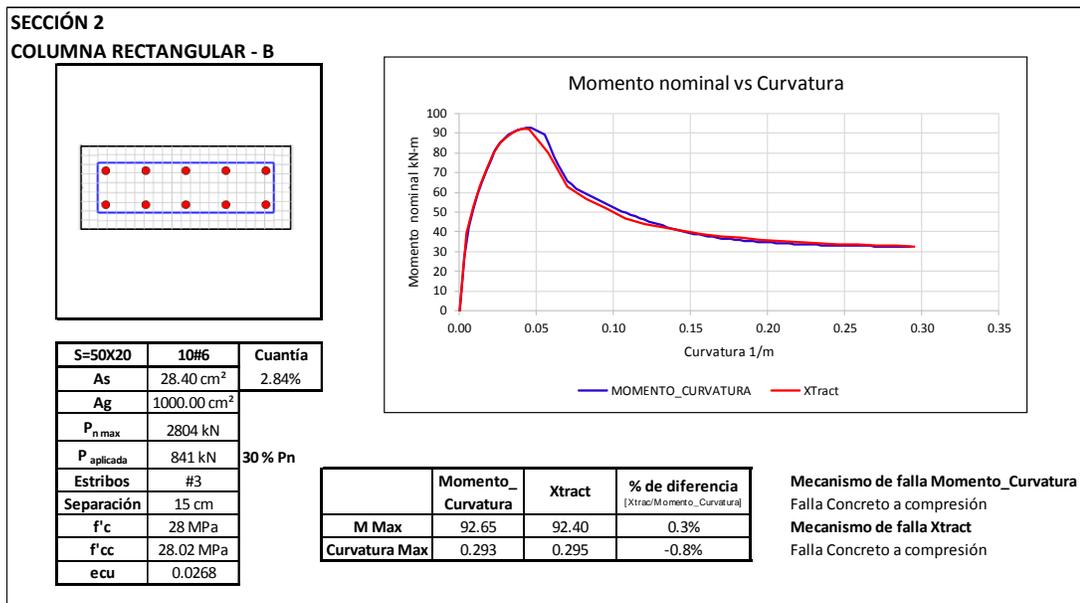


Figura 68. Columna rectangular B, sección 2
Fuente: Elaboración propia

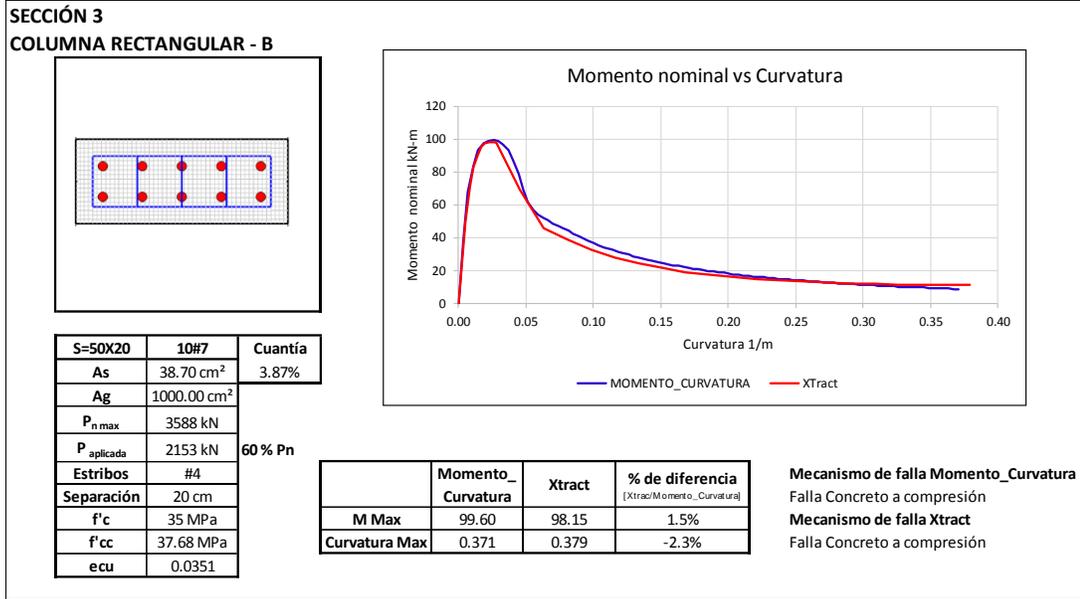


Figura 69. Columna rectangular B, sección 3
Fuente: Elaboración propia

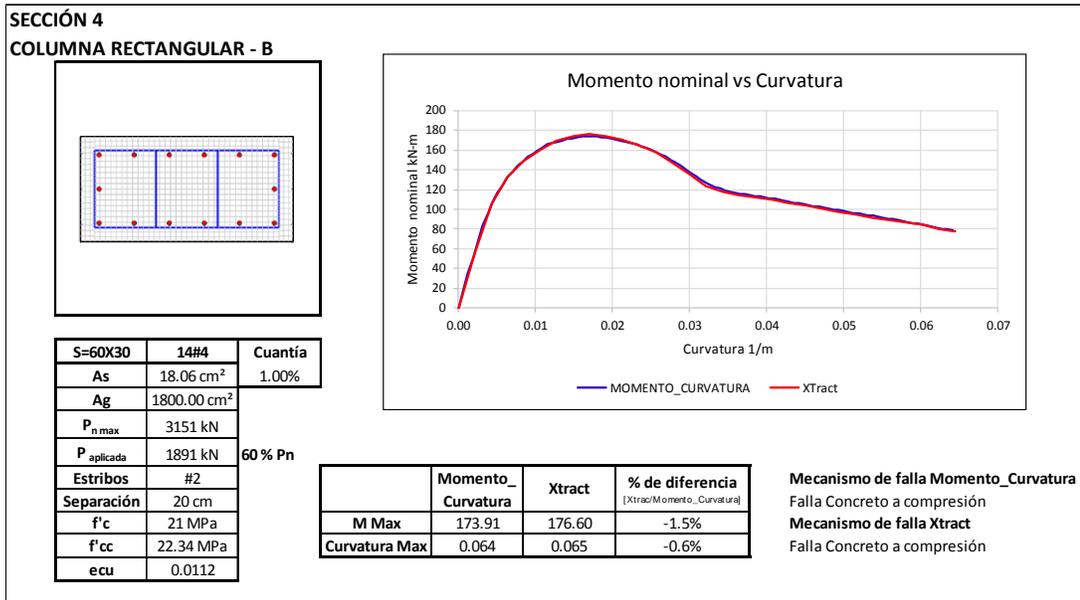


Figura 70. Columna rectangular B, sección 4
Fuente: Elaboración propia

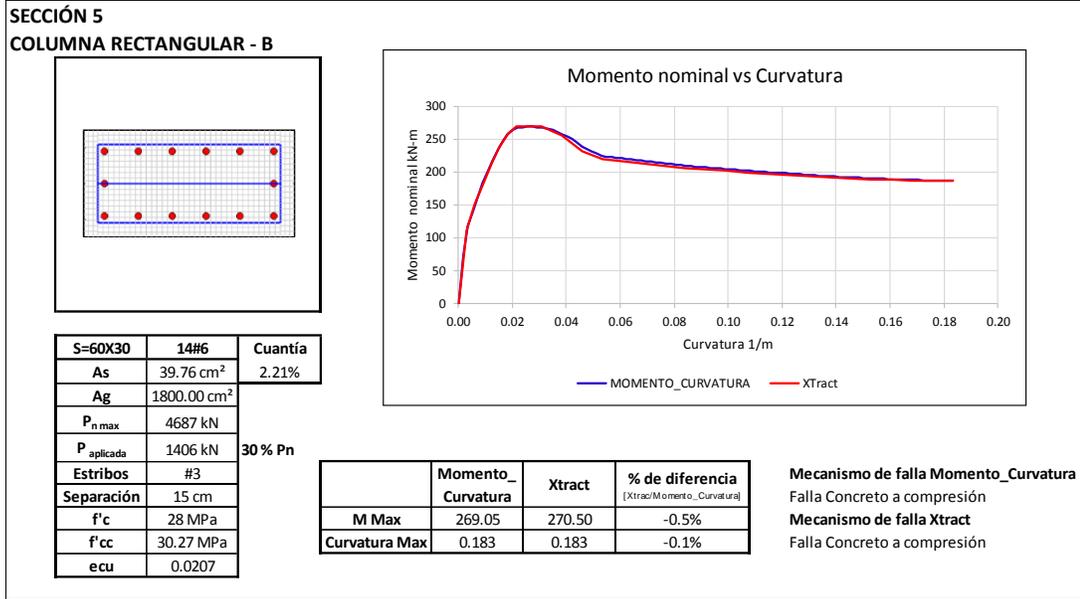


Figura 71. Columna rectangular B, sección 5
Fuente: Elaboración propia

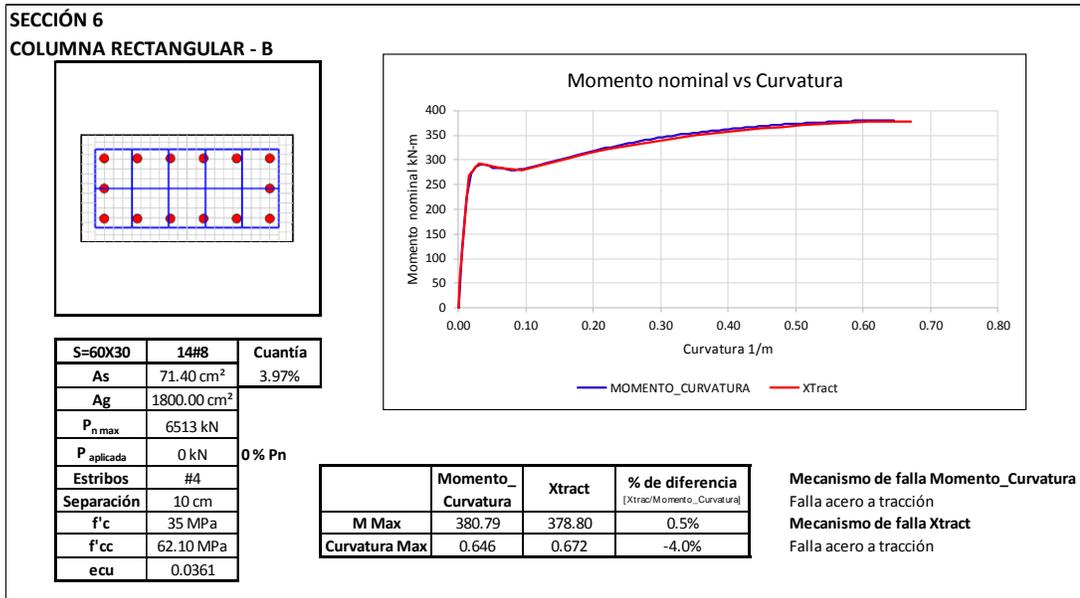


Figura 72. Columna rectangular B, sección 6
Fuente: Elaboración propia

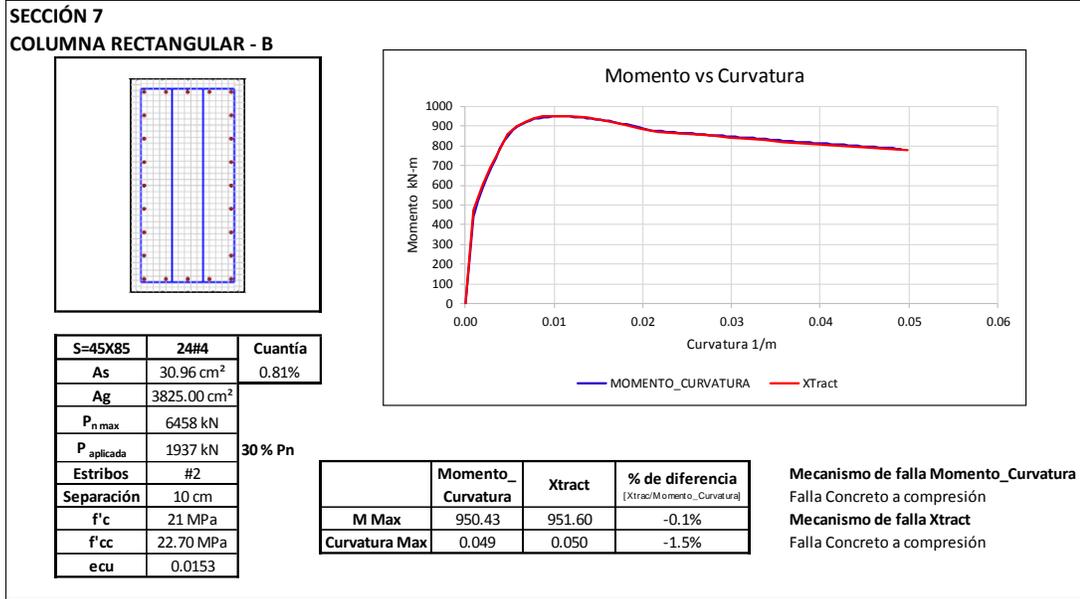


Figura 73. Columna rectangular B, sección 7
Fuente: Elaboración propia

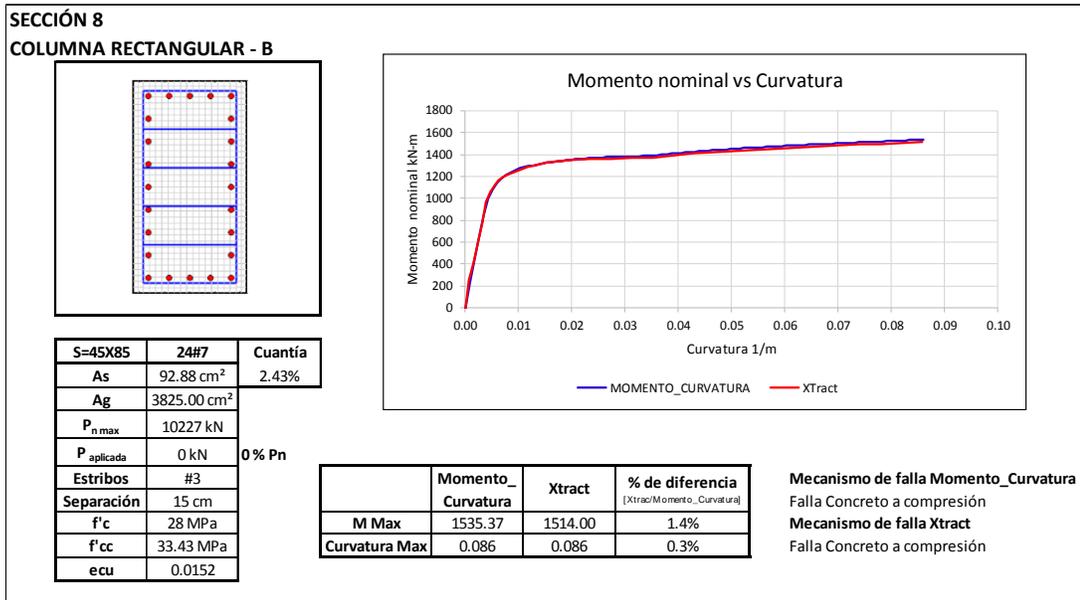


Figura 74. Columna rectangular B, sección 8
Fuente: Elaboración propia

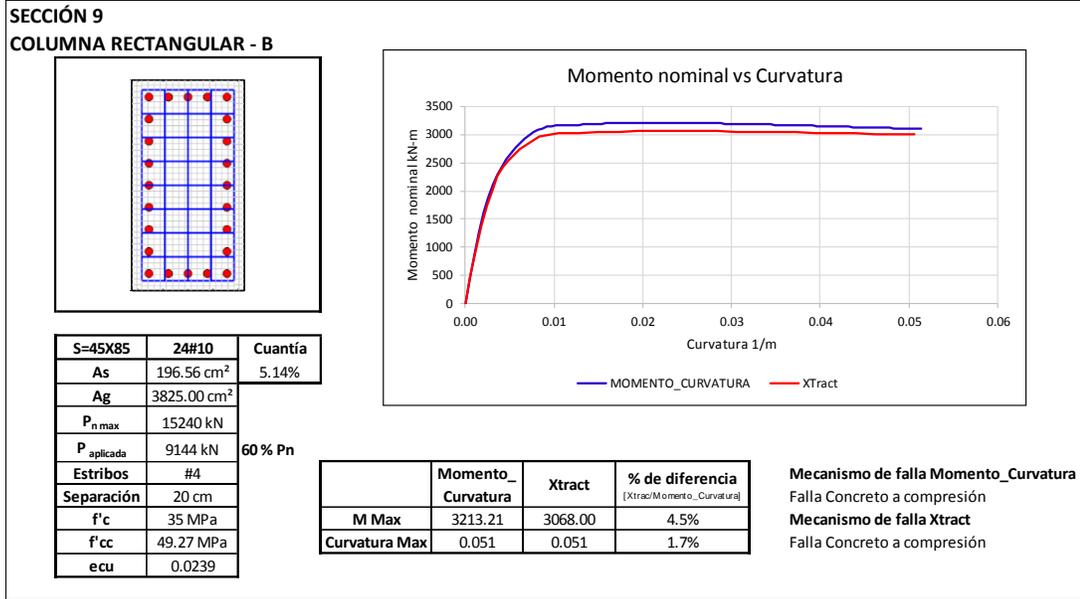


Figura 75. Columna rectangular B, sección 9
Fuente: Elaboración propia

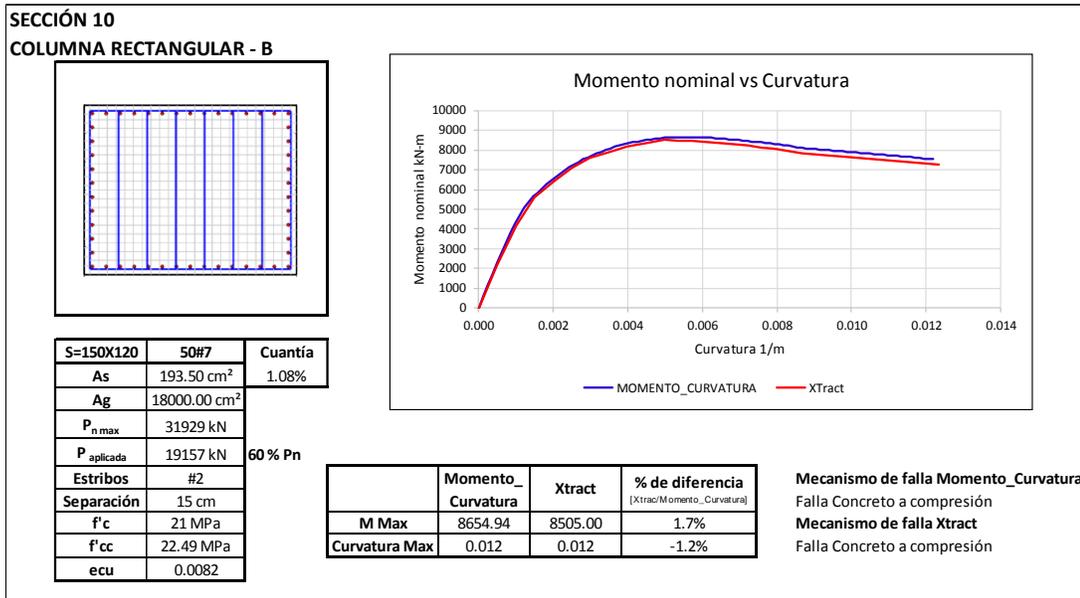


Figura 76. Columna rectangular B, sección 10
Fuente: Elaboración propia

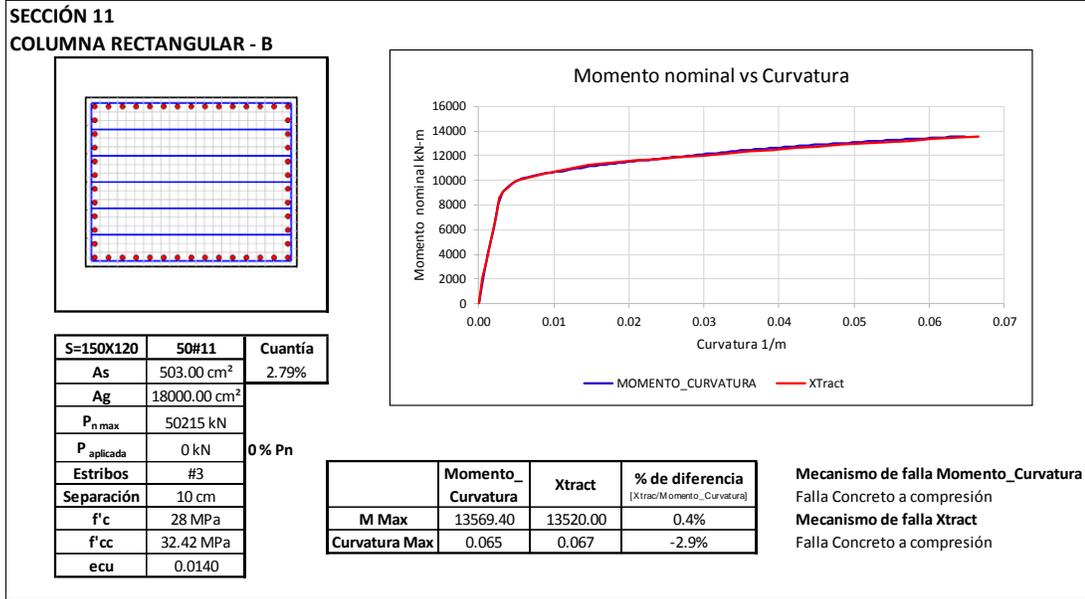


Figura 77. Columna rectangular B, sección 11
Fuente: Elaboración propia

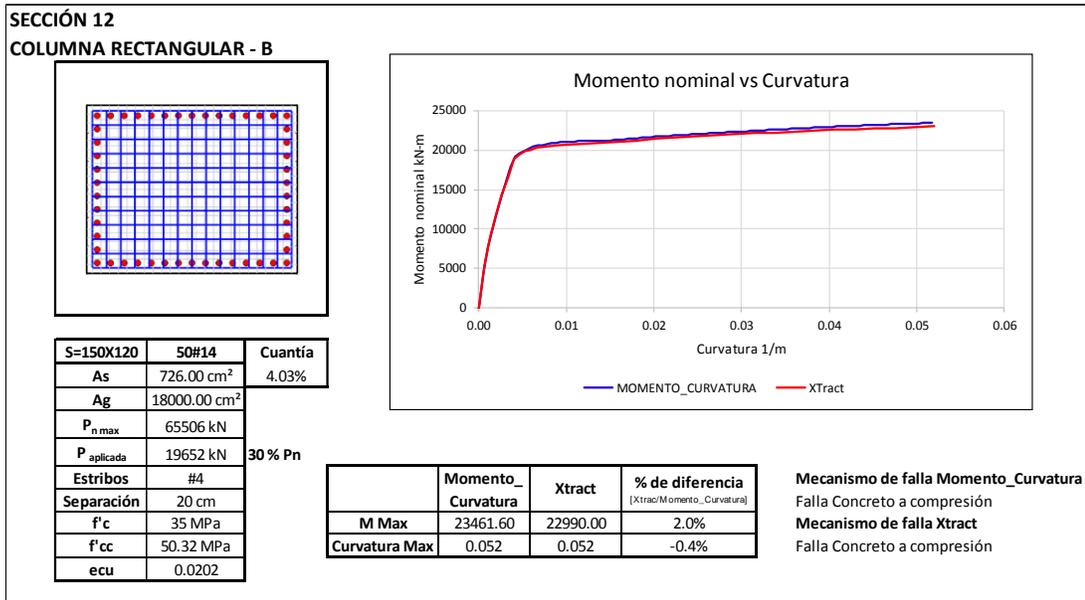


Figura 78. Columna rectangular B, sección 12
Fuente: Elaboración propia

Columnas circulares

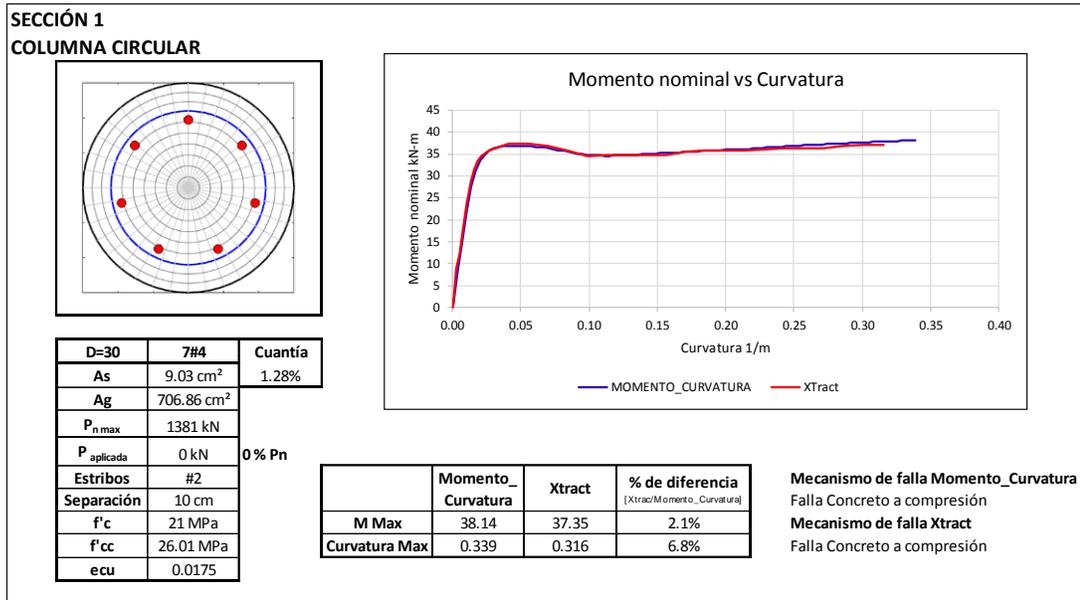


Figura 79. Columna circular, sección 1
Fuente: Elaboración propia

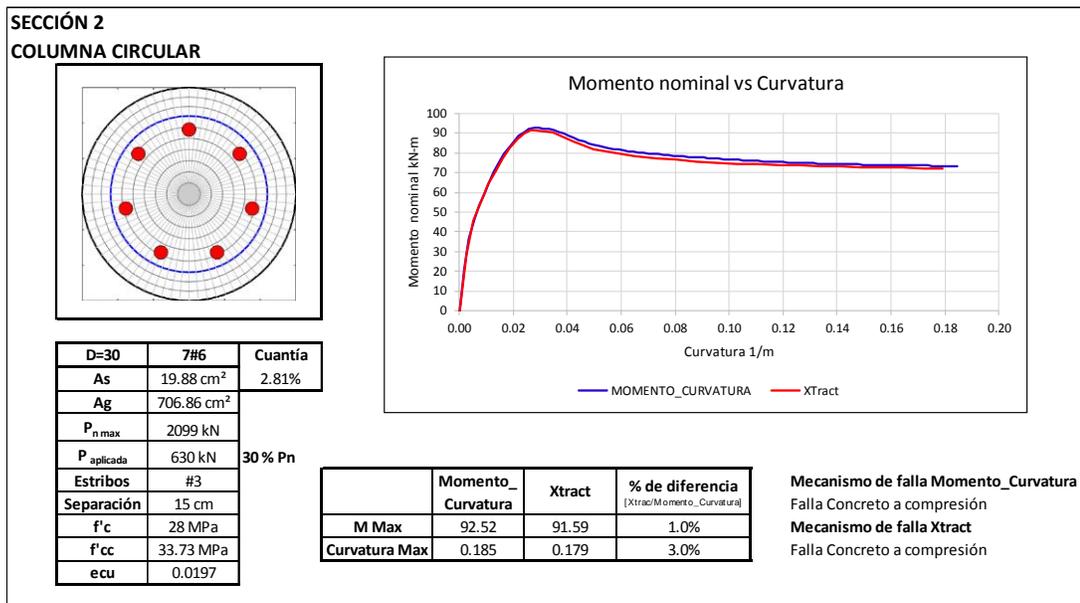


Figura 80. Columna circular, sección 2
Fuente: Elaboración propia

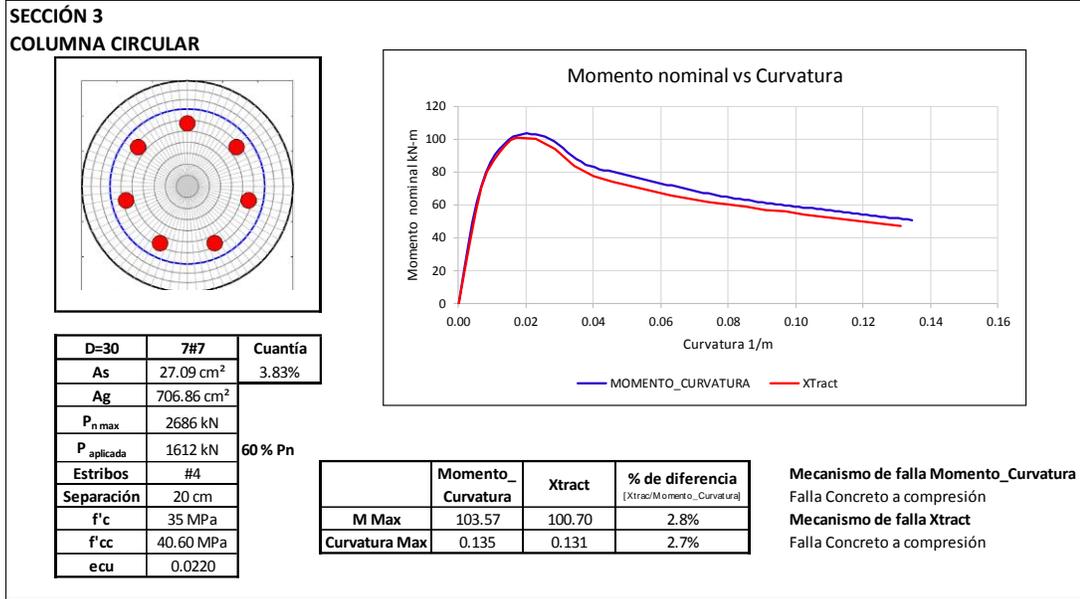


Figura 81. Columna circular, sección 3
Fuente: Elaboración propia

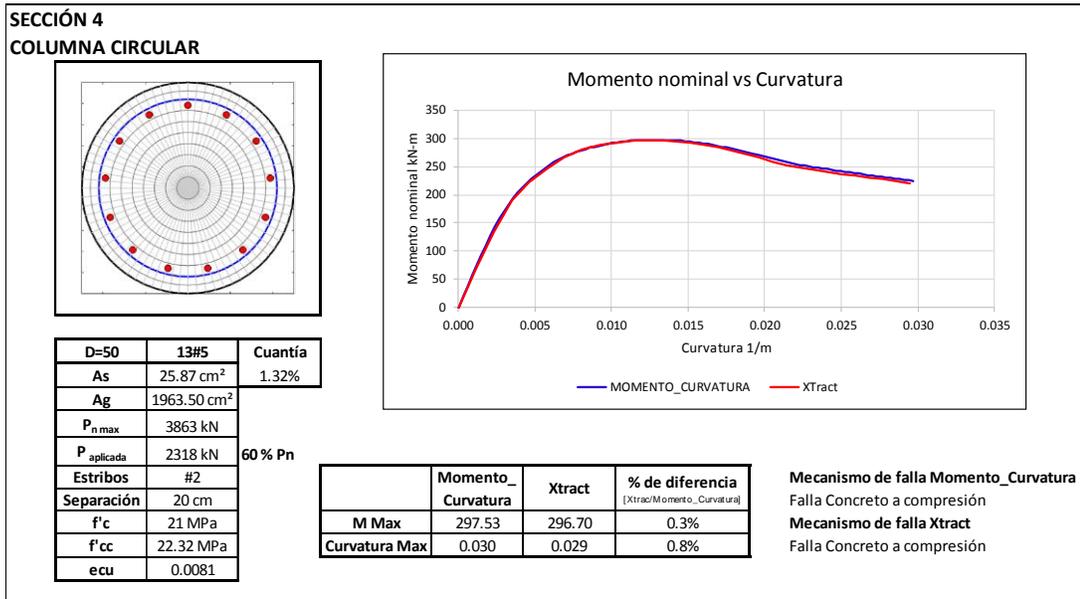


Figura 82. Columna circular, sección 4
Fuente: Elaboración propia

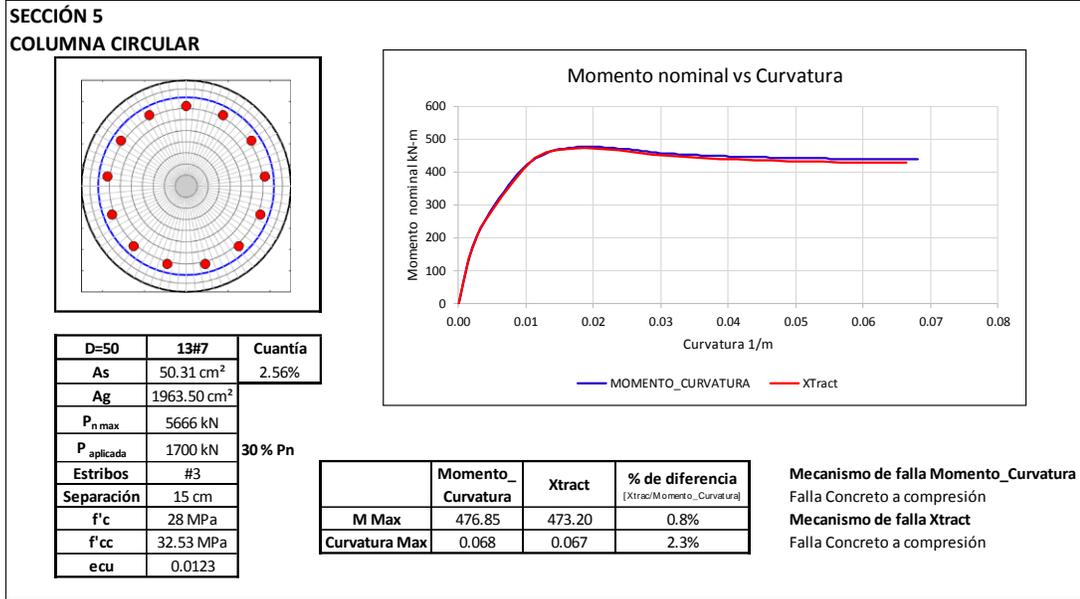


Figura 83. Columna circular, sección 5
Fuente: Elaboración propia

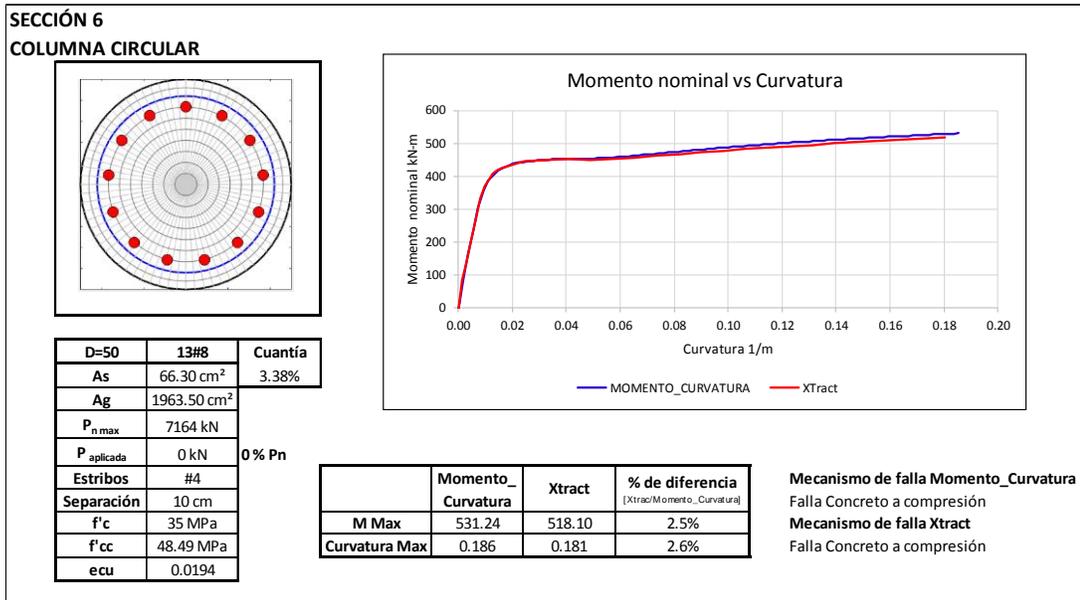


Figura 84. Columna circular, sección 6
Fuente: Elaboración propia

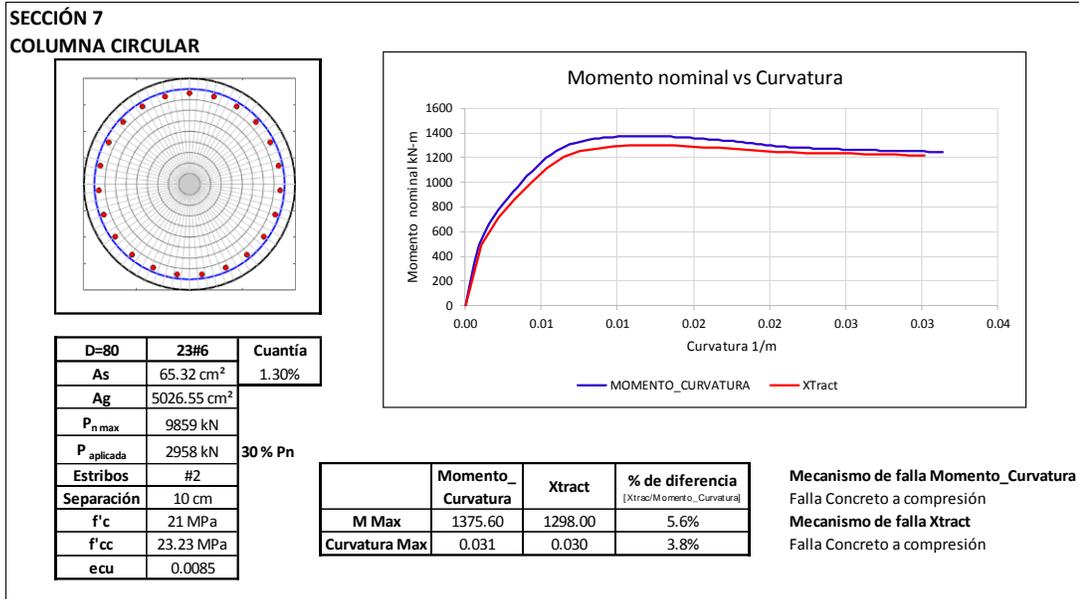


Figura 85. Columna circular, sección 7
Fuente: Elaboración propia

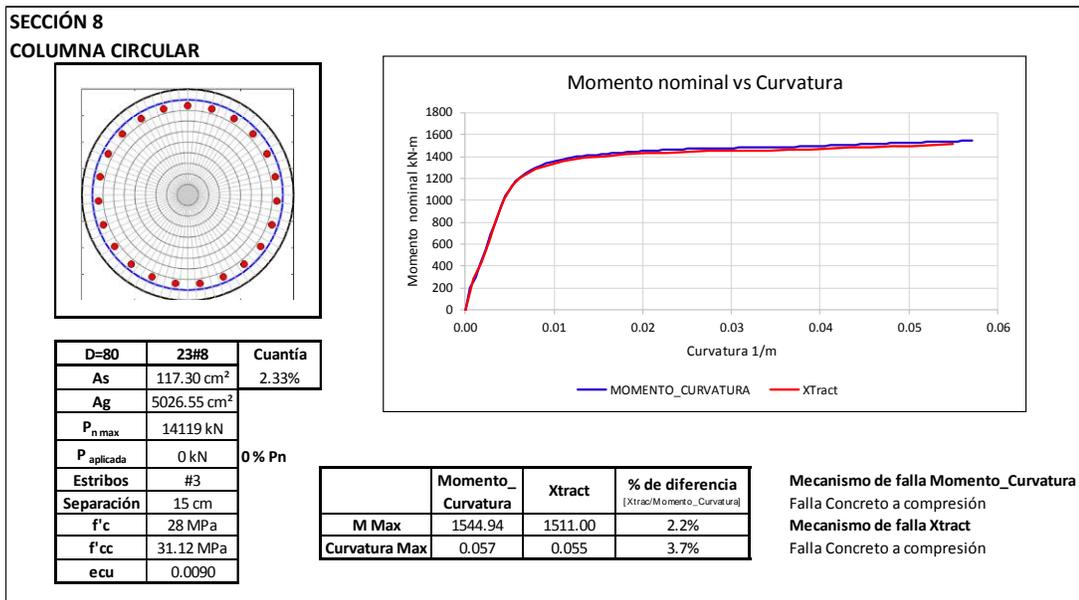


Figura 86. Columna circular, sección 8
Fuente: Elaboración propia

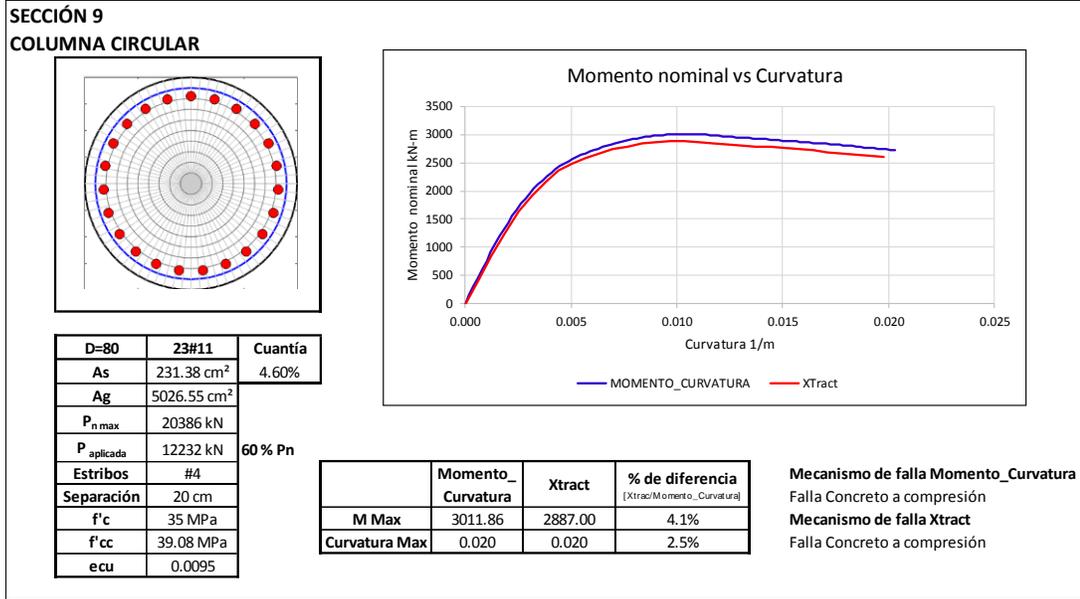


Figura 87. Columna circular, sección 9
Fuente: Elaboración propia

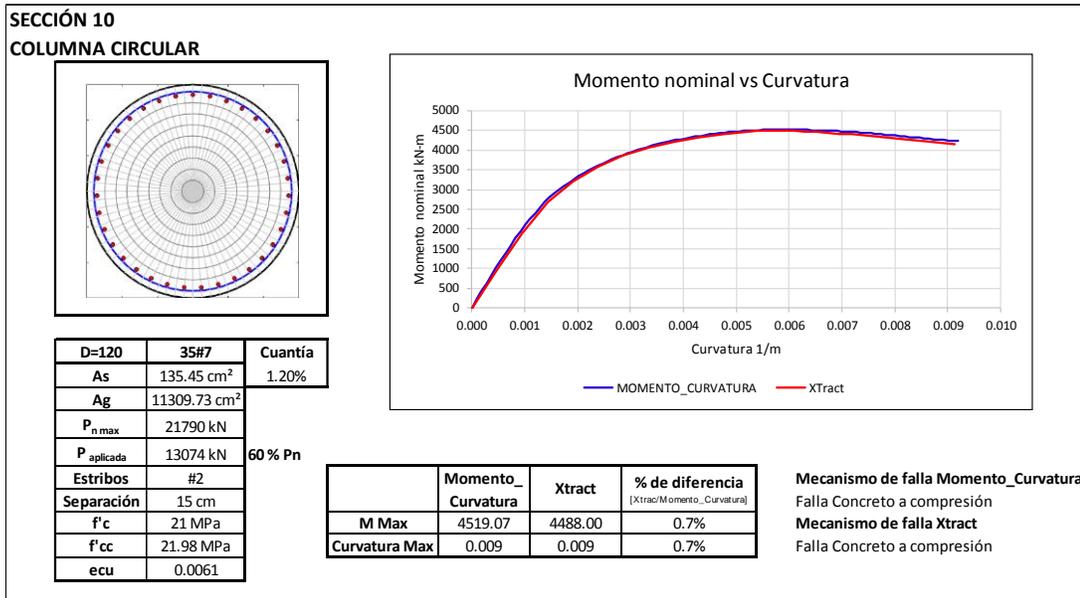


Figura 88. Columna circular, sección 10
Fuente: Elaboración propia

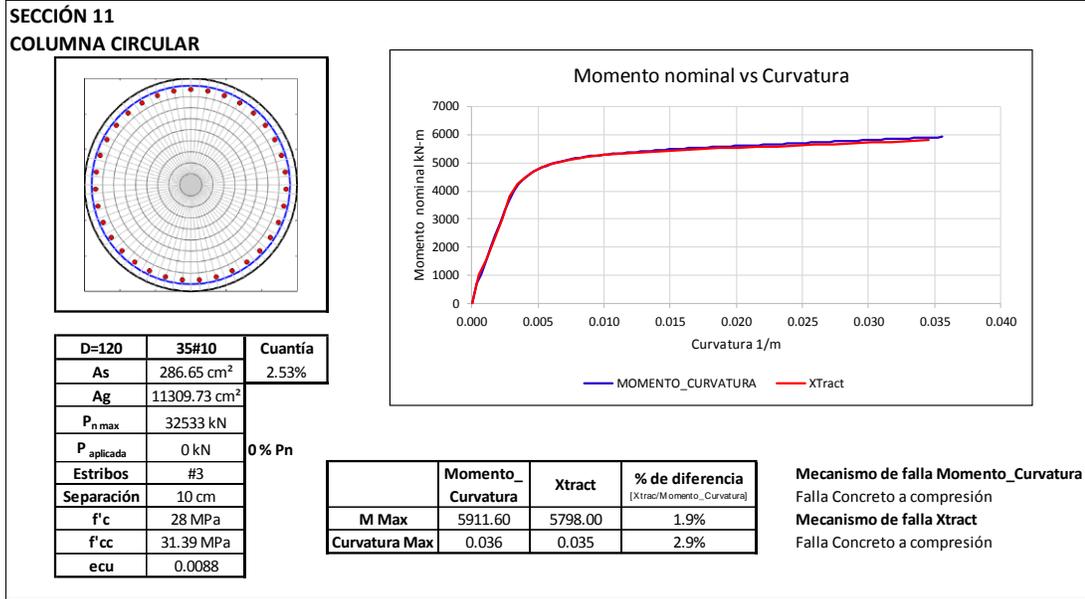


Figura 89. Columna circular, sección 11
Fuente: Elaboración propia

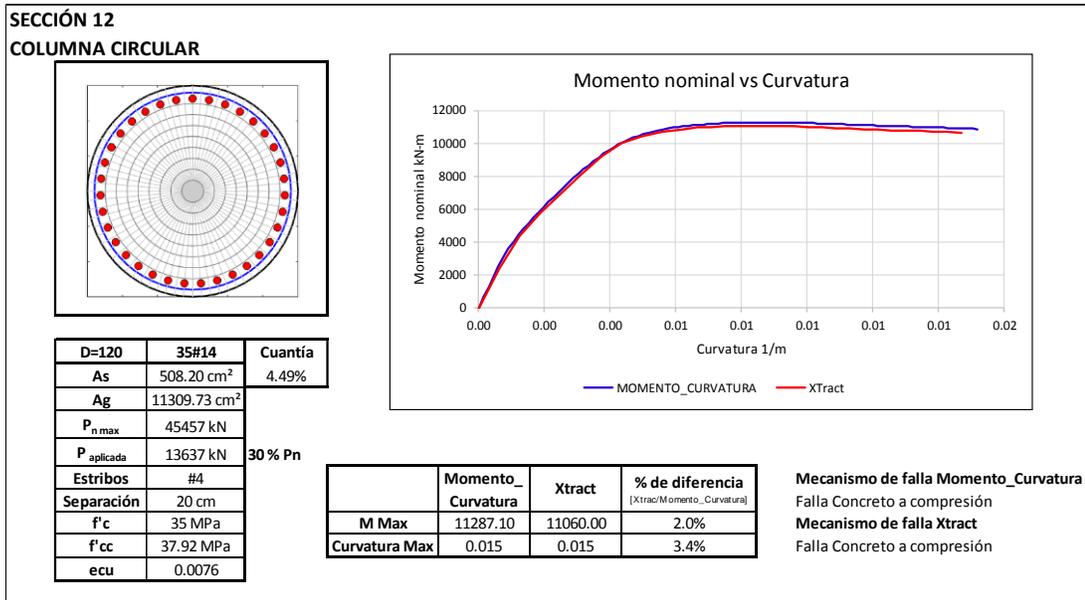


Figura 90. Columna circular, sección 12
Fuente: Elaboración propia

Vigas

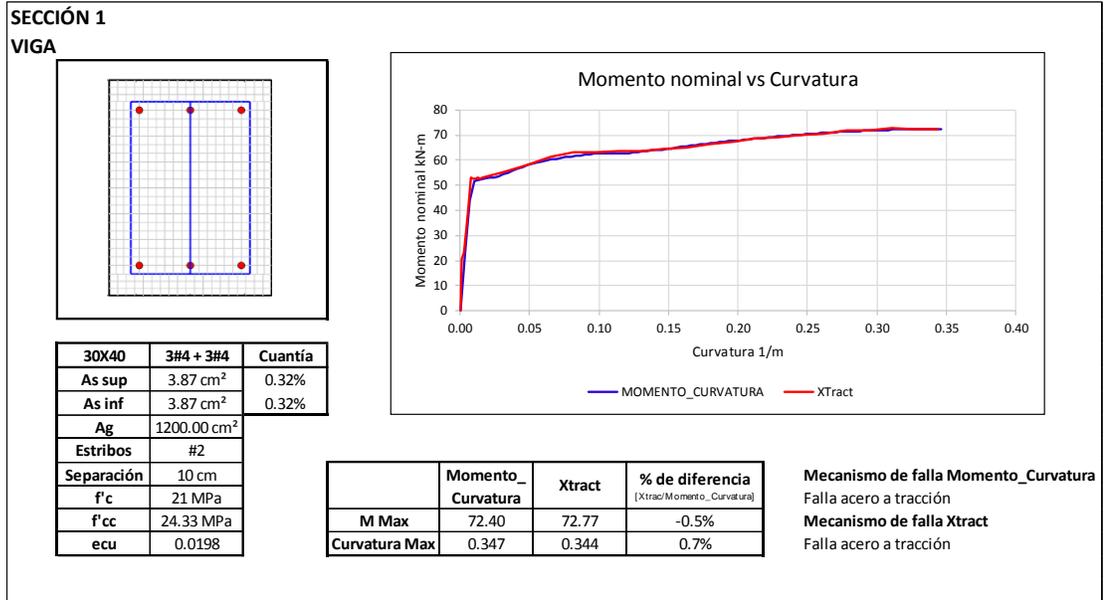


Figura 91. Viga, sección 1
Fuente: Elaboración propia

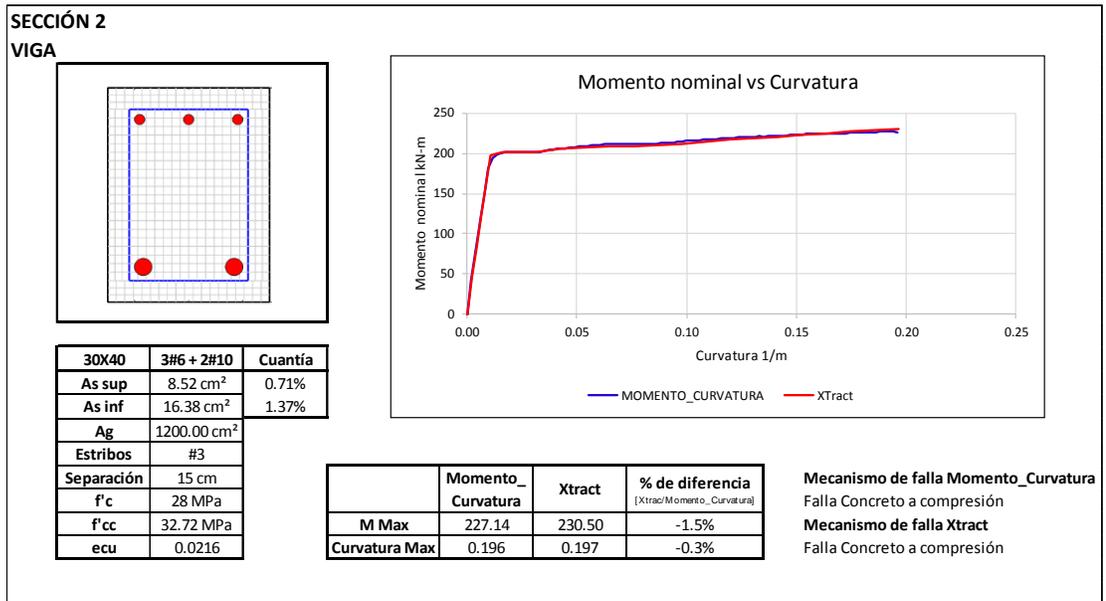


Figura 92. Viga, sección 2
Fuente: Elaboración propia

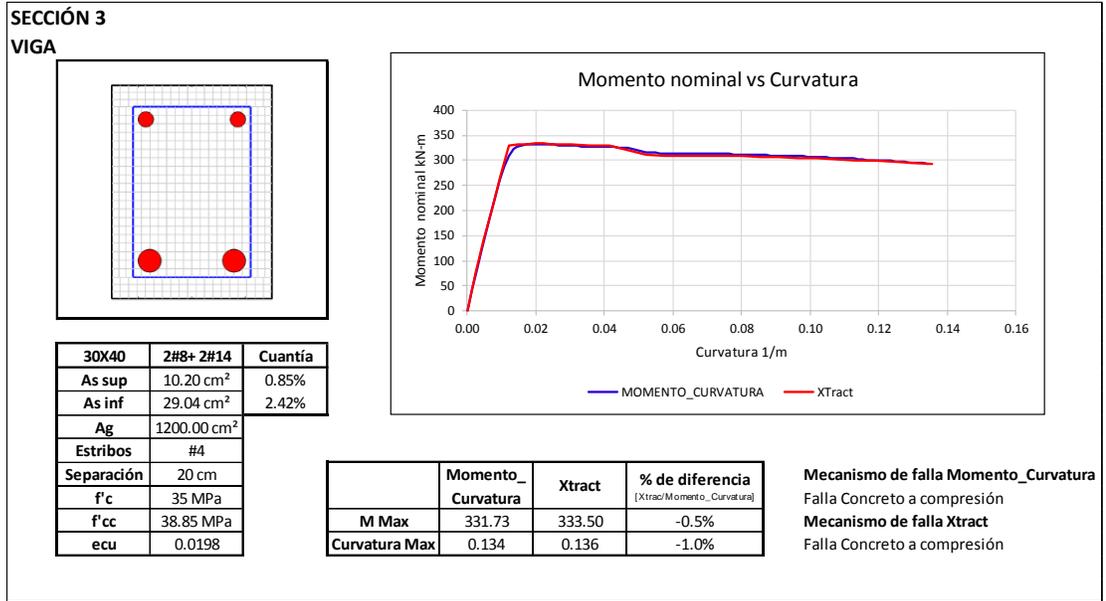


Figura 93. Viga, sección 3
Fuente: Elaboración propia

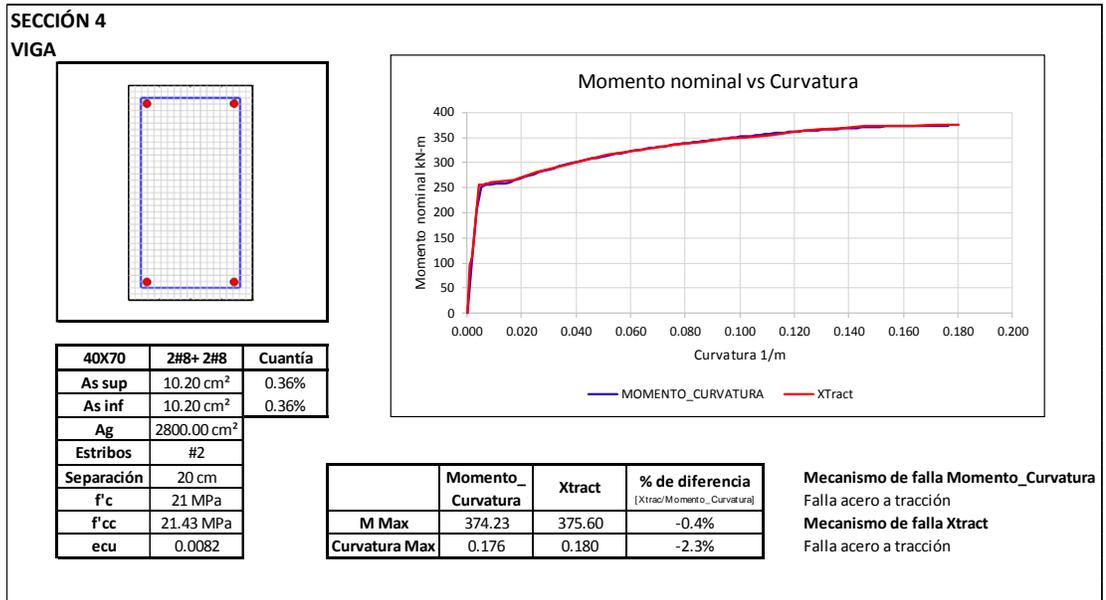
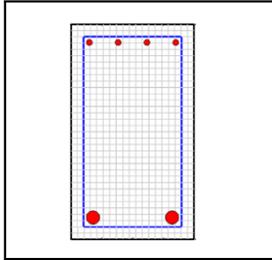


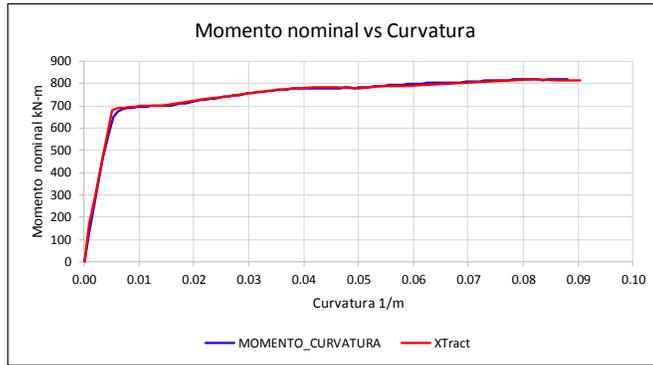
Figura 94. Viga, sección 4
Fuente: Elaboración propia

SECCIÓN 5

VIGA



40X70	4#6 + 2#14	Cuántía
As sup	11.36 cm ²	0.41%
As inf	29.04 cm ²	1.04%
Ag	2800.00 cm ²	
Estribos	#3	
Separación	15 cm	
f'c	28 MPa	
f'cc	29.80 MPa	
ecu	0.0131	



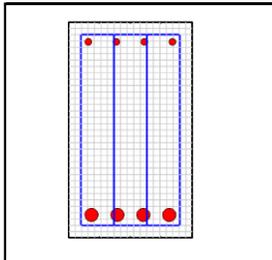
	Momento_Curvatura	Xtract	% de diferencia [Xtract/Momento_Curvatura]
M Max	820.43	817.00	0.4%
Curvatura Max	0.088	0.090	-2.7%

Mecanismo de falla Momento_Curvatura
Falla Concreto a compresión
Mecanismo de falla Xtract
Falla Concreto a compresión

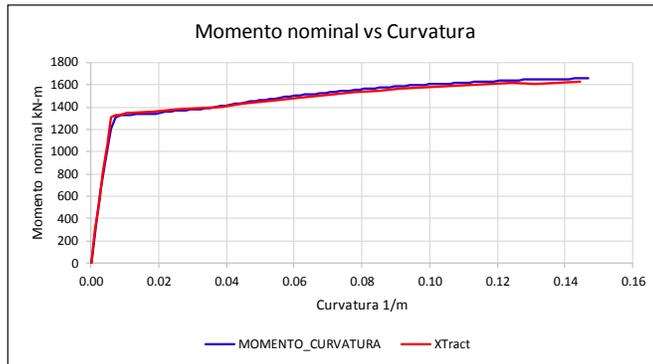
Figura 95. Viga, sección 5
Fuente: Elaboración propia

SECCIÓN 6

VIGA



40X70	4#7 + 4#14	Cuántía
As sup	15.48 cm ²	0.55%
As inf	58.08 cm ²	2.07%
Ag	2800.00 cm ²	
Estribos	#4	
Separación	10 cm	
f'c	35 MPa	
f'cc	46.07 MPa	
ecu	0.0309	



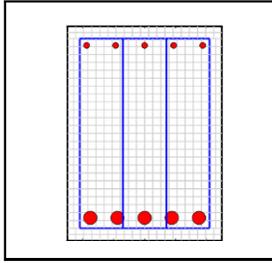
	Momento_Curvatura	Xtract	% de diferencia [Xtract/Momento_Curvatura]
M Max	1660.88	1624.00	2.2%
Curvatura Max	0.147	0.144	1.8%

Mecanismo de falla Momento_Curvatura
Falla Concreto a compresión
Mecanismo de falla Xtract
Falla Concreto a compresión

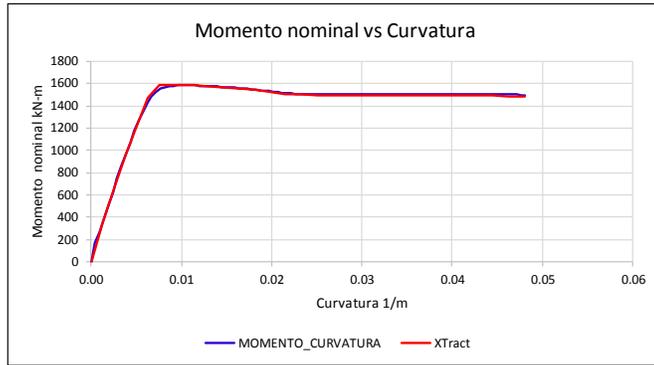
Figura 96. Viga, sección 6
Fuente: Elaboración propia

SECCIÓN 7

VIGA



50X70	5#6 + 5#14	Cuántía
As sup	14.20 cm ²	0.41%
As inf	72.60 cm ²	2.07%
Ag	3500.00 cm ²	
Estribos	#2	
Separación	10 cm	
f'c	21 MPa	
f'cc	23.85 MPa	
ecu	0.0142	



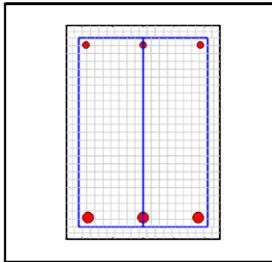
	Momento_Curvatura	Xtract	% de diferencia [Xtract/Momento_Curvatura]
M Max	1584.29	1591.00	-0.4%
Curvatura Max	0.048	0.048	0.1%

Mecanismo de falla Momento_Curvatura
Falla Concreto a compresión
Mecanismo de falla Xtract
Falla Concreto a compresión

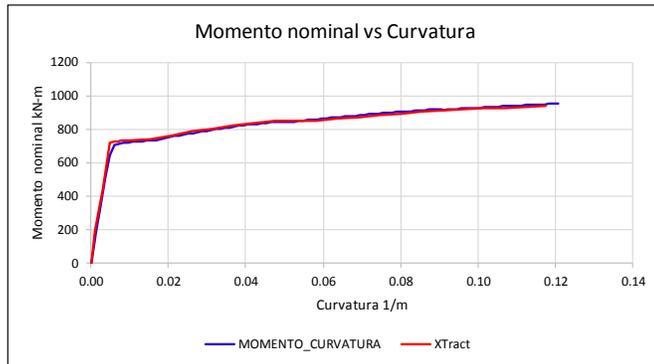
*Figura 97. Viga, sección 7
Fuente: Elaboración propia*

SECCIÓN 8

VIGA



50X70	3#7 + 3#11	Cuántía
As sup	11.61 cm ²	0.33%
As inf	30.18 cm ²	0.86%
Ag	3500.00 cm ²	
Estribos	#3	
Separación	15 cm	
f'c	28 MPa	
f'cc	30.93 MPa	
ecu	0.0135	



	Momento_Curvatura	Xtract	% de diferencia [Xtract/Momento_Curvatura]
M Max	954.07	939.40	1.5%
Curvatura Max	0.121	0.118	2.6%

Mecanismo de falla Momento_Curvatura
Falla Concreto a compresión
Mecanismo de falla Xtract
Falla Concreto a compresión

*Figura 98. Viga, sección 8
Fuente: Elaboración propia*

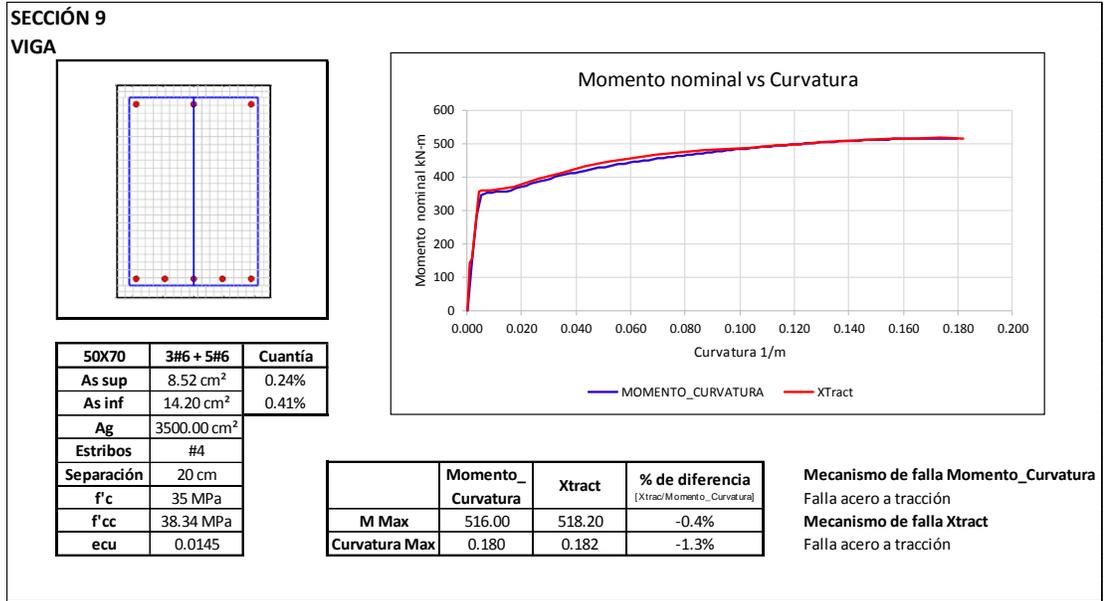


Figura 99. Viga, sección 9
Fuente: Elaboración propia

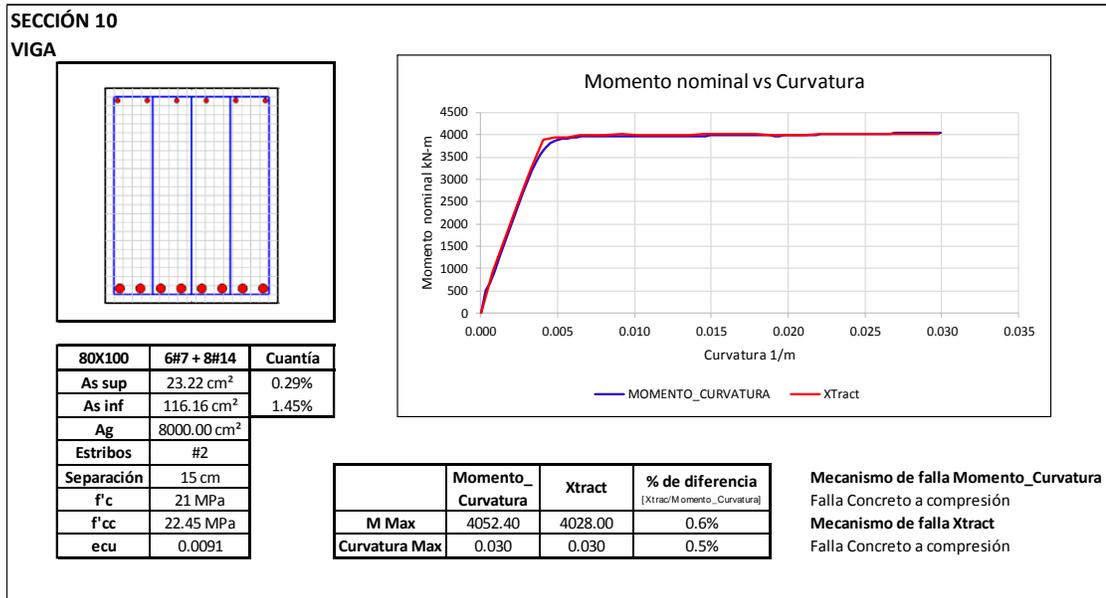


Figura 100. Viga, sección 10
Fuente: Elaboración propia

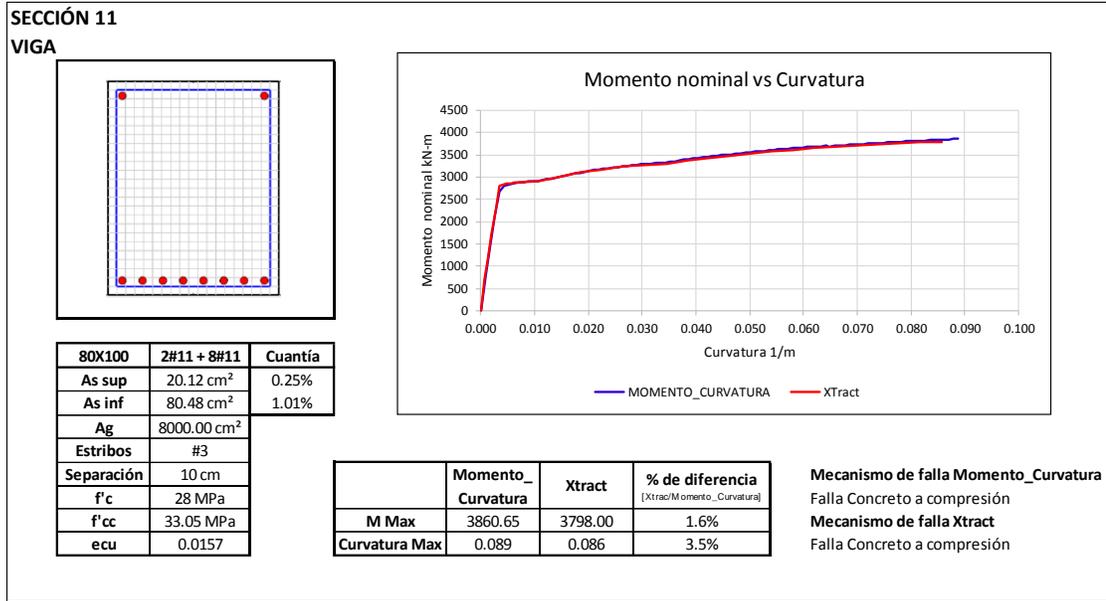


Figura 101. Viga, sección 11
Fuente: Elaboración propia

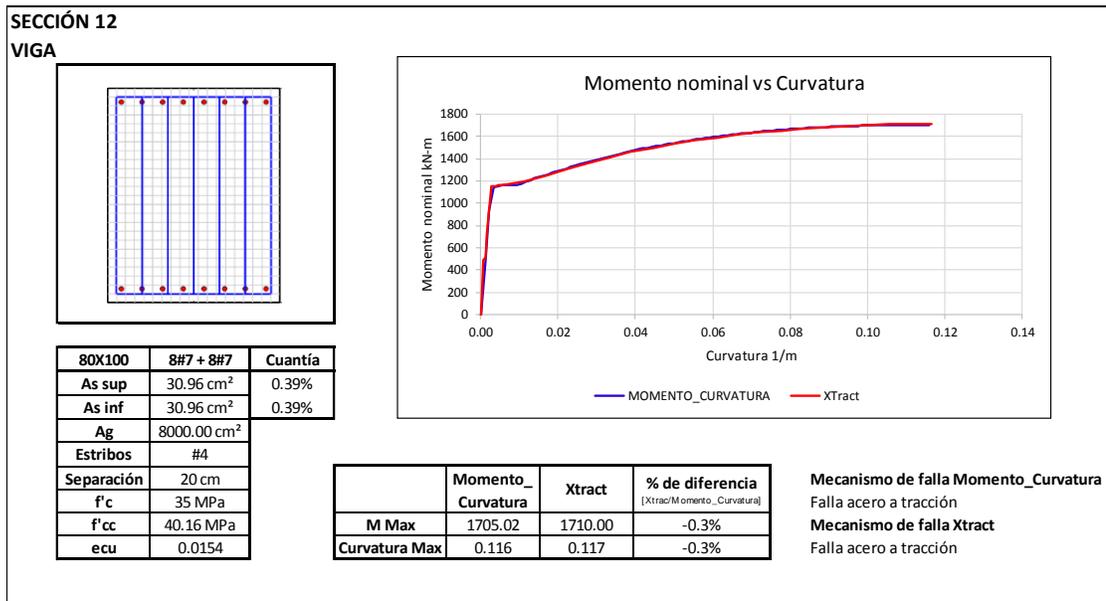


Figura 102. Viga, sección 12
Fuente: Elaboración propia

B. Secciones banco de pruebas

A continuación se presenta el procedimiento de construcción y los resultados de las 6 secciones que hacen parte del banco de pruebas.

Viga 1

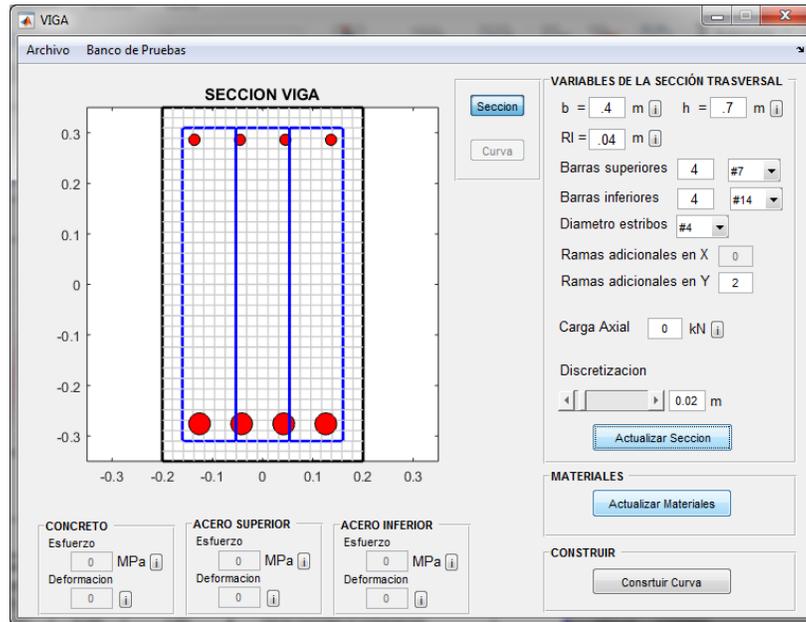


Figura 103. Definición de la geometría, sección 1, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

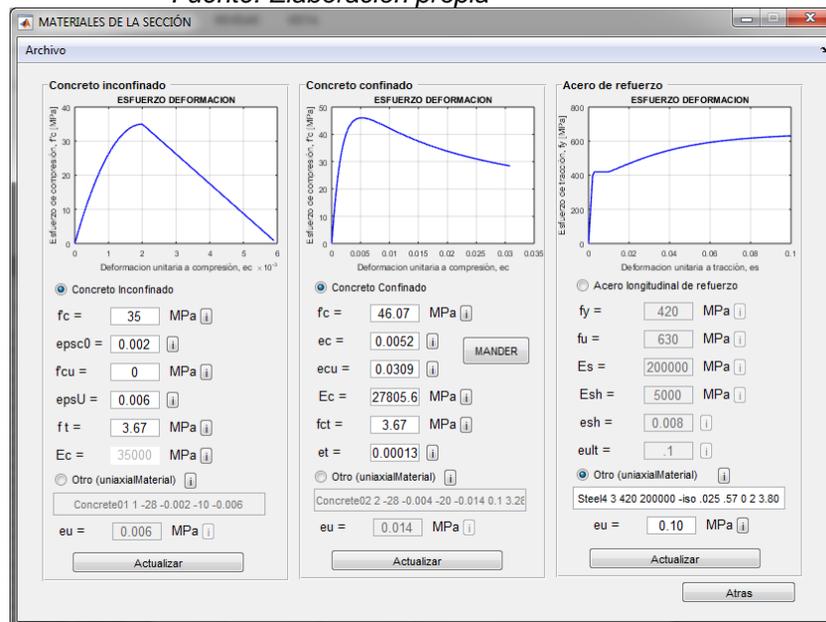


Figura 104. Definición de materiales, sección 1, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia



Figura 105. Definición concreto Mander, sección 1, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

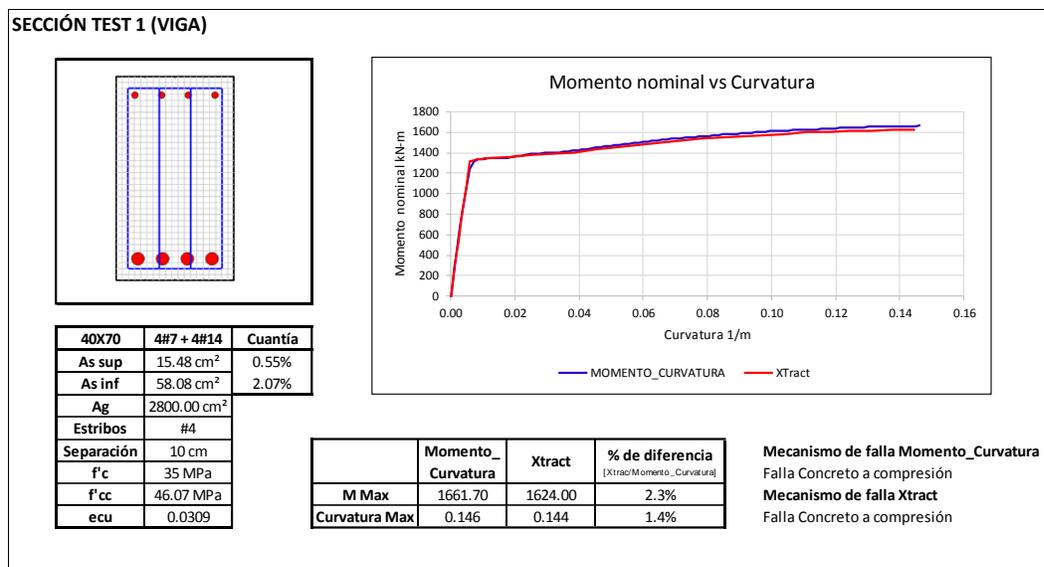


Figura 106. Resultados sección 1, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

Viga 2

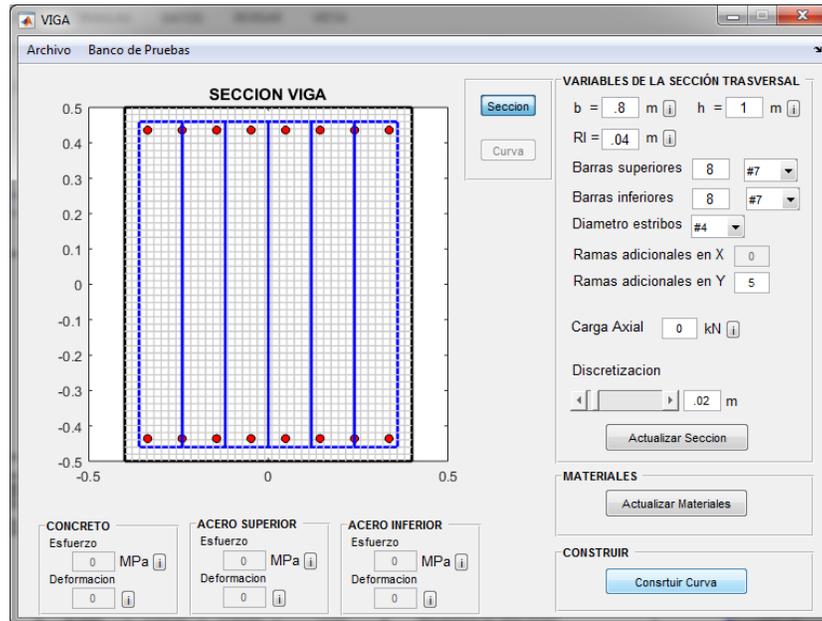


Figura 107. Definición de la geometría, sección 2, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

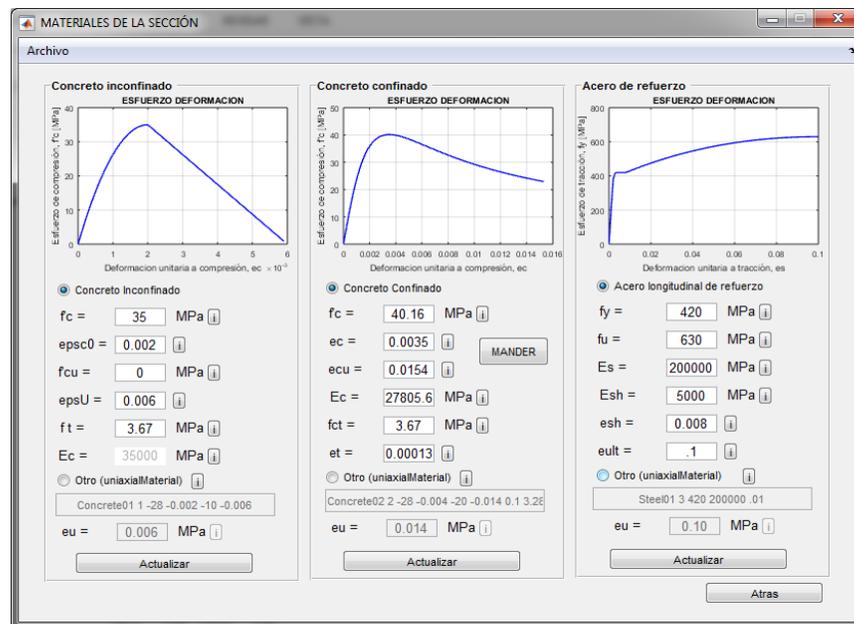


Figura 108. Definición de materiales, sección 2, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

MODELO MANDER

Documentación

Variables modelo Mander

f'c = 35 MPa | s = .2 m | px = 0.00142 |

Fyh = 420 MPa | s' = 0.187 m | py = 0.00638 |

Ec = 27805.6 MPa | ε sm = 0.100 | ε co = 0.002 |

Esec = 11556.3 MPa | ε cu = 0.0154 | ke = 0.479 |

ft = 3.67 MPa | ε t = 0.00013 | ε cc = 0.0035 |

Establecer valores para la sección definida

Cálculo de f'cc

Promedio de las cuantías

Nomograma

Ver Nomograma

f11 / f'c = 0.0082

f12 / f'c = 0.0367

K = 1.15

Resistencia a la compresión del concreto confinado

f'cc = 40.16 MPa

Actualizar | Calcular

Figura 109. Definición concreto Mander, sección 2, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

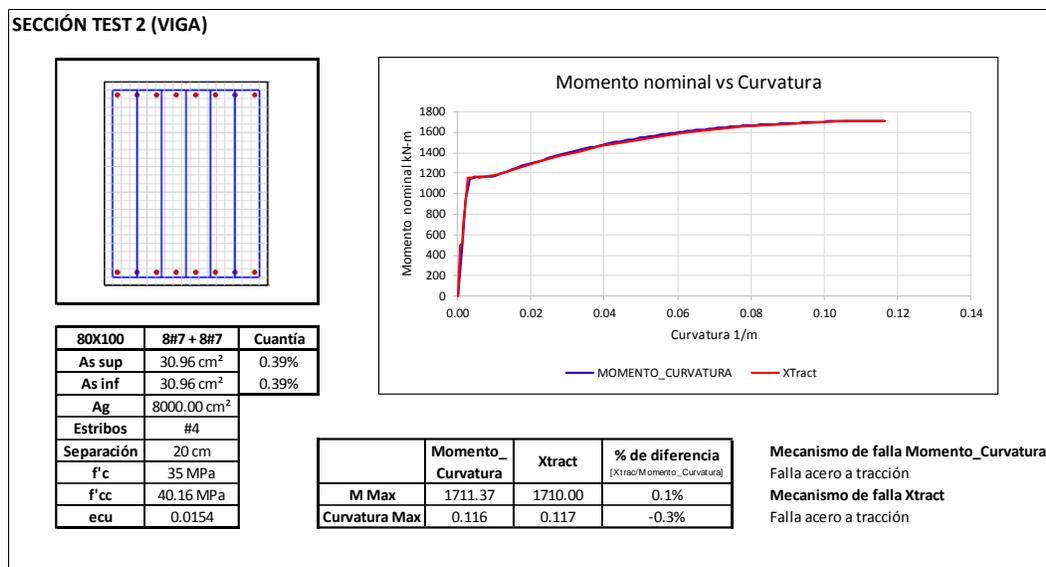


Figura 110. Resultados sección 2, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

Columna 1

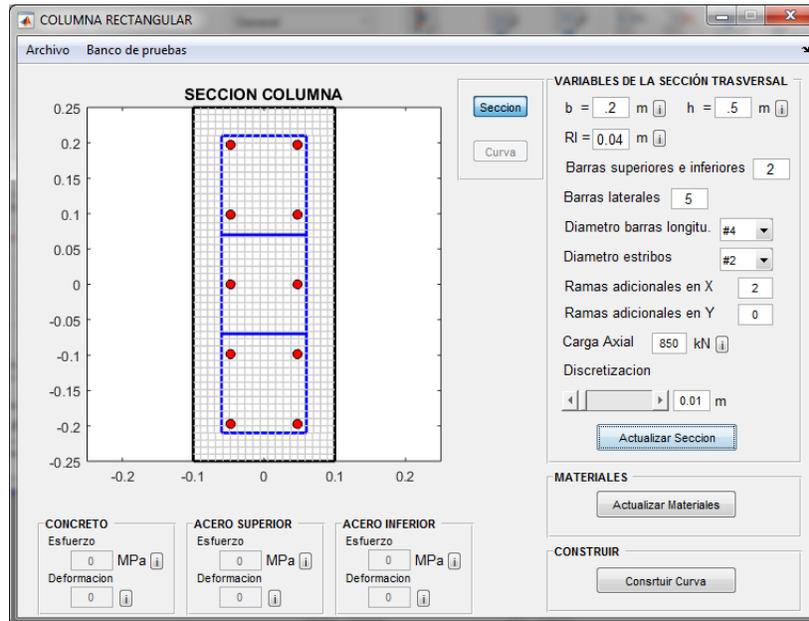


Figura 111. Definición de la geometría, sección 3, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

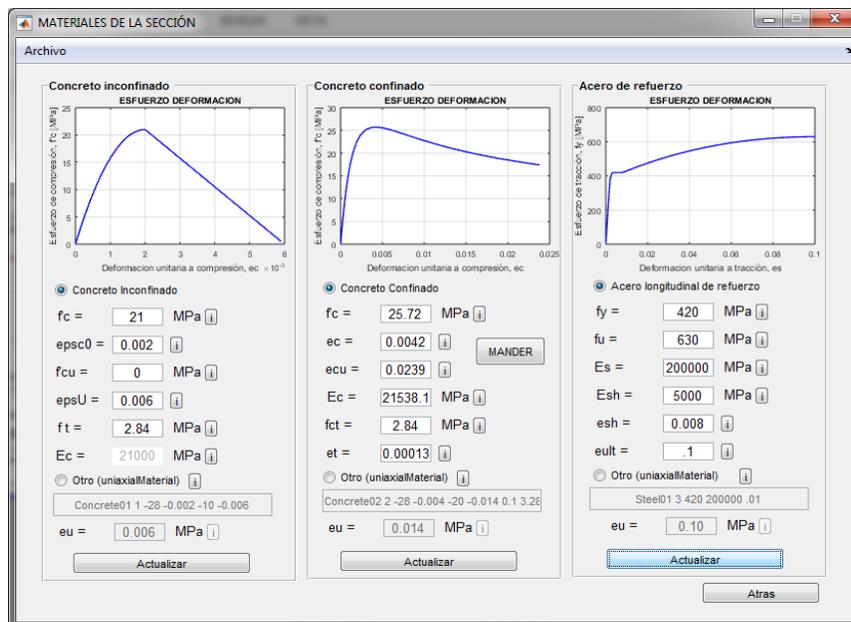


Figura 112. Definición de materiales, sección 3, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia



Figura 113. Definición concreto Mander, sección 3, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

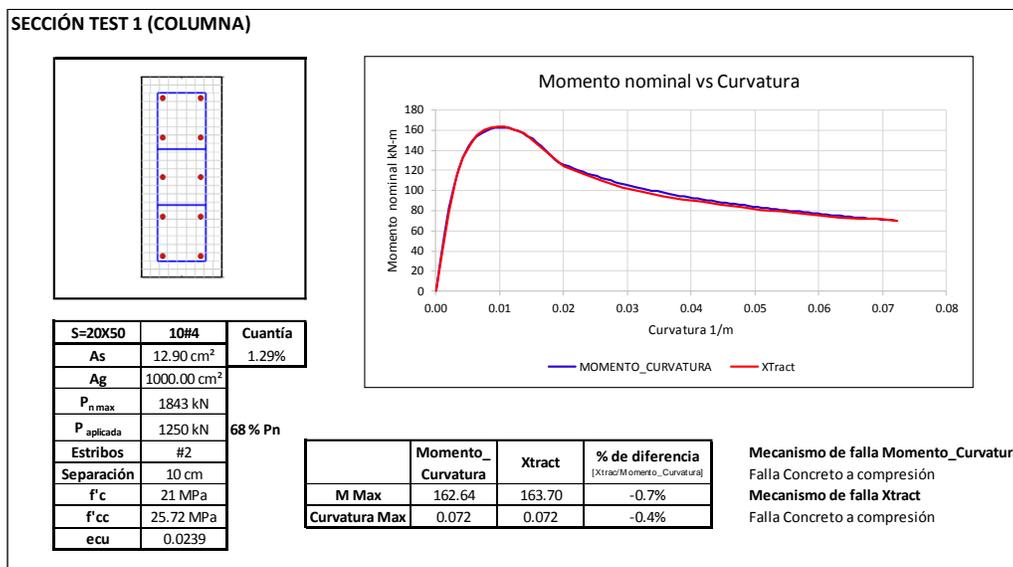


Figura 114. Resultados sección 3, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

Columna 2

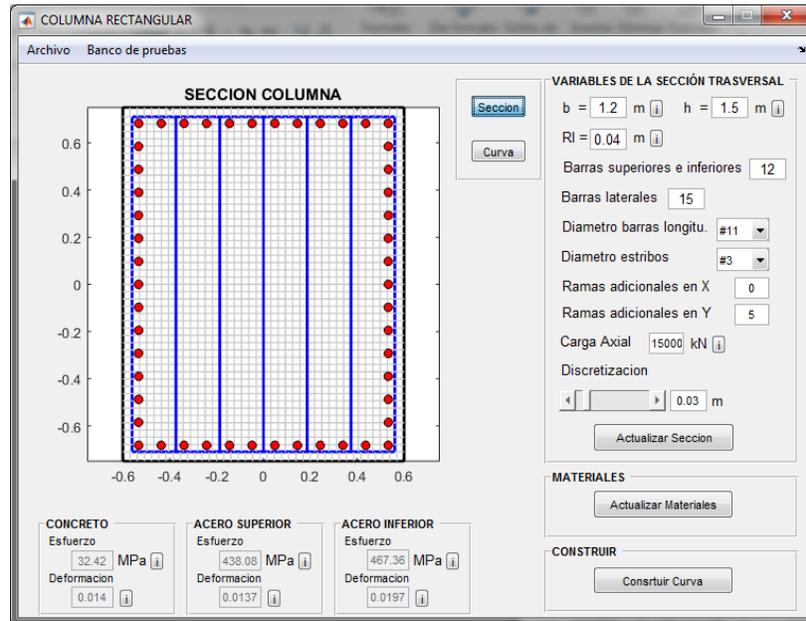


Figura 115. Definición de la geometría, sección 4, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

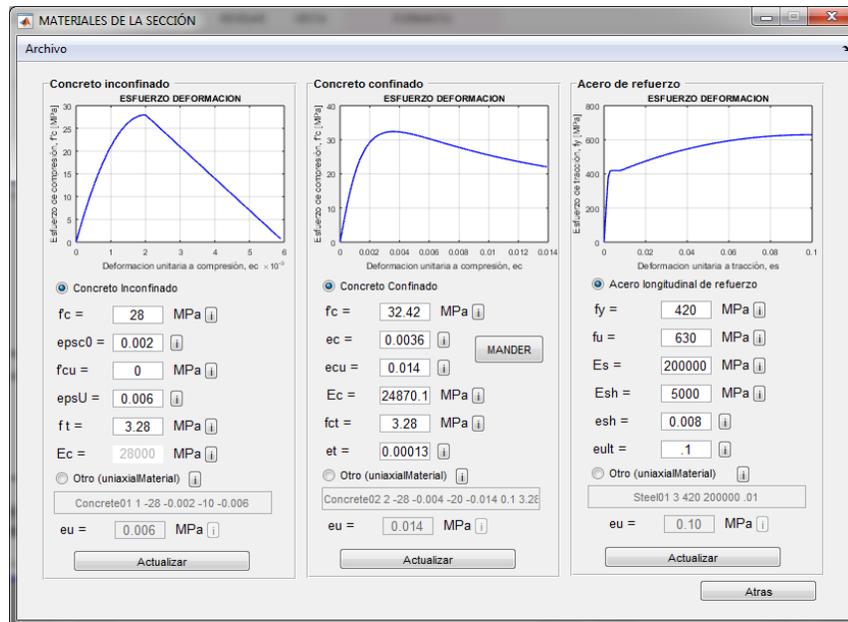


Figura 116. Definición de materiales, sección 4, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

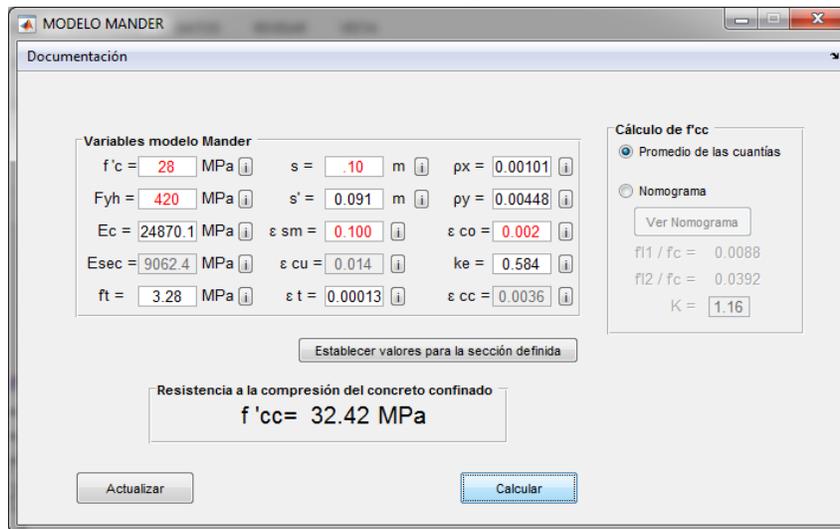


Figura 117. Definición concreto Mander, sección 4, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

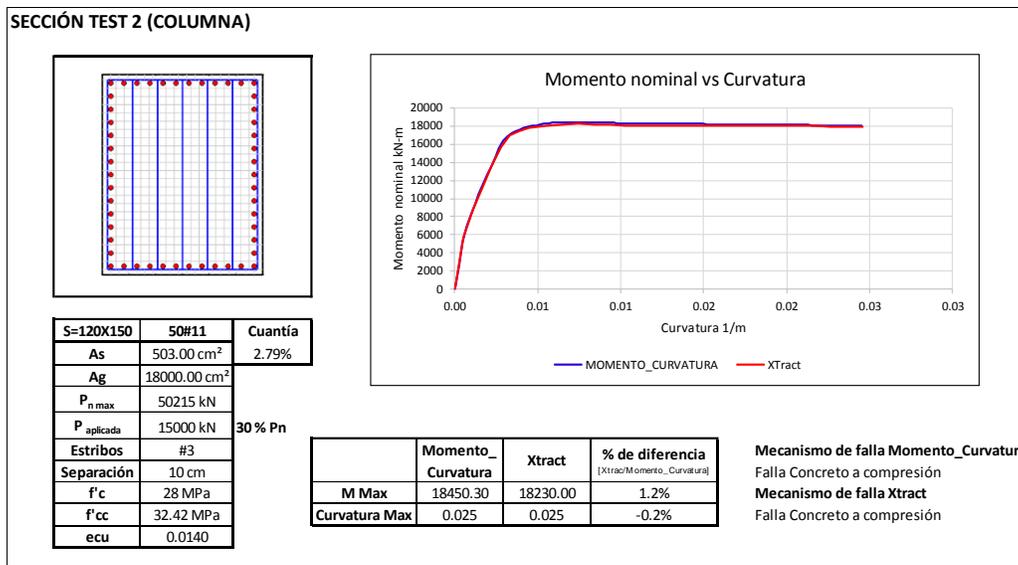


Figura 118. Resultados sección 4, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

Columna circular 1

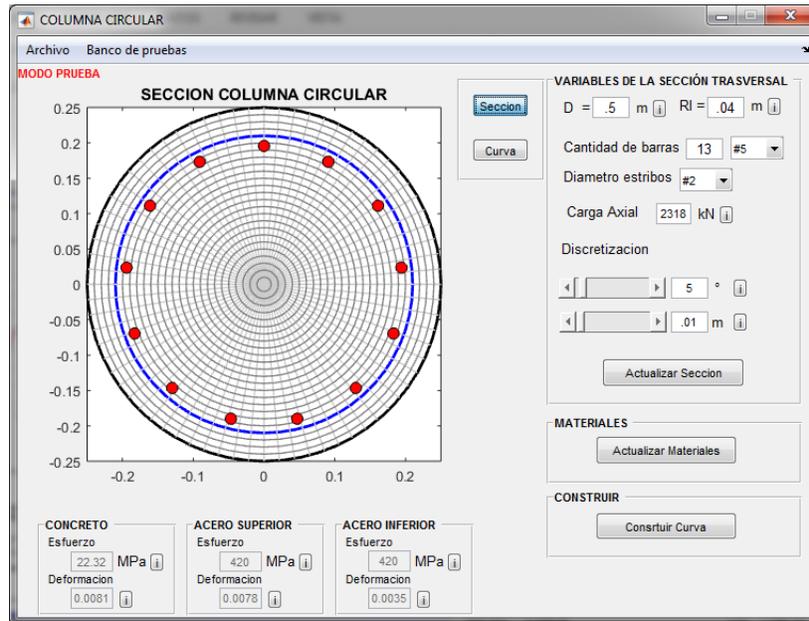


Figura 119. Definición de la geometría, sección 5, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

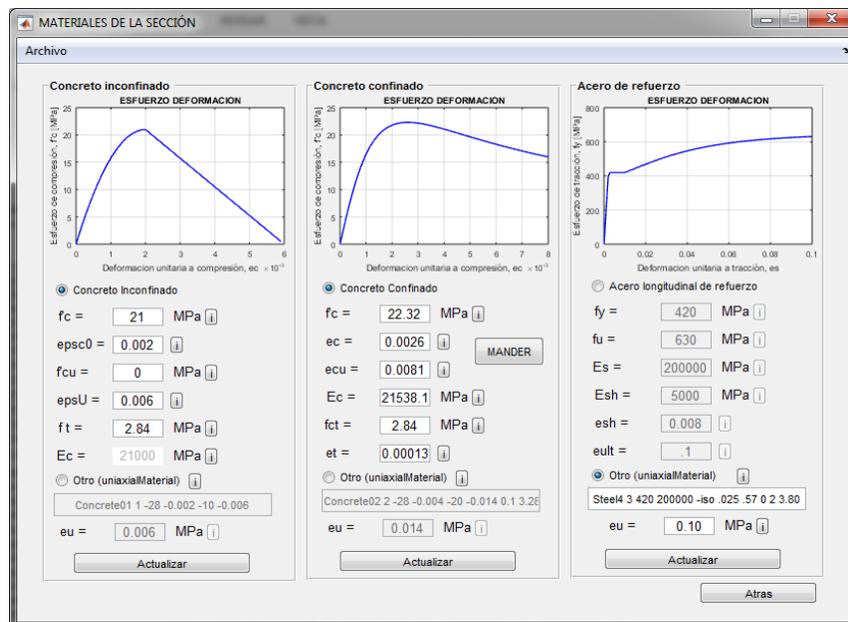


Figura 120. Definición de materiales, sección 5, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia



Figura 121. Definición concreto Mander, sección 5, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

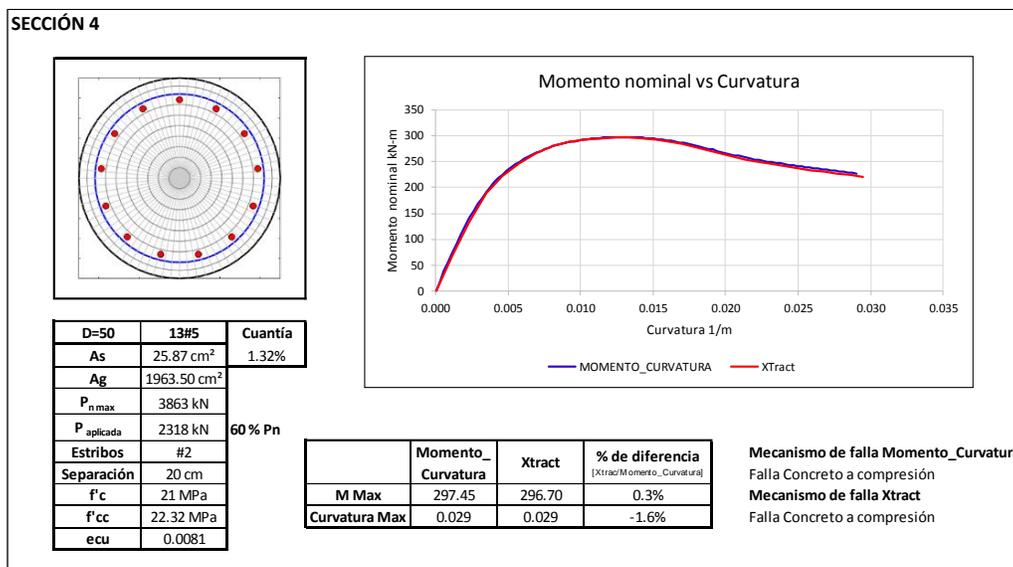


Figura 122. Resultados sección 5, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

Columna circular 2

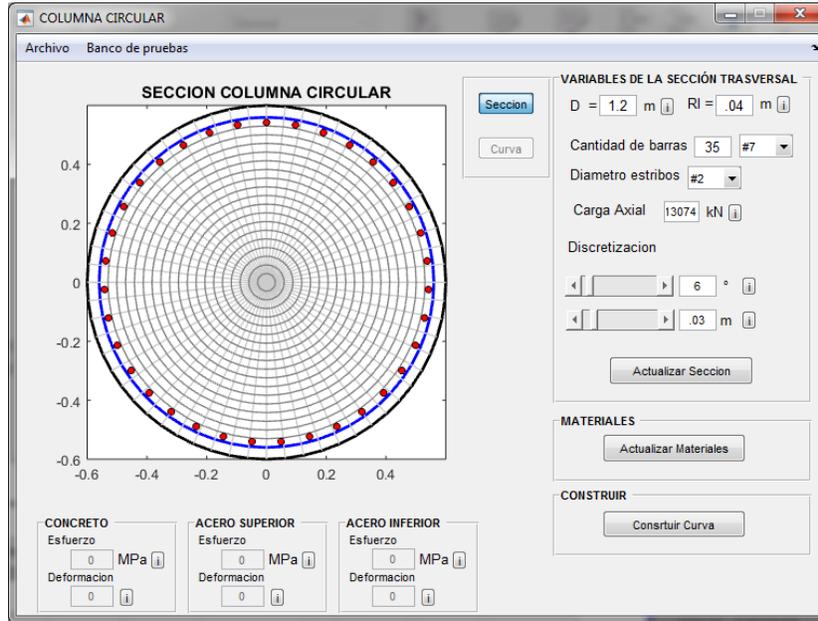


Figura 123. Definición de la geometría, sección 6, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

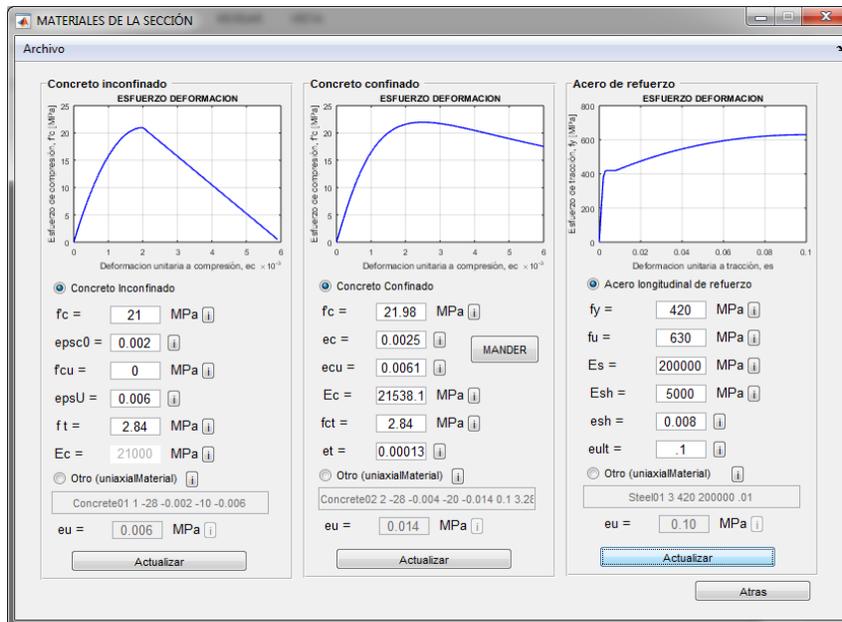


Figura 124. Definición de materiales, sección 6, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia



Figura 125. Definición concreto Mander, sección 6, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

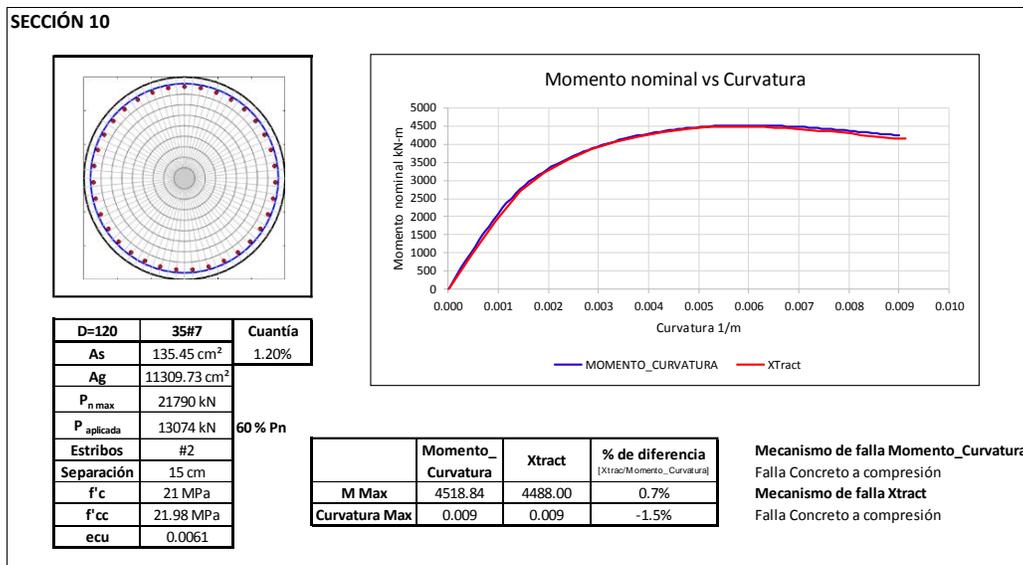


Figura 126. Resultados sección 6, banco de pruebas
Fuente: Elaboración propia

C. Encuesta

A continuación, se presenta el formato de la encuesta electrónica utilizada en la fase de verificación de la usabilidad de la herramienta

Encuesta evaluación del software Momento-Curvatura V 0.1

Buenos días,

por favor dedique unos minutos de su tiempo para rellenar el siguiente cuestionario.

1

Por favor especifique su grado academico

Estudiante de Ingeniería Civil Pregrado

Estudiante de Ingeniería Civil Postgrado

Otra

100 caracteres restantes

2

El proceso de instalación del software Momento-Curvatura V 0.1 fue:

Facil

Normal

Dificil

3

¿La interfaz del software Momento-Curvatura V 0.1 es fácil de usar?

Muy facil de usar

Facil de usar

No tan Facil de usar

Es dificil de usar

4

La documentación que acompaña al software Momento-Curvatura V 0.1 es:

Muy útil

Normal

Totalmente inútil

5

Es útil el archivo de salida en formato .xml?

Muy util

No sirve mucho

Es inutil

6

¿Con qué frecuencia "se cuelga" o "se bloquea" el software Momento-Curvatura V 0.1?

- Muy amenudo
- A veces
- Casi nunca
- Nunca

7

¿Está usted satisfecho con el alcance del módulo de conceptualización del software Momento-Curvatura V 0.1?

- Muy satisfecho
- Satisfecho
- Normal
- Insatisfecho
- Terriblemente insatisfecho

8

¿Recomendaría el software Momento-Curvatura V 0.1 a otros?

- Definitivamente sí
- Probablemente sí
- No lo sé
- Probablemente no
- Seguramente no

9

Por favor califique el software Momento-Curvatura V 0.1



10

¿Cómo podemos mejorar el software Momento-Curvatura V 0.1?

 Escribir un párrafo

1500 caracteres restantes

D. Manual de instalación momento curvatura

Versiones soportadas

Momento_Curvatura V 1.0 es un software de 32 o 64 bits que funciona en sistemas operativos Microsoft Windows 7 o superior.

Instalación

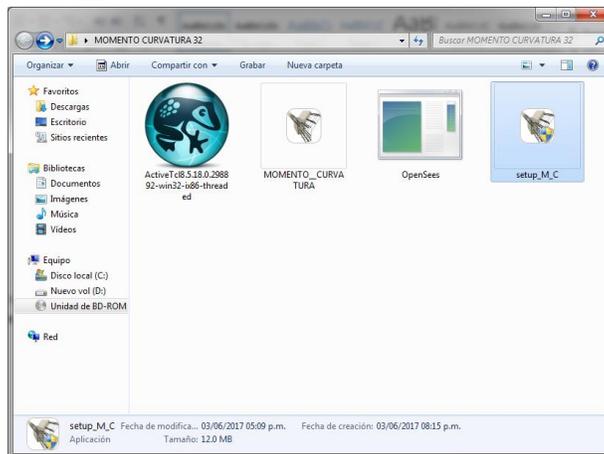
Antes de comenzar con el proceso de instalación compruebe que tiene los archivos necesarios para la correcta instalación, revisando la versión de su sistema operativo (32 o 64 bits).



El proceso de instalación es relativamente sencillo y cuenta con dos secciones.

Sección 1 - Instalación del software Momento_Curvatura V 1.0

Paso 1. Ejecute setup_M_C.exe



Paso 2. Siga las instrucciones de instalación y seleccione en su momento la ruta de instalación que usted prefiera.

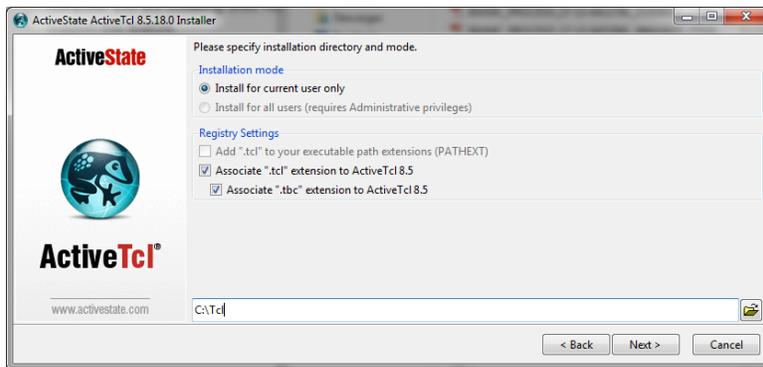
Una vez finalizado el proceso de instalación se podrá dar por finalizada la sección 1 del proceso de instalación

Nota: Si usted cuenta con una instalación de MatLab R2015b o superior podrá ejecutar el programa Momento_Curvatura V 1.0.exe directamente, obviando los pasos 1 y 2

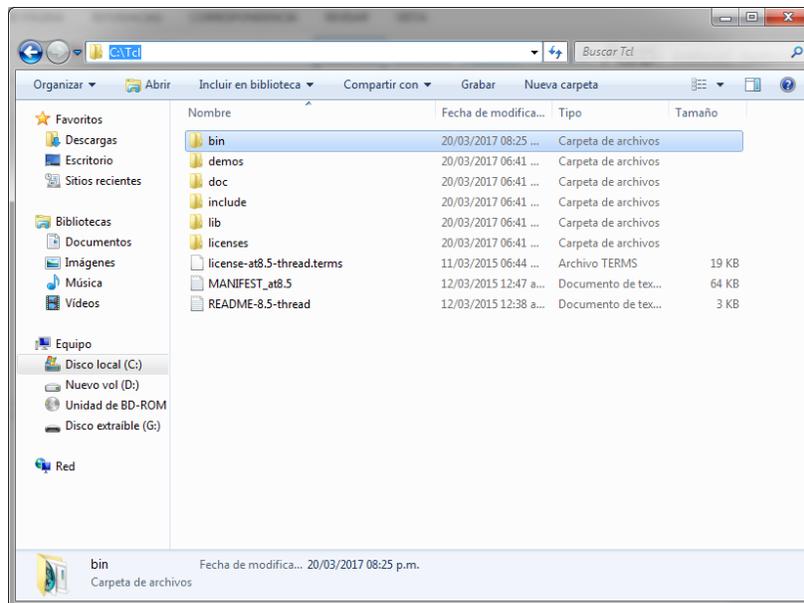
Sección 2 - Instalación del interprete Tcl / Tk y OpenSees

Paso 1. Ejecute ActiveTcl8.5.18.0.298892-win32-ix86-threaded.exe para sistemas de 32 bits o ActiveTcl8.5.18.0.298892-win32-x86_64-threaded.exe para sistemas de 64 bits.

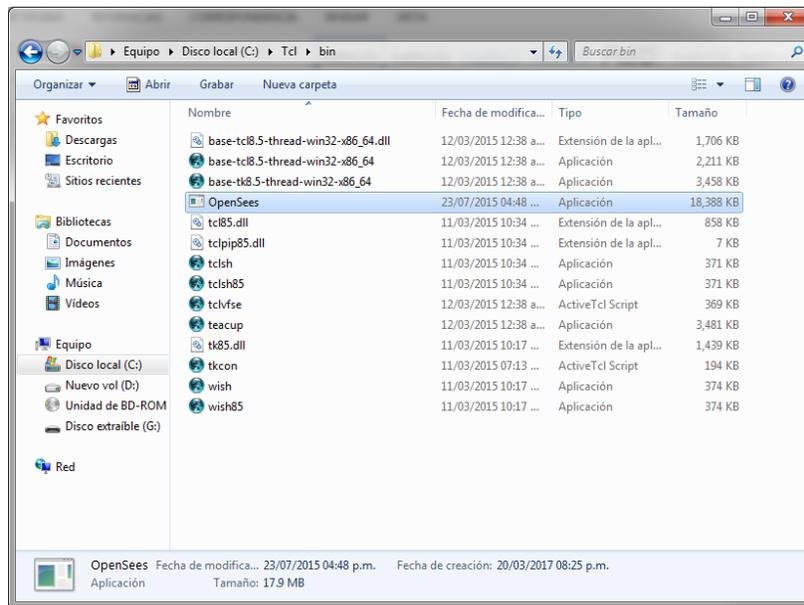
Paso 2. Siga las instrucciones dejando la ruta que viene por defecto.



Paso 3. Una vez finalizada la instalación del intérprete diríjase a la ruta de instalación del mismo.



Paso 4. Abra la carpeta bin y dentro de ella pegue el ejecutable Opensees.exe



Una vez realizados los cuatro pasos anteriores se dará por finalizado en su totalidad el proceso de instalación y se podrá comenzar a usar el programa Momento_Curvatura V 1.0