

Aplicaciones para análisis y diseño de elementos de concreto reforzado



Abstract

The developed project is called "*Applications for analysis and design of reinforced concrete elements*". This is a program for analysis and design of some reinforced concrete elements, in a more specific way, for columns and structural walls (or shear walls). The program was developed in Visual Basic 6.0 language.

The principal objective of this project was to create a computational tool to analyze and design columns and structural walls of reinforced concrete, according to the requirements established by the Costa Rican seismic code (Código Sísmico de Costa Rica 2002).

This work includes a resume of the basic theory for analysis and design of concrete columns and walls. This theory was used as a base to develop the program.

The final product of this work is program easy to use, but able to do an important quantity of calculations, that in other way could take a lot of time to do it. Also, this program is in accordance with the actual normative used in Costa Rica. The software includes some menus for the design and analysis of shear and the simultaneous loads of flexion and compression acting on a section.

Resumen

El proyecto desarrollado lleva por título "*Aplicaciones para análisis y diseño elementos de concreto reforzado*". El mismo consiste en un programa para el análisis y diseño de elementos de concreto reforzado, específicamente columnas y muros estructurales o de cortante. Este programa fue desarrollado en lenguaje de Visual Basic 6.0.

El objetivo principal de este proyecto consistió en realizar herramientas computacionales para el análisis y diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado, que además cumplan con los requisitos que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2002.

Como parte de este trabajo se incluye un resumen de la teoría básica para el análisis y diseño de muros y columnas de concreto reforzado, teoría que sirvió de base para el desarrollo del programa.

El resultado final de este trabajo es un programa de uso sencillo pero capaz de realizar cálculos que de otra forma tomarían mucho tiempo calcular. Además es un programa adaptado a las normativas vigentes en Costa Rica. El software incluye menús para diseño y análisis por cortante y flexo-compresión de columnas y muros estructurales de concreto reforzado.

Aplicaciones para análisis y diseño de elementos de concreto reforzado

PABLO ZÚÑIGA MIRANDA

Junio del 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	5
Resumen ejecutivo	7
Introducción	10
Metodología	12
Marco teórico	15
Cargas en las estructuras	15
Premisas de diseño del concreto reforzado.....	18
Diseño y análisis de columnas de concreto reforzado	18
Columnas robustas	19
Columnas esbeltas	25
Cortante y refuerzo transversal en columnas	33
Diseño y análisis de muros de concreto reforzado	35
Flexo-compresión en muros estructurales	36
Cortante en muros estructurales.....	39
Resultados.....	41
Análisis de resultados	43
Conclusiones y recomendaciones	44
Apéndices	45
Anexos.....	95

Prefacio

En Costa Rica uno de los materiales más utilizados en la construcción corresponde al concreto reforzado, por lo que en esta investigación se considera que los ingenieros deben estar familiarizados con las técnicas básicas de diseño de elementos donde se emplea este material.

Algunos de los cálculos más laboriosos que se deben realizar en el proceso de diseño de elementos de concreto se relacionan con los requeridos para diseñar columnas y muros estructurales por flexo-compresión, pues sus diagramas de interacción de momentos de flexión versus carga axial deben ser preparados. La construcción manual de estos diagramas requiere de un proceso lento y cuidadoso. Se Necesitan varios pares ordenados de momento de flexión y carga axial que representan la resistencia en el elemento estudiado para cierta profundidad del eje neutro de la sección. Para ello se deben suponer diferentes valores de la distancia de la fibra externa en compresión del concreto al eje neutro, a partir de los cuales se calculan las deformaciones que sufren el concreto y el acero. Así se obtienen los valores de los esfuerzos en estos materiales y se determina la resistencia que aportan estos materiales ante las cargas aplicadas.

Finalmente se requiere verificar que las cargas externas aplicadas sean menores que las que puede soportar el elemento, para poder considerar la sección como adecuada. Esta revisión se realiza también con los diagramas de interacción. Igualmente estos cálculos manuales requieren de paciencia y cuidado para evitar errores. Además, en muchos casos se obvia considerar los efectos de amplificación de momentos en el diseño de elementos con relaciones de esbeltez considerables, lo que puede resultar en un dimensionamiento inadecuado del miembro.

De esta forma, el objetivo fundamental de este proyecto fue realizar herramientas

computacionales para el análisis y diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado, tanto para las solicitaciones en flexo-compresión como en cortante. Para ello se consideraron las disposiciones del Código Sísmico de Costa Rica 2002. La ayuda tal vez más importante del programa que se desarrolló es la generación de los diagramas de interacción para columnas de forma rectangular, circular y otras formas poligonales, así como para muros rectangulares, muros en "L" y en "T".

Dichas herramientas permiten obtener los diagramas con gran rapidez y de forma que se pueden evitar errores que se podrían cometer cuando se realizan cálculos a mano. Además, permite agilizar los cálculos de las combinaciones de carga que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2002 y de amplificación de momentos.

Por otra parte, la entrada en vigencia del nuevo Código Sísmico de Costa Rica 2002, hace necesaria la actualización de las herramientas de cómputo que se utilizan en el análisis y diseño de estructuras, este trabajo toma en cuenta las nuevas disposiciones de este código en lo referente al diseño en concreto estructural. Algunas de las nuevas disposiciones del código tienen que ver con la asignación de los factores de reducción de la resistencia (ϕ), cuyo cálculo ha variado respecto a las disposiciones anteriores. En códigos de diseño y construcción anteriores, el cálculo del factor de reducción de resistencia para la construcción de los diagramas de interacción se basaba en los esfuerzos a los que se veía sometida la sección. La evolución en estos códigos ha reconocido que un parámetro más adecuado para el cálculo de estos factores es el tomar en cuenta las deformaciones que sufren los materiales de los elementos. Sin embargo, esto hace un poco más complicada la determinación de los valores de estos factores. Con las aplicaciones que se desarrollaron, estos factores son calculados automáticamente, para así obtener la curva de diseño en los diagramas

de interacción. El tomar estas nuevas disposiciones establecidas por el Código Sísmico de Costa Rica 2002 hace que la herramienta computacional sea totalmente actualizada y adaptada al medio costarricense.

Aunque en el mercado existen programas avanzados para el cálculo de columnas y muros de concreto, basados principalmente en las disposiciones del American Concrete Institute (ACI), estos difieren en ciertos puntos de la normativa costarricense, además, por lo general, son herramientas bastante costosas. Además, entre los propósitos de este proyecto se halla la evolución y mejora del programa por desarrollar, de modo que pueda constituirse en una herramienta útil para los diseñadores nacionales.

También se espera que este proyecto sea una buena referencia, tanto en su base teórica

como en las aplicaciones, para los estudiantes del curso de Estructuras de Concreto de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Para ello se le entregará a la Dirección de Ingeniería en Construcción una versión “demostrativa” del programa.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que de una u otra forma hicieron posible la realización de este proyecto, tanto con sus conocimientos como con su apoyo. Agradezco de manera especial a mi profesor guía, el Ing. Gustavo Rojas Moya, quien me motivó y apoyó para que las ideas plasmadas en este proyecto se consolidaran en el programa que se expone.

Resumen Ejecutivo

El presente proyecto tiene como objetivo principal realizar herramientas computacionales para el análisis y diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado. Se incluyen las disposiciones que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-2002), de manera que el programa responda a las normativas vigentes en Costa Rica para el diseño estructural, específicamente en referente al diseño en concreto reforzado.

En Costa Rica, uno de los materiales estructurales más utilizados en la construcción es el concreto reforzado, por lo que es importante que estudiantes y profesionales de ingeniería civil y de ingeniería en construcción, conozcan claramente los métodos para el análisis y diseño de elementos estructurales de concreto reforzado.

Algunos de los cálculos más laboriosos para los diseñadores de estructuras de concreto corresponden al diseño de columnas y muros estructurales, por la acción simultánea de cargas axiales y momentos de flexión sobre los elementos (flexo-compresión). Debido a esto el análisis y diseño de los elementos se debe llevar a cabo mediante la elaboración de diagramas que muestre el comportamiento de los elementos bajo las cargas indicadas.

La elaboración de estos diagramas de forma manual requiere de una importante cantidad de tiempo y cuidado, aún para las columnas más simples. Cuando se tienen columnas con gran cantidad de acero, dispuesto en varias localidades de la sección transversal de la columna, los cálculos son más lentos, y se pueden cometer errores. El mismo problema se presenta en el caso de diseño de muros estructurales por flexo-compresión, en los cuales se tiene una cantidad de barras de acero mucho mayor que en una columna.

Con base en lo anterior, se consideró necesario crear una herramienta de cómputo que facilitara la realización de todos estos cálculos, de manera que los usuarios en pocos minutos

puedan revisar o diseñar los elementos mencionados.

Este proyecto no se limita al diseño y análisis por flexo-compresión de columnas y muros estructurales. También alcanza el análisis y diseño por cortante en muros y columnas. Además, para el caso específico de columnas, se podrán tomar en cuenta los posibles efectos de esbeltez que presenten estos elementos. En algunas ocasiones a los cálculos de los efectos de esbeltez no se les da la importancia que ameritan, lo que puede dar como resultado un dimensionamiento y detallado de las columnas no adecuados. Algunas veces esta situación se da porque los cálculos para tomar en cuenta los efectos de esbeltez requieren de mucho esfuerzo y tiempo, pero la herramienta planteada en esta investigación facilita dicho cálculo.

Actualmente en el mercado se dispone de algunos programas para el cálculo de diferentes elementos de concreto reforzado. La mayoría de dichos programas se basan en las disposiciones normativas estadounidenses que establece el American Concrete Institute (ACI). Las disposiciones que establece el ACI difieren en algunos casos de las que establece el CSCR-2002. Esto permite justificar una vez más la necesidad de diseñar herramientas de cálculo, actualizadas y adaptadas al medio costarricense.

Por otra parte, generalmente los programas disponibles en el mercado son bastante costosos y muchas veces no pueden ser adquiridos por profesionales que se inician como diseñadores o por empresas pequeñas y aún medianas. Se espera que el programa desarrollado por el autor pueda ser perfeccionado para que esté disponible en el mercado como una herramienta económicamente accesible para los diseñadores nacionales. La Escuela de Ingeniería en Construcción del ITCR contará con una versión tipo demostrativa del programa desarrollado.

Para la elaboración de este proyecto, primero se requirió efectuar una recopilación de la teoría general para el diseño estructural de

columnas y muros de concreto reforzado, específicamente para las solicitaciones por carga axial, flexo-compresión y cortante que pueden actuar en dichos elementos. En el caso de muros estructurales, se analizó la flexo-compresión en propio plano del muro; no se contempló la flexión fuera del plano. También se resume la teoría para tomar en cuenta los efectos de esbeltez en las columnas, mediante el método de amplificación de momentos que establece el ACI. Toda esta información teórica se encuentra en Marco Teórico de este informe.

Con base en la teoría para el análisis y diseño de columnas y muros estructurales para los requerimientos de cargas antes mencionados, se iniciaron los procedimientos del programa para realizar los diferentes cálculos. Para ello se dividió el trabajo según los elementos por diseñar, muros y columnas. Asimismo, se efectuó una subdivisión según las solicitaciones: carga axial, flexo-compresión y cortante. Seguidamente se revisaron los datos mínimos que requeriría el programa para realizar los diferentes cálculos. Con éstos, se crearon las diferentes interfaces para los diferentes tipos de elementos y solicitaciones. Luego se realizó la codificación del programa para que este pueda llevar a cabo los cálculos necesarios y que permitirá brindar al usuario la información que requiere. Este trabajo se ejecutó primero de forma independiente para cada tipo de elemento y según las solicitaciones por flexo-compresión o cortante. De forma similar se efectuaron los procedimientos para tomar en cuenta los efectos de esbeltez en las columnas.

Cuando se terminaron y probaron los diferentes módulos de cálculo, se integraron para obtener un solo programa, donde el usuario pueda seleccionar el tipo de elemento que desea analizar o diseñar, y así realizar los cálculos correspondientes a flexo-compresión y cortante.

Como resultado final, se logró crear un programa de cómputo que permite analizar y diseñar columnas y muros estructurales de concreto reforzado. El programa ofrece al usuario una serie de módulos de diseño o análisis para estos elementos. En cuanto a columnas, es posible analizar o diseñar columnas con una sección transversal rectangular, circular o alguna otra forma poligonal que puede ser definida por el usuario. Con respecto a los muros, pueden ser analizados muros con sección transversal rectangular, muros en "L", en "T" o en "I". En el caso de las columnas, es posible tomar en cuenta el efecto de su esbeltez. Además, el programa puede realizar los cálculos para diseño y análisis por cortante para ambos tipos de elementos.

Por otra parte, el programa ofrece al usuario una interfaz agradable, la forma como se deben ingresar los datos es sencilla y brinda como resultado información valiosa para el diseño de columnas y muros estructurales. Los datos que muestra el programa cumplen de forma satisfactoria con las disposiciones que establece el CSCR-2002 para el diseño de elementos de concreto estructural.

El programa creado ha sido denominado por el autor como "DCR, Diseño de Concreto Reforzado". En la siguiente figura se muestra la ventana con la que se inicializa el programa.

DCR

Diseño de Concreto Reforzado

Creado por: Ing. Pablo Zúñiga Miranda

**pablozmir@yahoo.com
Tel: 355-9318**

**Heredia, Costa Rica
Junio del 2005**



Figura 1. Ventana de inicio del programa "DCR".

Introducción

El presente trabajo consistió en desarrollar un programa de cómputo que permite llevar a cabo el análisis y diseño estructural de columnas y muros de concreto reforzado para diferentes solicitaciones: cargas axiales puras (compresión y tensión pura), flexo-compresión y cortante.

Por lo tanto, el área de trabajo de este proyecto es una combinación del diseño de estructuras de concreto con algunos elementos básicos de la informática, en lo que se refiere al desarrollo del programa.

El objetivo principal fue realizar herramientas computacionales para el análisis y diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado.

Como objetivos específicos se consideraron los siguientes:

- ❖ Crear herramientas actualizadas que faciliten el análisis y diseño de columnas con secciones transversales rectangulares, circulares y otras secciones poligonales, de concreto reforzadas, además de muros estructurales rectangulares, en "L" y en "T".
- ❖ Adaptar a estas herramientas las últimas disposiciones del Código Sísmico de Costa Rica 2002 para el diseño sismorresistente de elementos de concreto reforzado, específicamente en lo que se refiere a elementos en flexo-compresión (muros estructurales y columnas).
- ❖ Construir herramientas de fácil uso, agradables y económicas para el diseño de los elementos de concreto mencionados.
- ❖ Proporcionar una breve guía de las bases teóricas para el diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado según el estado actual del conocimiento en esta materia.

Para llevar a cabo este proyecto, primeramente se realizó una revisión de la teoría

correspondiente al análisis y diseño de columnas y muros de concreto reforzado, como base para el desarrollo del programa de cómputo. La información teórica obtenida incluye el análisis y diseño de elementos en compresión o tensión pura, en flexo-compresión y en cortante. Para el caso de las columnas, se consideró también el método de amplificación de momentos para tener en cuenta los efectos de la esbeltez de los elementos. En todo momento se tomaron en cuenta los requisitos que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2002, tal como las combinaciones de carga, factores de reducción de la resistencia, de modo que se adaptó la teoría general de los diferentes libros de texto a las disposiciones de este código.

Seguidamente se inició la elaboración del programa, el cual está elaborado en lenguaje de Visual Basic 6.0 y compatible con máquinas con sistema operativo de Windows 98 o superior. Se elaboraron inicialmente diagramas de flujo que muestran el proceso principal que se debe seguir para elaborar los diagramas de interacción de carga axial *versus* momento de flexión (P-M), ya que estos procesos son un poco más complejos y algunas veces menos claros de visualizar en el momento de desarrollar el programa. Estos diagramas son para los casos de columnas rectangulares y circulares, pues muestran de forma aproximada el proceso que sigue el programa creado para dibujar los diagramas de interacción.

Una vez que se obtuvieron los diagramas de flujo para columnas y con las bases teóricas de diseño y análisis, fue posible iniciar la codificación o escritura del programa. Este proceso se explica con mayor detalle en el apartado "Metodología".

Este trabajo ofrece entonces una pequeña referencia de la teoría para el diseño y análisis de columnas y muros estructurales de concreto reforzado, donde además se anotan los requisitos especiales que establece el Código Sísmico de Costa Rica. Además, brinda también el programa, que es el objetivo principal del trabajo.

El programa ofrece al usuario una interfaz agradable, sencilla de utilizar, pues se le solicita la menor cantidad de información posible, pero brinda resultados valiosos que le pueden ahorrar gran cantidad de tiempo y esfuerzo que gastaría si los cálculos se realizaran de forma manual.

Esta herramienta es de gran utilidad no solo para el diseño de elementos nuevos de concreto reforzado. También resulta de gran ayuda cuando se efectúan reestructuraciones o reforzamientos en edificaciones y otras estructuras, donde se ha tomado la decisión de reforzarlas mediante el mejoramiento de columnas y la colocación de nuevas barras de acero longitudinal. Realizar el

análisis de una columna con varias capas de acero en forma manual resulta lento y complicado, pero la herramienta ofrecida tiene la capacidad de hacer este análisis en unos pocos segundos, luego de que el usuario ha introducido unos pocos datos esenciales.

La expectativa es que el programa desarrollado pueda ser de utilidad tanto para estudiantes como para profesionales que se dedican al diseño estructural. Además, se espera poder realizar mejoras y novedades a este programa con las recomendaciones que en el futuro puedan brindar los usuarios.

Metodología

A continuación se presentan de forma más detallada los procedimientos que se llevaron a cabo en la elaboración de este trabajo y algunos de los principales problemas enfrentados.

Primeramente se debió recolectar la información teórica correspondiente al diseño estructural de columnas y muros estructurales de concreto reforzado, para lo cual se consultaron diversas fuentes bibliográficas. Se procuró utilizar la información más actualizada disponible. El resumen de esta teoría contempla el análisis y diseño de los elementos mencionados, para los requerimientos en compresión, flexo-compresión y cortante.

La teoría consultada en libros de texto de estructuras de concreto se complementó con los requisitos especiales que indica el Código Sísmico de Costa Rica en la versión 2002 (CSCR-2002)¹, con el fin de que la información recopilada, que es la base para la elaboración del programa de cómputo, cumpla con la normativa nacional para el diseño estructural.

Adicionalmente, para el caso de análisis y diseño columnas, se resumió la teoría de columnas esbeltas, que es un tema que algunas veces se pasa por alto en el diseño de columnas. Aquí se le trata de brindarle a este tema la importancia debida, y el programa desarrollado realiza los cálculos de forma automatizada, con algunos pocos datos que el usuario debe ingresar, como se explica más adelante. Una vez que se obtuvo esta información, fue posible clarificar los diferentes procedimientos para el análisis y diseño de las columnas y muros estructurales, según las solicitaciones de carga axial, momentos de flexión y fuerzas cortantes. El resumen de la teoría general de análisis y diseño para los elementos estructurales, así como los requisitos especiales que establece el CSCR-

2002 se muestra ampliamente en el Marco Teórico de este trabajo.

Es importante aclarar que para el diseño en flexo-compresión de columnas y muros estructurales (en general para el diseño en flexo-compresión), no existe un procedimiento directo que permita obtener la cantidad de acero requerida para esta situación y el procedimiento de diseño es más bien un proceso iterativo de selección de las dimensiones de la columna, selección del acero por utilizar y revisión de las cargas que actúan en el elemento. Además, los elementos sujetos a flexo-compresión no están sujetos a una única condición crítica, sino que se pueden presentar varias condiciones que deben ser analizadas para verificar que el elemento diseñado es adecuado para resistir esas condiciones. Aunque se dispone de algunas ayudas de diseño para aproximar la cantidad de acero requerida por una sección, estas ayudas se limitan a una cierta cantidad de columnas con formas y disposiciones de acero específicas. En este trabajo se considera que la mejor ayuda de diseño que se puede brindar es el programa mismo, ya que permite verificar las cargas sobre los elementos y realizar cambios de una forma muy rápida, de modo que en unos pocos minutos se pueda tener detallada la sección.

El siguiente paso consistió en confeccionar los diagramas de flujo correspondientes a los procesos de análisis de columnas rectangulares y circulares, con el fin de esquematizar y visualizar mejor los diferentes pasos a seguir para elaborar los diagramas de interacción de carga axial versus momento de flexión (P-M), pues se considera que la elaboración de estos diagramas es una de las partes más importantes de este proyecto y también la más compleja. Los procedimientos son muy similares en el caso de columnas que tienen otras formas en su sección transversal y para muros estructurales, por lo que los diagramas no se repiten para estos casos.

Los procedimientos para el análisis y diseño por cortante son un poco más simples, por lo que

¹ Nota: En adelante cuando se mencionen las palabras: el código, o este código, se referirá al Código Sísmico de Costa Rica 2002.

se consideró satisfactorio contar con los resúmenes para realizar estos cálculos.

Una vez que se obtuvieron los resúmenes y diagramas, se inició la elaboración del programa de cómputo. Para ello se dividió el trabajo según los elementos por diseñar, muros y columnas. Asimismo, se efectuó una subdivisión según las solicitaciones: flexo-compresión (que incluye compresión y tensión pura) y cortante. Seguidamente se revisaron los datos mínimos que requeriría el programa para realizar los diferentes cálculos.

Para los diferentes elementos y solicitaciones, se revisó la información básica que el usuario debe brindar para efectuar los cálculos y la información final que necesita para detallar completamente la sección del elemento por diseñar y así realizar los planos requeridos; o para comprobar que una sección dada es adecuada para resistir las cargas impuestas sobre el elemento, en el caso de análisis. A partir de esto se creó la interfaz para cada menú o módulo del programa, procurando que sea agradable y de uso sencillo.

Como ya se mencionó, el trabajo fue dividido según el elemento por analizar o diseñar y según los requerimientos de flexo-compresión o cortante. Con la interfaz diseñada para cada situación fue posible iniciar la codificación del programa. Aquí el procedimiento utilizado fue ir elaborando secciones de código, cuyos resultados fueron comparados con los obtenidos en ejemplos del curso de Estructuras de Concreto y alguna información con la que se contaba, como tablas en MS Excel, preparada anteriormente para proyecto del curso de Taller de Diseño. Posteriormente, se procedió a ensamblar por completo cada módulo.

Uno de los procesos más importantes fue desarrollar un método para el cálculo de centroides de área, método necesario para poder realizar el módulo para el cálculo de columnas con formas diferentes a las rectangulares y circulares y para efectuar los diagramas de interacción de estas. Para esto se creó un método en el cual el usuario introduce las coordenadas de los vértices de la columna y mediante las cuales la máquina analiza la geometría que se forma al "trazar una línea" entre dos puntos sucesivos. El método compara dos puntos consecutivos de manera que pueda "ver" si se trata de un triángulo, un rectángulo o si no

se forma ninguna figura. Esto se muestra de forma esquemática seguidamente.

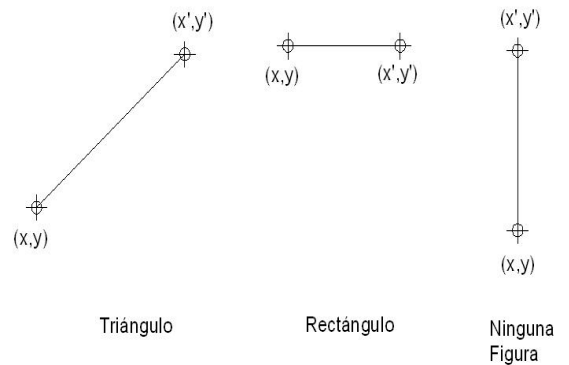


Figura 2. Posibles formas entre dos puntos consecutivos.

Como los centroides de área de estas geometrías son conocidos, entonces es fácil determinar el centroide total de una sección. Este procedimiento fue verificado con los resultados de ejemplos de libros de estática y mecánica de sólidos. El desarrollo de este procedimiento constituye un aporte significativo para el proyecto, pues permite analizar columnas que posean cualquier sección poligonal², sea esta regular o no. Esto es útil cuando se cuenta columnas con formas de "L", "T", "I", entre otras empleadas comúnmente, así como para el análisis de muros con las formas ya mencionadas.

Además, el procedimiento para obtener los centroides de área permitió completar todos los procedimientos para el análisis en flexo-compresión de los diferentes elementos.

Luego se procedió a preparar los procedimientos para tomar en cuenta los efectos de esbeltez en las columnas. Estos procedimientos se basan en el método de amplificación de momentos. Esta sección del programa permite calcular las amplificaciones en los momentos por efectos de esbeltez, y realiza las diferentes combinaciones de carga que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2002, de manera que se pueden obtener los resultados de la amplificación de momentos para las cuatro combinaciones de carga de forma automatizada. Las cargas obtenidas pueden ser trasladadas

² Se debe aclarar que el programa desarrollado solo puede analizar secciones sólidas y no se contemplan cavidades en estas.

para revisarlas en el diagrama de interacción de la columna.

Posteriormente se elaboraron los procedimientos para el análisis y el diseño por cortante para columnas y muros. Para columnas se realiza con base en los requisitos por capacidad que establece el CSCR-2002. En el análisis se puede obtener el cortante máximo que puede soportar una sección, dada el área de acero para cortante y la separación de los aros, mientras que para el diseño, el resultado final es la separación a la que se deben colocar los aros, dadas las cargas y el área de acero supuesta. Algo similar ocurre en el caso de los muros, donde el análisis permite obtener el cortante

máximo que el muro puede tomar, y en el diseño se obtiene la cuantía de refuerzo requerida.

Finalmente, una vez preparados todos los procedimientos relacionados con cálculos, se procedió a elaborar el módulo principal del programa, el cual incluye menús para la selección del cálculo que se quiere realizar, sobre este modulo o formulario principal se ensamblaron todos los demás módulos de cálculos para obtener una sola aplicación, que integra los formularios elaborados para los diversos cálculos indicados anteriormente. A partir la integración total de los procedimientos anteriores, se crearon las ayudas para el uso del programa, las cuales se detallan en la sección de "Resultados".

Marco Teórico

A continuación se presenta un resumen de la teoría que se recopiló con respecto al análisis y diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado, así como las especificaciones que establece el Código Sísmico de Costa Rica 2002 en lo que a este tema se refiere.

Cargas en las estructuras

Toda estructura está sometida a diferentes tipos de cargas, y cada estructura debe ser capaz de soportar de forma segura estas fuerzas a las que se ve sometida. Además, debe cumplir con los límites de deformación establecidos en los diferentes códigos.

En general se puede hablar de las cargas o fuerzas externas que actúan sobre las estructuras y de las fuerzas internas que son provocadas por las anteriores en los diferentes elementos estructurales.

Las fuerzas externas o sollicitaciones son obtenidas de un estudio de la estructura que se desea diseñar o revisar y son las fuerzas que deberán resistir los diferentes elementos de la estructura. Se originan por el peso propio de cada elemento, las condiciones de servicio normales de las estructura –como por ejemplo: peso de muebles, de personas, equipo que se puede utilizar durante la construcción o equipos permanentes, entre otros– o por acciones especiales como los sismos, que debido a una aceleración en el suelo, inducen fuerzas inerciales sobre las estructuras al ponerlas en movimiento.

Otro tipo de acción externa importante es la fuerza provocada por el viento, aunque en Costa Rica, por lo general, no causa las condiciones críticas que sí generan las acciones de sismo. Las diferentes cargas deben ser combinadas de

alguna forma para obtener las cargas últimas (CU) probables que pueden actuar de forma simultánea en la estructura. Los códigos de diseño, según los estudios realizados por los comités encargados, señalan la forma de combinar las diferentes cargas. En general, se multiplica cada tipo de carga por un factor ψ de mayoración de carga, por lo general mayor que uno (aunque puede ser menor), con el fin de obtener seguridad en el cálculo de las cargas, por ejemplo: estimar posibles variaciones en los pesos de los materiales.

Las cargas externas sobre las estructuras son agrupadas en varios tipos:

- ❖ *Cargas permanentes* (CP) que están presentes prácticamente durante toda la vida útil de la estructura, tal como su propio peso
- ❖ *Cargas temporales* (CT) las cuales se deben al uso de las estructuras, como el peso de mercaderías, los usuarios de la estructura, entre otros.
- ❖ *Cargas de empuje* (CE), debidas al empuje de suelos, presión de líquidos entre otros, como en el caso de muros de retención.
- ❖ *Cargas sísmicas* (CS) inducidas por movimientos del terreno.

Algunos códigos consideran por separado a las *fuerzas de viento* (CW), mediante alguna combinación particular. El CSCR-2002 no hace ninguna consideración particular para el caso de estas cargas y solo establece de forma general cargas de empuje (CE), por lo que de considerarse importante la carga de viento en un proyecto, es puede ser conveniente revisar combinaciones de carga de códigos que incluyan cargas de viento de una forma particular, como tal como lo hace el American Concrete Institute, ACI 318-02 en el artículo 9.2.

El Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-2002) establece cuatro combinaciones de carga para estimar las posibles cargas últimas que pueden actuar sobre la estructura. Estas

combinaciones son las que se detallan a continuación³:

$$CU = 1.4 CP$$

$$CU = (1.2 CP + 1.6 CT) + 1.6 CE$$

$$CU = 1.05 CP + f_1 CT \pm CS + CE$$

$$CU = 0.95 CP \pm CS + CE$$

donde:

CU = carga última.

CP = carga permanente.

CT = carga temporal.

CS = carga sísmica.

CE = carga por empuje.

y donde el factor f_1 (factor de escala de cargas gravitacionales), está dado por:

$f_1 = 0.5$ para edificaciones de baja probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo.

$f_1 = 1.0$ para edificaciones con alta probabilidad de ocupación plena de carga temporal a la hora del sismo, tales como: bodegas, sitios de reunión pública, estacionamientos públicos, etc.

$f_1 = 0.0$ para techos.

La estimación de las cargas permanentes se puede realizar con las propiedades de los materiales, tal como su peso volumétrico o peso por unidad de área. Debido a la gran cantidad de materiales que se puede utilizar en la construcción, no se detallarán estas propiedades, pero se pueden encontrar en bibliografía relacionada con estructuras o en los catálogos de fabricantes.

La obtención de las cargas de empujes de suelos depende de sus propiedades y se puede calcular con base en las teorías de la mecánica de suelos. Por su parte, para el cálculo de las fuerzas sísmicas, el CSCR-2002 establece los procedimientos por seguir en los capítulos del 2 al 7. En cuanto a las cargas temporales, el código señala valores mínimos en el capítulo 6, según el

uso que tenga la estructura. Estos valores mínimos se muestran en la siguiente tabla.

³ Tomado del Código Sísmico de Costa Rica 2002, Art: 6.2.

Tabla 1: Cargas temporales unitarias mínimas⁴.	
Destino del piso	Carga temporal (kg/m²)
Habitación (casas de habitación, apartamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, edificios para internados en escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares).	200
Oficinas, despachos, laboratorios, salones de lectura, aulas, salas de juego y similares.	250
Escaleras, rampas, vestíbulos, pasajes de libre acceso al público.	400
Lugares de reunión desprovistos de asientos fijos, estadios, salones de baile, etc.	500
Bibliotecas, salones de archivo.	500
Lugares de reunión con asientos fijos, templos, cines, teatros, gimnasios, etc.	400
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía ligera.	500
Comercios, bodegas y fábricas de mercancías con peso intermedio.	650
Comercios, bodegas y fábricas de mercancía pesada.	800
Techos de fibrocemento, láminas de acero galvanizado y otros.	40
Azoteas con pendiente superior a 5 por ciento.	100
Azoteas con pendiente inferior a 5 por ciento.	200
Voladizos en vía pública (marquesinas, balcones y similares).	300
Garajes y aparcamientos (para automóviles exclusivamente).	300

⁴ Tomado del CSCR-2002

Por otro lado, las fuerzas internas en los diferentes elementos de una estructura pueden ser de varios tipos. Las cargas externas pueden provocar sobre los elementos fuerzas internas que en general corresponden a: cargas axiales, momentos de flexión, fuerzas cortantes y momentos de torsión. Estos su vez generan esfuerzos de compresión, tensión, flexión y cortante. Cada elemento está sometido en mayor o menor medida a uno o varios de estos esfuerzos.

Para determinar si un elemento es capaz de tomar de forma satisfactoria estos esfuerzos, se efectúa un análisis de las fuerzas que la sección puede soportar, para lo cual se toma en cuenta la resistencia de los materiales (en el caso de estructuras de concreto, por lo general la resistencia a la compresión del concreto y la resistencia de fluencia en tensión del acero), y la geometría de la sección transversal del elemento por diseñar o analizar. Además, como medida de seguridad, la resistencia nominal así obtenida se debe multiplicar por un factor (ϕ) de reducción de la resistencia.

En este trabajo se presenta un resumen de las teorías de columnas y muros de concreto mediante las cuales se determina la resistencia de estos elementos estructurales para las diferentes solicitaciones. Se incluyen otros requisitos de análisis y diseño que establece el CSCR-2002.

Premisas de diseño del concreto reforzado

El diseño estructural de concreto reforzado se base en algunas suposiciones o premisas fundamentales que se indican seguidamente:

1. Las fuerzas internas (momentos de flexión, fuerzas cortantes y esfuerzos normales y cortantes), están en equilibrio con las cargas externas en la sección.
2. La deformación unitaria de una barra de refuerzo embebida es la misma que la del concreto que la circunda, lo que quiere decir

que se supone que existe una adherencia perfecta entre la interfase del concreto y el acero.

3. las secciones transversales planas antes de la aplicación de las cargas permanecen planas cuando el elemento se carga.
4. Debido a que la resistencia a la tensión del concreto es pequeña comparada con su resistencia a la compresión, se supone en general que el concreto no es capaz de resistir esfuerzos de tensión.
5. La teoría se basa en las relaciones esfuerzo – deformación reales y en las propiedades de los materiales (concreto y acero).

Diseño y Análisis de columnas de concreto reforzado

Las columnas son elementos estructurales sometidos principalmente a cargas de compresión y flexión, aunque pueden estar también en tensión o tensión y flexión, además de solicitaciones de cortante y torsión. En cuanto a las solicitaciones por torsión, éstas finalmente se toman como un incremento en los esfuerzos de tensión diagonal que induce la fuerza cortante en la sección, por lo que se puede decir entonces que las solicitaciones serán las cargas axiales, momentos de flexión y fuerzas cortantes, las cuales pueden causar tensión o compresión en alguna zona interna de la sección transversal a lo largo del elemento.

En términos generales se pueden diseñar y construir tres tipos de elementos a compresión (columnas) de concreto reforzado⁵:

1. Reforzadas con barras longitudinales y aros.
2. Reforzadas con barras longitudinales y espirales.
3. Compuestos, reforzados con perfiles de acero, con barras longitudinales o sin estas.

⁵ Nilso, Arthur. Diseño de Concreto Reforzado

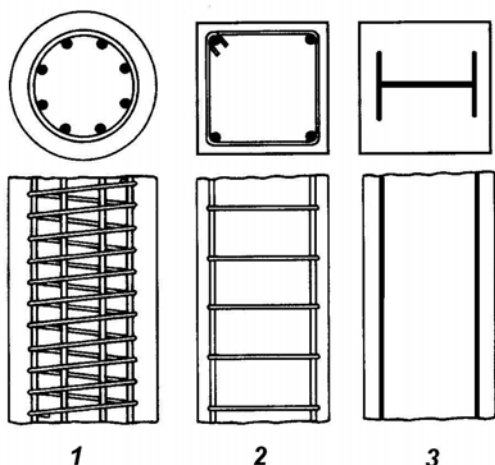


Figura 3. Tipos de refuerzos en columnas de concreto

En este trabajo se estudian únicamente el primer y segundo tipo. De forma similar, el programa calculará secciones con barras longitudinales y refuerzo horizontal, ya sea con aros o espirales.

Adicionalmente, las columnas se pueden dividir en dos categorías importantes:

1. Columnas robustas (columnas cortas).
2. Columnas esbeltas.

Como se mencionó anteriormente, las columnas en general están sometidas a cargas axiales, momentos de flexión y fuerzas cortantes.

Las acciones de la fuerza axial y momento de flexión se analizan de manera simultánea, ya que actúan en conjunto. El análisis de los esfuerzos en la sección transversal cambia para cada combinación de carga axial y momento de flexión. A este análisis se le llama flexo-compresión.

La resistencia de las secciones a las demandas en flexo-compresión está dada por los aportes del concreto en compresión y de las barras longitudinales de acero en compresión y tensión.

Para el caso de las columnas robustas, su resistencia depende de las propiedades de los materiales, en este caso, de la resistencia del concreto y el acero, además de la geometría de la sección transversal. Aquí la relación de esbeltez de la columna es pequeña, por lo que pueden ignorarse los efectos de esbeltez.

Para las columnas esbeltas, la resistencia se ve reducida por las deflexiones laterales que

pueden ocurrir en el elemento, debido a una relación de esbeltez grande. Estas deflexiones ocurren debido a que el elemento puede sufrir un pandeo (elástico o inelástico) que no solo provocan una disminución en la carga axial total que puede tomar la columna. También genera un incremento en la magnitud de los momentos de flexión a los que estaba sometido el elemento en un inicio.

Seguidamente se resumen los pasos generales para el análisis y diseño de columnas de concreto reforzado tanto robustas como esbeltas.

Columnas robustas

Compresión pura

Como se indicó anteriormente, la resistencia de una columna robusta está dada por las propiedades de los materiales y la geometría de la sección transversal, por lo que solo se requiere conocer:

- La forma y las dimensiones de la sección transversal. Esto debe incluir la forma y área de concreto, además de la posición y cantidad de acero (área de acero).
- La resistencia del concreto y del acero.

La resistencia nominal máxima en compresión, capaz de soportar una sección de concreto reforzado, corresponde a:

$$P_n = 0,85 * f'_c * A_c + A_{st} * f_y$$

Donde:

P_n = esfuerzo en la sección.

f_s = resistencia a la fluencia del acero.

f'_c = resistencia a la compresión del concreto a los 28 días.

A_c = área de concreto de la sección transversal.

A_{st} = área total de acero en la sección.

Para determinar la carga última o carga de diseño en compresión pura (P_u) de la sección, se deben aplicar los factores de reducción de la resistencia (ϕ) y un factor para tomar en cuenta las pequeñas excentricidades accidentales que se pueden dar por defectos de la construcción (w), ya que en la práctica no es posible obtener

una columna cargada axialmente de forma perfecta. El CSCR 2002 establece los siguientes factores, según el tipo de refuerzo horizontal de la columna.

Tipo de refuerzo horizontal	Factor por excentricidades (ω) ⁶	Factor de reducción de resistencia (ϕ)
Aros	0,80	0,65
Espiral	0,85	0,70

Tabla 2. Factores de reducción de resistencia para la carga máxima en compresión pura

Por lo tanto, la carga axial nominal máxima, tomando en cuenta excentricidades, es:

$$P_{n(max)} = \omega * P_n = \omega(0,85 * f'_c * A_c + A_{st} * f'_c)$$

Y la carga última en compresión

$$P_u = \phi * P_{n(max)} = \phi * \omega * (0,85 * f'_c * A_c + A_{st} * f'_c)$$

Flexo-compresión

Debido a que la mayoría de los marcos o estructuras de concreto reforzado son continuos en sus uniones, en ellos se generan momentos de flexión y son transmitidos a los diferentes elementos de la estructura. Las columnas no escapan de esto, ya que las vigas transmiten el momento de flexión al nudo y este a su vez lo transmite a la columna. Además, las cargas de viento o sismo en las estructuras generan importantes momentos de flexión, que la mayoría de veces son mucho mayores que los momentos causados por las cargas gravitacionales y crean condiciones críticas imposibles de ignorar. Estos momentos de flexión actúan simultáneamente con la carga axial y, por lo tanto, la sección debe ser analizada con esta combinación de efectos. Los siguientes esquemas muestran la interacción entre los diferentes elementos de una estructura y cómo se transmiten las cargas.

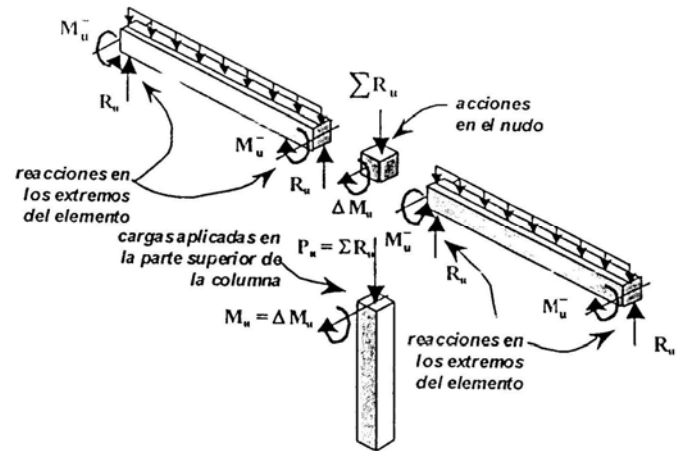


Figura 4. Transmisión de cargas de las vigas y nudos hacia una columna⁷.

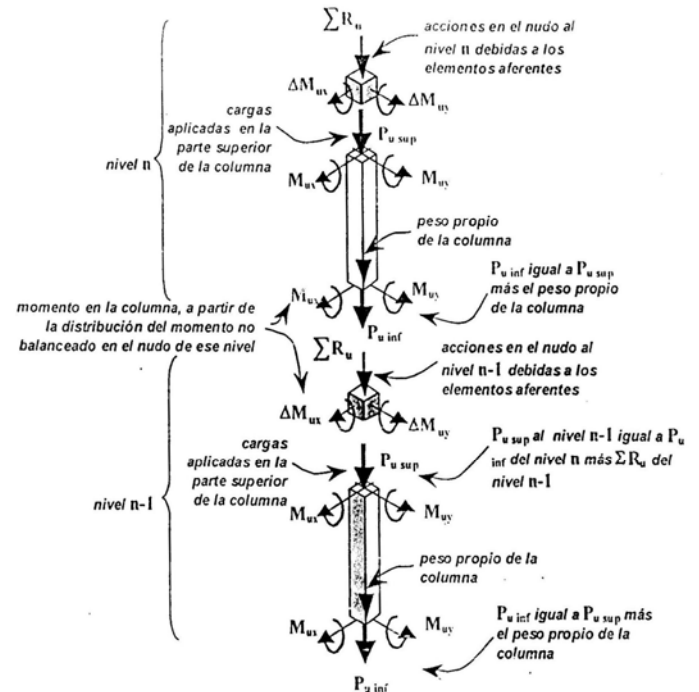


Figura 5. Transmisión de cargas de las vigas y nudos hacia una columna⁸.

Para el análisis, se puede reemplazar la carga axial concéntrica y el momento de flexión por una carga con una excentricidad de magnitud $e = M/P$. En el caso de tener

⁶ Según el ACI 318-02, Art. 10.3.6.

⁷ Figuras 5 tomadas de "Requisitos Esenciales para Edificios de Concreto Reforzado", ACI Internacional.

⁸ Figuras 6 tomadas de "Requisitos Esenciales para Edificios de Concreto Reforzado", ACI Internacional.

excentricidades pequeñas, entonces la sección completa está sometida a compresión y la falla del elemento se da por aplastamiento del concreto y la fluencia del acero en compresión. Si la excentricidad es grande, entonces alguna zona de la sección transversal puede estar en tensión y la falla puede ocurrir de alguna de las siguientes maneras: 1) debido al aplastamiento del concreto en compresión; 2) por la fluencia del acero en tensión, 3) o por la falla simultánea del concreto en compresión y la fluencia del acero en tensión, como ocurre en el caso de la falla balanceada. El siguiente esquema muestra de forma simple las acciones externas que se pueden dar en una columna y sus fuerzas internas. Para el cálculo de la resistencia requerida y la resistencia que es capaz de brindar un determinado elemento, se hará uso de este esquema.

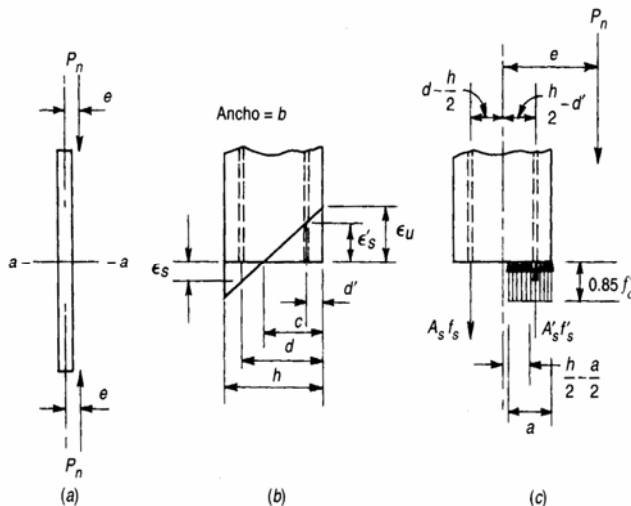


Figura 6. A) Fuerzas sobre una columna excéntrica. B) Deformaciones. C) esfuerzos

Como se indicó anteriormente, las cargas externas son obtenidas previamente de un análisis estructural. El diseño y análisis de las secciones se lleva a cabo revisando el estado de esfuerzos en la sección transversal, mediante la compatibilidad de deformaciones y con la idealización de que las deformaciones varían linealmente, de manera que se obtienen fuerzas internas que desarrolla la sección y con estas se pueden obtener las cargas axiales (P) y momentos de flexión (M), que la sección puede resistir. La carga axial y el momento de flexión varían con la profundidad del eje neutro (c) desde la fibra más lejana en compresión. Los valores de

P y M son graficados para obtener así los conocidos diagramas de interacción de momento de flexión *versus* carga axial de la columna.

La teoría parte de que las deformaciones en la sección transversal varían de forma lineal, según la profundidad desde la fibra extrema en compresión. Los códigos de diseño han establecido que, la máxima deformación que puede soportar el concreto de peso normal antes de fallar es $\epsilon_{cu} = 0,003$ (este valor puede variar hasta 0,008 pero el ACI establece para el cálculo el valor de 0,003) y el esfuerzo máximo en el concreto es de $0,85 \cdot f'_c$. A partir de esta deformación última del concreto, se puede obtener por semejanza de triángulos la deformación en el acero, según la profundidad del eje neutro de la sección. Con esta deformación, se puede calcular el esfuerzo en el acero, tal como se indica seguidamente:

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} * \frac{d - c}{c}$$

Donde:

ϵ_s = deformación del acero.

ϵ_{cu} = deformación última del concreto (0,003).

d = posición del acero medida desde la fibra extrema en compresión.

c = profundidad del eje neutro

y

$$f_s = E_s * \epsilon_s \leq f_y$$

Donde

f_s = esfuerzo en el acero

E_s = módulo de elasticidad del acero

f_y = resistencia a la fluencia del acero

Una vez conocidas las deformaciones y los esfuerzos en los materiales, se puede calcular la resistencia a la compresión y flexión de la sección transversal, aplicando las ecuaciones de la estática $\Sigma F = 0$, $\Sigma M = 0$, de lo cual se obtiene que para el caso de una columna rectangular con acero en compresión y en tensión:

$$P_n = 0,85 * f'_c * a * b + A'_s * f'_s \pm A_s * f_s$$

Donde

P_n = carga axial nominal que resiste la sección analizada para una profundidad del eje neutro c.

a = profundidad del bloque equivalente de esfuerzos rectangulares ($a = \beta_1 * c$).

b = ancho de la columna.
 A'_s = área de acero en compresión.
 f'_s = resistencia a la fluencia del acero en compresión.

$$M_n = 0,85 * f'_c * a * b * \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) \pm A'_s * f'_s * \left(\frac{h}{2} - d' \right) \pm A_s * f_s * \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

Donde:
 h = altura de la sección transversal.

Mediante estas fórmulas y con algunas pequeñas variaciones, se puede realizar el análisis para columnas con otras formas de sección transversal y con mayores cantidades o capas de acero. En el caso de que el refuerzo no sea simétrico, entonces también se debe calcular el centroide plástico de la sección (X_p) y debe ser sustituido por $h/2$ en la ecuación anterior. La fórmula para el cálculo del centroide plástico de una sección rectangular con dos capas de acero es como se presenta seguidamente.

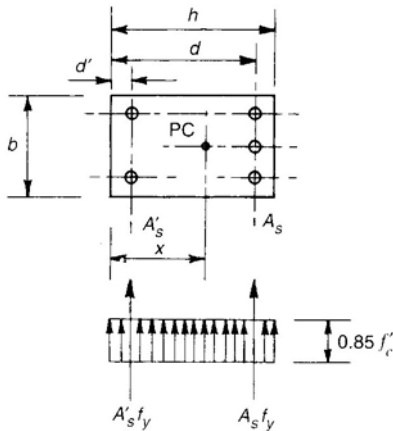


Figura 7. Columna rectangular con refuerzo asimétrico.

$$X_p = \frac{0,85 * f'_c * b * h^2 / 2 + A_s * f_y * d + A'_s * f'_s * d}{0,85 * f'_c * h * b + A_s * f_y + A'_s * f'_s}$$

El análisis y el diseño en flexo-compresión para columnas se realizan mediante la construcción de diagramas de interacción de carga axial y momento de flexión, para lo cual se utilizan las fórmulas planteadas anteriormente y se varía la profundidad del eje neutro (c) para obtener varios puntos (M , P). Las gráficas de

momento de flexión *versus* carga axial tiene la forma que se muestra en la siguiente figura, además tienen algunos puntos particulares que se explican a continuación.

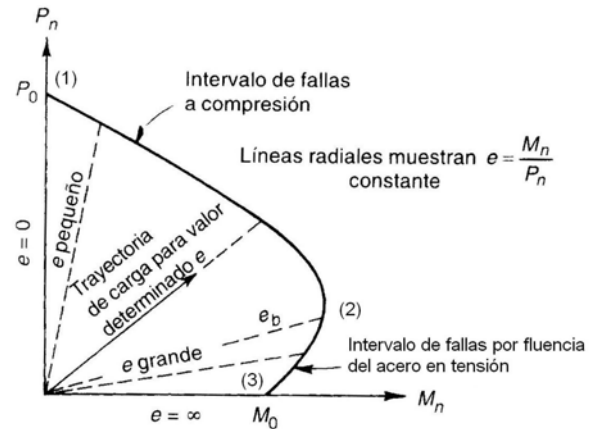


Figura 8. Forma general de diagramas de interacción M-P

Los puntos particulares de estas gráficas son:

1. Punto de carga axial pura ($0, P_0$), la cual se calcula con la fórmula dada en la sección de Compresión Pura
2. Falla balanceada, que se determina calculando la profundidad del eje neutro, con la cual el concreto alcanza su deformación última máxima, mientras que el acero extremo en tensión alcanza la primera fluencia (M_b, P_b).
3. Un punto de flexión pura ($M_0, 0$).
4. Punto de tensión pura ($0, -P$).

Para calcular la falla balanceada se utiliza la siguiente fórmula:

$$c_b = d \frac{e_{cu}}{e_{cu} + e_y}$$

Donde:

c_b = profundidad del eje neutro para que ocurra la falla balanceada.

e_y = la deformación en la primera fluencia del acero, obtenida como $e_y = f_y / E_s$.

Este valor de c_b es sustituido en las ecuaciones de P_n y M_n para flexo-compresión y se obtiene P_b y M_b . El punto cercano a la flexión pura se puede obtener por aproximaciones sucesivas o calculando la resistencia al momento

de la sección sin que actúe una carga axial. Y finalmente el punto en tensión pura se obtiene mediante la resistencia únicamente del acero, ya que se asume que el concreto no es capaz de resistir esfuerzos de tensión, lo que significa que:

$$P_n = -A_s * f_y$$

Las fórmulas presentadas anteriormente para el cálculo de la carga axial y el momento de flexión que puede resistir una sección, son valores nominales de resistencia, que pueden ser modificados por los factores de reducción de la resistencia para obtener las cargas últimas que puede soportar la sección. El CSCR-2002 establece los siguientes factores de reducción de la resistencia (ϕ) para el concreto reforzado:

- ❖ Secciones controladas por tensión $\phi = 0,90$.
- ❖ Tensión axial, $\phi = 0,90$.
- ❖ Secciones controladas por compresión:
 - Refuerzo transversal en espiral, $\phi = 0,70$
 - Refuerzo transversal con otros elementos, $\phi = 0,65$.
- ❖ Aplastamiento, $\phi = 0,65$

Adicionalmente, el código establece que para elementos en flexo-compresión, el factor de reducción de la resistencia puede variar según la deformación del acero extremo en tensión como se indica a continuación:

“Para secciones en las cuales la deformación unitaria neta de tracción en el acero extremo de tracción en condición de resistencia nominal (ϵ_t) está dentro de los límites definidos para secciones controladas por compresión y tracción, f_y/E_s y 0.005 respectivamente, se

permitirá que ϕ aumente linealmente del valor correspondiente a una sección controlada por compresión hasta 0.90, conforme ϵ_t aumente del valor correspondiente al límite de deformación unitaria de una sección controlada por compresión, f_y/E_s hasta 0.005,

donde E_s es el módulo de elasticidad del acero de refuerzo y podrá considerarse como $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ⁹.

Esto implica realizar una interpolación para calcular el valor del factor de reducción de la resistencia a partir de la deformación calculada

para el acero extremo en tensión, esta interpolación es:

$$0,65 \leq \phi = \frac{\epsilon_s - \epsilon_y}{0,005 - \epsilon_y} * (0,90 - 0,65) + 0,65 \leq 0,90$$

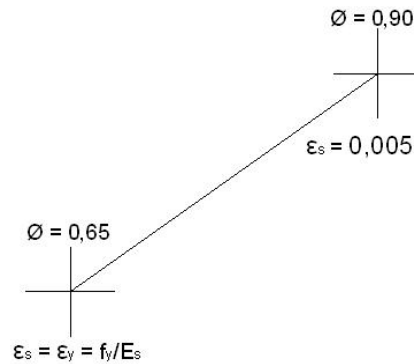


Figura 9: Interpolación para el cálculo de ϕ en elementos con refuerzo transversal en forma de aros.

Para el caso columnas con refuerzo transversal en aros.

ó

$$0,70 \leq \phi = \frac{\epsilon_s - \epsilon_y}{0,005 - \epsilon_y} * (0,90 - 0,70) + 0,70 \leq 0,90$$

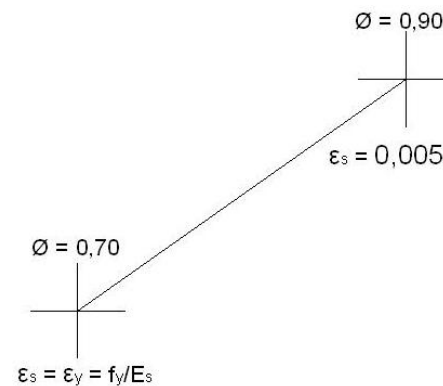


Figura 10: Interpolación para el cálculo de ϕ en elementos con refuerzo transversal en forma de espiral.

Para el caso de columnas con refuerzo transversal en espiral.

También se requiere determinar la capacidad probable en flexión de las columnas para su posterior análisis o diseño en cortante. Con este fin se calcula la carga axial probable (P_{pr}) y el momento de flexión probable (M_{pr}) que

⁹ CSCR-2002 Capítulo 8, Artículo 8.1.4.

puede ocurrir en la sección, para lo cual el código establece en el artículo 8.7.1.a. y 8.7.1.b. que el esfuerzo de fluencia del acero se debe suponer con un valor igual a $1,25 \cdot f_y$; además, en este caso no se deben aplicar los factores de reducción de la resistencia.

Luego de llevar a cabo este proceso, se pueden obtener gráficas para el diseño y análisis de columnas de concreto reforzado como la que se muestra a continuación.

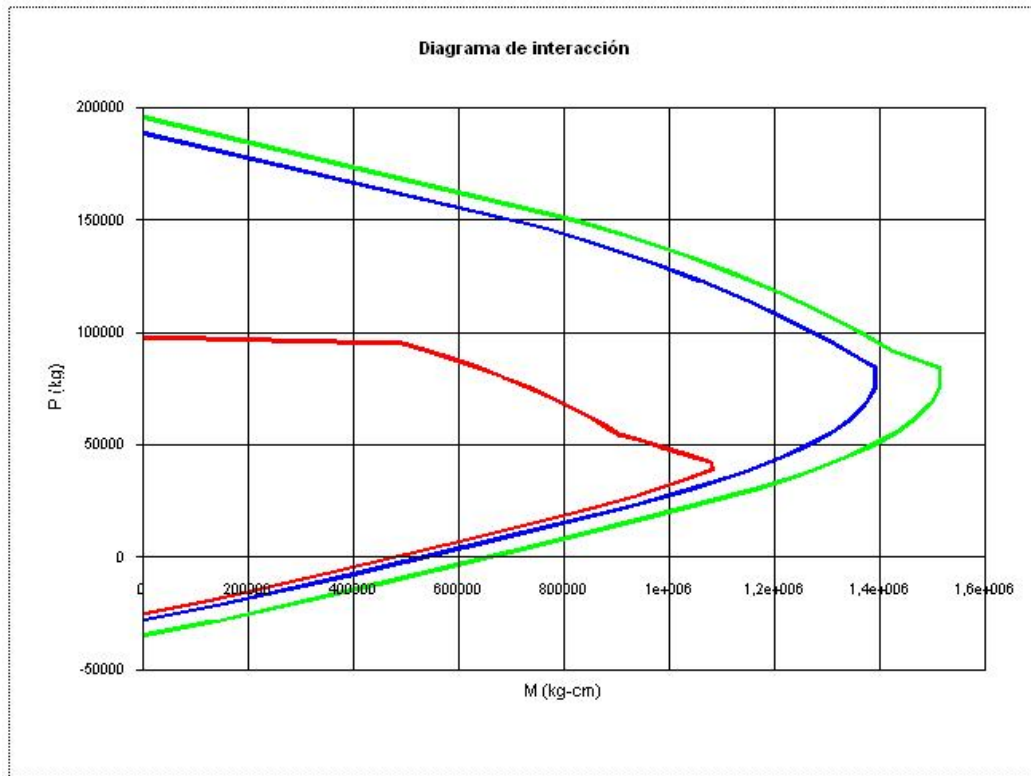


Figura 11. Diagrama de interacción con los valores de resistencia nominal, resistencia última y resistencia probable.

Que tiene la siguiente simbología

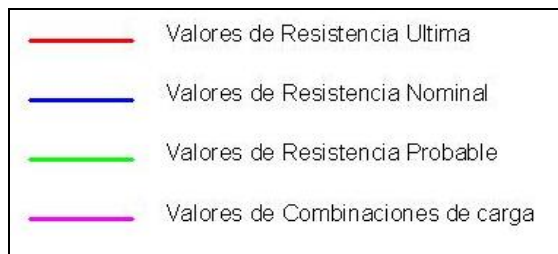


Figura 12. Simbología del diagrama de interacción.

Para llevar a cabo el análisis o diseño de un elemento en flexo-compresión, se requiere la evaluación simultánea de las cargas axiales y los momentos de flexión, por ello no se tiene un procedimiento directo de diseño para el cálculo del acero requerido por un determinado elemento para un conjunto de cargas dadas, como sí se puede obtener en el caso de diseño de vigas o el diseño por cortante de algún elemento. Se dispone de algunas herramientas de diseño para aproximar el área de acero requerida por un elemento, tales como los diagramas de interacción que brinda el ACI, pero estos se limitan a ciertos tipos de columnas con disposición de acero. El programa desarrollado tiene la capacidad de realizar los diagramas de interacción P-M de forma rápida y con una cantidad de información relativamente pequeña que debe ser introducida por el usuario, por lo que no se brindan ayudas adicionales para el diseño. En su lugar, el diseñador puede introducir las características de la columna y las cargas a las que se verá sometida y revisar rápidamente si la columna es adecuada o no. También el diseñador puede basar sus cálculos iniciales con las disposiciones del CSCR-2002 del artículo 8.3.3., que indica que la razón de refuerzo (ρ) para elementos en flexo-compresión no debe ser menor que 0,01 ni mayor que 0,06.

El código establece en el artículo 8.3., otros requisitos para elementos en flexo-compresión importantes como la capacidad a flexión y el confinamiento, que no se detallan en este trabajo, pero que son de suma importancia para el detallado final de una sección. Todos estos requisitos deben ser atendidos por el diseñador.

Columnas Esbeltas

Ya se ha indicado que se pueden tener dos tipos de columnas: las robustas, cuya descripción se realizó en el apartado anterior y las esbeltas que se describen a continuación.

A diferencia de las columnas robustas que son controladas por los materiales y la geometría de la sección, las columnas esbeltas son controladas por su propia geometría, específicamente por su relación de esbeltez, que

es básicamente la razón de su longitud (L_c) por su radio de giro (r).

El conocimiento actual permite el diseño un poco más complejo de columnas esbeltas, mediante poderosas herramientas computacionales de cálculo de estructuras, que además permiten obtener la respuesta de estas en el rango inelástico y obtener los momentos generados por el efecto P- Δ en elementos esbeltos, mediante un análisis de segundo orden. Estos cálculos complejos están fuera del alcance de este proyecto, pero en su lugar se utilizan técnicas¹⁰ para tomar en cuenta los efectos de esbeltez sobre las columnas, como son los métodos de amplificación de momentos.

Como una pequeña introducción en este tema, se explican seguidamente las características de una columna esbelta.

“Se dice que una columna es esbelta si las dimensiones de la sección transversal son pequeñas con respecto a su longitud. El grado de esbeltez de un elemento en general se mide mediante la relación L/r , donde L es la longitud del elemento y r es su radio de giro”¹¹.

Las columnas pueden estar sometidas simultáneamente a cargas axiales y momentos de flexión. Las acciones externas sobre los elementos pueden causar deflexión lateral en los extremos y desplazamientos laterales en las uniones, a lo que se le deben sumar los momentos de segundo orden causados por efectos de esbeltez. Para tomar en cuenta todas estas acciones en una columna esbelta, el ACI 318-02 establece el método de amplificación de momentos, que será el utilizado en este trabajo.

Los elementos con una relación de esbeltez grande fallan a cargas considerablemente menores que las correspondientes a la falla de un elemento robusto que tiene una resistencia a la compresión de $P_n = 0,85 * f_c * A_c + f_y * \Sigma A_{si}$, donde el acero y el concreto son sometidos a las máximas capacidades que pueden resistir. La falla en estos elementos con una relación de esbeltez alta se da por el pandeo del elemento, con el correspondiente sobreesfuerzo del acero y el concreto causado por los esfuerzos de flexión que se superponen con los esfuerzos de compresión.

¹⁰ Estas técnicas son permitidas por los códigos de diseño. Sin embargo, son métodos aproximados.

¹¹ Nilson, Arthur. Diseño de Estructuras de Concreto. 12ª Ed.

Compresión Pura

Para columnas esbeltas, la carga crítica de pandeo está dada por la ecuación de Euler, según la cual se puede obtener la carga crítica de pandeo con:

$$P_c = \frac{\pi^2 * E_t * I}{(kL)^2}$$

Donde:

P_c = carga crítica de la columna.

E_t = el módulo de elasticidad de el material, en este caso del concreto reforzado.

I = momento de inercia de la sección transversal de la columna.

k = factor para obtener la longitud real o efectiva de la columna.

L = longitud de la columna.

Una columna simplemente apoyada se pandeará en forma de media onda sinusoidal bajo una carga de magnitud P_c y con esta configuración pandeada actúan momentos de flexión adicionales $P*y$ y en cualquier sección de la columna, donde "y" es la deflexión lateral de la columna, producto del pandeo, tal como se muestra en la siguiente figura.

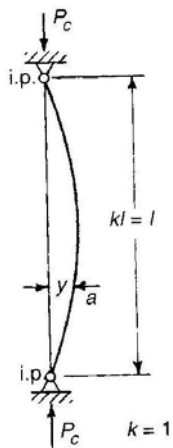


Figura 13. Esquema de una columna bajo carga crítica.

Con el pandeo de la columna, las deflexiones laterales aumentan hasta que el esfuerzo por flexión simultáneamente con el esfuerzo de compresión producen sobreesfuerzos y la falla de la columna.

Cuanto mayor sea la relación de esbeltez de la columna, menor será su carga de pandeo, tal como se puede observar en una gráfica de carga de pandeo en relación con la esbeltez.

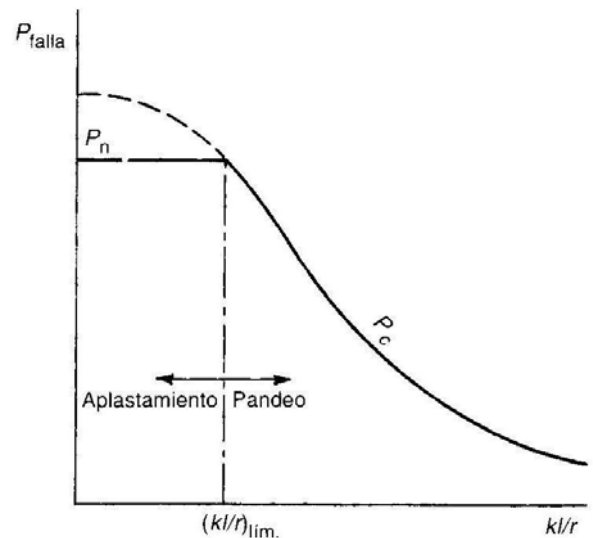


Figura 14. Grafica general de carga de pandeo contra relación de esbeltez.

El valor del factor para determinar la longitud efectiva de la columna (k) depende del grado de restricción en los extremos de la columna. Esto varía según el tipo de apoyo de la columna y según la posibilidad de que la columna pueda sufrir o no desplazamientos laterales. En general no se puede decir que una columna esté totalmente empotrada o que sus apoyos sean simples del todo. Eso depende de la rigidez de la columna y de la de los elementos que llegan a sus extremos, como las vigas o las fundaciones. De forma ilustrativa se muestran en esquemas varios tipos de apoyos típicos para las columnas con desplazamientos laterales y sin estos desplazamientos.

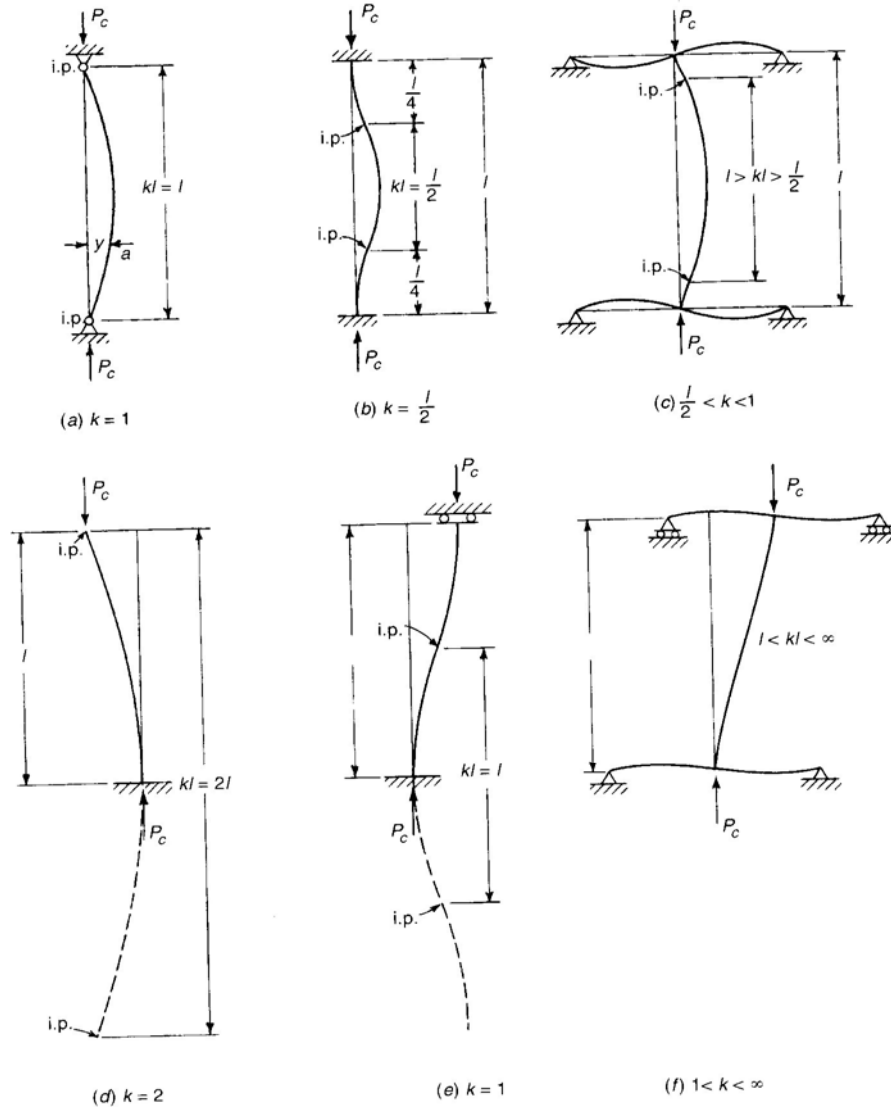


Figura 15. Esquemas de casos típicos de longitudes de pandeo en columnas.

Flexo-compresión

Ya se ha mencionado que los elementos de las estructuras de concreto por lo general están sometidos a momentos de flexión en sus extremos debido a la continuidad en las uniones de la estructura, por lo que en las columnas se tiene la acción simultánea de carga axial y momentos de flexión. En el caso de columnas esbeltas, en los momentos provocados por las cargas externas sobre la estructura, se deben sumar los momentos de flexión adicionales

generados por las deflexiones laterales que sufre la columna por el efecto $P-\Delta$ (momentos de segundo orden). Para hacer el análisis de este fenómeno un poco más claro, se divide el problema de igual forma, un análisis del elemento en flexión pura y luego por superposición se agrega el efecto de esbeltez.

Si la carga axial no estuviera presente en la columna, y solo actuaran momentos de flexión, esta se pandearía como indica la línea punteada de la Figura 15.a., donde “ y_o ” es la deflexión causada por la flexión simple.

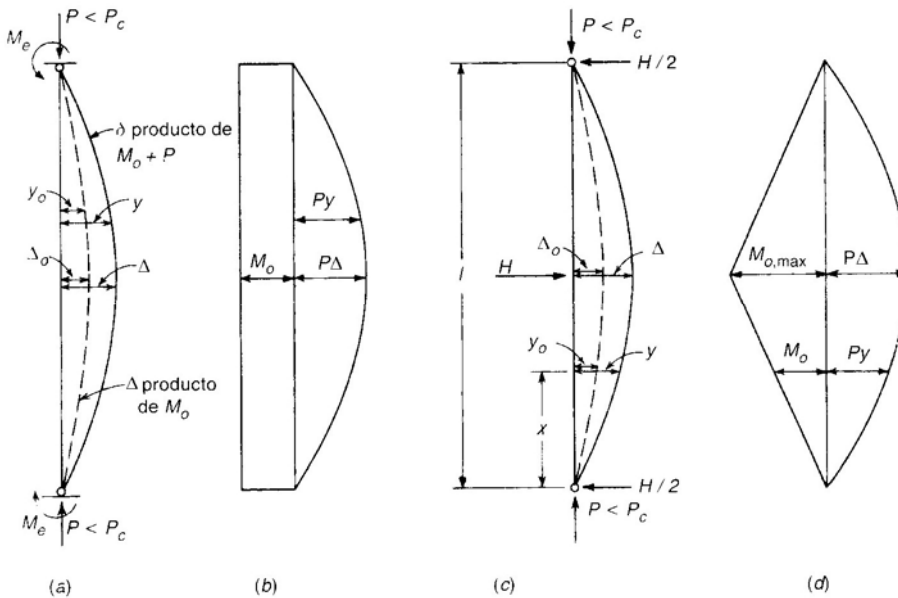


Figura 16. Efectos de esbeltez en una columna sometida a flexo-compresión.

Al aplicar una carga axial P , la magnitud del momento de flexión se incrementa en una cantidad $P*y$. Estos aumentos en la magnitud del momento de flexión causan deflexiones adicionales que a su vez incrementan la magnitud de los momentos es convergente y, por lo tanto, tiene un límite. Esto se conoce como el efecto $P-\Delta$, que se observa en la Figura 16. De esta forma la magnitud del momento de flexión en cualquier sección de la columna se obtiene como:

$$M = M_o + P * y$$

Donde:

M = magnitud del momento tomando en cuenta el efecto $P-\Delta$.

M_o = magnitud del momento inicial en la columna, producto de las cargas externas.

P = carga axial sobre la columna.

y = deflexión lateral en alguna sección de la columna.

Una situación similar ocurre cuando la flexión es producida por una carga lateral H , tal como se observa en la Figura 16.c. y 12.d.

La magnitud de las deflexiones “ y ” en la columna se puede obtener a partir de las

deflexiones “ y_o ” correspondientes a una viga sin carga axial, por medio de la expresión:

$$y = y_o / (1 - P / P_c)$$

Si Δ es la deflexión en el punto de máximo momento M_{max} , entonces

$$M_{max} = M_o + P\Delta = M_o + P\Delta_o \frac{1}{1 - P / P_c}$$

Que se puede formular como:

$$M_{max} = M_o \frac{1 + \psi * P / P_c}{1 - P / P_c}$$

Pero según los estudios, para la mayoría de los casos prácticos el valor de ψ es pequeño, por lo que el segundo término del numerador se puede despreciar y finalmente se obtiene que:

$$M_{max} = M_o \frac{1}{1 - P / P_c}$$

En la expresión anterior, el factor $1/(1-P/P_c)$ se conoce como el *factor de amplificación de momento* y refleja de forma adecuada la cantidad

en que se incrementa el momento M_o debido a una carga P , que actúa simultáneamente con M_o .

La magnitud de P_c disminuye cuando la relación de esbeltez kL/r es mayor, mientras que el momento se incrementa cuando crece kL/r .

Cuando se presentan momentos en los extremos de la columna que le producen una curvatura doble, no siempre se tiene el máximo momento producido por P actuando simultáneamente con el máximo momento inicial en la columna, como se muestra en la siguiente figura.

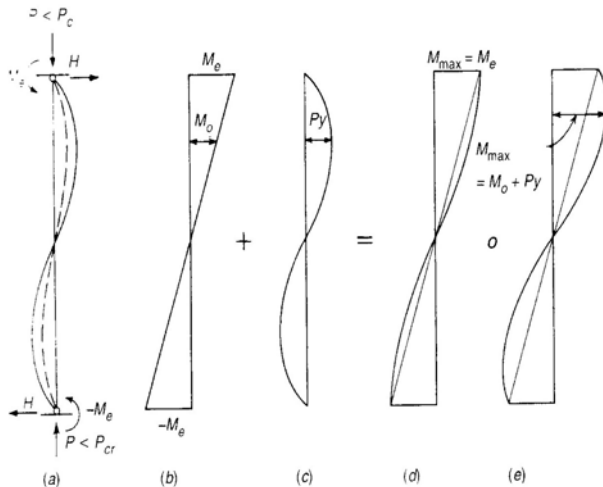


Figura 17. Momentos para elementos en flexo-compresión con curvatura doble.

Y en este caso las deflexiones bajo carga axial y flexión se obtienen con:

$$y = y_o / (1 - P / 4P_c)$$

Que es menor que en el caso de curvatura simple.

La localización del momento máximo depende del momento amplificado y pueden ocurrir dos situaciones:

1. El momento máximo actúa en el extremo, de modo que la carga axial no produce un incremento en el momento máximo.
2. El momento máximo actúa a cierta distancia del extremo de la columna y M_o es menor que M_e , por lo que el momento provocado por la carga axial genera un incremento en el momento máximo.

La amplificación de momentos depende de la magnitud relativa de los momentos de extremo y para el caso de columnas en marcos arriostrados contra desplazamientos laterales, la magnitud del momento máximo se obtiene como:

$$M_{\max} = M_o \frac{C_m}{1 - P/P_c}$$

El factor C_m es un factor para momento uniforme equivalente en la columna y se calculó como

$$C_m = 0,6 + 0,4 \frac{M1}{M2} \geq 0,4$$

Donde $M1$ es el momento de extremo menor y $M2$ es el momento de extremo mayor ($|M1| \leq |M2|$). Además, $M1/M2$ es mayor que cero si los momentos en los extremos producen una curvatura simple y $M1/M2$ es menor que cero si los momentos en los extremos producen una curvatura doble.

Para el caso de columnas que forman parte de marcos no arriostrados, el factor C_m tiene un valor de 1 (uno).

Criterios del ACI para tomar en cuenta los efectos de esbeltez

Un marco de un edificio no se puede considerar totalmente arriostrado o no. Sin embargo, es necesario determinar si el arriostramiento que pueden proveer los algunos elementos estructurales como los muros es suficiente para evitar desplazamientos laterales considerables.

Para ello, el arriostramiento proporcionado por los muros (el caso común en edificios) debe ser tal que la resistencia de las columnas de ese nivel no se vea afectada por los desplazamientos laterales. Para esto el ACI establece dos criterios que se indican a continuación.

- **Criterio 1:** una columna se considera como arriostrada si el momento de extremo por efectos de segundo orden ($P-\Delta$), no excede en más de 5% los momentos de primer orden.

- **Criterio 2:** se puede considerar un nivel (piso) como arriostrado contra desplazamientos laterales si el índice de estabilidad (Q) no excede el valor de 0,05.

El índice de estabilidad se puede obtener de un análisis elástico de las estructuras y se calcula como:

$$Q = \frac{\sum P_u * \Delta_o}{V_u * L_c}$$

Donde:

Q = índice de estabilidad.

$\sum P_u$ = carga axial mayorada total del piso analizado.

V_u = Cortante total que actúa en el piso analizado.

Δ_o = deflexión lateral relativa de primer orden entre la parte superior e inferior del piso, causada por V_u .

L_c = longitud del elemento en compresión, medida centro a centro entre los nudos del marco.

Además para cuantificar los efectos de esbeltez en las columnas, el ACI permite el uso del método de amplificación de momentos. Con este método se obtiene un factor de amplificación de momentos (δ). El ACI establece dos procedimientos para calcular este factor, uno para columnas en marcos arriostrados y otro para columnas en marcos no arriostrados.

Amplificación de momentos en marcos arriostrados

Una columna esbelta alcanza el límite de su resistencia cuando la combinación de las cargas P y M alcanzan los valores de P_n y M_n . La carga axial P se considera constante en toda la longitud de la columna, mientras que el momento M puede variar y se requiere determinar su valor máximo $M_{max} = M_o * (C_m / (1 - P/P_c))$.

La magnitud de P y M se pueden obtener mediante un análisis elástico de la estructura y luego el elemento que se requiere diseñar se calcula para esta carga axial P y para un momento amplificado según el procedimiento del ACI.

Para un marco arriostrado, la ecuación de amplificación de momentos es:

$$M_e = \delta_{ns} * M_2$$

Donde:

M_e = momento amplificado.

δ_{ns} = factor de amplificación del momento.

Y el factor de amplificación se obtiene como:

$$\delta_{ns} = \frac{C_m}{1 - P_u / 0,75P_c}$$

Para calcular la carga crítica de pandeo de la columna esta se obtienen como:

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kL_u)^2}$$

Donde L_u es la longitud no soportada de la columna que se mide del nivel de piso hasta la altura de cielo, o el nivel inferior de la viga que está en la parte superior de la columna de ese nivel. Esto se muestra esquemáticamente en la siguiente figura.

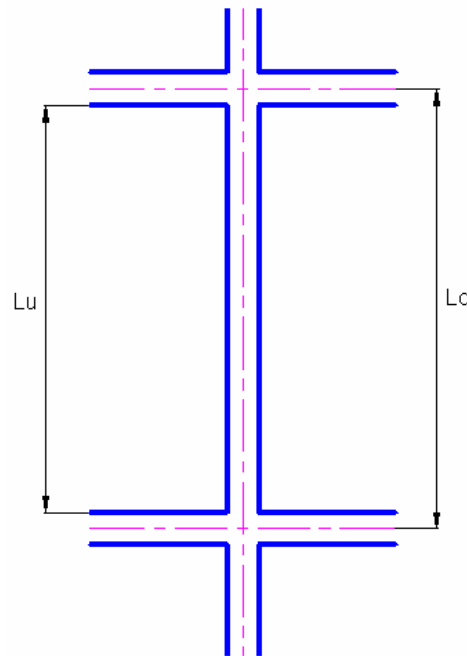


Figura 18. Longitud nominal de una columna L_c y longitud no soportada L_u .

Los demás términos de estas ecuaciones ya fueron definidos anteriormente.

Para calcular la rigidez del elemento EI, el ACI recomienda utilizar las siguientes fórmulas:

$$EI = \frac{0,2E_c * I_g + E_s * I_{se}}{1 + \beta_d}$$

O

$$EI = \frac{0,4E_c * I_g}{1 + \beta_d}$$

Donde:

E_c = módulo de elasticidad del concreto ($E_c = 15000\sqrt{f'_c}$, en kg/cm^2).

E_s = módulo de elasticidad del acero ($E_s = 2,1 \times 10^6$, en kg/cm^2).

I_g = momento de inercia de la sección bruta de concreto reforzado (en cm^4).

β_d = es un factor para tomar en cuenta los efectos del flujo plástico en la estructura y se calcula como: $\beta_d = P_{u_{cp}}/P_{u_{total}}$, donde $P_{u_{cp}}$ es la carga permanente última y $P_{u_{total}}$ es la carga total última.

El factor de longitud efectiva (k) para columnas en marcos arriostrados varía entre 0,5 y 1, mientras que en marcos no arriostrados este valor está entre 1 e infinito (∞). Los valores del factor de longitud efectiva dependen de la relación de rigidez entre la columna y los elementos en sus extremos como las vigas. Para obtener los valores de k se puede hacer uso de nomogramas o de fórmulas dadas por el ACI, las cuales se utilizaron en la elaboración del programa. A continuación se muestran.

Para marcos arriostrados

$$k = 0,7 + 0,05(\psi_A + \psi_B) \leq 1$$

$$k = 0,7 + 0,05\psi_{\min} \leq 1$$

Y se utiliza el menor valor de k.

Ψ es valor de la relación de la rigidez de la columna con respecto a la rigidez de sus soportes. En la figura siguiente se presenta con mayor claridad.

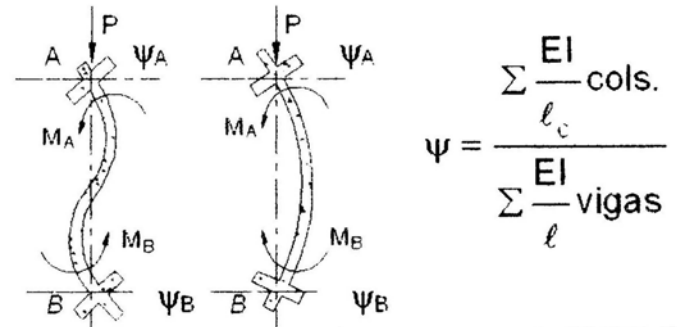


Figura 19. Relación de rigidez de la columna con respecto a sus soportes en un marco arriostrado.

Donde L_c es la longitud de la columna medida centro a centro entre los nudos y L es la longitud de la viga medida de la misma manera. E es el módulo de elasticidad del material e I es el momento de inercia de la columna o la viga.

Además, el CSCR-2002 establece que para elementos en flexo-compresión, el valor de "I" se puede como $1,0 * I_g$ de la columna, mientras que para elementos en flexión (vigas) "I" debe tomarse con el valor de $0,5 * I_g$.

Para determinar si se deben tomar los efectos de esbeltez en una columna de un marco arriostrado, el ACI establece que si

$$\frac{kLu}{r} \leq 34 - 12 \frac{M1}{M2}$$

los efectos de esbeltez pueden ser ignorados. De lo contrario, se deben efectuar el análisis y el diseño para un elemento esbelto.

A modo de resumen, los pasos para calcular diseñar una columna de un marco arriostrado son los siguientes:

1. Seleccionar las medidas tentativas de la columna a partir de un análisis elástico y suponiendo un comportamiento de columna robusta.
2. Determinar si el marco se puede considerar como arriostrado o no.
3. Determinar la longitud no soportada L_u de la columna.
4. Para la columna analizada, verificar si se debe revisar por efectos de esbeltez, utilizando inicialmente un valor de $k = 1$.
5. Si se deben considerar los efectos de esbeltez, se calcula k con los nomogramas o las ecuaciones y se

revisan nuevamente los criterios de esbeltez.

6. Calcular el factor para momento uniforme equivalente C_m .
7. Calcular β_d , EI y P_c .
8. Calcular el factor de amplificación de momento para marco no arriostrado δ_{ns} y el momento amplificado como $M_e = M_o * \delta_{ns}$.
9. Verificar que la columna sea adecuada para soportar la carga axial y el momento amplificado.

Amplificación de momentos en marcos no arriostrados

En este tipo de marcos, el factor de longitud efectiva está entre 1 e ∞ , aunque algunas veces se utiliza como límite el valor de 10.

Las columnas no arriostradas no están aisladas, sino que forman parte de un marco que interactúa como un conjunto. Los pisos y la cubierta por lo general son bastante rígidos en su propio plano. Si estos diafragmas se pueden considerar como rígidos, entonces todas las columnas de un mismo nivel estarán sometidas a desplazamientos laterales de igual magnitud en caso de que estos ocurran.

Para marcos no arriostrados, el ACI establece que las cargas deben ser divididas en dos categorías:

1. Cargas que no producen desplazamientos laterales considerables, como las cargas la mayoría de las cargas permanentes (CP) y cargas temporales (CT) de uso normal de la estructura.
2. Cargas que producen desplazamientos laterales considerables, como lo son las cargas de sismo (CS), cargas de viento (CW) y la presión de empuje de suelos o líquidos (CE), entre otras.

En la mayoría de los casos, los momentos amplificados por cargas gravitacionales y los de cargas laterales no ocurren en el mismo lugar o sección transversal de una columna, por lo que en estos casos no se amplifican los momentos debidos a las cargas gravitacionales, de modo

que las ecuaciones para la amplificación de momentos en marcos no arriostrados son:

$$M1 = M1_{ns} + \delta_s * M1_s$$

$$M2 = M2_{ns} + \delta_s * M2_s$$

Donde:

$M1$ y $M2$ son respectivamente el momento menor y el momento mayor, ambos mayorados, amplificados para el caso de marcos arriostrados. $M1_{ns}$ y $M2_{ns}$ son los momentos menor y mayor, mayorados, debidos a cargas que no producen desplazamientos laterales.

$M1_s$ y $M2_s$ son los momentos menor y mayor, mayorados, debidos a cargas que producen desplazamientos laterales.

δ_s es el factor de amplificación de momentos para marcos no arriostrados.

Y el momento amplificado se obtiene entonces como:

$$\delta_s M_s = \frac{1}{1 - \Sigma P_u / 0,75 \Sigma P_c}$$

Donde:

ΣP_u = suma de la carga axial total mayorada en todas las columnas del piso analizado.

ΣP_c = suma de las cargas críticas de cada una de las columnas del piso analizado.

El valor de δ_s calculado con ΣP_u y ΣP_c debe ser positivo y menor a 2,5 para combinaciones de carga que incluyan cargas que producen desplazamientos laterales.

En el caso de marcos no arriostrados contra desplazamiento lateral el factor β_d se calcula como la relación del cortante sostenido máximo mayorado y el cortante total mayorado, del piso analizado.

$$\beta_d = Vu_{cp,ce} / Vu_{total}$$

para tomar en cuenta los efectos del flujo plástico sobre la columna. Es importante indicar que $\beta_d = 0$, ya que en la mayoría de los casos las cargas laterales no son sostenidas.

Para el caso de las cargas gravitacionales en columnas que forma parte de marcos no arriostrados, β_d se calcula para todo el piso analizado como la relación de la carga axial

mayorada máxima sostenida y la carga axial total mayorada de ese piso, estos es:

$$\beta_d = P_{u_{cp}}/P_{u_{total}}$$

Un método alternativo y más sencillo que se puede utilizar para calcular los efectos de la esbeltez en marcos no arriostrados consiste en utilizar el índice de estabilidad (Q), que se indicó en el apartado "Criterios del ACI para tomar en cuenta los efectos de esbeltez", que establece que el momento amplificado es:

$$\delta_s = \frac{M_s}{1-Q}$$

$$\text{Y recordando, } Q = \frac{\sum P_u * \Delta_o}{V_u * L_c}$$

Los demás procedimientos por seguir para el diseño de columnas esbeltas en marcos no arriostrados es similar al descrito anteriormente para columnas en marcos arriostrados. Algunas de las diferencias adicionales que se presentan son:

El valor de C_m para el diseño de columnas en marcos no arriostrados es de uno ($C_m=1$), además, el factor de longitud efectiva se debe obtener mediante el nomograma correspondiente a columnas en marcos no arriostrados o mediante las fórmulas apropiadas para estas, que se indican a continuación:

Para $\psi_m < 2$

$$k = \frac{20 - \psi_m}{20} \sqrt{1 + \psi_m}$$

Y para $\psi_m \Rightarrow 2$

$$k = 0,9 \sqrt{1 + \psi_m}$$

Donde ψ_m es el promedio de los valores de ψ en los extremos del elemento ($\psi_m = (\psi_A + \psi_B)/2$)

Además, el límite para tomar en cuenta o no los efectos de esbeltez en este tipo de marcos es:

si $\frac{kLu}{r} \leq 22$, se pueden ignorar los efectos de esbeltez en la columna.

Se debe anotar que la ecuación:

$$M_2 = M_{2_{ns}} + \delta_s * M_{2_s}$$

Se basa en la suposición de que el momento máximo para columnas de marcos no arriostrados está ubicado en los extremos. Pero como en realidad el momento máximo puede ocurrir en cualquier punto a lo largo del elemento, el ACI establece que si la relación de esbeltez de la columna excede:

$$\frac{l_u}{r} > \frac{35}{\sqrt{\frac{P_u}{f'_c * A_g}}}$$

El momento máximo puede exceder el dado por la ecuación $M_2 = M_{2_{ns}} + \delta_s * M_{2_s}$. por lo que el ACI exige que si se presenta esta condición, las columnas se deben diseñar como columnas arriostradas con

$$M_e = \delta_{ns} * M_2$$

$$\delta_{ns} = \frac{C_m}{1 - P_u / 0,75 P_c}$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kL_u)^2}$$

Y con M_1 y M_2 calculadas como

$$M_1 = M_{1_{ns}} + \delta_s * M_{2_s}$$

$$M_2 = M_{2_{ns}} + \delta_s * M_{2_s}$$

Esto quiere decir que se deben amplificar tanto las cargas que producen desplazamientos laterales como las que no.

Cortante y refuerzo transversal en columnas

Aparte de proporcionar resistencia al cortante generado por las cargas gravitacionales y laterales, el refuerzo transversal en las columnas tiene como propósito brindar confinamiento al núcleo de concreto de la columna y evitar que el acero longitudinal falle por pandeo ante cargas axiales relativamente altas. Además, si el refuerzo transversal tiene una separación relativamente pequeña, la carga axial que la columna puede resistir se incrementa por la acción de confinamiento que este refuerzo brinda, aunque por lo general, este incremento en la

resistencia a carga axial no se toma en cuenta en el diseño.

El refuerzo transversal de las columnas se puede hacer mediante la colocación de aros individuales espaciados a cierta distancia, la cual debe ser calculada, o mediante la colocación de refuerzo helicoidal o en especial. Este último tipo se considera el más adecuado debido a que es continuo en toda la longitud de la columna y puede proveer un mejor confinamiento. Sin embargo, dependiendo de la geometría de la columna, puede ser difícil colocar refuerzo en espiral.

En el caso de que la estructura pueda estar sometida a cargas laterales o fuerzas sísmicas intensas, el refuerzo transversal en la columna adquiere un papel aún más importante, ya que además del confinamiento, debe ser capaz de brindar una ductilidad adecuada, para permitir la formación de rótulas plásticas en algunas zonas específicas de la estructura y así disipar energía durante el evento, lo que evitará el colapso general.

En estos casos, el diseño por cortante requiere que sea un diseño por capacidad de la estructura, donde se deben tomar en cuenta los detalles de refuerzo de los diferentes elementos estructurales (vigas y columnas), para determinar su capacidad probable en flexión y cortante.

Para que la estructura en general tenga un buen comportamiento durante sismos severos, se debe garantizar el desarrollo de roturas plásticas en las estructura. Estas ocurren primero en las vigas y por último en las columnas, con el fin de evitar mecanismos de colapso. Esto lleva al enfoque de diseño de columna fuerte – viga débil.

El CSCR-2002 establece que en las uniones de estructuras con elementos con ductilidad local óptima, la suma de las capacidades en flexión de las columnas debe ser mayor a 1,2 veces la suma de las capacidades en flexión de las vigas.

Además, los requisitos del código para la capacidad en cortante establecen para elementos en flexión que “la fuerza cortante de diseño no debe ser menor que V_u resultado del análisis de la estructura, ni la correspondiente a un elemento con rótulas plásticas en sus extremos que produce una condición de doble curvatura, V_e , que se calculará como

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{L - d} + V_{ug}$$

Donde:

M_{pr1}, M_{pr2} = capacidades probables en flexión, en los extremos del elemento, calculadas de manera que produzcan doble curvatura, considerando las dos direcciones de carga. Para el cálculo de estos valores, no se considera el factor de reducción en flexión y se supone que el esfuerzo de fluencia en el acero longitudinal es, por lo menos 1.25 f_y .

L = longitud entre caras de elemento en flexión, cm.

d = altura efectiva del elemento, cm.

V_{ug} = cortante a una distancia $d/2$ correspondiente a la carga gravitacional y de empuje de tierra o líquidos¹².

Para elementos en flexo-compresión el código establece que “la fuerza cortante de diseño no debe ser menor que V_u producto del análisis, ni menor que la correspondiente a un elemento con rótulas plásticas en sus extremos que producen una condición de doble curvatura, V_e , que se calculará como:

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{H}$$

Donde:

M_{pr1}, M_{pr2} = Capacidades probables en flexión, en los extremos superior e inferior de la columna, calculadas de manera que produzcan doble curvatura. Para este caso, no se considera el factor de reducción para flexo-compresión y se supone que el esfuerzo de fluencia en el acero longitudinal es, por lo menos, 1.25 f_y . La carga axial con la cual se calcula la capacidad probable en flexión puede tomarse, conservadoramente, como la carga axial máxima correspondiente a una combinación de carga que incluya sismo.

H = altura libre de la columna, cm.

Esquemáticamente esto se puede observar en al siguiente figura.

¹² CSCR 2002, artículos 8.7.1a. y 8.7.1.b.

$$V_c = \frac{(M_{pr})_{sup} + (M_{pr})_{inf}}{h_n}$$

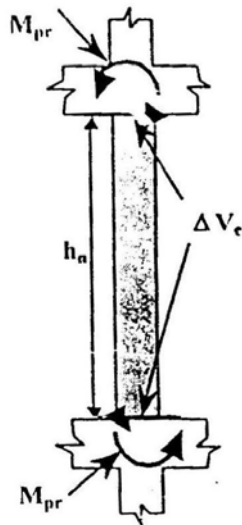


Figura 20. Esquema para el cálculo de la capacidad a cortante de una columna.

Este cortante esperado o probable V_e puede ser resistido por la acción del concreto y el acero o únicamente del acero. Si la fuerza cortante debida a sismo (V_e) representa más del 50% del cortante total de diseño, no se toma en cuenta la resistencia a cortante del concreto, a menos de que las fuerzas axiales en el elemento sean superiores a $0,05 \cdot A_g \cdot f'_c$, donde A_g es el área bruta de la sección. Por lo general, para el caso de las columnas se puede tomar en cuenta la resistencia al cortante del concreto, que se puede calcular como:

$$V_c = 0,53 \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$$

Donde V_c es en cortante del concreto. Mientras que el aporte del acero es:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yh} \cdot d}{s}$$

Donde:

s = separación entre los aros o paso de la espiral.
 A_v = área del refuerzo transversal. En el caso de la utilización de aros, se debe tener cuidado al usar el área de las ramas de refuerzo que pueden

ser cortadas y no únicamente el área correspondiente al diámetro de una varilla.

f_{yh} = resistencia a la fluencia del acero de refuerzo transversal.

d = altura efectiva del elemento.

V_s = fuerza cortante última que debe ser resistida por medio del refuerzo transversal.

Y por tanto el cortante total que puede resistir una sección es $V_u = \phi \cdot (V_c + V_s)$.

Donde ϕ es el factor de reducción de resistencia para cortante, cuyo valor es de 0,75.

Adicionalmente, se indica en el código que los aros necesarios para resistir estas fuerzas cortantes son aros de confinamiento, y mediante estos se trata de dar una mejor ductilidad a la estructura, por lo que se debe cumplir con las características que indican los artículos 8.2, 8.3 y 8.4, que no se repetirán en este trabajo, pero que el diseñador debe tener presente y cumplir para el buen desempeño de las estructuras.

Para calcular la separación entre los aros o el paso de la espiral, se puede utilizar la fórmula

$$s = \frac{A_v \cdot f_{yh} \cdot d}{V_s}$$

Diseño y Análisis de muros de concreto reforzado

Los muros estructurales, comúnmente conocidos como muros de cortante, son elementos muy adecuados para resistir cargas laterales en edificaciones, ya que limitan los desplazamientos provocados por estas fuerzas. Es común considerarlos como muros rectangulares, aun cuando sean continuos y su sección transversal pueda tener otra forma, principalmente porque es un poco más complejo calcular la capacidad en flexo-compresión de un muro debido a la gran cantidad de acero longitudinal que este puede tener y aun más si se considera el aporte de las alas en casos de muros en L, T ó I.

El programa desarrollado puede realizar de forma rápida los cálculos correspondientes a

muros tanto rectangulares como muros con otras formas indicadas antes. Sin embargo, los muros aquí considerados son continuos desde la base hasta la parte superior del edificio. No se considera la posibilidad de aberturas debido a buques de ventanas o puertas. En este trabajo, no se toman en cuenta los efectos de esbeltez en el muro.

En algún momento se consideró que los muros estructurales eran elementos frágiles, pero se ha visto que esta situación depende mucho de la realización de un buen detallado del muro. Se ha visto que un muro bien proporcionado y detallado puede evitar daños estructurales durante sismos moderados y puede alcanzar una ductilidad adecuada en sismos severos¹³.

Según la referencia "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures", los principios del comportamiento inelástico para marcos de concreto reforzado son también aplicables a los muros de concreto reforzado. Sin embargo, se plantea una serie de suposiciones o idealizaciones que se deben verificar en la práctica. Las suposiciones fundamentales más importantes para un procedimiento racional de diseño de muros estructurales son las siguientes:

1. Los muros estructurales poseen fundaciones adecuadas, que pueden transmitir las acciones de la superestructura hacia el suelo sin permitir que el muro se deslice.
2. La fundación de uno de varios muros estructurales interconectados no afecta su propia rigidez con respecto a los otros muros.
3. Las fuerzas inerciales de cada piso son introducidas a los muros por la acción de diafragma del sistema de piso y por medio de conexiones adecuadas en el diafragma. En términos de fuerza en el propio plano, se supone que los sistemas de piso permanecen en el rango elástico todo el tiempo.
4. La totalidad de las fuerzas laterales es resistida por los muros, aunque se puede considerar la interacción del marco y los muros.

Los muros estructurales, de forma similar que las columnas, están sujetos a cargas axiales, momentos de flexión y fuerzas cortantes, los procedimientos para su diseño y análisis también son similares a los utilizados en columnas. No obstante, los códigos de diseño establecen ciertos requisitos un poco diferentes para el detallado de estos elementos, los cuales se indican más adelante.

En la siguiente figura se muestran las fuerzas que pueden actuar en un muro estructural.

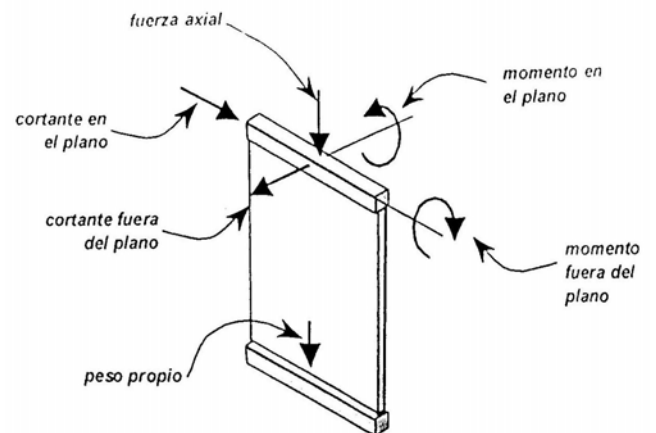


Figura 21. Acciones externas sobre un muro.

Flexo-compresión en muros estructurales

Un muro estructural alto en voladizo tiene un comportamiento similar al de una viga en voladizo, tal como se muestra en al siguiente figura.

¹³ Pauly, T. Priestley, M.J.N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

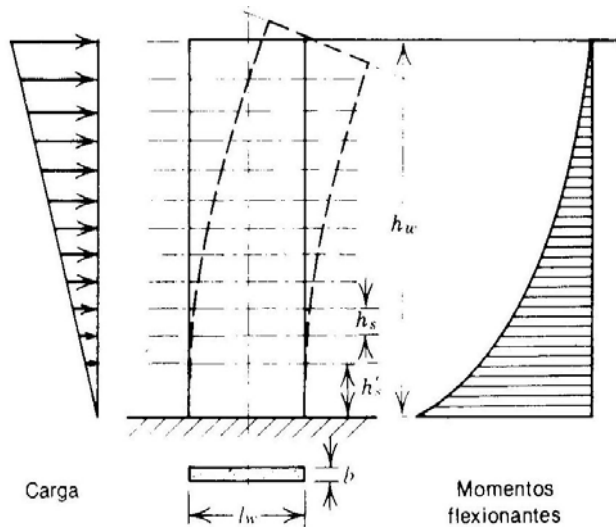


Figura 22. Muro de cortante en voladizo.

Como se mencionó anteriormente, los muros pueden ser rectangulares: en L, en T o en I. Para el análisis tanto en flexo-compresión como en cortante, es válido tomar el aporte de resistencia de las alas ante las cargas externas, pero el ancho efectivo (b_{ef}) de las alas que puede aportar resistencia debe ser calculada. La referencia "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Structures", recomienda usar un valor de:

$$b_{ef} = b_w + 0.3 h_w \leq b$$

Donde:

b_{ef} = ancho efectivo del ala.

b_w = ancho del alma del muro

h_w = altura del muro

Estos términos se muestran gráficamente en la siguiente figura.

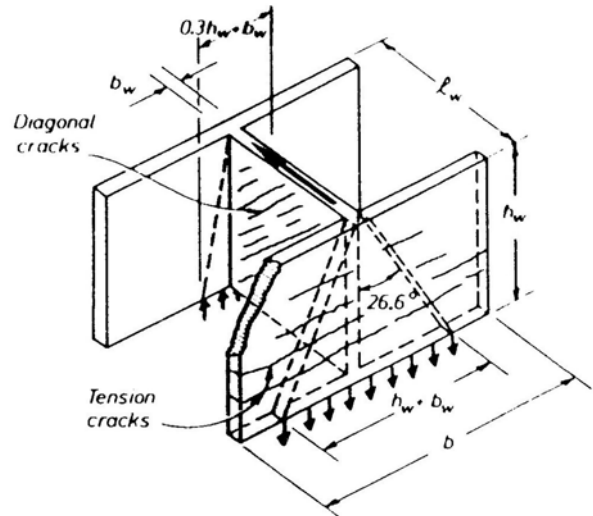


Figura 23. Ancho efectivo del ala de un muro.

Adicionalmente a los momentos de flexión se debe considerar la carga axial sobre el muro, de modo que se va a obtener un comportamiento en flexo-compresión que, según la teoría, puede ser analizado de forma similar que las columnas de concreto reforzado en flexo-compresión.

El Código Sísmico de Costa Rica 2002 establece en el artículo 8.6.2 que los muros donde $M/Vl_w \geq 2$ pueden ser diseñados con los conceptos de diseño de elementos en flexión o flexo-compresión según sea el caso. Donde M es el momento, V es la fuerza cortante y l_w es la longitud o segmento de muro considerado en la dirección de la fuerza cortante. Además el código establece que la razón mínima de refuerzo longitudinal debe ser de $\rho_{vmin} = 0,0025$. El espaciamiento de este refuerzo no puede exceder de 45 cm y se debe colocar doble malla de refuerzo en cualquier muro en el que la fuerza cortante factorizada exceda $0.50 A_{cv} \sqrt{f'_c}$ o en el que el espesor iguale o exceda 20 cm.

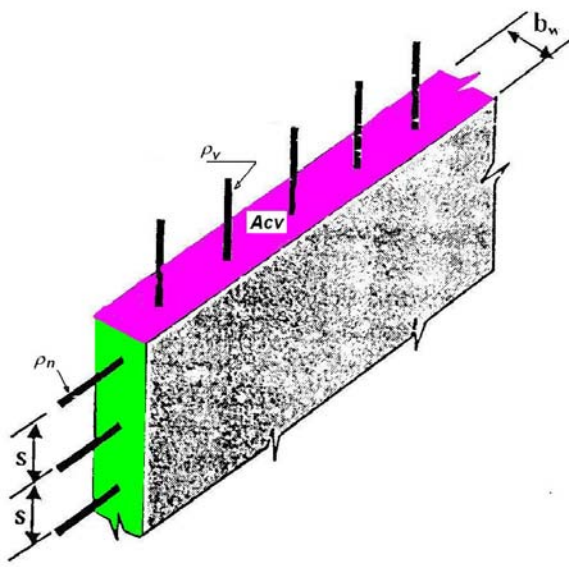


Figura 24. Esquema para mostrar A_{cv} , p_v y p_n .

Otros requisitos importantes en los muros estructurales de concreto reforzado son los elementos de borde. El CSCR-2002 en su artículo 8.6.5 indica cuándo se deben proporcionar elementos de borde en los muros y presenta los requisitos de su detallado. Aquí se reproducen los incisos c, e, f, g, h, i, j de dicho artículo, ya que se consideran de gran importancia para el detallado en flexo-compresión de un muro. Estos indican las cargas para las cuales deben diseñarse los elementos de borde, cuando deben construirse elementos de borde y extenderse dentro de la sección.

Inciso c) Los elementos de borde de muros estructurales de concreto... deben diseñarse para resistir todas las cargas verticales, incluyendo cargas tributarias y peso propio, así como las cargas verticales necesarias para resistir el momento de volteo debido al sismo.

Inciso e) La necesidad de utilizar elementos de borde debe ser evaluada según los incisos 8.6.5 (f), 8.6.5 (g) y 8.6.5 (h) ó 8.6.5 (i).

Inciso f) Esta sección se aplica a muros que son continuos desde su base hasta su parte superior y que son diseñados para tener únicamente una sección crítica para flexión y carga axial. Los muros que no satisfagan estos requisitos deben diseñarse según el inciso 8.6.5 (i).

Inciso g) Las zonas de compresión deben ser reforzadas con elementos de borde cuando:

$$c \geq \frac{l_w}{600(\delta_u / h_w)}$$

Donde:

l_w = longitud del muro o del segmento de muro considerado en la dirección de la fuerza cortante, cm.

δ_w = desplazamiento de diseño, cm.

h_w = altura del muro o del segmento de muro considerado, cm.

c = distancia de la fibra extrema en compresión al eje neutro, calculada para la carga axial factorizada y el momento nominal, consistentes con el desplazamiento de diseño, δ_u , lo que da como resultado mayor profundidad del eje neutro, cm.

Además, δ_w / h_w debe ser mayor o igual a 0.007.

Inciso h) En donde se requieran elementos de borde, requeridos según 8.6.5 (f) y 8.6.5 (g), su refuerzo deberá ser extendido verticalmente desde la sección crítica una distancia no menor que el mayor de l_w o $M_u / (4 V_u)$.

Inciso i) Los muros estructurales que no sean diseñados según los incisos 8.6.5(f), 8.6.5(g) y 8.6.5(h), deberán tener elementos de borde en sus extremos y en sus aberturas cuando el esfuerzo a compresión máximo en la fibra extrema correspondiente a las cargas factorizadas, incluyendo el efecto de sismo, exceda $0.20 f'_c$. Estos elementos podrán discontinuarse en el nivel en que los esfuerzos de compresión sean inferiores a $0.15 f'_c$. Los esfuerzos deben calcularse para las cargas factorizadas utilizando un modelo linealmente elástico y las propiedades de la sección bruta. Para muros con alas, el ancho efectivo se puede tomar como la distancia desde la cara del alma hasta el menor de los siguientes valores: la mitad de la distancia hasta la siguiente alma de muro o el 25% de la altura total del muro.

Inciso j) Cuando se requieran elementos de borde, se deben satisfacer los siguientes requisitos:

- i) El elemento de borde debe extenderse horizontalmente desde la fibra extrema en compresión hasta una distancia no menor que el mayor valor de $c - 0.1 l_w$ y $c / 2$.
- ii) En secciones "T" de muros el elemento de borde debe incluir el ancho efectivo del ala en compresión y extenderse al menos 30 cm dentro del alma.
- iii) El refuerzo transversal de los elementos de borde deberá cumplir con los requisitos de los incisos 8.2.6(b), y 8.2.6(c) ó 8.2.6(d), excepto que no se requiere satisfacer la Ec. [8-3].
- iv) El refuerzo transversal de los elementos de borde en la base del muro deberá extenderse hasta su base de soporte como mínimo la longitud de desarrollo de la barra longitudinal de mayor diámetro, a menos que el elemento de borde termine en un cimiento o losa de cimentación, en cuyo

caso el elemento de borde deberá extenderse 30 cm.

v) El refuerzo horizontal en el alma del muro debe ser anclado para desarrollar f_y dentro del núcleo confinado del elemento de borde.

Cortante en muros estructurales

El análisis y diseño por cortante de muros estructurales de concreto reforzado es un tanto diferente al análisis y diseño por cortante de columnas, ya que aquí no se estima una capacidad probable del muro, sino que el muro es diseñado para tomar toda la fuerza cortante debida a sismo que actúa sobre él. Esta fuerza de cortante sobre el muro se obtiene al distribuir la fuerza cortante total de un nivel a cada uno de los muros en ese nivel. Dicha distribución se hace tomando en cuenta la rigidez relativa de cada muro según la dirección o direcciones donde podría actuar el sismo. Los siguientes esquemas muestran como actúa el cortante en los muros.

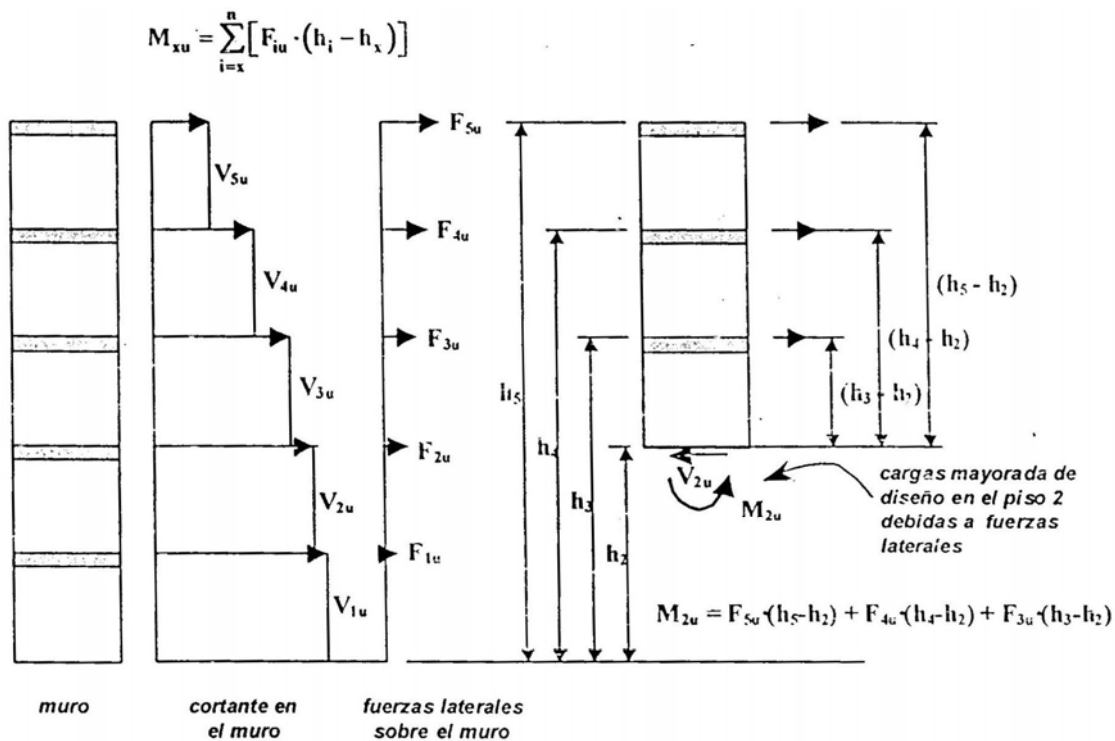


Figura 25. Distribución de fuerzas cortantes y momentos de flexión en los diferentes niveles de un muro.

El comportamiento en cortante de muros estructurales de concreto reforzado puede ser complejo. Sin embargo, los códigos de diseño proporcionan procedimientos simples para el diseño. El CSCR-2002 indica en el artículo 8.6.3, que los muros estructurales, donde $M/Vl_w < 2$, el refuerzo longitudinal se definirá conforme a los requisitos de cortante.

Estos requisitos para muros de concreto reforzado se indican en el artículo 8.7.2 y establecen que la capacidad en cortante V_n se debe calcular como:

$$V_n = A_{cv} (\alpha_c \sqrt{f'_c} + \rho_n f_y)$$

Donde:

$$\alpha_c = 0.75 \text{ para } h_w/l_w \leq 1.5.$$

$$\alpha_c = 0.50 \text{ para } h_w/l_w \geq 2.0.$$

α_c = varía linealmente de 0.75 a 0.50 para h_w/l_w entre 1.5 y 2.

h_w = altura del muro o del segmento de muro considerado, cm.

l_w = longitud del muro o del segmento de muro considerado en la dirección de la fuerza cortante, cm.

A_{cv} = área neta de la sección de concreto que resiste cortante, producto del espesor del alma multiplicado por la longitud l_w de la sección.

ρ_n = razón del área de refuerzo distribuido paralelo al plano de A_{cv} , respecto del área bruta de concreto perpendicular a dicho refuerzo.

f'_c = resistencia en compresión del concreto en kg/cm^2 .

f_y = esfuerzo de fluencia del acero perpendicular al área A_{cv} , en kg/cm^2 .

Para el caso de cortante en muros estructurales el factor de reducción de la resistencia es de 0,60 ($\phi = 0,60$)

Asimismo, el artículo establece que el valor de la razón h_w/l_w usado para determinar V_n para segmentos de muro, debe ser la mayor de las razones para el muro entero (desde la base hasta la parte superior) y el segmento de muro considerado. En el inciso c), se indica que los muros deben tener refuerzo por cortante distribuido en las dos direcciones ortogonales de su plano, y si la razón h_w/l_w es menor o igual a 2.0, la razón de refuerzo ρ_v que indica la cantidad de refuerzo en el eje longitudinal deberá ser igual o mayor que ρ_n , donde ρ_v = razón del área de refuerzo distribuido perpendicularmente al plano de A_{cv} , respecto del área bruta de concreto A_{cv} .

También el código establece un límite superior a la capacidad en cortante de muros estructurales. Esta capacidad no puede exceder el valor de $2.5 A_{cv} \sqrt{f'_c}$, (f'_c en kg/cm^2). En el caso de la resistencia nominal a cortante de segmentos verticales de muro que comparten una fuerza lateral común, esta debe ser menor o igual a $2 A_{cv} \sqrt{f'_c}$, donde A_{cv} es la sección transversal total. La resistencia nominal a cortante individual de los segmentos verticales no debe exceder $2.5 A_{cp} \sqrt{f'_c}$, donde A_{cp} es la sección transversal del segmento considerado.

Resultados

El resultado final de este trabajo es un programa de cómputo para el análisis y diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado, útil para realizar cálculos para una amplia variedad de estos elementos, ya que permite el análisis y diseño de columnas rectangulares, circulares y con otras formas poligonales, además de muros rectangulares, muros en “L”, en “T” y en “I”.

Este programa ha sido denominado por el autor como “DCR”, iniciales de “Diseño de Concreto Reforzado”. Este presenta al usuario una interfaz simple y agradable para el trabajo, además, ofrece una forma bastante sencilla para que el usuario ingrese los datos que requiere el programa. En general, la cantidad de datos que se deben introducir al programa es pequeña, pero los resultados brindados son de gran utilidad para el diseño o análisis de estructuras, especialmente en cuanto a su detallado.

Esta herramienta para el cálculo de columnas y muros incluye varios menús. Primero se puede seleccionar el tipo de elemento que se quiere analizar o diseñar, ya sea una columna o un muro. Luego se ofrecen varios módulos, según se desee analizar o diseñar por flexo-compresión o cortante. Además, incluye una sección para el cálculo de los efectos de esbeltez sobre las columnas, para lo cual se utiliza el método de la amplificación de momentos dado por el ACI.

El programa es especialmente útil para el análisis y diseño por flexo-compresión de columnas y muros, ya que con una poca cantidad de información que debe brindar el usuario, es posible obtener en pocos segundos los diagramas de interacción de las columnas o muros y de una forma sencilla se pueden revisar

las cargas a las que estará sometido el elemento para determinar si pueden ser soportadas por él. Además, el usuario puede hacer los ajustes necesarios en las dimensiones de la sección o en la cantidad y disposición del refuerzo, de una forma rápida, para ajustar la sección a los requerimientos debidos a las cargas.

Se ha dispuesto la opción para imprimir tanto la información introducida por el usuario como la de los resultados mostrados por el programa, con el fin de que el usuario, en este caso estudiantes o diseñadores, pueda usarla como parte de las memorias de cálculo de sus proyectos.

Es importante anotar que las unidades de medida básicas que se deben utilizar en este programa son: el kilogramo, como unidad de masa y los centímetros (cm.) como unidad de longitud, como unidad de fuerza se adoptó el kilogramo fuerza (kg_f., algunas veces denominado simplemente como kilogramo, kg.) por lo que las demás unidades derivadas que se deben utilizar deben estar en términos de kg. y cm. Como ejemplo, se pueden anotar las unidades para los esfuerzos como kg/cm², o para los momentos de flexión kg-cm.

Para instalar el programa se requiere contar con alguna versión de Windows superior a Windows 98, además de una resolución mínima del monitor de 1024 x 768 píxeles.

La información completa de ayuda se muestra en los apéndices. En esos apéndices se explican las diferentes funciones y posibilidades que tiene el usuario de “DCR”, así como la forma correcta de introducir la información y los resultados o datos que brinda el programa.



Figura 26. Ventana de inicio del programa "DCR".

Análisis de Resultados

Como se indicó en el apartado anterior, el resultado más importante de este trabajo es el programa creado. Se introdujeron datos de diversas fuentes, con el fin de verificar los cálculos hechos por el programa y los resultados finales que este muestra al usuario. Cada una de sus partes fue revisada, para lo cual se utilizaron datos que provienen de problemas resueltos en el curso de Estructuras de Concreto, y de diversos libros de texto consultados, así como de otros datos obtenidos anteriormente por el autor de este trabajo en el proyecto del curso de Taller de Diseño (proyecto relacionado con el análisis estructural y el diseño de estructuras de concreto, y disponible en la Escuela de Ingeniería en Construcción).

En el apartado de Apéndices se muestran algunos ejemplos realizados MS-Excel ó ejemplos elaborados manualmente, con el fin de comparar estos resultados con los obtenidos mediante el programa diseñado.

Una vez verificados estos datos se comenzaron a ensamblar las diferentes partes para finalmente obtener el programa que aquí se presenta.

El programa realizado es una obra propia del autor y se basa únicamente en la teoría general de diseño de estructuras de concreto. Brinda importante ayuda a los usuarios, sean estos estudiantes o diseñadores profesionales, para el cálculo de columnas y muros estructurales, especialmente en los cálculos por solicitaciones en flexo-compresión sobre estos elementos. Pero el programa no se limita solo al análisis y diseño en flexo-compresión, sino que incluye módulos para el cálculo en cortante. Además, el usuario

puede realizar la revisión por efectos de esbeltez en el caso de las columnas.

Este programa está adaptado a las necesidades del medio nacional, ya los resultados cumplen con los requisitos del Código Sísmico de Costa Rica 2002, como factores de reducción de resistencia y las combinaciones de carga que establece este código.

Por lo descrito anteriormente, se puede considerar como una herramienta bastante completa para el medio nacional. No obstante, presenta algunas limitaciones, como las que se detallan a continuación.

El sistema de unidades que se puede utilizar corresponde únicamente al kilogramo fuerza (o simplemente kilogramo kg) como unidad de fuerza y al centímetro como unidad de longitud, así por ejemplo las unidades por utilizar para la resistencia de los materiales deben ser kg/cm^2 . De igual manera, los resultados presentados por el programa se encuentran en estas mismas unidades, por ejemplo, la magnitud de los momentos de flexión son kg-cm.

Otra limitación del programa creado es su utilidad para el diseño en flexo-compresión uniaxial de los elementos y está fuera del alcance de este proyecto la flexión biaxial. Además, se supone que los elementos por analizar o diseñar son prismas rectos. Esto significa que la sección transversal del elemento se mantiene constante en toda su altura.

A pesar de estas limitaciones, el proyecto se considera una buena herramienta de cálculo para los elementos planteados inicialmente en los objetivos.

Conclusiones y Recomendaciones

Con el desarrollo de este proyecto se logró cumplir con los objetivos planteados en un principio. El resultado más importante fue el programa cómputo desarrollado, el cual constituye una herramienta bastante eficiente para el cálculo estructural de columnas y muros estructurales de concreto reforzado.

A continuación se muestra una lista con los diferentes resultados que se lograron con la elaboración de este proyecto, además se indican algunas recomendaciones.

- ❖ Este trabajo proporciona una breve guía con bases teóricas para el diseño estructural de columnas y muros estructurales de concreto reforzado para las solicitaciones de carga axial, flexo-compresión y cortante a las que estos elementos según el estado actual del conocimiento en esta materia y cumpliendo los requisitos que establece el CSCR-2002 en esta materia.
- ❖ Se ha creado una herramienta de cómputo actualizada, en lenguaje de Visual Basic 6.0., que facilita el análisis y diseño de columnas y muros estructurales de concreto reforzado.
- ❖ La herramienta creada tiene la capacidad de analizar o diseñar columnas de concreto con secciones transversales rectangulares, circulares y otras secciones poligonales que pueden ser definidas con gran precisión por el usuario, además de muros estructurales rectangulares, en “L”, en “T” y en “I”.
- ❖ Se han adaptado a estas herramientas las últimas disposiciones del Código Sísmico de Costa Rica 2002 para el diseño sismorresistente de elementos de concreto reforzado, esto para cada tipo de elemento y para las diferentes solicitaciones que este

puede tener como las mencionadas anteriormente.

- ❖ El programa de cómputo que se ha diseñado es una herramienta de fácil uso y trata de presentar una interfaz agradable.
- ❖ Se recomienda a los usuarios de este programa leer primeramente la ayuda brindada para el correcto uso del programa, así como conocer sus alcances y limitaciones.
- ❖ Es recomendable que los usuarios del programa tengan siempre en cuenta las disposiciones especiales que establecen los códigos de diseño para el buen detallado de las estructuras y no olvidar que los programas de cómputo para el análisis y diseño de estructuras o elementos estructurales, como el que aquí se desarrolló, son herramientas que facilitan el diseño pero no sustituyen los buenos criterios que debe tener el ingeniero diseñador. Por lo tanto, ante todo se debe seguir la buena práctica de la Ingeniería y poner especial cuidado a la hora de detallar los planos de construcción estructuras.

El autor pondrá a disposición de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica una versión demostrativa del programa desarrollado, para que pueda ser utilizada por los estudiantes de dicha escuela en los proyectos de algunos de los cursos que aquí se imparten.

Se recuerda a los estudiantes del curso de Estructuras de Concreto y en general de todos los cursos, considerar los principios básicos en los cuales se fundamentan los procedimientos para el cálculo de las estructuras y de los elementos estructurales, y no utilizar “ciegamente” las herramientas de cálculo.

Apéndices

En este apartado se muestran parte de los resultados y del análisis de resultados, que debido se requiere mostrar las pantallas del programa desarrollado, no se incluyeron en dichas secciones. Estos apéndices son:

- El “Manual de Usuario”, que muestra como se debe utilizar el programa DCR V.1.0., así como alguna limitaciones del software.
- Ejemplos comparativos, donde se muestran algunos ejemplo realizados manualmente o con MS-Excel, y seguidamente de cada uno de estos ejemplos se muestran las pantallas con los resultados obtenidos con el programa desarrollado.

Manual de Usuario

A continuación se muestra el material de ayuda que se le brinda al usuario, para que pueda utilizar correctamente el programa “DCR”, creado por el autor. Aquí se anotan los requerimientos mínimos del sistema donde se va a instalar el programa. También se muestran las opciones de análisis y diseño que ofrece “DCR” al usuario y los pasos que debe seguir para el uso de esta herramienta de cálculo. Se indican los datos que requiere el programa según la función que se esté usando, y la forma como se deben introducir los datos en el programa para cada opción. Se describen los resultados que brinda el programa y algunas de sus limitaciones.

Requisitos generales del sistema

Para instalar el programa, se requiere contar con alguna versión de Windows superior a Windows 98. Debe tener al menos 32 MB de memoria RAM. Además, se requiere de una resolución mínima del monitor de 1024 x 768 píxeles. Es importante señalar que para un óptimo funcionamiento del programa, se requiere que la configuración regional de Windows sea “Ingles (Estados Unidos)”, o simplemente, que la separación decimal sea el punto (.), esto con el fin de evitar errores al leer los datos introducidos, o al abrir un archivo con datos existentes. Para verificar que la separación decimal sea el punto, el usuario debe dirigirse al Panel de Control de Windows, Seleccionar Configuración Regional y de Idioma, en la pantalla Opciones Regionales seleccionar sea “Ingles (Estados Unidos)”, o hacer clic en el botón “Personalizar” y seleccionar la opción de punto (.), para el símbolo decimal.

Pantalla inicial

Cuando el programa es iniciado, la primera pantalla muestra información general del programa como nombre y datos del autor. Esta pantalla inicial dura unos cuantos segundos y se descarga automáticamente, para mostrar seguidamente el menú principal del programa. Esta pantalla inicial se muestra en la siguiente figura.



Figura 27. Pantalla inicial mostrada al cargar el programa.

Menú principal y ventana inicial

Una vez que se descarga la pantalla inicial, se muestra entonces la ventana principal de la aplicación, en esta se encuentra el menú principal y una barra de herramientas que permite seleccionar de forma rápida el cálculo que se desea realizar. Además esta ventana principal presenta una ventana secundaria con el título "Tipo de Proyecto", donde el usuario selecciona el tipo de proyecto que desea realizar, ya sea este el diseño o análisis de muros o de columnas.

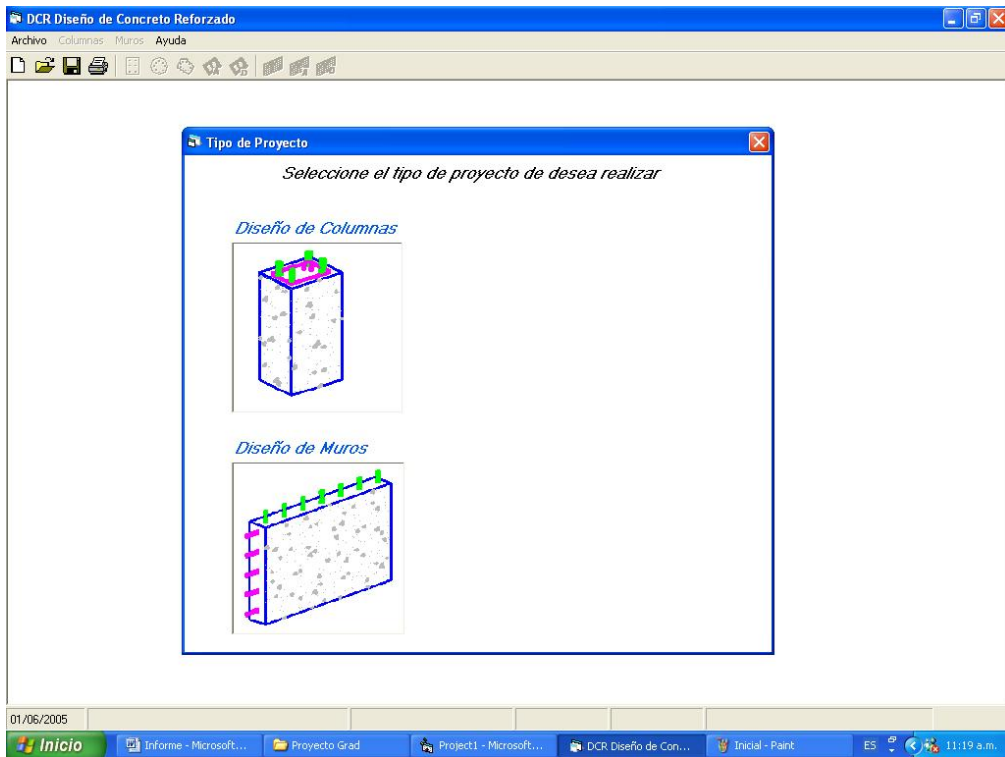


Figura 28. Ventana principal del programa y ventana secundaria de selección del tipo de proyecto.

Inicialmente, cuando la aplicación se carga, solo están disponibles en el menú principal las opciones de “Archivo” y “Ayuda”, aunque también existen las opciones de “Columnas” y “Muros”. Éstas estarán disponibles hasta que se haya seleccionado un tipo de proyecto. De forma similar, en la barra de herramientas solo están disponibles los botones de “Nuevo”, “Abrir”, “Guarda” e “Imprimir”. Los demás botones estarán disponibles hasta que se haya seleccionado un tipo de proyecto. Sin embargo no todas las opciones del menú ni todos los botones de la barra de herramientas estarán disponibles de forma simultánea. Cuando se selecciona en la ventana “Tipo de Proyecto”, la opción de “Diseño de Columnas” entonces estarán disponibles en el menú y en la barra de herramientas las opciones correspondientes al diseño de columnas y de forma similar si se selecciona la opción de “Diseño de Muros”.

Para seleccionar el tipo de proyecto, el usuario debe hacer clic en la figura de “Diseño de Muros” o “Diseño de Columnas” según desee. Se aclara aquí, que en esta ventana de selección de tipo de proyecto, las palabras “Diseño de Muros” y “Diseño de Columnas” no se refieren únicamente al diseño, sino también al análisis. Al seleccionar la opción de muros o columnas, estarán disponibles las opciones para diseño o análisis de los mismos.

Cuando se ha seleccionado el tipo de proyecto que se quiere realizar, se muestra en la ventana “Tipo de Proyecto” un cuadro para que el usuario ingrese alguna información general relativa al proyecto que va a realizar como: el nombre del proyecto, la ubicación, el tipo de columna o muro que se va a analizar o diseñar, los ejes entre los que se encuentra ubicado el elemento según la distribución que el diseñador haya establecido anteriormente, y el nivel en que se encuentra el elemento. Esta información es opcional y el usuario puede omitirla. Los datos ingresados en esta parte se muestran en la barra de estado, ubicada en la parte inferior de la aplicación, una vez que se hace clic en el botón “Continuar”.

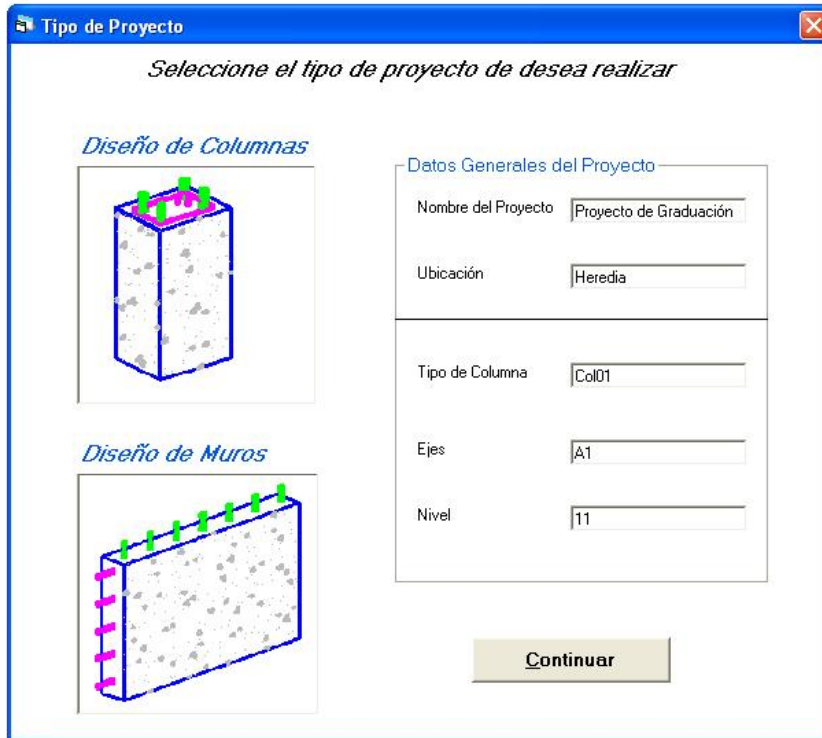


Figura 29. Ventana de selección de tipo de proyecto y de ingreso de información general.



Figura 30. Barra de estado de la aplicación, con la información general del proyecto.

Una vez seleccionado el tipo de proyecto quedan entonces disponibles las opciones para ese tipo de proyecto. Seguidamente se mostrarán y explicarán los submenús que ofrece el menú principal y su función, así como la función de los diferentes botones de la barra de herramientas.

Menú Archivo



Figura 31. Menú Archivo

Este menú contiene a los submenús: Nuevo, Abrir, Guardar, Imprimir y Salir.

- ❖ Nuevo: Muestra la ventana "Tipo de Proyecto" cuya función se explicó anteriormente.

- ❖ Abrir: tendrá como función abrir un archivo con datos existentes de algún proyecto que se haya realizado.
- ❖ Guardar: su función será guardar la información que el usuario ingresa cuando realiza un proyecto, de manera que pueda ser utilizada o modificada posteriormente.
- ❖ Imprimir: este submenú permite imprimir la información que se presenta en las diferentes pantallas que tiene la aplicación. La información que se imprime es la que corresponde a la ventana que esté activa.
- ❖ Salir: Al hacer clic sobre función, la aplicación finaliza y se cierra.

Menú Columnas



Figura 32. Menú Columnas

Este menú presenta las opciones que se tienen para el cálculo de columnas, que son: “Flexo-compresión” o “Cortante”. En la opción de cortante se puede seleccionar entre “Diseño” o “Análisis”

- ❖ Flexocompresión: al hacer clic en esta función, se muestra la ventana “Tipo de Columna”, donde le usuario debe seleccionar el tipo de columna que desea analizar o diseñar haciendo clic en la figura del tipo de columna deseada.

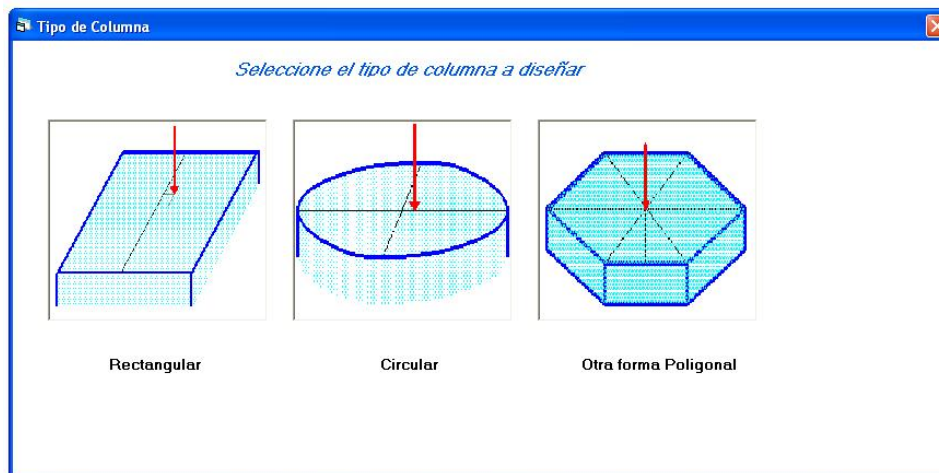


Figura 33. Ventana de selección del tipo de columna.

- ❖ Cortante: aquí se muestran dos submenús: Análisis y Diseño. El primero corresponde al análisis por cortante en columnas y el segundo, al diseño por cortante en estas.

Menú Muros



Figura 34. Menú Muros

Este menú es muy similar al menú “Columnas”, pues presenta las mismas opciones de: Flexocompresión y Cortante. La diferencia que se presenta es que al hacer clic en Flexocompresión, se muestra de inmediato la ventana para análisis y diseño de muros de concreto “Diseño de Muros Poligonales”, mientras que al hacer clic en los submenús “Análisis” o “Diseño”, se mostrarán las ventanas para tales cálculos, pero en este caso para muros estructurales.

Menú Ayuda

Este menú tiene las opciones de: “Acerca de” y “Temas”.

- ❖ Acerca de: muestra una ventana con el nombre del programa y su autor.
- ❖ Temas: esta opción establece un vínculo con los documentos de ayuda creados, los cuales son similares a lo que se muestran en el capítulo de Resultados, donde se indica al usuario cómo funciona el programa.

Barra de herramientas

La barra de herramientas proporciona un acceso directo a las principales funciones del programa, sin la necesidad de utilizar el menú. Como se explicó anteriormente, algunos botones no están disponibles, dependiendo del tipo de proyecto seleccionado. Asimismo, cuando se selecciona como tipo de proyecto la opción de columnas, solo están disponibles los botones para diseño o análisis de columnas, mientras que si se elige la opción de muros, solo estarán disponibles los botones para el diseño y análisis de muros. Los únicos botones que se encuentran disponibles todo el tiempo son los que corresponden al menú de “Archivo”, como lo son: Nuevo, Abrir, Guardar, Imprimir, y Salir. Seguidamente se muestran estos botones y su función.



Nuevo: muestra la ventana “Tipo de Proyecto” para seleccionar si se van a analizar o diseñar Columnas o Muros.



Abrir: permitirá abrir un archivo existente, con el fin de ver sus datos, modificarlos o ampliarlos.



Guardar: permitirá guardar la información que el usuario introduce, con el fin de utilizarla, modificarla o ampliarla en un futuro.



Imprimir: permite imprimir la ventana activa en el formulario o ventana principal.



Columnas rectangulares: Muestra la ventana para realizar los cálculos de flexo-compresión de columnas rectangulares.



Columnas circulares: Muestra la ventana para realizar los cálculos flexo-compresión de columnas circulares.



Columnas poligonales: Muestra la ventana para realizar los cálculos de flexo-compresión de columnas poligonales.



Análisis de cortante en columnas: Muestra la ventana para realizar los cálculos de análisis por cortante en columnas.



Diseño de cortante en columnas: Muestra la ventana para realizar los cálculos de diseño por cortante en columnas.



Flexocompresión de muros: Muestra la ventana para realizar los cálculos de flexo-compresión en muros.



Análisis de cortante de muros: Muestra la ventana para realizar los cálculos de análisis por cortante en muros.



Diseño de cortante de muros: Muestra la ventana para realizar los cálculos de diseño por cortante en muros.

Flexo-compresión en columnas

Para el análisis o diseño de columnas en flexo-compresión, el usuario debe seleccionar del menú principal la opción Columnas, Flexocompresión, y luego seleccionar el tipo de columna en la ventana "Tipo de Columna", o puede seleccionar directamente el tipo de columna deseado en la barra de herramientas.

El procedimiento por seguir es el mismo para el análisis y el diseño en flexo-compresión. En el caso de análisis, se tendrá inicialmente una sección completamente detallada, que deberá ser revisada para verificar si pueden soportar o no las cargas solicitadas, o simplemente determinar qué cargas puede soportar, lo cual se hace mediante el diagrama de interacción.

En lo que se refiere al proceso de diseño, inicialmente solo se tendrán las cargas que actúan sobre la columna por diseñar y posiblemente las medidas iniciales de la sección transversal. El usuario o diseñador deberá suponer la distribución y cantidad de acero que colocará en la columna. Esta cantidad inicial puede suponerse como un uno por ciento (1%) del área de la sección transversal, seguidamente se puede correr el programa para que realice el diagrama de interacción y se introducen las cargas para revisar si la columna con el refuerzo indicado puede tomar satisfactoriamente las cargas solicitadas. Si la columna "no cumple" con la resistencia, se puede modificar la cantidad y distribución de acero y revisar nuevamente. Aunque en apariencia es un poco largo, realizar esto solo toma unos pocos minutos, ya que el programa permite realizar los gráficos y la revisión de las cargas en cuestión de unos pocos segundos.

A continuación se muestra como utilizar las diferentes opciones que se presentan para el cálculo de columnas.

Columnas rectangulares

La ventana para el cálculo de columnas rectangulares está titulada como “Análisis de columnas rectangulares” y su apariencia es como la que se muestra a continuación.

DCR Diseño de Concreto Reforzado - [Análisis de columnas rectangulares]

Archivo Columnas Muros Ayuda

Materiales

$f'_c =$ 210

$f_y =$ 2800

Propiedades de la sección

$h =$ 45

$b =$ 20

Capas de Acero

Capa N°	d	Asi
1	5	5
2	40	5

Refuerzo Horizontal

Aros

Espiral

Calcular Limpiar Ver Columna

01/06/2005 Nombre del Proyecto: Tipo de Elemento: Ejes: Nivel: Flexocompresión en Columnas Rectangulares

Figura 35. Ventana para ingresar los datos para el cálculo de columnas rectangulares.

En esta ventana, el usuario debe introducir los datos generales de la columna que desea analizar o diseñar, como: la resistencia a la compresión del concreto (f'_c), la resistencia a la fluencia del acero (f_y), la altura de la sección transversal (h), el ancho de la sección (b). La posición y el área de cada capa de acero que tendrá la columna se introducen en la cuadrícula¹⁴ del cuadro “Capas de Acero”. La posición o distancia de las capas de acero aumenta de arriba hacia abajo como muestra en el esquema que se ejemplifica en la ventana. Finalmente el usuario debe seleccionar el tipo de refuerzo horizontal que utilizará. Esta última opción debe ser verificada, ya que para columnas rectangulares se establecen como predeterminadas la opción de aros; para columnas circulares es la opción de espiral; y finalmente para columnas poligonales la opción predeterminada es la de aros. La selección del tipo de refuerzo horizontal para la columna afecta los

¹⁴ Nota: Cuando se ingresen datos en cualquier cuadrícula que muestre esta aplicación, se debe presionar la tecla “enter” para asegurarse de que los datos sean leídos posteriormente por la máquina. Una forma de saber si los datos han sido ingresados realmente en la cuadrícula y que van a ser leídos por la máquina es que estos aparecen alineados a la derecha en la celda correspondiente.

factores de reducción que se utilizan en los cálculos, según lo dispone el Código Sísmico de Costa Rica 2002 (CSCR-2002).

Una vez que el usuario ha introducido estos datos, la máquina puede realizar los cálculos necesarios para la elaboración de los diagramas de interacción de carga axial *versus* momentos de flexión (P-M), para la columna, cuando el usuario hace clic en el botón “Calcular” el programa realiza el diagrama de interacción de la columna y lo muestra en una ventana aparte con el título de “Diagrama de Interacción P-M”. El uso de esta ventana se explica más adelante, pues su funcionamiento es común, sin importar el tipo de columna del que se trate.

Los otros botones disponibles en la ventana son: “Limpiar” y “Ver Columna”. El primero borra todos los datos existentes en esta ventana, con el fin de introducir otros nuevos; mientras que el segundo muestra un dibujo sencillo de la columna, según los datos introducidos, cuyo propósito es únicamente revisar de forma visual que la posición del acero es la deseada (este dibujo no incluye medidas de la geometría ni de la cantidad de acero).

Columnas circulares

La ventana para el cálculo de columnas Circulares está titulada como “Análisis de columnas circulares” y su apariencia se puede observar en la siguiente figura.

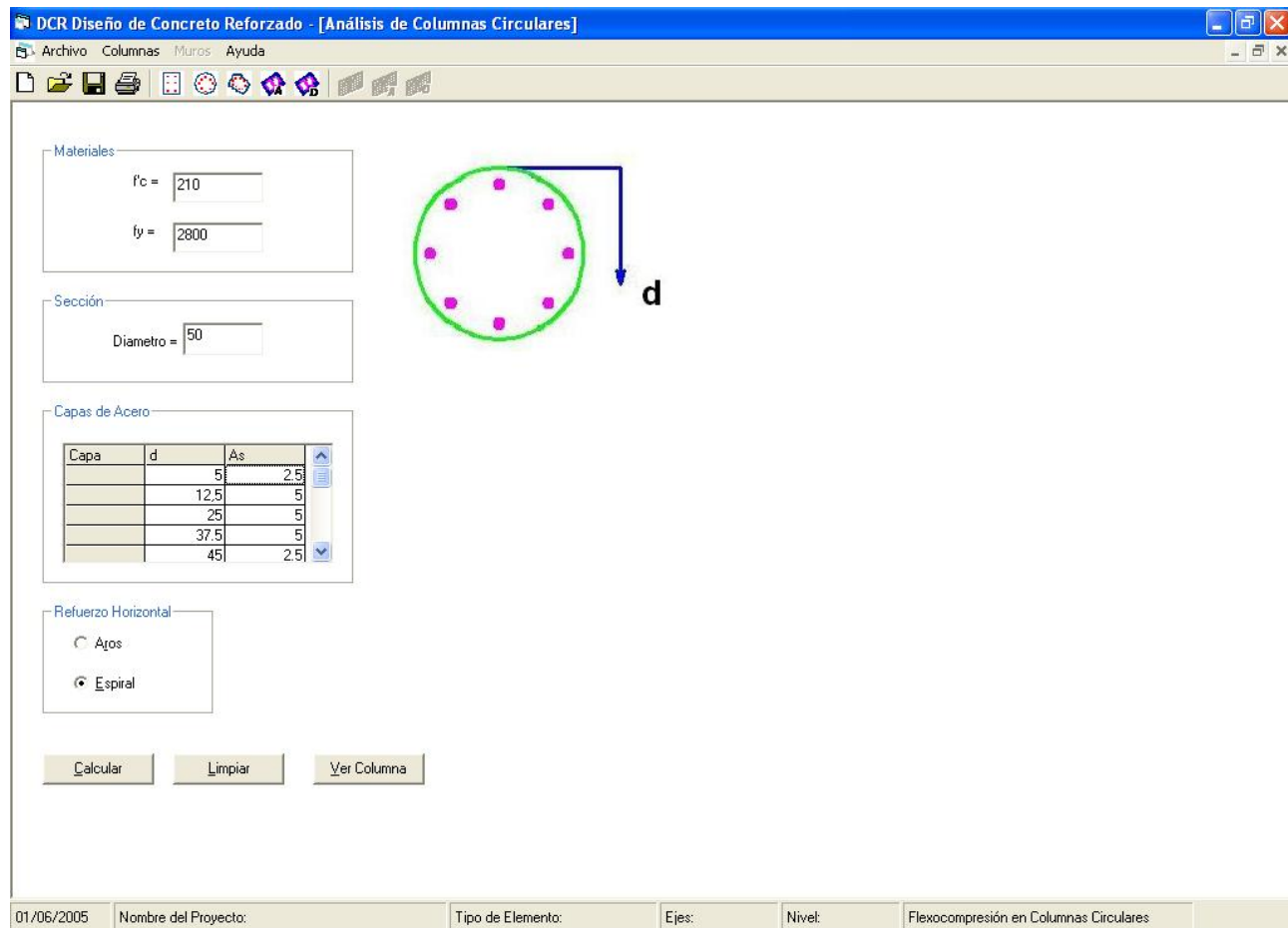


Figura 36. Ventana para ingresar los datos para el cálculo de columnas circulares

Como se puede observar, esta ventana es muy similar a la ventana para el cálculo de columnas rectangulares. Su funcionamiento es esencialmente el mismo, con la diferencia que en esta el único dato de la sección transversal que se utiliza es el diámetro de la columna. El resto de los pasos son idénticos a los requeridos para las columnas rectangulares. De igual modo, al hacer clic en el botón "Calcular", el programa realiza el diagrama de interacción de la columna, que es mostrado en una ventana aparte. Los demás botones tienen una función similar a los botones de la ventana "Análisis de columnas rectangulares"¹⁵.

Columnas poligonales

La ventana para el cálculo de columnas poligonales está titulada como "Columnas Poligonales", que se refiere a aquellas que pueden tener una sección transversal cualquiera, sea esta regular o irregular. Mediante esta opción, se pueden diseñar columnas en "T", en "L", en "I" o con cualquier otra forma que pueda ser definida mediante líneas rectas como por ejemplo: columnas octogonales, entre otras. La interfaz para el diseño o análisis de este tipo de columnas se muestra en la siguiente figura.

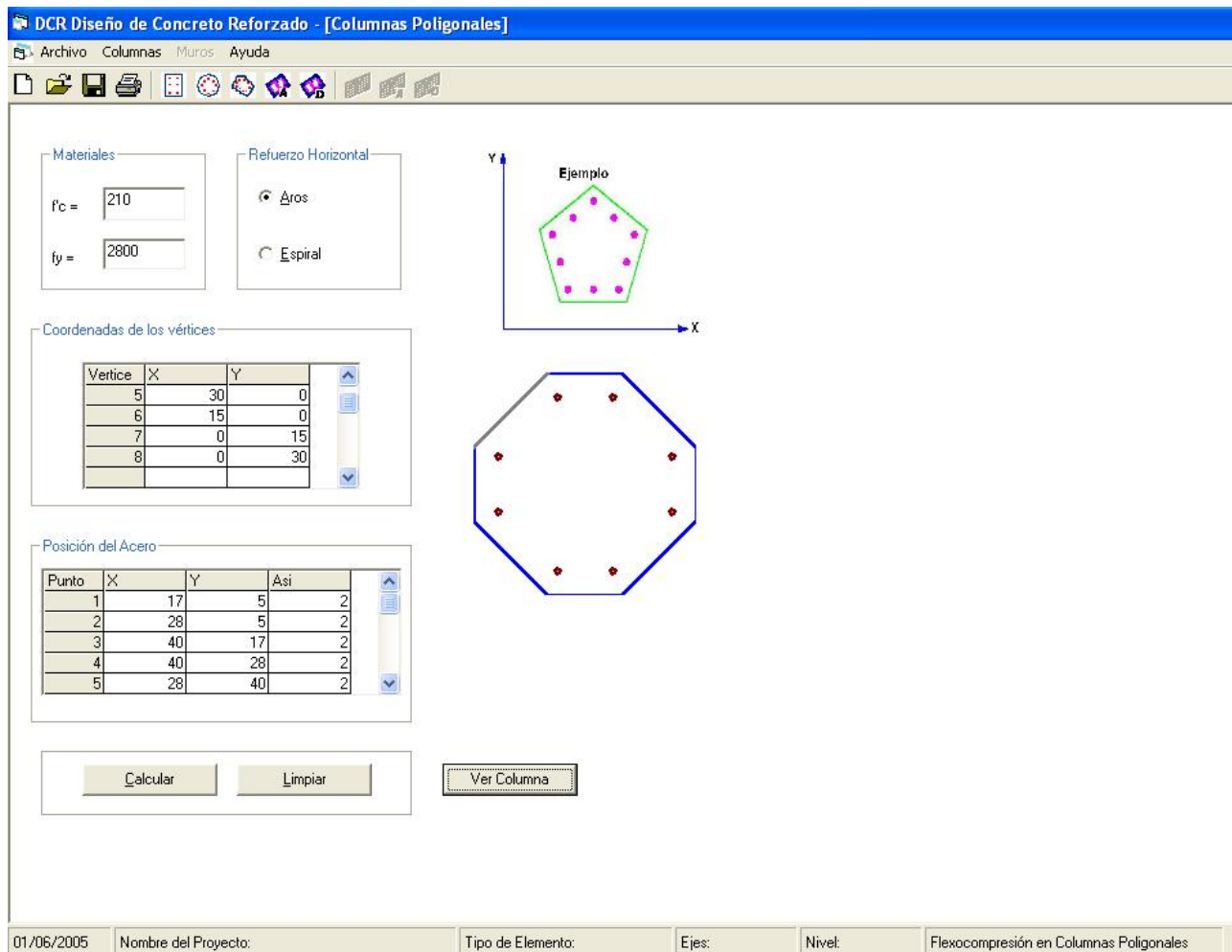


Figura 37. Ventana para ingresar los datos para el cálculo de columnas poligonales.

¹⁵ Vea el apartado Columnas rectangulares

Como se puede observar, esta interfaz es bastante similar a las interfaces para columnas rectangulares y circulares y su uso también se asemeja. Sin embargo, se debe poner atención a algunos detalles que se indican a continuación.

Para el caso de “Columnas Poligonales”, la geometría de la sección debe ser introducida mediante coordenadas “X” e “Y” que corresponden a los vértices de la columna. Este sistema de coordenadas es el convencional, con los valores de “X” aumentando de izquierda a derecha sobre el eje horizontal, mientras que los valores de “Y” aumentan de abajo hacia arriba en el eje vertical. Se escogió este sistema de coordenadas por ser el sistema convencional con el cual la mayoría de las personas está acostumbrada a trabajar. Es importante aclarar que las coordenadas de los vértices de la sección deben ser introducidas de forma cerrada, y de modo que al unir los puntos se vaya girando en el sentido de las manecillas del reloj. El usuario puede comenzar a introducir los datos de cualquiera de los vértices, pero como se acaba de mencionar, debe hacerlo de forma cerrada y en sentido “horario”. Para tener más claro esto se muestra el siguiente esquema.

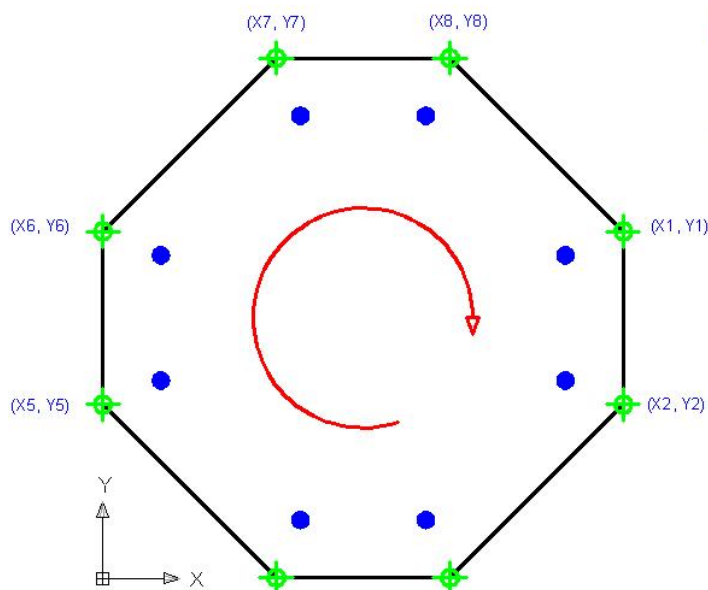


Figura 38. Esquema ilustrativo para la introducción de los datos de las coordenadas de los vértices de una columna.

Por lo tanto, para la columna mostrada, los datos pueden ser ingresados en la cuadrícula de la siguiente manera:

Vértice	X	Y
1	X1	Y1
2	X2	Y2
3	X3	Y3
4	X4	Y4
5	X5	Y5
6	X6	Y6
7	X7	Y7
8	X8	Y8

Tabla 3. Ejemplo para la forma como se deben introducir los datos de las coordenadas de los vértices de una columna mostrada en la figura 38.

Si los datos se introducen de otra manera, los resultados dados por el programa no reflejarán el verdadero comportamiento del elemento analizado.

De igual forma, la posición del acero en estas columnas debe ser ingresada mediante las coordenadas “X” e “Y”. El sistema de coordenadas aquí es igual que el utilizado para definir la geometría de

Además de mostrar el diagrama de interacción, en esta ventana se pueden introducir, en la cuadrícula del cuadro “Combinaciones de carga”, los datos de las cargas últimas que se han estimado previamente mediante un análisis estructural. También, haciendo clic en el botón “Combinaciones y Esbeltez”, se abre una ventana, donde se puede seleccionar el tipo de marco al cual pertenece la columna (marco arriostrado o marco no arriostrado), para considerar los posibles efectos de esbeltez en la columna, que a su vez realizan las cuatro combinaciones de carga que establece el CSCR-2002 y obtener las cargas últimas con los efectos de esbeltez incluidos. El funcionamiento de este material se explica con mayor detalle más adelante.

Otro botón que se presenta en esta ventana es “Revisar”, cuya función consiste en graficar en el diagrama de interacción mostrado todas las combinaciones de carga que el usuario ha ingresado, ya sea directamente o por medio de las opciones para tener en cuenta el efecto de la esbeltez en la columna.

En el diagrama mostrado en esta ventana, se presentan tres curvas con diferentes colores y puntos o triángulos. La curva de color rojo corresponde a los valores últimos de diseño que ya cuentan con los factores de reducción de la resistencia en establece el CSCR-2002. En color azul se muestran la curva que corresponde a los valores de resistencia nominal de la columna, en los cuales no se han aplicado los factores de reducción de la resistencia. De color verde se muestra la curva correspondiente a los valores probables de momento (M_{pr}) y carga axial que se pueden desarrollar en la columna. Estos valores corresponden a los cálculos donde se asume que la resistencia de fluencia del acero es igual a $1,25f_y$, como lo establece el código. Esta curva es de gran utilidad para el cálculo de la capacidad en cortante de la sección que se analiza y de aquí se pueden obtener los valores de M_{pr1} y M_{pr2} para calcular el cortante esperado (V_e) al que se puede ver sometida la columna. Finalmente en color magenta se muestran triángulos, que corresponde a cada una de las coordenadas (P_u, M_u), de las cargas últimas estimadas para la columna, que fueron introducidas en la cuadrícula del cuadro “Combinaciones de carga”.

También se muestra en el cuadro “Otros datos de la sección” alguna información extra de la columna tal como: el área (A), el momento de inercia para la sección bruta (I_g) y el valor del Módulo de elasticidad multiplicado por la inercia de la sección (EI_o). Estos datos son útiles cuando se va a realizar el análisis de los efectos de esbeltez en la columna.

Por último se muestra un botón cuyo mensaje inicial es: “Mostrar Datos de Gráfico”, el cual al ser presionado muestra en la parte inferior de la ventana una pequeña cuadrícula con los valores que el programa calculó para hacer el diagrama de interacción. Además en el momento que el botón es presionado, su mensaje cambia entre “Ocultar datos de Gráfico” y “Mostrar Datos de Gráfico” según esté o no visible la cuadrícula con los valores calculados para realizar el gráfico de P-M.

Cálculo de los efectos de esbeltez en las columnas

El programa desarrollado tiene la capacidad de realizar los cálculos para tomar en cuenta los efectos de la esbeltez en las columnas, usando la técnica de amplificación de momentos. Si el usuario desea llevar a cabo esto cálculos, primero debe seguir los pasos indicados anteriormente para la selección de columnas como elemento por diseñar o analizar. Luego debe introducir los datos correspondientes que el programa le solicita según el tipo de columna que haya seleccionado. Después de hacer clic en el botón “Calcular” de alguno de los módulos (o ventanas) de los diferentes tipos de columnas que se ofrecen, deberá hacer clic en el botón “Combinaciones y Esbeltez”, de la ventana “Diagramas de interacción P-M” que muestra el programa. Al hacer clic en dicho botón aparecerá una nueva ventada como la que se muestra a continuación, donde el usuario debe seleccionar - haciendo clic sobre una de las figuras - el tipo de marco al que pertenece la columna que se está analizando.

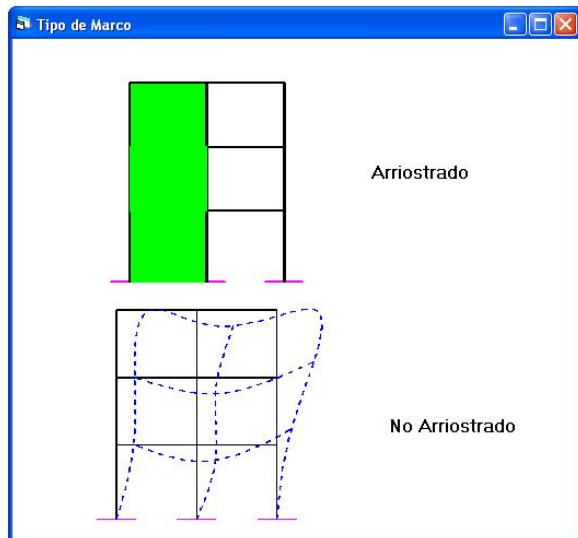


Figura 40. Ventana para seleccionar el tipo de marco para el cálculo de efectos de esbeltez.

Como el cálculo de los efectos de esbeltez tiene procedimientos diferentes según se trate de columnas en marcos arriestrados o columnas en marcos no arriestrados, los módulos de trabajo para cada tipo se explican por separado.

Efectos de esbeltez en Marcos Arriestrados

Para calcular los efectos de esbeltez en un marco arriestrado se presenta una ventana como la que se muestra.

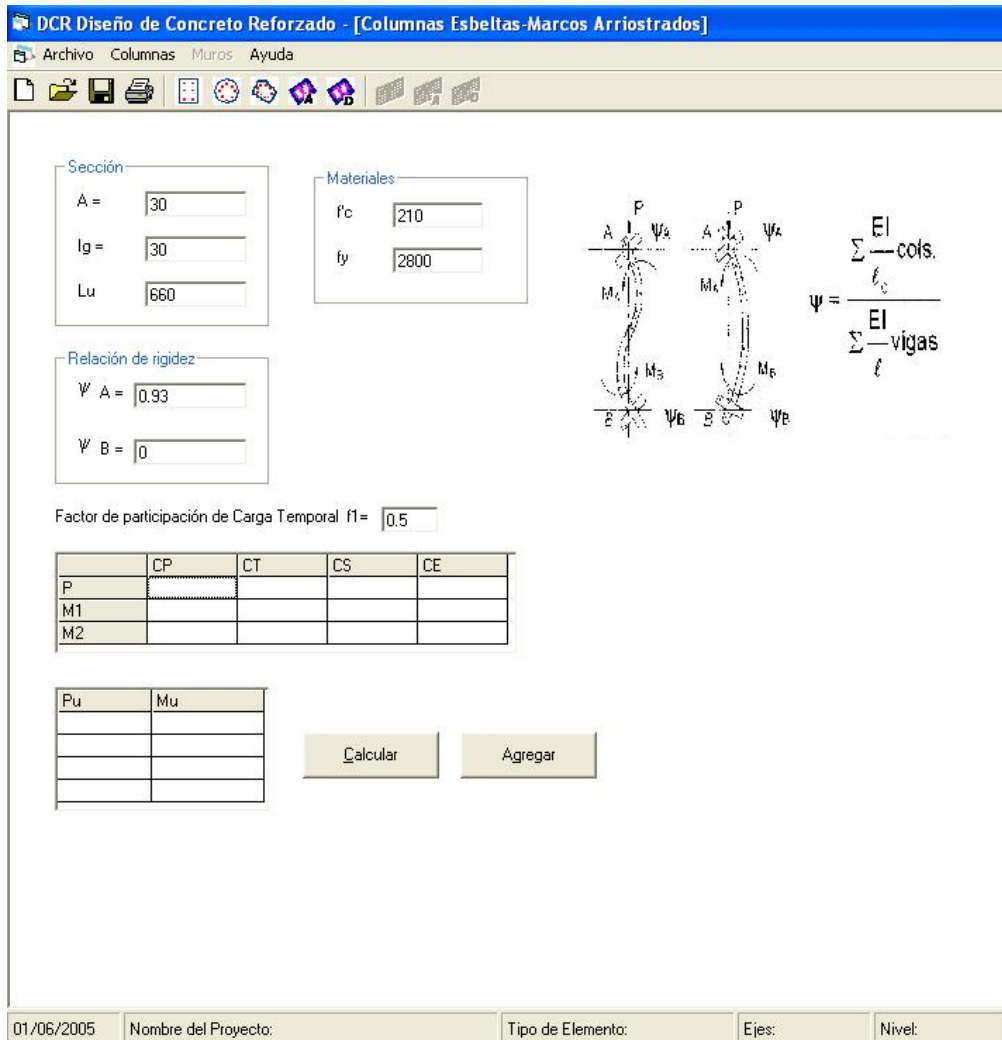


Figura 41. Ventana para el cálculo de efectos de esbeltez en marcos arriostrados.

Aquí el usuario debe introducir algunos datos de la sección transversal: área de la sección (A), momento de inercia de la sección bruta (I_g) y longitud no soportada de la columna (L_u). Los dos primeros datos los puede obtener el usuario de la información brindada en la ventana “Diagramas de interacción P-M”. Además, debe ingresar las propiedades mecánicas de los materiales de la columna (f'_c y f_y), los factores de relación de rigidez de las columnas con respecto a las vigas, para cada extremo de la columna (ψ_A y ψ_B), y el factor de participación de la carga temporal (f1) que separa la tercera combinación de carga que estipula el CSCR-2002. Finalmente debe introducir las cargas axiales (P) y los momentos de flexión menor (M1) y mayor (M2) que actúan en los extremos de la columna, para cada tipo de carga. Esto es las fuerzas axiales y momentos de flexión debidos a cargas permanentes (CP), cargas temporales (CT), cargas de sismo (CS), o cargas de empuje (CE). Estas fuerzas axiales y momentos de flexión no deben ser mayorados por el usuario (no se deben multiplicar por los factores que establecen las combinaciones de carga del código), ya que el programa se encarga de realizar esto.

Luego de haber ingresado estos datos de forma correcta, se debe hacer clic en el botón “Calcular” de esta ventana y los valores calculados por el programa son mostrados en la cuadrícula con las etiquetas “P_u” y “M_u”. Los datos presentados corresponden a los momentos amplificados en el caso de que la columna resultara esbelta para alguna de las combinaciones de cargas. Además, son los valores últimos de carga, que ya han sido factorados según las combinaciones del código. El primer par de datos (P_u, M_u)

corresponde a la primera combinación, el siguiente par corresponde a la segunda y así sucesivamente. Si el usuario desea revisar estos datos en el diagrama de interacción de la columnas, simplemente debe presionar el botón "Agregar" y entonces los datos serán trasladados a la cuadrícula del cuadro "Combinaciones de carga" en la ventana "Diagramas de interacción P-M". Cuando se hace clic en este último botón, la ventana "Columnas esbeltas-Marcos Arriostrados" se cierra.

El usuario puede llevar a cabo más cálculos de los efectos de esbeltez con las cargas obtenidas del análisis estructural que previamente debió realizar, de manera que pueda considerar el sismo actuando en varias direcciones (como lo establece el CSCR-2002). Para ello puede repetir los pasos antes descritos.

Efectos de esbeltez en marcos no arriostrados

Para el caso de efectos de esbeltez en marcos no arriostrados se proporcionan dos opciones de cálculo: una utilizando el método de amplificación de momentos del ACI y la otra utilizando el índice de estabilidad.

Como se puede ver en las figuras siguientes, los datos que se requieren para el cálculo de los efectos de esbeltez en columnas que pertenecen a marcos no arriostrados es similar a la requerida para columnas en marcos arriostrados. En este caso se necesita alguna información extra como la sumatoria de todas las cargas críticas de las columnas del nivel analizado y la sumatoria de las cargas axiales, en las columnas del nivel analizado, para los casos de CP, CT, CS y CE. El resto de la información que el usuario debe brindar al programa es la misma que para el cálculo de los efectos de esbeltez en columnas que pertenecen a marcos arriostrados¹⁶.

¹⁶ Ver el apartado: Efectos de Esbeltez en Marcos Arriostrados

DCR Diseño de Concreto Reforzado - [Columnas Esbeltas-Marcos No Arriostrados]

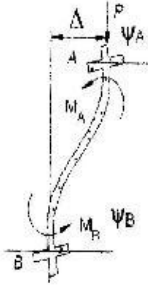
Archivo Columnas Muros Ayuda

Materiales
 $f_c =$
 $f_y =$

Sección
 $A =$
 $I_g =$
 $L_u =$

Relación de Rigidez
 $\psi_A =$
 $\psi_B =$

Otros Datos
 $\sum P_c =$
 $r_1 =$



$$\psi = \frac{\sum \frac{EI}{l_c} \text{ cols.}}{\sum \frac{EI}{l} \text{ vigas}}$$

	P	M1	M2	Po Total
CP				
CT				
CE				
CS				

Pu	Mu

01/06/2005 Nombre del Proyecto: Tipo de Elemento: Ejes: Nivel:

Figura 42. Ventana para el cálculo de efectos de esbeltez en marcos no arriostrados, con el método de amplificación de momentos.

DCR Diseño de Concreto Reforzado - [Columnas Esbeltas-Marcos No Arriostrados (Índice de estabilidad)]

Archivo Columnas Muros Ayuda

Efectos de esbeltez en columnas de marcos no arriostrados utilizando el método del índice de estabilidad (Q)

Materiales

$f_c =$

$f_y =$

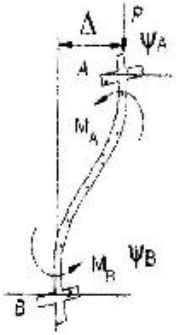
Sección

$A =$

$I_g =$

$L_u =$

$L_c =$



$$Q = \frac{\sum \frac{EI}{l_c} \text{ cols.}}{\sum \frac{EI}{l} \text{ vigas}}$$

Relación de Rigidez

$\psi_A =$

$\psi_B =$

$r1 =$

$\Delta \sigma =$

	P	M1	M2	Suma Po	Vu
CP	104500	-27700	27700	522600	
CT	78600	1385000	1385000	396200	
CE					
CS	2700	970000	1165000	0	5000

Pu	Mu
146,300.00	38,780.00
251,160.00	2,249,240.00
151,725.00	1.99
101,975.00	1,262,266.22

Calcular combinaciones de carga y amplificación de momentos

Figura 43 Ventana para el cálculo de efectos de esbeltez en marcos no arriostrados, con el índice de estabilidad.

Los cuidados al introducir la información son los mismos que los indicados para columnas en marcos arriostrados. La información resultante al hacer clic en el botón “Calcular” de este módulo de cálculo de efectos de esbeltez en marcos no arriostrados es del mismo tipo que la obtenida en marcos arriostrados. De igual forma los datos obtenidos (P_u , M_u) pueden ser trasladados a la cuadrícula del cuadro “Combinaciones de carga” en la ventana “Diagramas de interacción P-M” presionando el botón “Agregar” y revisar estos datos en el diagrama presionando el botón “Revisar”. La ventana “Columnas esbeltas-Marcos No Arriostrados” también se cierra automáticamente cuando se presiona “Agregar”.

El usuario puede llevar a cabo más cálculos de los efectos de esbeltez con las cargas obtenidas del análisis estructural que previamente debió realizar, de manera que pueda considerar el sismo actuando en varias direcciones (como lo establece el CSCR-2002). Para ello puede repetir los pasos antes descritos.

Cortantes en columnas

Para el cálculo por cortante en columnas, el programa dispone de dos opciones: "Análisis" o "Diseño". Para comenzar los cálculos por cortante, el usuario puede seleccionar una de las dos opciones mediante el menú principal, haciendo clic en "Columnas, Cortante, Análisis", o "Columnas, Cortante, Diseño". También puede hacer clic directamente sobre unos de los botones de la barra de herramientas, ya sea "Análisis de Cortante de Columnas" o "Diseño de Cortante de Columnas", según el cálculo que se necesite realizar.

Los cálculos por cortante son mucho más simples que los cálculos para flexo-compresión. Por lo tanto, también son más sencillas las aplicaciones para este tipo de cálculos. El uso de las aplicaciones para el cálculo de cortante en columnas se explica a continuación.

Análisis por Cortante en Columnas

Este módulo puede ser utilizado para determinar el cortante máximo que puede resistir una columna, según los materiales empleados, propiedades de la sección y el refuerzo horizontal que se ha supuesto o que se debe revisar para una sección dada. La interfaz es la que se muestra en la siguiente figura.

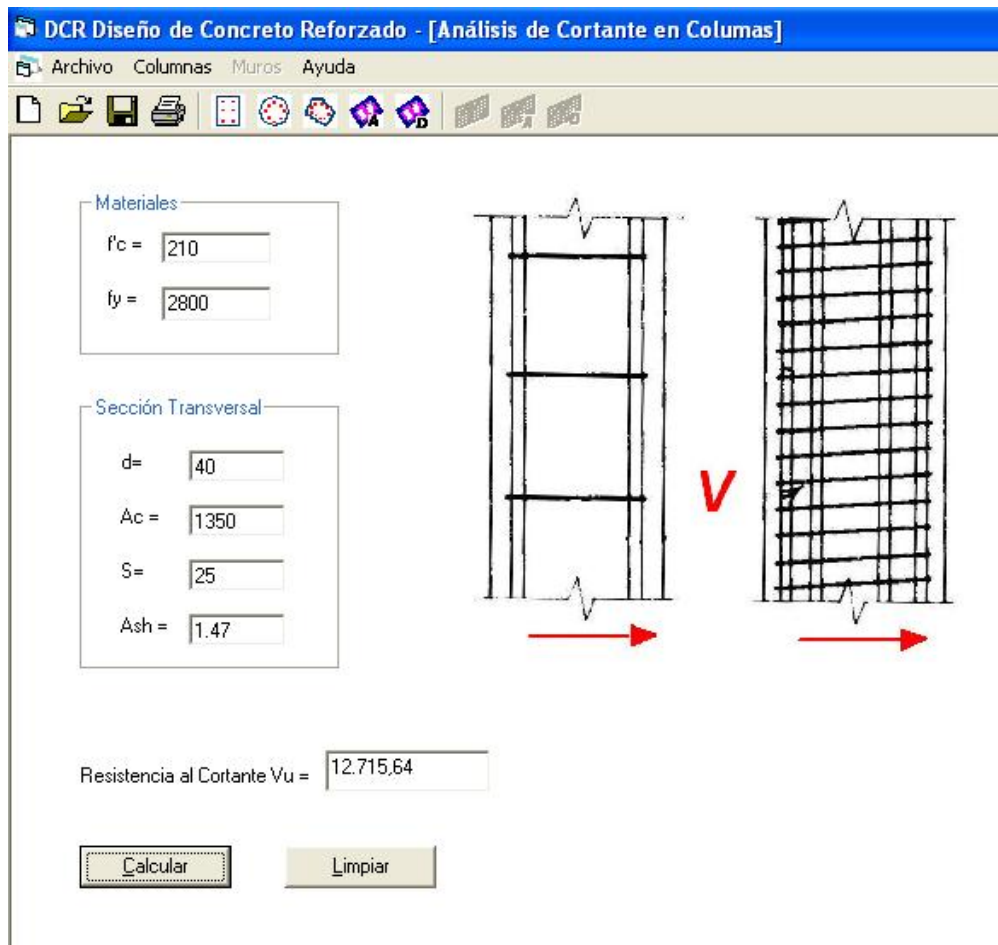


Figura 44: Ventana para el análisis por cortante en columnas.

Los datos que el programa requiere y que deben ser introducidos por el usuario son: la resistencia a la compresión del concreto (f_c), la resistencia a la fluencia del acero (f_y), la altura efectiva del elemento (d), el

área total de concreto que puede resistir fuerza cortante (A_c), la separación entre aros o el paso de la espiral (S), y el área total de las ramas de acero que resisten fuerza cortante en la dirección analizada, o área de la sección de la espiral (A_{sh}).

Una vez que se han introducido estos datos y al presionar el botón “Calcular”, se obtiene la resistencia última al cortante (V_u) de la sección analizada. Mediante el botón “Limpiar” se borran todos los datos introducidos por el usuario y el dato de V_u obtenido por el programa. Es importante mencionar que el programa lleva a cabo el cálculo del cortante máximo que puede resistir una sección, tal como lo establece el CSCR-2002, por lo que es posible que al realizar incrementos en el área de acero que resiste cortante (A_{sh}), no se incremente la fuerza cortante que la sección puede resistir (V_u), debido a que se ha alcanzado este límite.

Diseño por Cortante en Columnas

Mediante esta aplicación, el usuario puede calcular la separación de aros que se requiere para soportar un cortante dado, aunque debe suponer inicialmente un área de acero que resiste fuerza cortante. El suponer un área de acero que resiste cortante no es muy complicado, ya que una vez definido el refuerzo longitudinal de la columna, se puede determinar la cantidad y forma de los aros por utilizar en una sección. Además, por lo general se utilizan barras N° 3 o N° 4 para el refuerzo transversal. En la siguiente figura se presenta la interfaz de este módulo.

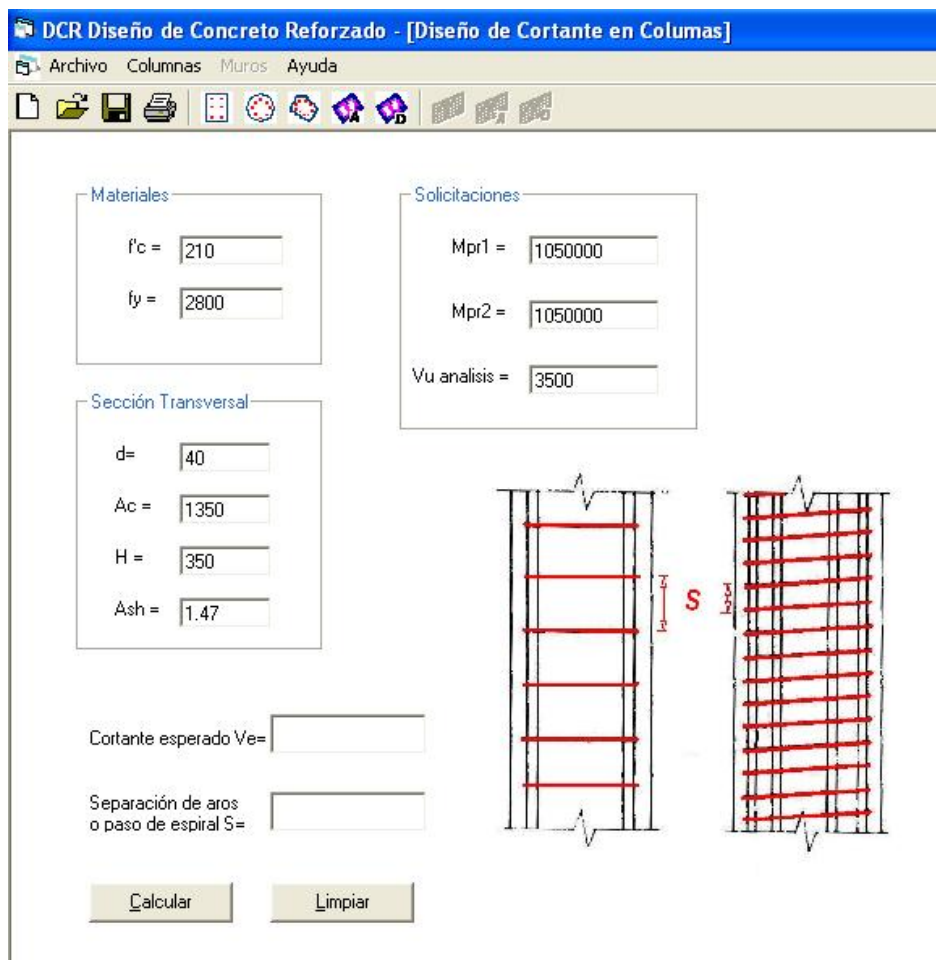


Figura 45. Ventana para el diseño por cortante en columnas.

Los datos que el programa requiere son: la resistencia a la compresión del concreto (f_c), la resistencia a la fluencia del acero (f_y), la altura efectiva del elemento (d), el área total de concreto que puede resistir fuerza cortante (A_c), la altura libre de la columna (H), el área total de las ramas de acero que resisten fuerza cortante en la dirección analizada, o área de la sección de la espiral (A_{sh}), los momentos probables en la sección (M_{pr1} y M_{pr2}), los cuales se pueden obtener de los diagramas de interacción P-M para la columna en cuestión y finalmente la fuerza cortante producto del análisis estructural que debió realizar el usuario previamente.

Una vez que se han introducido estos datos y al presionar el botón "Calcular", el programa calcula el cortante esperado (V_e) según la magnitud de los momentos probables. Luego compara el cortante esperado con el cortante producto del análisis estructural, para determinar cual es el mayor y finalmente con el cortante mayor calcula la separación de los aros o el paso de la espiral, según los datos introducidos.

Flexo-compresión en Muros

Para el análisis o diseño en flexo-compresión de muros estructurales, el usuario debe seleccionar del menú principal la opción Muros, Flexocompresión, o puede seleccionar directamente presionando el botón "Flexocompresion de muros" en la barra de herramientas. El módulo de flexocompresión de muros ofrece la posibilidad de diseñar muros rectangulares, en "T", en "L" o en "I", utilizando la misma ventana para cualquiera de estos casos. Como se explica más adelante.

De la misma manera que para el caso de las columnas, en el análisis y el diseño en flexo-compresión el procedimiento es el mismo. En el caso de análisis, se tendrá inicialmente una sección completamente detallada, que deberá ser revisada para verificar si puede soportar o no las cargas solicitadas sobre esta, o simplemente se requiere determinar qué cargas puede soportar, lo cual se hace mediante el diagrama de interacción. En relación con el proceso de diseño, inicialmente solo se tendrán las cargas que actúan sobre el muro que se desea diseñar y posiblemente las medidas iniciales de la sección transversal de este. El usuario o diseñador deberá suponer la distribución y cantidad de acero que colocará en el muro. Esta cantidad inicial puede suponerse como 0,0025 veces el área del alma del muro (0,25% el área del muro). En el caso de secciones diferentes a la rectangular, la cantidad de acero en las alas del muro se puede determinar de igual forma, pero utilizando el área del ala correspondiente, en lugar del área del alma. Seguidamente se puede correr el programa para que realice el diagrama de interacción y se introducen las cargas para revisar si el muro con el refuerzo indicado puede resistir las cargas solicitadas. Si el muro "no cumple" con la resistencia, se puede modificar la cantidad y distribución de acero y revisar nuevamente.

Se debe revisar si el muro por analizar o diseñar requiere de elementos de borde e introducir el refuerzo que corresponde a estos elementos para el análisis por flexo-compresión.

A continuación se muestra la pantalla para el análisis por flexo-compresión para muros y se indica cómo debe utilizarse esta herramienta.

DCR Diseño de Concreto Reforzado - [Diseño de Muros Poligonales]

Archivo Columnas Muros Ayuda

Materiales

$f_c =$ 210

$f_y =$ 2800

Coordenadas de los vértices de la sección

Vértice	X	Y

Reforzamiento del Alma

Inicio de reforzamiento 1, d= 20 S1 = 50 Asi1 = 1.97

Inicio de reforzamiento 2, d= 45 S2 = 50 Asi2 = 1.27

Reforzamiento de Alas

Espesor del Ala Superior t1 = 15 Espesor del Ala Inferior t2 = 20

Ala Superior d1 = 495 At1 = 12 d2 = 490 At2 = 10

Ala Inferior d1 = 5 At1 = 12 d2 = 10 At2 = 10

Reforzamiento Especial

Punto	X	Y	Asi

Calcular

Limpiar

Ver Muro

Ala Superior

Alma

Ala Inferior

t1

t2

d

01/06/2005 Nombre del Proyecto: Tipo de Elemento: Ejes: Nivel: Flexocompresión en Muros

Figura 46: Ventana para introducir datos para el cálculo por flexo-compresión en muros.

Como se puede observar en la figura anterior, la ventana para el cálculo por flexo-compresión en muros se asemeja un poco a la ventana para el cálculo en flexo-compresión de columnas. Primeramente se describirán las posibilidades que ofrece ese módulo en cuando a la forma del muro y en su reforzamiento. Luego se indicará como se ingresan los datos para el cálculo.

Esta ventana ofrece la opción de calcular varios tipos de muros estructurales como se indicó anteriormente, los cuales son: muros rectangulares, en "T", en "L" o en "I". Además, se puede detallar el reforzamiento longitudinal del muro con gran precisión y se ofrecen facilidades para indicar la cantidad de acero en el alma del muro como en las alas, en caso de tenerlas. Para el reforzamiento¹⁷ del alma, se puede indicar un solo tipo de barra (área de la barra) o dos tipos. En ambos casos se debe especificar la entre cada una. En cuanto al reforzamiento de las alas, se pueden especificar una o dos capas de acero en cada ala. Para cada capa se debe indicar la cantidad de acero total que posee.

¹⁷ En este apartado específico, cuando se habla del reforzamiento, se refiere al reforzamiento longitudinal del muro, a menos de que se indique otro aspecto.

De forma general, los datos que debe ingresar el usuario son: la resistencia a la compresión del concreto (f'_c), la resistencia a la fluencia del acero (f_y), las coordenadas de los vértices de la sección transversal del muro, y la cantidad (área) y ubicación del acero en el muro.

El ingreso de las coordenadas de los vértices de la sección del muro se introducen en la cuadrícula del cuadro "Coordenadas de los vértices de la sección", el orden en que se ingresan estos datos debe hacerse de la misma forma que se indicó anteriormente para el caso de análisis de columnas poligonales¹⁸. Esto significa introducir las coordenadas de forma cerrada, siguiendo una dirección en el sentido de las manecillas del reloj. Si los datos se introducen de otra manera, los resultados dados por el programa no reflejarán el verdadero comportamiento del elemento analizado.

El siguiente paso consiste en introducir los datos para el refuerzo del alma del muro. Esto corresponde a los datos solicitados en las diferentes casillas del cuadro "Refuerzo del Alma". Como se indicó anteriormente, se pueden especificar uno o dos tipos de refuerzo longitudinal para el alma del muro. Para cada refuerzo, se debe indicar la distancia d (d_1 y d_2) –desde la parte extrema en tensión del muro– desde donde se iniciará la colocación de este refuerzo que se distribuirá a lo largo del alma del muro, según la separación que se indique en la casilla correspondiente a la separación entre las varillas de cada tipo de refuerzo (S_1 y S_2). Por último, en esta etapa se debe indicar el área correspondiente a las barras de acero por utilizar en el alma (Asi_1 y Asi_2), o en caso de usar una malla doble, el área indicada será la suma del área de cada barra (o sea, el área total en una capa de refuerzo). Para el refuerzo en el alma, no se debe indicar el refuerzo total, sino el que corresponde a una capa. En caso de que solo se utilice un tipo de refuerzo en el alma, las casillas de d_2 , S_2 y Asi_2 pueden dejarse en blanco o con valor de 0 (cero).

Los datos hasta ahora indicados son los datos mínimos que requiere el programa para realizar el diagrama P-M para el muro. Los datos, que se describen a continuación son datos requeridos específicamente para muros con forma diferente a la rectangular, o muros que requieren algún tipo de refuerzo especial, tal como elementos de borde.

Cuando se requiere analizar o diseñar muros en "T", en "L" o en "I", se debe indicar el refuerzo que estos tienen en las alas, por lo tanto es necesario brindar al programa una cantidad de información adicional, que debe ser introducida en las casillas del cuadro "Refuerzo de Alas". Los primeros datos que se deben introducir son: el espesor de cada una de las alas (t_1 y t_2), con el fin de que el programa pueda determinar donde terminará el refuerzo del alma. Si el muro es un muro en "T" o en "L", solo será necesario el dato de t_1 o t_2 , dependiendo de cómo se quiera analizar el muro (puede ser una L o T invertida). Posteriormente se debe indicar la ubicación de las capas de refuerzo de las alas, tanto superior como inferior (d_1 y d_2), luego se indica el área de acero total para cada una de esas capas tanto para el ala superior como para el ala inferior (Ast_1 y Ast_2). En caso de que solo exista una capa de acero en las alas, la información correspondiente a d_2 y Ast_2 puede omitirse o ingresar valores de 0 (cero). Algo similar se puede realizar en caso de que el muro solo posea un ala.

A modo de ayuda e ilustración para el análisis en flexo-compresión de muros, en esta ventana se muestra un pequeño esquema donde se indican las diferentes partes del muro. Seguidamente se presenta un esquema más detallado de los datos requeridos por el programa en este módulo.

¹⁸ Ver el apartado: Columnas Poligonales

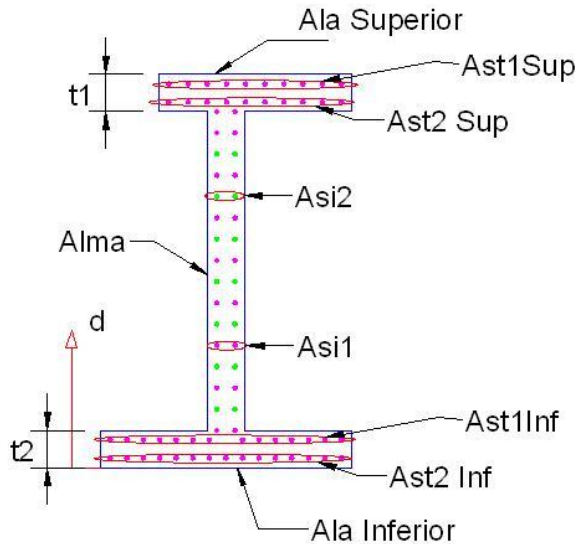


Figura 47. Esquema de los datos que se deben introducir para el cálculo en flexo-compresión de muros.

Una vez que se han introducido todos los datos necesarios para el muro que se desea analizar, se presiona el botón "Calcular" de este módulo, para obtener el diagrama de interacción P-M para el muro indicado, que será mostrado en una ventana aparte, con el título de "Diagrama de Interacción P-M", tal como el mostrado para columnas, cuyo funcionamiento se explica un más adelante. Los demás botones disponibles en esta ventana de cálculo por flexo-compresión para muros, desempeñan una función similar a los botones de las diferentes herramientas para el cálculo por flexo-compresión para columnas. Así el botón "Limpiar" borra todos los datos que se hayan introducido y el botón "Ver Muro" muestra un pequeño y sencillo diagrama con la forma del muro.

Ventana "Diagramas de interacción P-M" para el caso de muros

Esta ventana muestra el diagrama de interacción para el muro especificado según se explicó en el apartado anterior. Es muy parecida a las ventanas utilizadas para mostrar los diagramas correspondientes al análisis por flexo-compresión en columnas. Esta pantalla se muestra luego de hacer clic en el botón "Calcular" del módulo "Diseño de Muros Poligonales", según se ilustra en la siguiente figura.

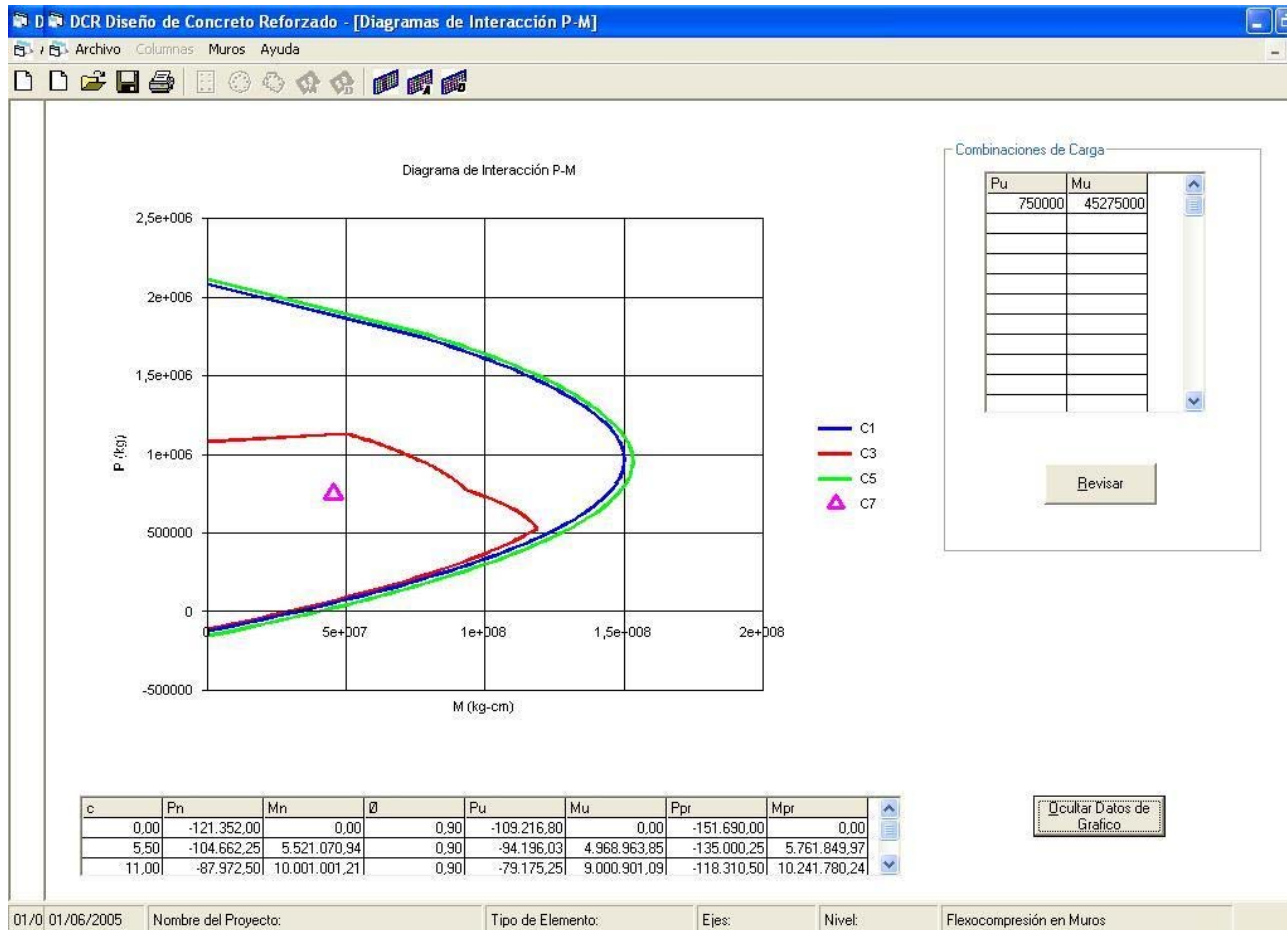


Figura 48. Ventana para “Diagramas de interacción P-M” para muros.

Además de mostrar el diagrama de interacción, en esta ventana se pueden introducir, en la cuadrícula del cuadro “Combinaciones de carga”, las cargas últimas que se han estimado previamente por medio de un análisis estructural. Luego se puede utilizar el botón “Revisar”, cuya función es graficar en el diagrama de interacción mostrado todas las combinaciones de carga que el usuario ha ingresado en la cuadrícula del cuadro “Combinaciones de carga”.

En el diagrama mostrado en esta ventana se presentan tres curvas con diferentes colores y puntos o triángulos. La curva de color rojo corresponde a los valores últimos de diseño que ya cuentan con los factores de reducción de la resistencia en establece el CSCR-2002. En color azul se muestra la curva que corresponde a los valores de resistencia nominal de la columna, en los cuales no se han aplicado los factores de reducción de la resistencia. De color verde se muestra la curva que corresponde a los valores probables de momento (M_{pr}) y carga axial que se pueden desarrollar en el muro. Estos valores corresponden a los cálculos donde se supone que la resistencia de fluencia del acero es igual a $1,25 \cdot f_y$.

Por último se muestra un botón cuyo mensaje inicial es: “Mostrar Datos de Gráfico”. Si es presionado, muestra en la parte inferior de la ventana una pequeña cuadrícula con los valores que el programa calculó para hacer el diagrama de interacción. Además, su mensaje cambia entre “Ocultar datos de Gráfico” y “Mostrar Datos de Gráfico” según esté o no visible la cuadrícula con los valores calculados para realizar el gráfico de P-M.

Cortantes en muros

Para el cálculo por cortante en muros, el programa dispone de dos opciones: "Análisis" o "Diseño". Para comenzar los cálculos por cortante, el usuario puede seleccionar una de las dos opciones mediante el menú principal, haciendo clic en "Muros, Cortante, Análisis", o "Muros, Cortante, Diseño". También puede hacer clic directamente sobre unos de los botones de la barra de herramientas, ya sea "Análisis Cortante de Muros" o "Diseño Cortante de Muros", según el cálculo que se necesite realizar.

Como se indicó antes, los cálculos por cortante de columnas son mucho más simples que para flexo-compresión. E también es válido en el caso de muros. El uso de las aplicaciones para el cálculo de cortante en muros se explica a continuación.

Análisis por Cortante en Muros

Este módulo puede ser utilizado para determinar el cortante máximo que puede resistir un muro, según los materiales empleados, propiedades de la sección y el refuerzo horizontal que se ha supuesto o que se debe revisar para una sección dada. La interfaz de este se muestra en la siguiente figura.

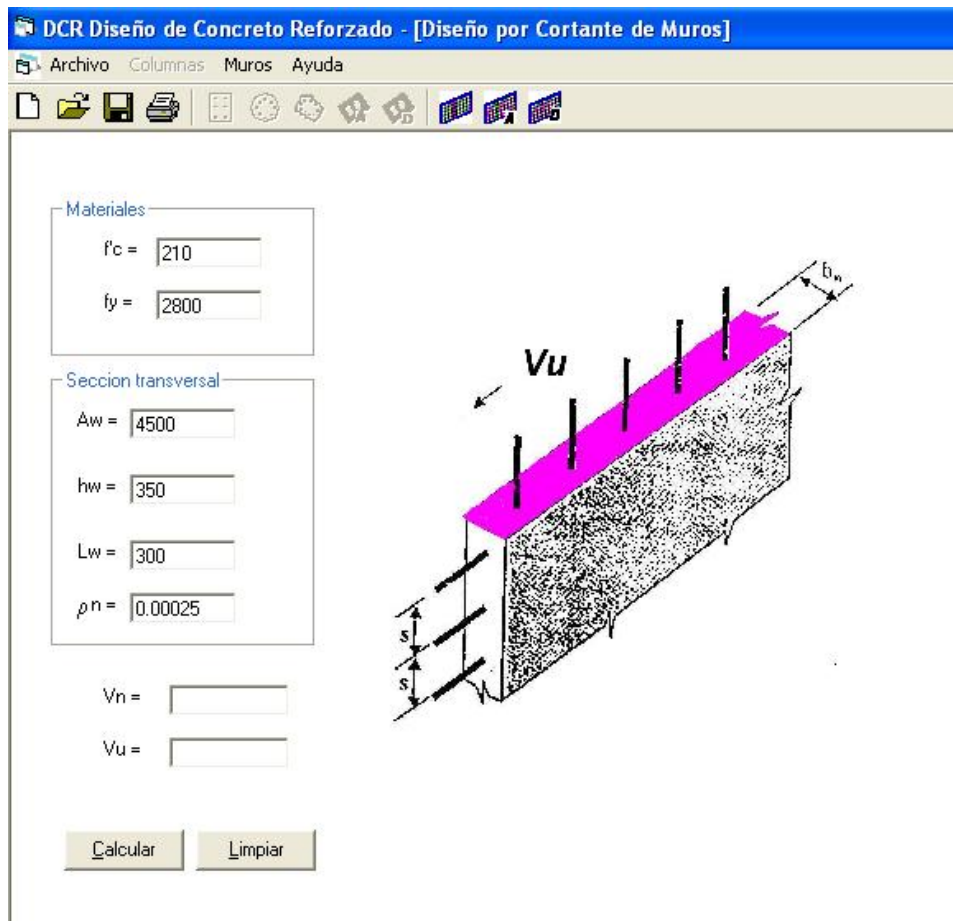


Figura 49. Ventana para el análisis por cortante en muros.

Los datos que el programa requiere y que deben ser introducidos por el usuario son: la resistencia a la compresión del concreto (f'_c), la resistencia a la fluencia del acero (f_y), el área total del muro considerada para resistir cortante (A_w), la altura del muro (h_w), longitud del muro (L_w), y la cuantía de acero para cortante que posee el muro (ρ_n).

Una vez que se han introducido estos datos y al presionar el botón “Calcular” se obtiene la resistencia última al cortante (V_u) de la sección analizada, además también se muestra como información extra la resistencia nominal al cortante que posee el muro (V_n). Mediante el botón “Limpiar” se borran todos los datos introducidos por el usuario y los datos de V_n y V_u obtenidos por el programa.

Diseño por Cortante en Muros

Mediante esta aplicación, el usuario puede calcular la cuantía y el área total de acero que requiere un muro para soportar un cortante dado. Mediante esta cuantía de acero, el diseñador puede detallar finalmente un muro estructural, según los requerimientos de cortante, por medio de la disposición de una cantidad de barras de acero colocadas horizontalmente, de modo que se cumpla con la cuantía requerida y con los espaciamientos mínimos que establece el CSCR-2002. En la siguiente figura se presenta la interfaz de este módulo.

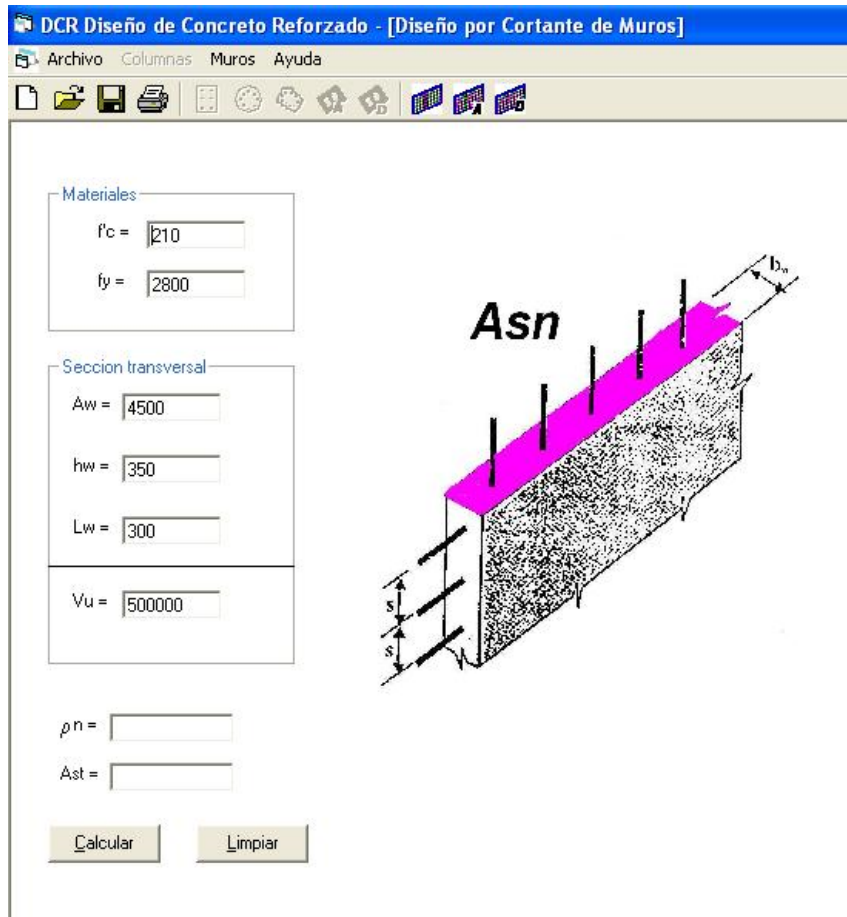


Figura 50. Ventana para el diseño por cortante en muros

Los datos que el programa requiere son la resistencia a la compresión del concreto (f'_c), la resistencia a la fluencia del acero (f_y), el área total del muro considerada para resistir cortante (A_w), la altura del muro (h_w), longitud del muro (L_w), y el cortante último máximo que actúa sobre el muro (V_u).

Una vez que se han introducido estos datos y al presionar el botón “Calcular”, el programa calcula la cuantía de acero (ρ_n) y la cantidad de acero total (A_{st}), que requiere la sección para soportar el cortante último especificado previamente.

Ejemplo comparativos

A continuación se presentan algunos ejemplos de cálculo realizados en MS-Excel o manualmente, con el fin de comparar estos con los resultados que se obtienen con el programa DCR, que además muestran el correcto funcionamiento del software.

Ejemplo 1: diagrama de interacción de columna rectangular en flexo-compresión

El siguiente es un ejemplo realizado en MS – Excel, de una columna rectangular con las siguientes características:

- Sección transversal de 30 cm x 40 cm.
- Concreto con resistencia de 210 kg/cm².
- Acero con resistencia a la fluencia de 2800 kg/cm².
- Además tiene dos capas de acero, cada una de 10,61 cm², distribuidas simétricamente y con un recubrimiento de 5 cm.

Solución:

Las siguientes tablas muestran los datos con los cálculos para obtener algunos puntos para crear el diagrama de interacción.

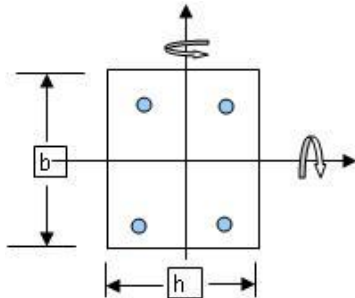


Figura 51. Esquema de la columna rectangular para el ejemplo 1.

Diagramas de Interaccion para columnas de concreto reforzado Según las cargas del modelo sin muros

N1 COL1

Cuadro 141. Momentos alrededor del eje x (Mxx), N1 COL-01		
Propiedades de los materiales		Myy
f'c (kg/cm2)	210	
fy (kg/cm2)	2800	
εc =	0,003	X
εy =	0,001	Mxx
β1 =	0,850	
Propiedades de la sección		
b (cm)	30	
h (cm)	40	
As' (cm2)	10,61	
Asm (cm2)	0	
As (cm2)	10,61	

Recubrimientos **5**

Compresión Pura

Pn (kg) = 269.828,23
 ω **0,8**
Pn (kg) = 215.862,58
 ϕ **0,65**
Pu (kg) = 140.310,68

Falla Balanceada

cb (cm) = 24,23
ab (cm) = 20,60
e's = 0,002380952 As' en fluencia **$\epsilon_s = 0,0013$**
f's (kg/cm²) = 2800
fsm 1332,692308
Pnb (kg) = 110.292,40
Mnb (kg-cm) = 1.961.288,42

Otros puntos supuestos

c (cm) =	35	$\epsilon_s =$	Menor de
a (cm) =	29,75		0 fluencia
Material	Esfuerzo (kg/cm ²)	Fuerza (kg)	Brazo palanca (cm) Momento (kg-cm)
Concreto		159.311,25	5,13 816.470,16
As'	2.800,00	29.708,00	15,00 445.620,00
Asm	2.700,00	-	- -
As	-	-	-15,00 -
Pn= 189.019,25		Mn= 1.262.090,16	
c (cm) =	30	$\epsilon_s =$	Menor de
a (cm) =	25,50		0,0005 fluencia
Material	Esfuerzo (kg/cm ²)	Fuerza (kg)	Brazo palanca (cm) Momento (kg-cm)
Concreto		136.552,50	7,25 990.005,63
As'	2.800,00	29.708,00	15,00 445.620,00
Asm	2.100,00	-	- -
As	1.050,00	-11.140,50	-15,00 167.107,50
Pn= 155.120,00		Mn= 1.602.733,13	
c (cm) =	25	$\epsilon_s =$	Menor de
a (cm) =	21,25		0,0012 fluencia
Material	Esfuerzo (kg/cm ²)	Fuerza (kg)	Brazo palanca (cm) Momento (kg-cm)
Concreto		113.793,75	9,38 1.066.816,41
As'	2.800,00	29.708,00	15,00 445.620,00
Asm	1.260,00	-	- -
As	2.520,00	-26.737,20	-15,00 401.058,00
Pn= 116.764,55		Mn= 1.913.494,41	

c (cm) =	20	$\epsilon_s =$	0,00225	En fluencia
a (cm) =	17,00			
Material	Esfuerzo (kg/cm²)	Fuerza (kg)	Brazo palanca (cm)	Momento (kg-cm)
Concreto		91.035,00	11,50	1.046.902,50
As'	2.800,00	29.708,00	15,00	445.620,00
Asm		-	-	-
As	2.800,00	-29.708,00	-15,00	445.620,00
Pn= 91.035,00			Mn= 1.938.142,50	
c (cm) =	15	$\epsilon_s =$	0,004	En fluencia
a (cm) =	12,75			
Material	Esfuerzo (kg/cm²)	Fuerza (kg)	Brazo palanca (cm)	Momento (kg-cm)
Concreto		68.276,25	13,63	930.263,91
As'	2.800,00	29.708,00	15,00	445.620,00
Asm	-2.100,00	-	-	-
As	2.800,00	-29.708,00	-15,00	445.620,00
Pn= 68.276,25			Mn= 1.821.503,91	
c (cm) =	10	$\epsilon_s =$	0,0075	En fluencia
a (cm) =	8,50			
Material	Esfuerzo (kg/cm²)	Fuerza (kg)	Brazo palanca (cm)	Momento (kg-cm)
Concreto		45.517,50	15,75	716.900,63
As'	2.800,00	29.708,00	15,00	445.620,00
Asm	2.800,00	-	-	-
As	2.800,00	-29.708,00	-15,00	445.620,00
Pn= 45.517,50			Mn= 1.608.140,63	
c (cm) =	2,9	$\epsilon_s =$	0,033206897	En fluencia
a (cm) =	2,47			
Material	Esfuerzo (kg/cm²)	Fuerza (kg)	Brazo palanca (cm)	Momento (kg-cm)
Concreto		13.200,08	18,77	247.732,41
As'	-4.562,07	-48.403,55	15,00	-726.053,28
Asm	2.800,00	-	-	-
As	2.800,00	-29.708,00	-15,00	445.620,00
Pn= -64.911,48			Mn= -32.700,87	

Resumen para el gráfico de Interacción				
Pn (kg)	Mn (kg-cm)	ϕ	Pu (kg) w = 0.8	Mu (kg-cm) f = 0.9
215,86	-	0,65	140,31	-
189,02	12,62	0,65	122,86	8,20
155,12	16,03	0,65	100,83	10,42

116,76	19,13	0,65	75,90	12,44
110,29	19,61	0,65	71,69	12,75
91,04	19,38	0,71	64,86	13,81
68,28	18,22	0,83	56,79	15,15
45,52	16,08	0,90	40,97	14,47
-64,91	-0,33	0,90	-58,42	0,29

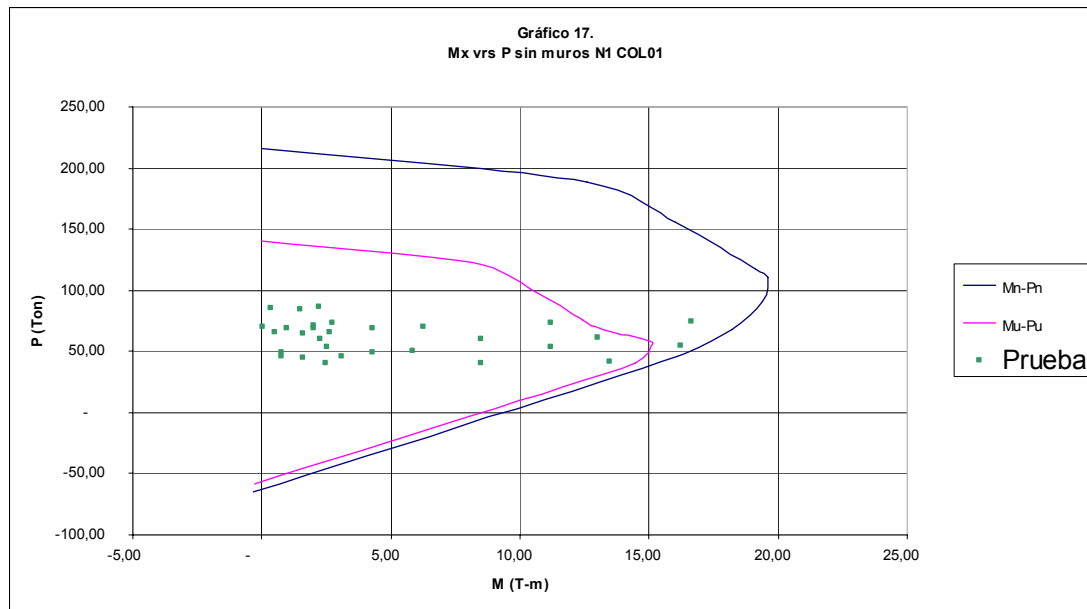


Figura 52. Diagrama de interacción para el ejemplo 1, obtenido en MS-Excel.

Para los datos dados anteriormente se obtiene el diagrama de interacción en el programa DCR, que muestra el diagrama de interacción para la columna tal como se observa en la siguiente figura.

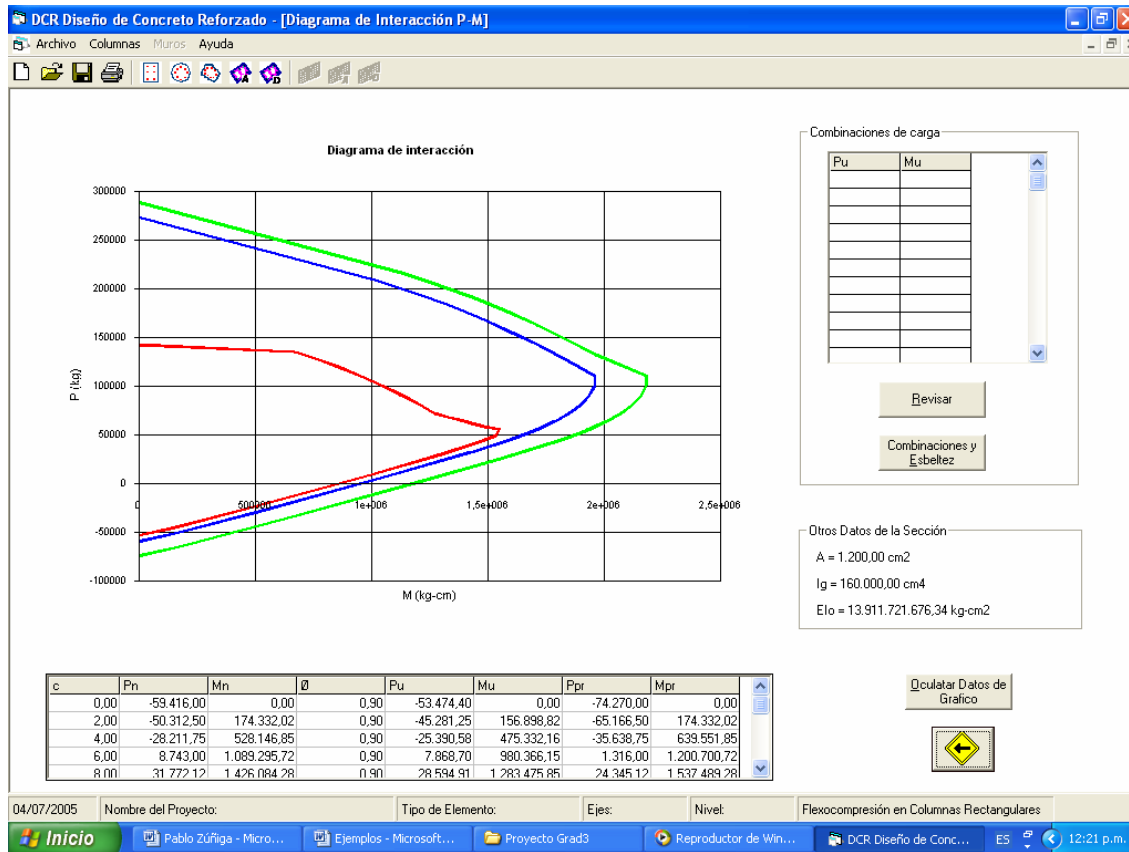


Figura 53. Diagrama de interacción para el ejemplo 1, obtenido con DCR.

Ejemplo 2: diagrama de interacción de columna circular en flexo-compresión

De forma similar al ejemplo anterior, se muestran los datos de la sección transversal de una columna circular para el cálculo de los diagramas de interacción. En este no se detallan todos los cálculos realizados, pero los mismos pueden ser realizados de forma similar que para la columna circular

- Sección transversal de 50 cm de diámetro.
- Concreto con resistencia de 210 kg/cm².
- Acero con resistencia a la fluencia de 2800 kg/cm².
- Además tiene cuatro capas de acero, el área y posición de cada capa se detalla en las siguientes tablas y en el esquema de la columna.

Solución:

Las siguientes tablas muestran los datos generales de la columna, además de los valores nominales y últimos de algunos puntos para crear el diagrama de interacción.

Materiales		Sección	
f'c =	210	r	25
fy =	2800	d	50

			acero	
$\epsilon_c =$	0.003	d 1 =	5	5
$\epsilon_s =$	0.00133	d 2 =	17.5	7.5
$E_s =$	2.10E+06	d 3 =	32.5	7.5
		d 4 =	45	5

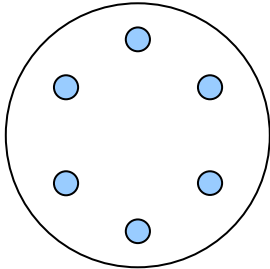


Figura 54. Esquema para la columna circular del ejemplo 2.

c	Pn	Mn	f	Pu	Mu
0	-70000	0	0.9	-63,000.00	-
2	-65,297.53	113,564.54	0.9	-58,767.78	102,208.09
10	7,901.37	1,595,453.48	0.9	7,111.24	1,435,908.14
20	115,822.53	2,921,915.43	0.83	96,132.70	2,425,189.81
31.15	248,229.27	3,430,699.40	0.7	173,760.49	2,401,489.58
40	340,504.43	2,854,465.15	0.7	238,353.10	1,998,125.60
50	420,483.93	-	0.7	250,187.94	-

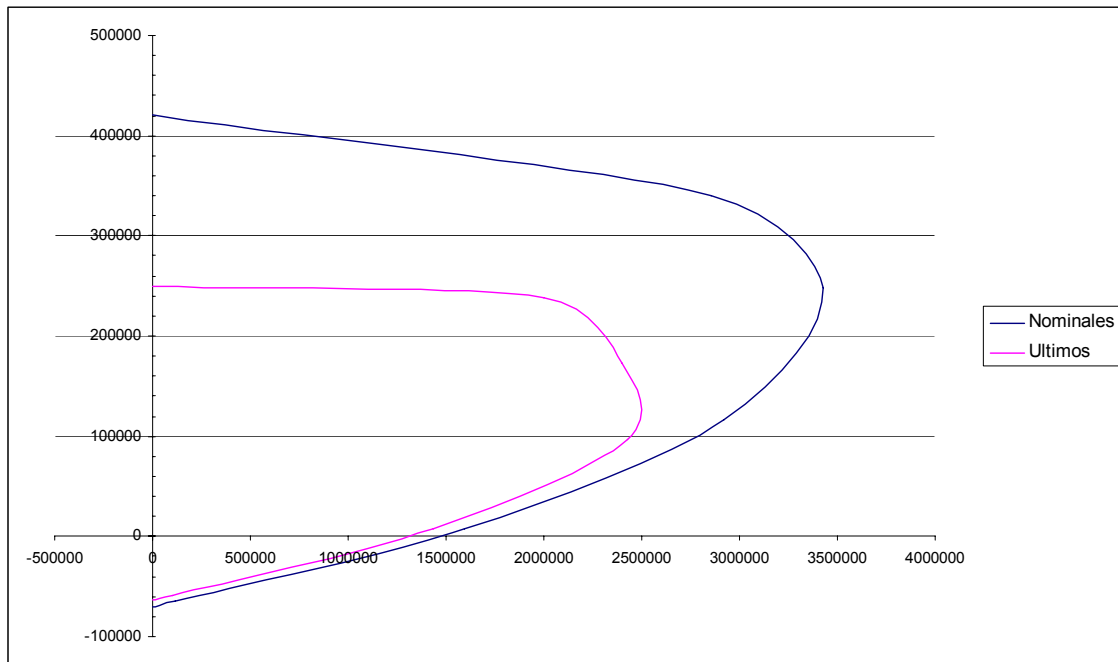


Figura 55. Diagrama de interacción para el ejemplo 2, obtenido en MS-Excel.

Seguidamente se muestran los datos que se deben introducir en el programa DCR para el cálculo del diagrama de interacción de una columna circular, así como el resultado que da el programa.

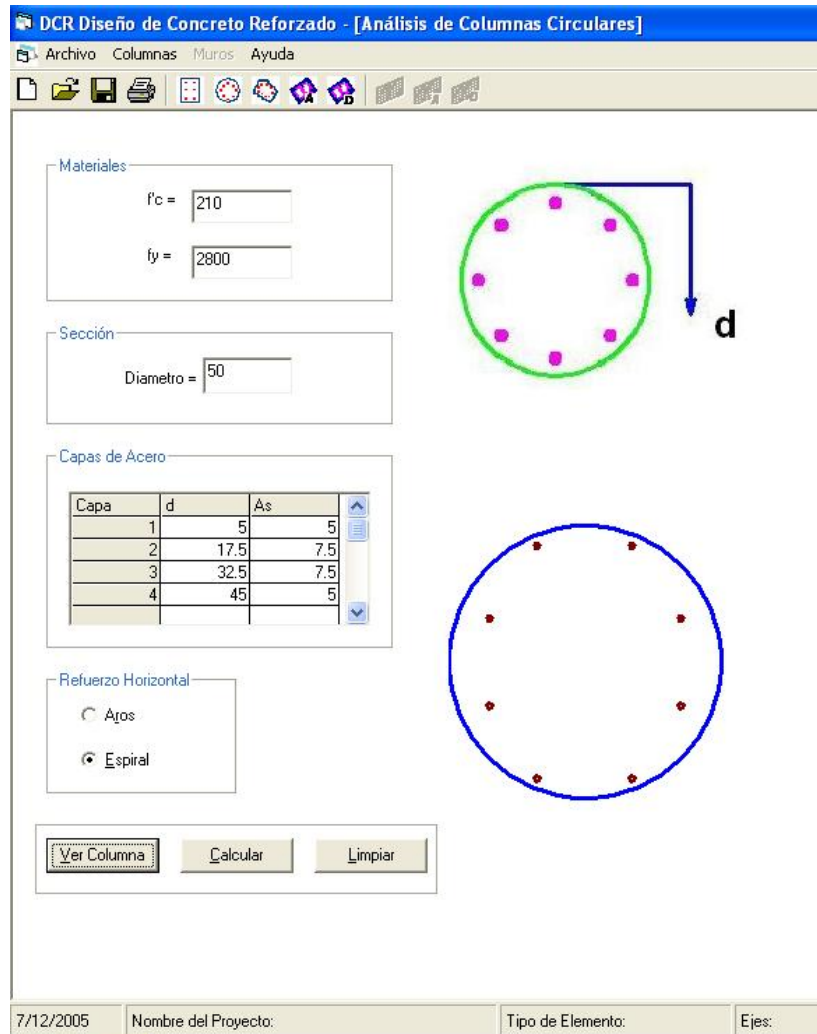


Figura 56. Datos para el cálculo del diagrama de interacción de la columna del ejemplo 2, requerido por el programa.

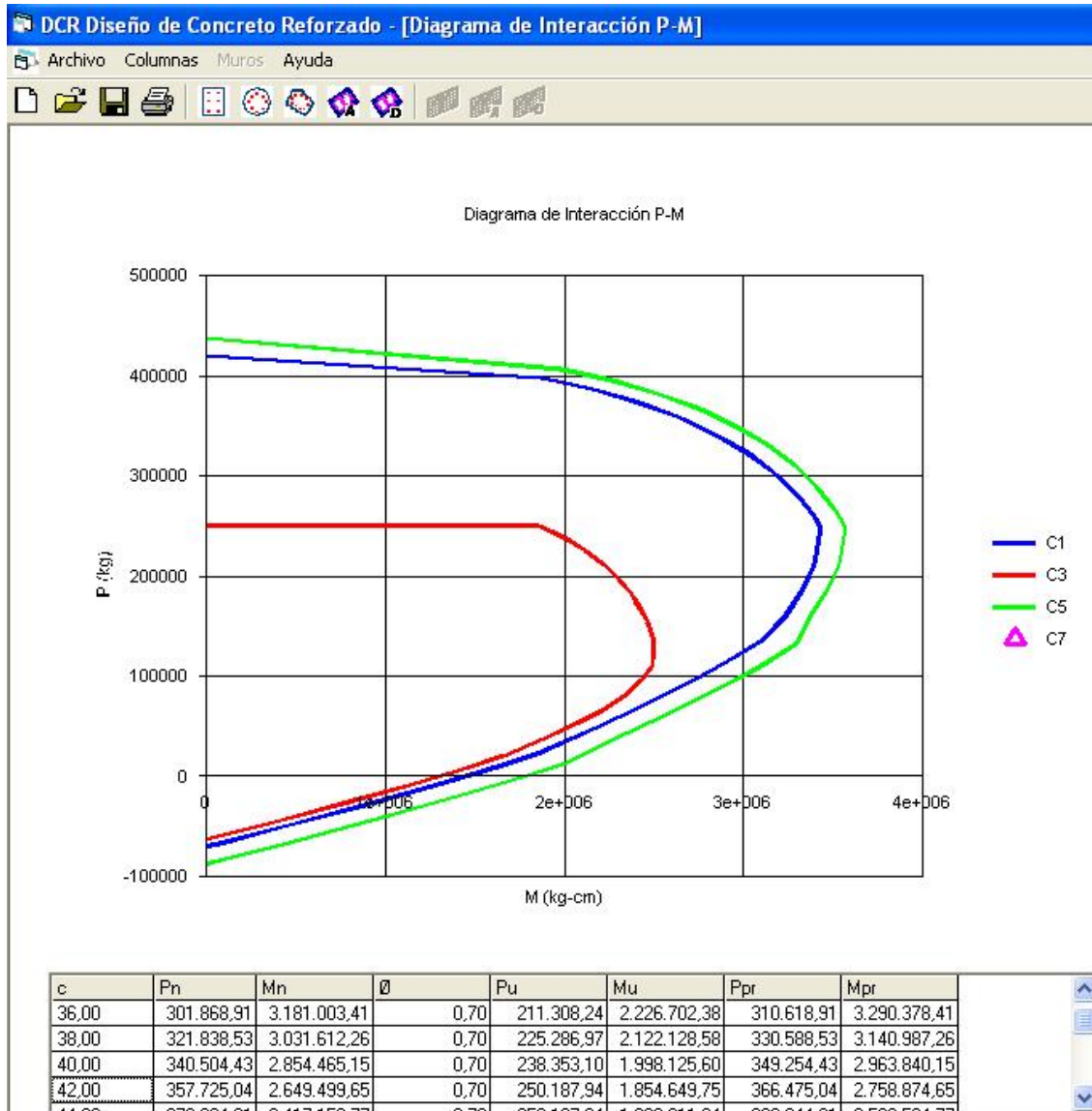


Figura 57. Diagrama de interacción para el ejemplo 2, obtenido con DCR.

Ejemplo 3: diagrama de interacción de columna hexagonal en flexo-compresión

Aquí se muestran los datos de la sección transversal de una columna hexagonal para el cálculo de los diagramas de interacción. En este ejemplo se puede observar que los datos obtenidos con la hoja de cálculo de MS-Excel difieren en una pequeña medida de los obtenidos con el programa DCR, debido a que este programa calcula el centroide exacto de la sección de concreto que queda sobre cada eje neutro que se toma para realizar los cálculos, mientras que los datos de la hoja de Excel suponen que el centroide se ubica a una distancia igual a $c/2$ desde la fibra extrema en compresión.

- Sección transversal es un hexágono inscrito en un círculo de 40 cm de diámetro y sus lados tienen una longitud de 23.09 cm.
- Concreto con resistencia de 210 kg/cm^2 .
- Acero con resistencia a la fluencia de 2800 kg/cm^2 .

- Además tiene cinco capas de acero, el área y posición de cada capa se detalla en las siguientes tablas y en el esquema de la columna.

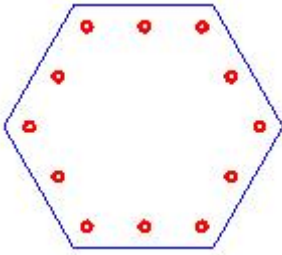


Figura 58. Esquema general de la columna del ejemplo 3.

Solución:

Las siguientes tablas muestran los datos generales de la columna, además de los valores nominales y últimos de algunos puntos para crear el diagrama de interacción.

Tension Pura	
Ast=	15.24
Pn=	-42672
Compresión pura	
Pn=	290008.74

Otros Puntos									
c=	3.5			Ac=	73.81				
di	Asi	e	sig	fs	Ps	x	Mt		
3.5	3.81	0	0	0.00	0	16.5	0		
11.75	2.54	-0.00707	-1	-2800.00	-7112	8.25	-58674		
20	2.54	-0.01414	-1	-2800.00	-7112	0	0		
28.25	2.54	-0.02121	-1	-2800.00	-7112	-8.25	58674		
36.5	3.81	-0.02829	-1	-2800.00	-10668	-16.5	176022		
Concreto	1.4875				13175.085		18.5125	243903.761	
ϕ	2.49			Pn =		-18,828.92	Mn = 419,925.76		

c=	11.75			Ac=	288.24				
di	Asi	e	sig	fs	Ps	x	Mt		
3.5	3.81	0.00211	1	2800.00	10668	16.5	176022		
11.75	2.54	0	0	0.00	0	8.25	0		
20	2.54	-0.00211	-1	-2800.00	-7112	0	0		
28.25	2.54	-0.00421	-1	-2800.00	-7112	-8.25	58674		
36.5	3.81	-0.00632	-1	-2800.00	-10668	-16.5	176022		
Concreto	4.99375				51450.84		15.00625	772084.168	
ϕ	0.99			Pn =		37,226.84	Mn = 1,182,802.17		

c=	20			Ac=	559.45			
di	Asi	e	sig	fs	Ps	x	Mt	
3.5	3.81	0.00247	1	2800.00	10668	16.5	176022	

11.75	2.54	0.00124	1	2604.00	6614.16	8.25	54566.82
20	2.54	0	0	0.00	0	0	0
28.25	2.54	-0.00124	-1	-2604.00	-6614.16	-8.25	54566.82
36.5	3.81	-0.00247	-1	-2800.00	-10668	-16.5	176022
Concreto	8.5				99861.825	11.5	1148410.99
ϕ	0.73			Pn =	99,861.83	Mn =	1,609,588.63

c=	25.27		Ac=	759.91			
di	Asi	e	sig	fs	Ps	x	Mt
3.5	3.81	0.00258	1	2800.00	10668	16.5	176022
11.75	2.54	0.00161	1	2800.00	7112	8.25	58674
20	2.54	0.00063	1	1323.00	3360.42	0	0
28.25	2.54	-0.00035	-1	-735.00	-1866.9	-8.25	15401.925
36.5	3.81	-0.00133	-1	-2793.00	-10641.33	-16.5	175581.945
Concreto	10.73975				135643.935	9.26025	1256096.75
ϕ	0.65			Pn =	144,276.13	Mn =	1,681,776.62

c=	28.25		Ac=	868.85			
di	Asi	e	sig	fs	Ps	x	Mt
3.5	3.81	0.00263	1	2800.00	10668	16.5	176022
11.75	2.54	0.00175	1	2800.00	7112	8.25	58674
20	2.54	0.00088	1	1848.00	4693.92	0	0
28.25	2.54	0	0	0.00	0	-8.25	0
36.5	3.81	-0.00088	-1	-1848.00	-7040.88	-16.5	116174.52
Concreto	12.00625				155089.725	7.99375	1239748.49
ϕ	0.62			Pn =	170,522.77	Mn =	1,590,619.01

c=	36.5		Ac=	1131.87			
di	Asi	e	sig	fs	Ps	x	Mt
3.5	3.81	0.00271	1	2800.00	10668	16.5	176022
11.75	2.54	0.00202	1	2800.00	7112	8.25	58674
20	2.54	0.00136	1	2800.00	7112	0	0
28.25	2.54	0.00068	1	1428.00	3627.12	-8.25	-29923.74
36.5	3.81	0	0	0.00	0	-16.5	0
Concreto	15.5125				202038.795	4.4875	906649.093
ϕ	0.56			Pn =	230,557.92	Mn =	1,111,421.35

Pn	Mn	f	Pu	Mu
-42,672.00	0	0.9	-38,404.80	0.00
-18,828.92	419,925.76	0.9	-16,946.02	377,933.18
37,226.84	1,182,802.17	0.9	33,504.16	1,064,521.95
99,861.83	1,609,588.63	0.73	72,899.13	1,174,999.70
144,276.13	1,681,776.62	0.65	93,779.48	1,093,154.80
170,522.77	1,590,619.01	0.65	110,839.80	1,033,902.36
230,557.92	1,111,421.35	0.65	149,862.64	722,423.88
290,008.74	0.00	0.65	188,505.68	0.00

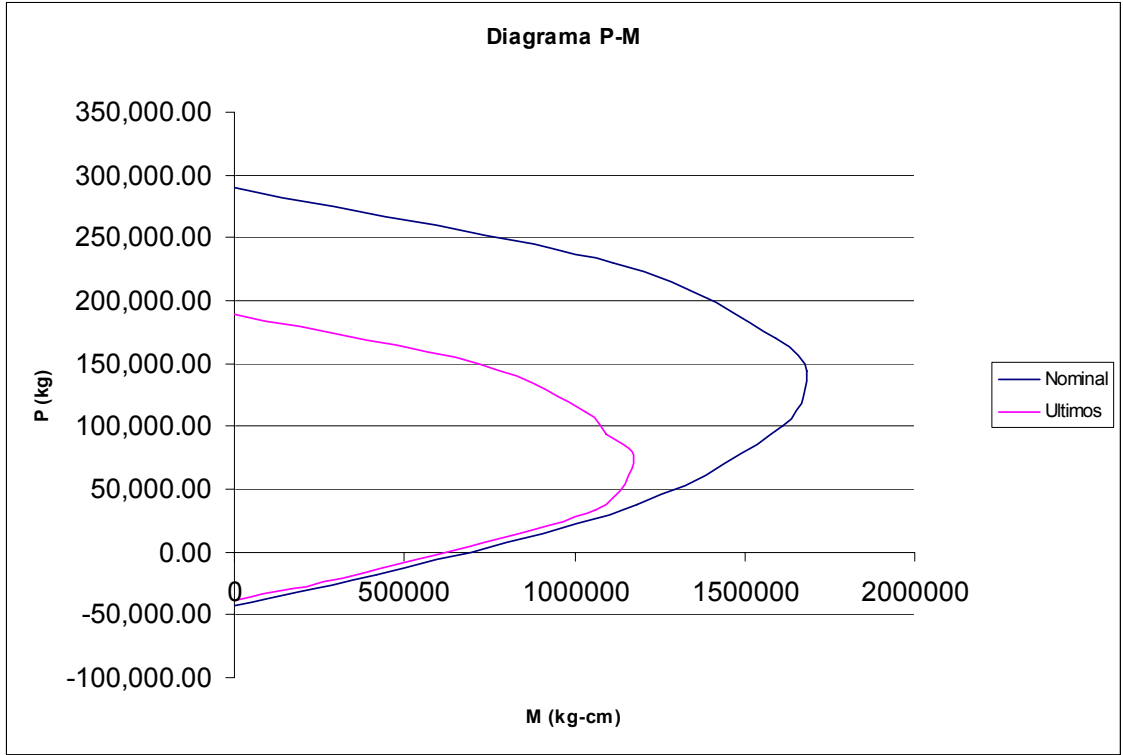


Figura 59. Diagrama de interacción para la columna hexagonal del ejemplo 3, obtenida con MS-Excel.

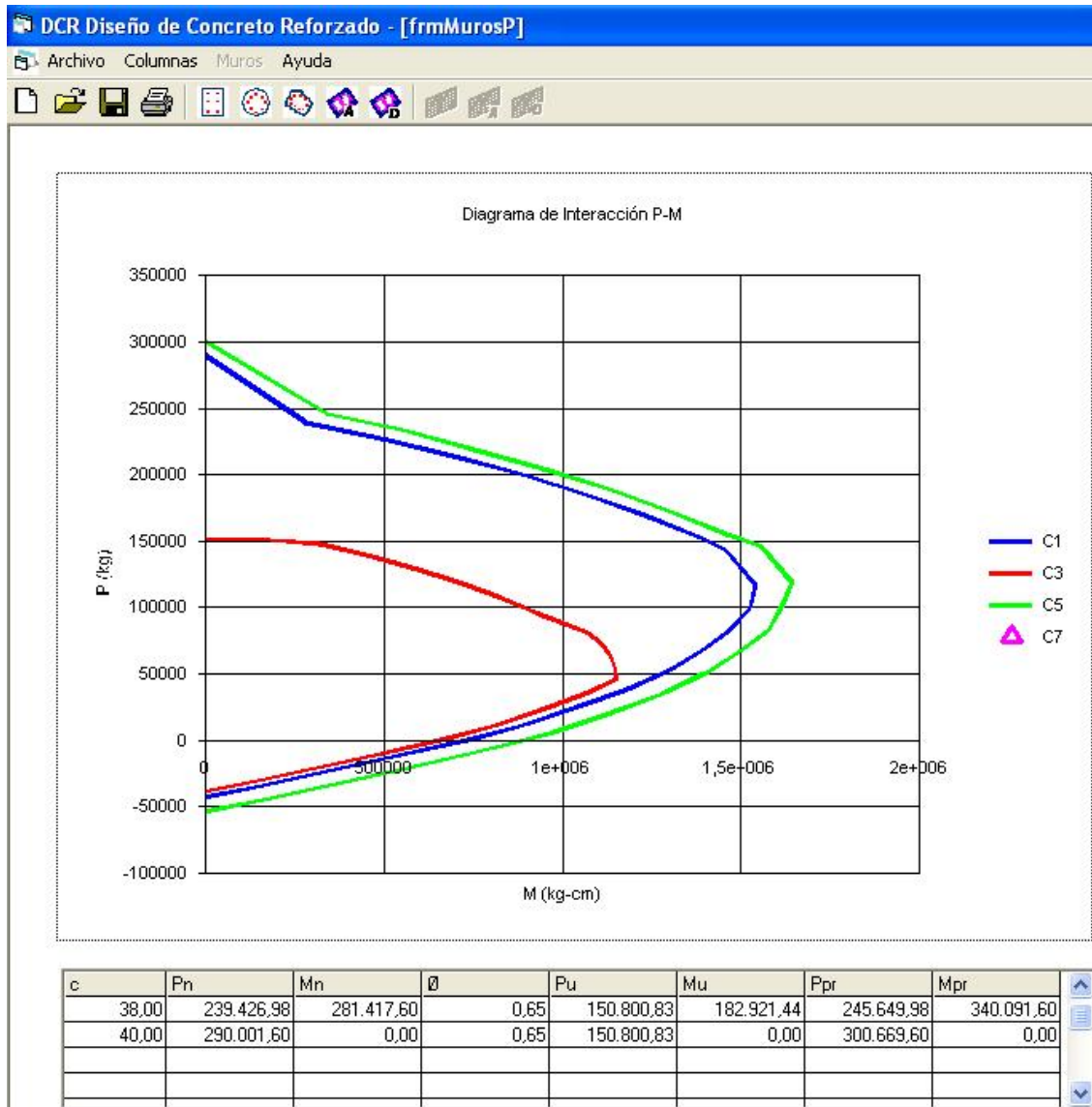


Figura 61. Diagrama de interacción para la columna hexagonal del ejemplo 3, obtenido con DCR.

Ejemplos 4: diseño por cortante de una columna

Según el esquema mostrado a continuación y los datos proporcionados, determinar la separación requerida de los aros en la columna (Tomado de ejemplo del curso del CSCR-2002, modulo de concreto estructural).

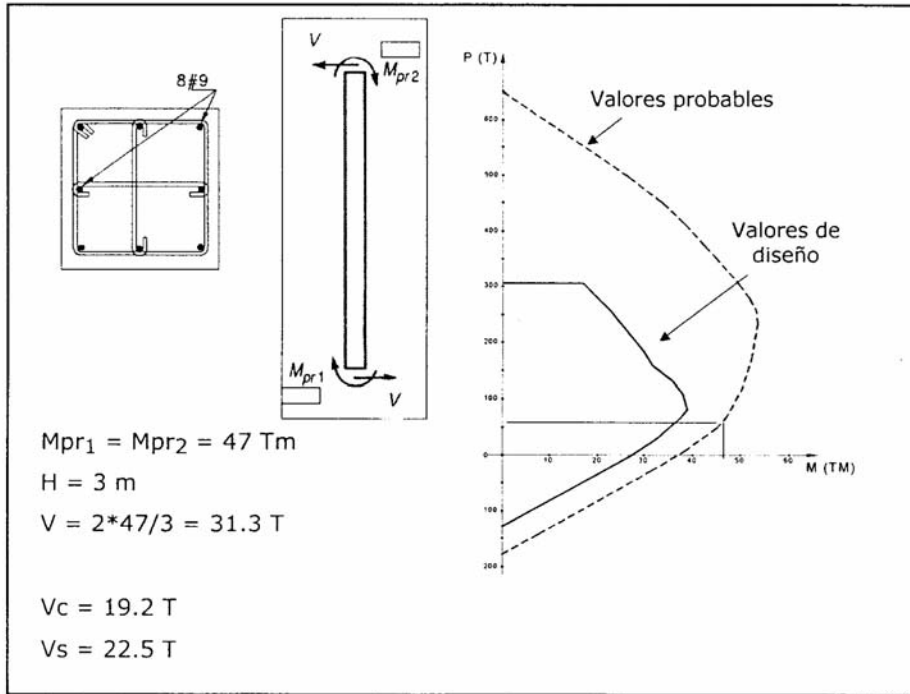


Figura 62. Datos generales para el diseño por cortante de la columna del ejemplo 4.

Datos:

- Suponiendo que de los diagramas de interacción, los momentos probables M_{pr1} y M_{pr2} son de 4700000 kg-cm
- Altura del elemento de 3m.
- Sección transversal de 50 cm x 50 cm.
- Resistencia del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$.
- Resistencia del acero $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$.

$$V_e = 2 \cdot 4.7 \times 106 = 31300 \text{ kg}$$

$$V_c = 0.53 \cdot 210^{0.5} \cdot 50 \cdot 50 = 19200 \text{ kg}$$

$$V_s = V_e - V_c = 31300 / 0.75 - 19200 = 22500 \text{ kg}$$

Suponiendo que los aros y el gancho son con varilla N°3, $A_{sh} = 2.14 \text{ cm}^2$

Por lo que la separación entre aros es de:

$$S = 2.14 \cdot 2800 \cdot 50 / 22500 = 13.31 \text{ cm.}$$

Seguidamente se muestra el resultado obtenido con DCR, el cual es prácticamente idéntico.

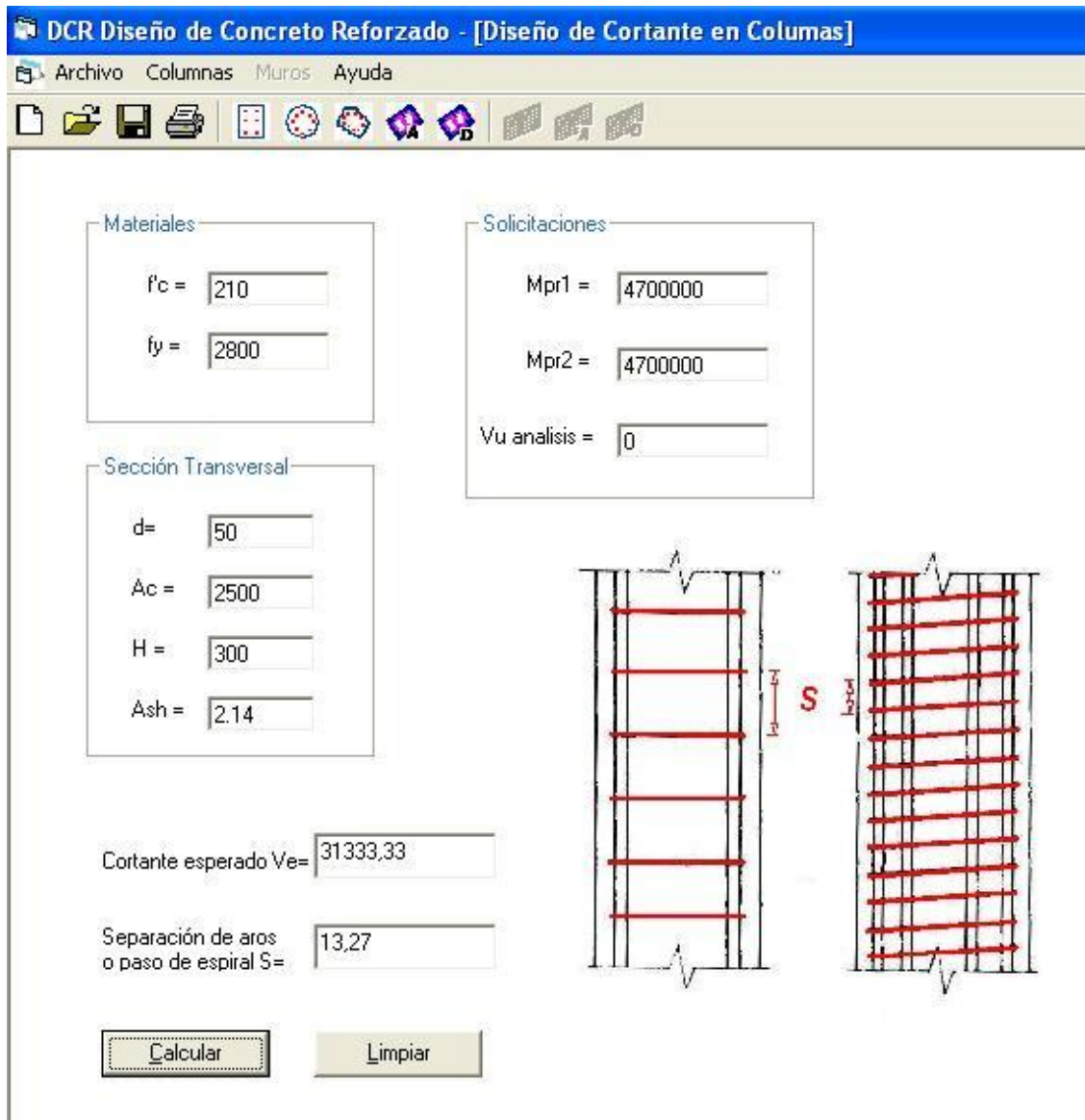


Figura 63. Resultados obtenidos con el software DCR, para el ejemplo 4.

Ejemplo 5: cálculo de amplificación de momentos en un marco arriostrado
 (Tomado de "Diseño de estructuras de concreto", Nilson, Arthur)
 Diseñar la columna C3 mostrada en la figura, según la información que se brinda

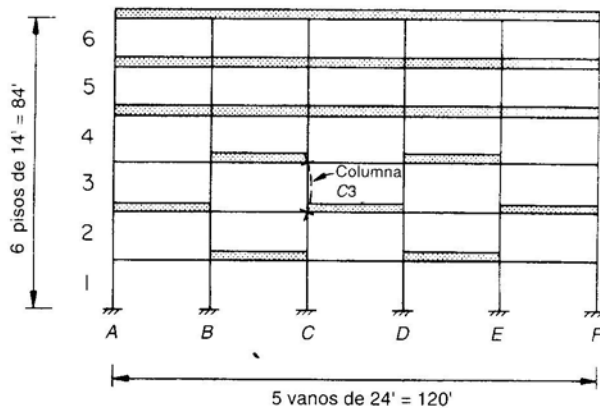


Figura 64. Esquema del marco para el cálculo de amplificación de momentos del ejemplo 5.

Características del marco:

- Altura de pisos $L_c = 4.25 \text{ m}$
- Vigas con altura $h = 30 \text{ cm}$ y ancho $b = 120 \text{ cm}$
- Columnas internas con sección de $45 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$
- Columnas externas con sección de $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$
- Altura libre (no soportada) de columnas $L_u = 3.95 \text{ m}$
- Resistencia del concreto $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$
- Resistencia del concreto $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

	CP	CT
$P_u \text{ (kg)}$	104500	78600
$M_1 \text{ (kg-cm)}$	-27700	1385000
$M_2 \text{ (kg-cm)}$	27700	1500000

Solución:

Utilizando la combinación de carga 2 del CSCR-2002

$$CU = 1.2 \text{ CP} + 1.6 \text{ CT}$$

$$P_u = 1.2*(104500) + 1.6*(78600) = 251160 \text{ kg}$$

$$M_u = 1.2*(27700) + 1.6*(1500000) = 2433240 \text{ kg-cm}$$

Calculo de esbeltez inicial $k*Lu/r$, suponiendo $k=1$

$$k*Lu/r = 395*(12)^{1/2}/45 = 30.4$$

Limite para tomar o no los efectos de esbeltez

$$34 - 12M_1/M_2 = 34 - 12*(1.2*-27700 + 1.6*1385000)/(1.2*27700 + 1.6*1500000) = 23.23$$

$30.4 > 23.23$, por lo que se deben considerar los efectos de esbeltez

Para este caso $\psi_A = \psi_B$

$$I_c = I_{gc} = 45^4/12 = 341.7 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$I_v = 0.5*I_{gv} = 0.5*30^3*120/12 = 135 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

Tanto al nudo A como al B llegan dos vigas y dos columnas, por lo que

$$\psi_A = \psi_B = (2*341.7 \times 10^3/425)/(2*135 \times 10^3/730) = 4.35$$

Utilizando las fórmulas del ACI, $k=1.14$, por lo tanto $k=1$ y por lo anterior se deben tener en cuenta los efectos de esbeltez

$$C_m = 0.6 + 0.4 \cdot (1.2 \cdot -27700 + 1.6 \cdot 1385000) / (1.2 \cdot 27700 + 1.6 \cdot 1500000) = 0.96$$

$$\beta_d = 1.2 \cdot 104500 / (1.2 \cdot 104500 + 1.6 \cdot 78600) = 0.5$$

$$EI = [0.4 \cdot 15000 \cdot (280)^{1/2} \cdot 45^4 / 12] / (1 + 0.5) = 2.28 \times 10^{10} \text{ kg-cm}^2$$

$$P_c = \pi^2 \cdot 2.28 \times 10^{10} / (1 \cdot 395)^2 = 1.44 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$\delta_{ns} = C_m / (1 - P_u / 0.75 P_c) = 0.96 / [1 - 251160 / (0.75 \cdot 1.44 \times 10^6)] = 1.25$$

Por lo tanto, para la segunda combinación de carga se tiene que:

$$P_u = 251160 \text{ kg}$$

$$M_u = 1.25 \cdot 2433240 = 30441550 \text{ kg-cm}$$

Ahora la siguiente figura muestra los resultados obtenidos con el programa

The screenshot shows the DCR software interface with the following data:

Materiales:
 $f_c = 210$
 $f_y = 2800$

Sección:
 $A = 2025$
 $I_g = 341700$
 $L_u = 395$

Relación de rigidez:
 $\psi_A = 4.35$
 $\psi_B = 4.35$

Factor de participación de Carga Temporal $\beta_1 = 0.5$

	CP	CT	CS	CE
P	104500	78600		
M1	-27700	1385000		
M2	27700	1500000		

P_u	M_u
146300.00	38780.00
251160.00	3183544.19
149025.00	897589.82
99275.00	26315.00

Buttons: **Calcular**, **Agregar**

Diagram: Shows a column with load P and moments M_A, M_B at ends A and B, with rotation angles ψ_A, ψ_B .

Equation:
$$\psi = \frac{\sum \frac{EI}{\ell_c} \text{ cols.}}{\sum \frac{EI}{\ell} \text{ vigas}}$$

Figura 65. Resultados de la amplificación de momentos con el programa DCR.

Ejemplo 6: cálculo de amplificación de momentos en un marco no arriostrado

(Tomado de "Diseño de estructuras de concreto", Nilson, Arthur)

Diseñar la columna C3 mostrada en la figura, según la información que se brinda.

Para esta caso se utilizará la combinación 3 del CSCR-2002.

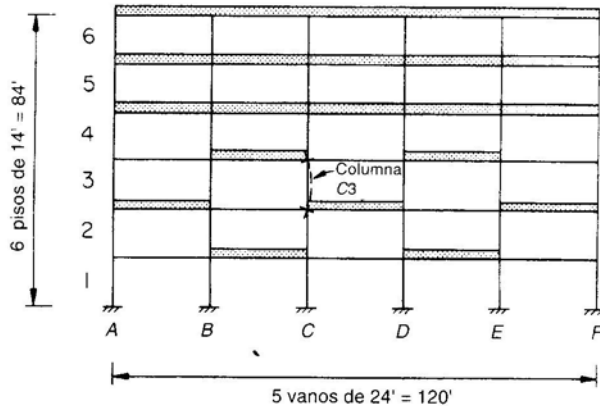


Figura 66. Esquema del marco para el cálculo de amplificación de momentos del ejemplo 6.

Características del marco:

- Altura de pisos $L_c = 4.25$ m
- Vigas con altura $h = 30$ cm y ancho $b = 120$ cm
- Columnas internas con sección de 45 cm x 45 cm
- Columnas externas con sección de 40 cm x 40 cm
- Altura libre (no soportada) de columnas $L_u = 3.95$ m
- Resistencia del concreto $f'_c = 280$ kg/cm²
- Resistencia del concreto $f_y = 4200$ kg/cm²
- La deriva del marco, producto del cortante de sismo es de 2.46 cm

	Columnas A3 y F3	Columnas B3 y E3	Columnas C3 y D3
Pcp (kg)	52300	104500	104500
Pct (kg)	40900	78600	78600
Pcs (kg)	±13600	±8200	±2700
Vcs (kg)	2500	5000	5000
M1cp (kg-cm)			-27700
M1ct (kg-cm)			1385000
M1cs (kg-cm)			970000
M2cp (kg-cm)			27700
M2ct (kg-cm)			1385000
M2cs (kg-cm)			1165000

Calculo de esbeltez inicial $k \cdot L_u / r$

$$k \cdot L_u / r = 395 \cdot (12)^{1/2} / 45 = 30.4$$

Para las columnas internas $\psi_A = \psi_B$

$$I_c = I_{gc} = 45^4 / 12 = 341.7 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$I_v = 0.5 \cdot I_{gv} = 0.5 \cdot 30^3 \cdot 120 / 12 = 135 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

Tanto al nudo A como al B llegan dos vigas y dos columnas, por lo que

$$\psi_A = \psi_B = (2 \cdot 341.7 \times 10^3 / 425) / (2 \cdot 135 \times 10^3 / 730) = 4.35$$

Utilizando las fórmulas del ACI, $k=2.08$

$k*Lu/r = 2.08*395*(12)^{1/2}/45 = 63.24 > 22$ por lo tanto se deben tomar en cuenta los efectos de esbeltez

$$C_m = 1$$

$$\beta_d = 0$$

$$EI = [0.4*15000*(280)^{1/2}*45^4/12]/(1) = 3.43 \times 10^{10} \text{ kg-cm}^2$$

$$P_c = \pi^2*2.28 \times 10^{10}/(2.08*395)^2 = 501.5 \times 10^3 \text{ kg}$$

Para las columnas externas $\psi_A = \psi_B$

$$I_c = I_{gc} = 40^4/12 = 213.3 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

$$I_v = 0.5*I_{gv} = 0.5*30^3*120/12 = 135 \times 10^3 \text{ cm}^4$$

Tanto al nudo A como al B llegan dos vigas y dos columnas, por lo que

$$\psi_A = \psi_B = (2*213.3 \times 10^3/425)/(2*135 \times 10^3/730) = 2.71$$

$$EI = [0.4*15000*(280)^{1/2}*40^4/12]/(1) = 2.14 \times 10^{10} \text{ kg-cm}^2$$

$$P_c = \pi^2*2.14 \times 10^{10}/(1.73*395)^2 = 452.3 \times 10^3 \text{ kg}$$

Ahora, la sumatoria de las cargas críticas es:

$$\Sigma P_c = 2*(452.3 \times 10^3) + 4*(501.5 \times 10^3) = 2.91 \times 10^6$$

Sumatoria de cargas gravitacionales: suponiendo que las cargas axiales debidas a sismo se cancela entre sí y suponiendo que el factor de participación de la carga temporal $f_1=0.5$; se tiene para la tercera combinación de carga:

$$P_u = 1.05 * 104500 + 0.5 * 78600 = 149025 \text{ kg (Columnas B3, C3, D3, E3)}$$

$$P_u = 1.05 * 52300 + 0.5 * 40900 = 753665 \text{ kg (Columnas A3, F3)}$$

$$\Sigma P_u = 2*(753665) + 4*(149025) = 746830 \text{ kg}$$

Por lo que el factor de amplificación de momento para esta combinación de carga es

$$\delta_s = 1/(1-\Sigma P_u/0.75\Sigma P_c) = 1/[1-746830/(0.75*2.91 \times 10^6)] = \mathbf{1.52}$$

$$M_2 = M_{2ns} + M_{2s}$$

$$M_{2ns} = 1.05*(27000)+0.5*(1385000) = 720850 \text{ kg-cm}$$

$$M_{2s} = 1.52*(1165000) = 1770800 \text{ kg-cm}$$

$$M_2 = 2491650 \text{ kg-cm}$$

Por lo tanto, para la segunda combinación de carga se tiene que:

$$\mathbf{P_u = 1.05*(104500) + 0.5*(78600) + 2700 = 151515 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{M_u = 1.25*2433240 = 30441550 \text{ kg-cm}}$$

Con los mismos datos indicados anteriormente, se muestran a continuación los resultados obtenidos por el programa DCR, utilizando el método de amplificación de momentos del ACI, y luego haciendo uso del factor de estabilidad.

DCR Diseño de Concreto Reforzado - [Columnas Esbeltas-Marcos No Arriostrados (Amplificación de Momentos)]

Archivo Columnas Muros Ayuda

Materiales

$f_c =$

$f_y =$

Sección

$A =$

$I_g =$

$L_u =$

Relación de Rigidez

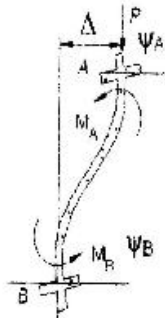
$\psi_A =$

$\psi_B =$

Otros Datos

$\sum P_c =$

$r_l =$



$$\psi = \frac{\sum \frac{EI}{l_c} \text{ cols.}}{\sum \frac{EI}{l} \text{ vigas}}$$

	P	M1	M2	Po Total
CP	104500	-27700	27700	522600
CT	78600	1385000	1385000	396200
CE				
CS	2700	970000	1165000	0

Pu	Mu
146,300.00	38,780.00
251,160.00	2,249,240.00
151,725.00	721,581.60
101,975.00	26,309.88

Figura 67. Resultados de la amplificación de momentos en un marco no arriostrado, utilizando el método de amplificación de momentos, con el programa DCR.

DCR Diseño de Concreto Reforzado - [Columnas Esbeltas-Marcos No Arriostrados (Índice de estabilidad)]

Archivo Columnas Muros Ayuda

Efectos de esbeltez en columnas de marcos no arriostrados utilizando el método del índice de estabilidad (Q)

Materiales

$f'_c =$ 210

$f_y =$ 2800

Sección

$A =$ 2025

$I_g =$ 341700

$L_u =$ 395

$L_c =$ 4255

Relación de Rigidez

$\Psi_A =$ 4.35

$\Psi_B =$ 4.35

$r1 =$ 0.5

$\Delta \alpha =$ 2.46

$$\Psi = \frac{\sum \frac{EI}{l_c} \text{ cols.}}{\sum \frac{EI}{l} \text{ vigas}}$$

	P	M1	M2	Suma Po	Vu
CP	104500	-27700	27700	522600	
CT	78600	1385000	1385000	396200	
CE					
CS	2700	970000	1165000	0	5000

Pu	Mu
146,300.00	38,780.00
251,160.00	2,249,240.00
151,725.00	1,99
101,975.00	1,262,266.22

Calcular combinaciones de carga y amplificación de momentos

Calcular Agregar Limpiar

Figura 68. Resultados de la amplificación de momentos en un marco no arriostrado, utilizando el índice de estabilidad, con el programa DCR.

Ejemplo 7: diseño de un muro estructural de concreto reforzado (Tomado del ACI)

Diseñar un muro de cortante que forma parte de un marco dúctil, con las siguientes características:

- Altura total: $h_w = 45\text{m}$ (4500 cm)
- Longitud: $L_w = 787.4$ cm
- Espesor: $t = 50.1$ cm
- Ancho del elemento de borde = 81.3 cm
- Longitud del elemento de borde = 127 cm
- Acero en el elemento de borde = 30 N° 11 (9.58 cm² c/u)
- Resistencia del concreto $f'_c = 280$ kg/cm²
- Resistencia del acero $f_y = 4200$ kg/cm²
- $P_u = 2.18 \times 10^6$ kg
- $M_u = 626 \times 10^6$ kg-cm

- P_u en elemento de borde = 2×10^6 kg
- $V_u = 402200$ kg

Solución:

$M/VL_w = 626 \times 106 / (402200 \times 4500) = 0.34 < 2$, por lo que se requiere un diseño conforme a los requisitos por cortante

Revisión de criterio para doble malla

$$0.5 * 40 \times 10^3 * (280)^{1/2} = 334664 \text{ kg} < 402200 \text{ kg}$$

Pero $t = 50.1 \text{ cm} > 20 \text{ cm}$, por lo que se requiere doble malla.

Cuantía mínima de acero $\rho = 0.0025$

Separación máxima $s = 45 \text{ cm}$

Area de acero mínima por metro de muro $A_s = 0.0025 * 100 * 50.1 = 12.5 \text{ cm}^2/\text{m}$

Usando barras N°5 con $A_{si} = 1.98 \text{ cm}^2$ $A_s = 2 * 1.98 = 3.96$

Espaciamiento requerido

$$S = A_s / \text{Area/metro} * 100 = 3.96 / 12.5 * 100 = 31.68 \text{ cm}$$

Por lo tanto, utilizando doble malla de barras N°5 @ 30 cm

$$\rho_n = 3.96 / (30 * 50.1) = 0.0026$$

Con este diseño se revisa la capacidad del muro en cortante:

$$h_w / L_w = 4500 / 787.4 = 5.7 > 2 \text{ por lo que } \alpha_c = 0.5$$

$$V_n = 40 \times 10^3 * [0.5 * (280)^{1/2} + 0.0026 * 4200]$$

$$V_n = 771464 \text{ kg}$$

$$V_u = 0.6 * 771464 = 462878 \text{ kg} > V_{u\text{req}} = 402200 \text{ kg}, \text{ por lo tanto el refuerzo es adecuado}$$

Ahora se muestra el resultado obtenido con el programa.

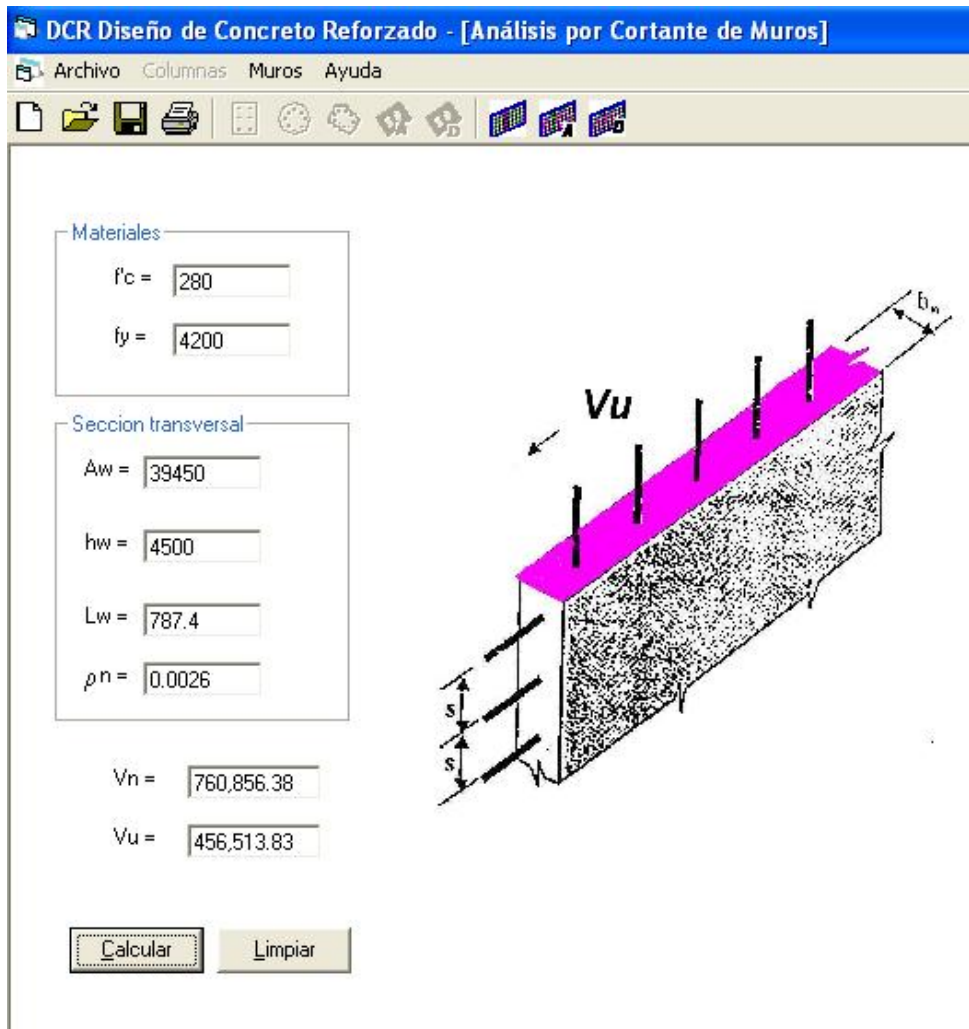
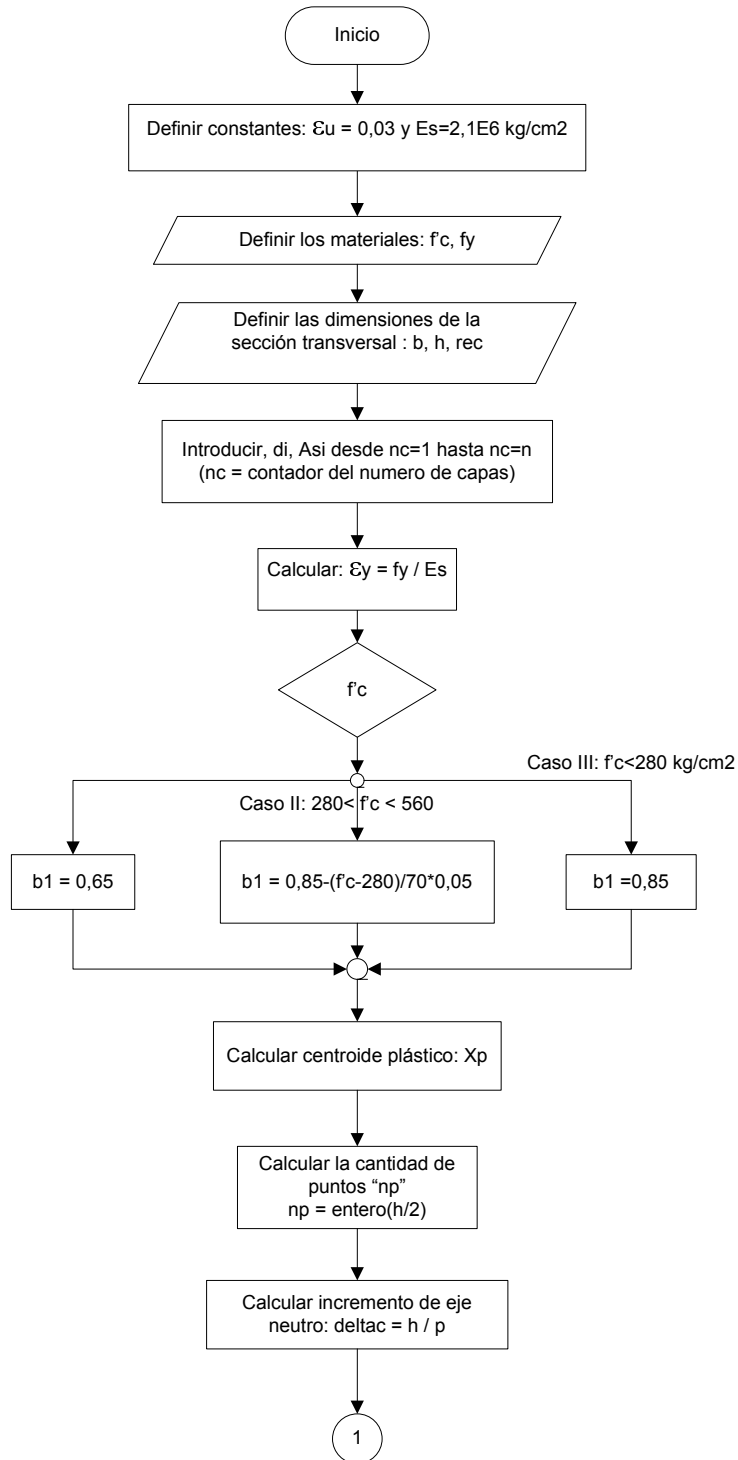


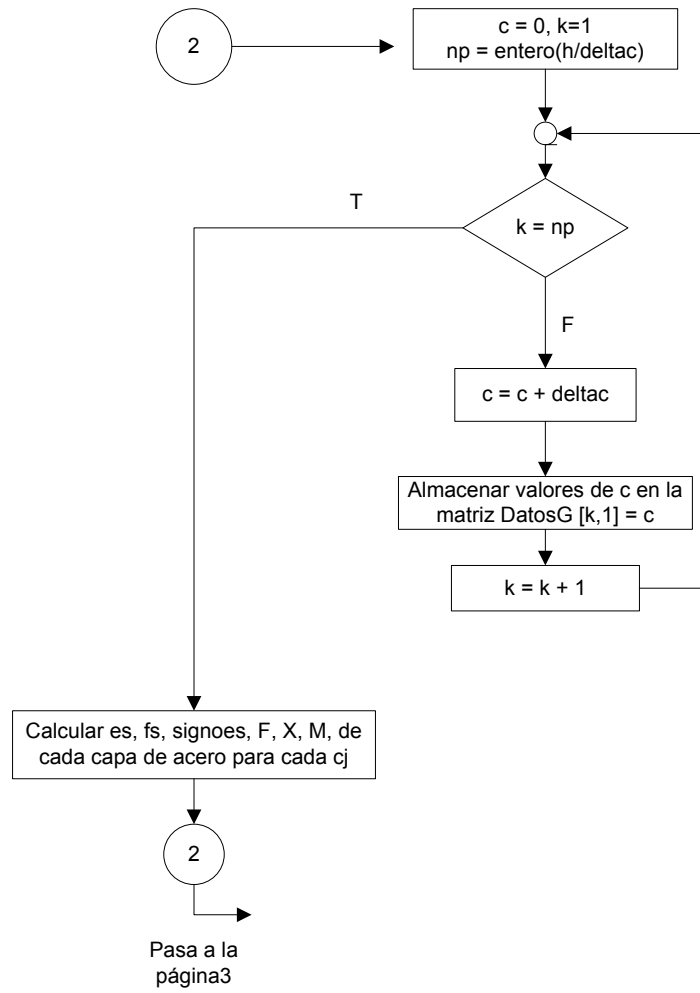
Figura 69. Resultados del análisis por cortante para el ejemplo 7, utilizando el programa DCR.

Anexos

En este apartado se presentan los diagramas de flujo para columnas rectangulares y para columnas circulares. Estos diagramas fueron elaborados con el fin de visualizar, de una forma más clara, los procedimientos que se deben seguir para construir los diagramas de interacción de carga axial versus momento de flexión (P-M). Los procedimientos para realizar los diagramas de interacción de columnas con otras formas poligonales y para los muros estructurales son similares.

**Diagrama de flujo para graficar diagramas de interacción P-M
Columnas Rectangulares**





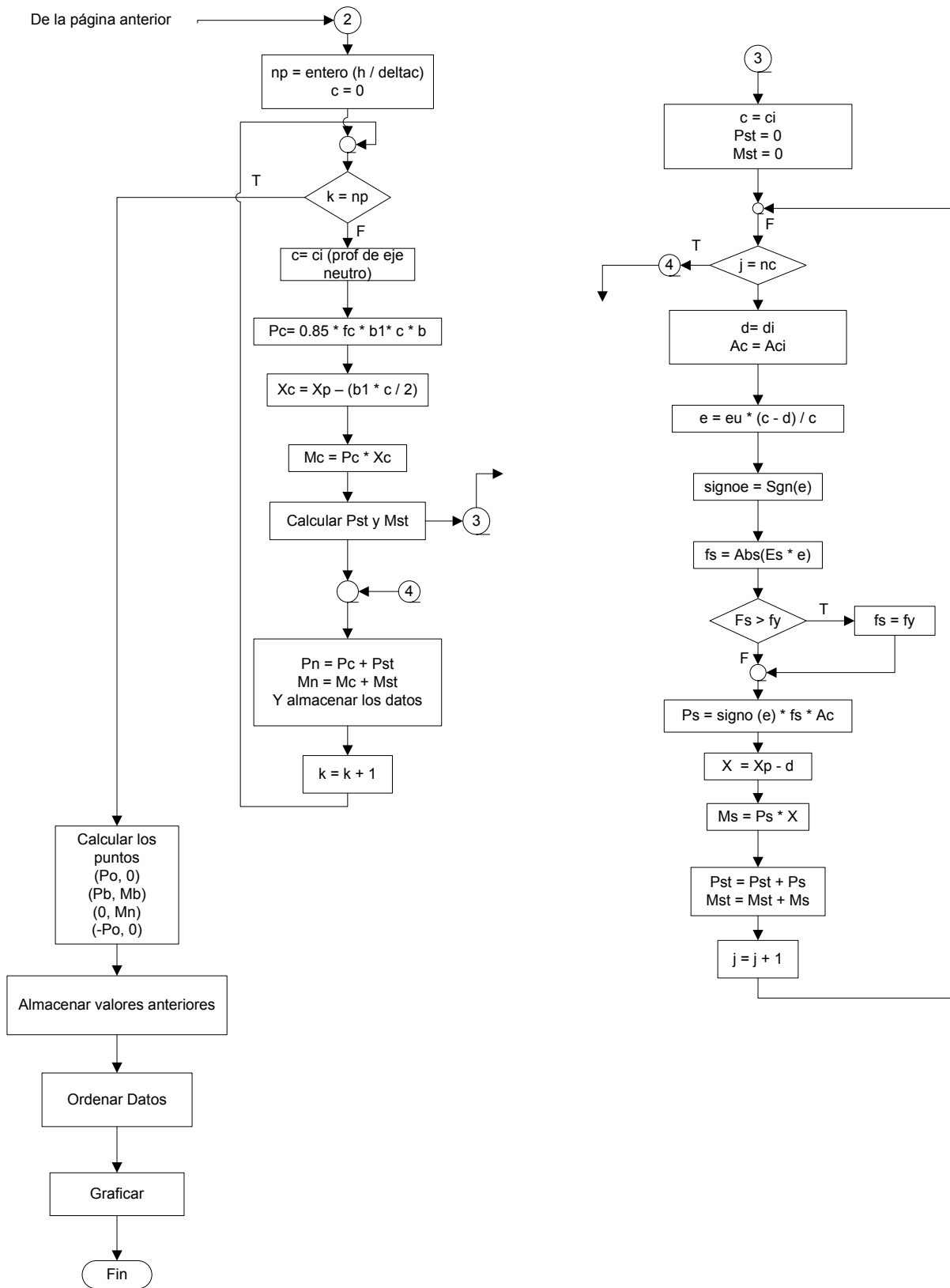
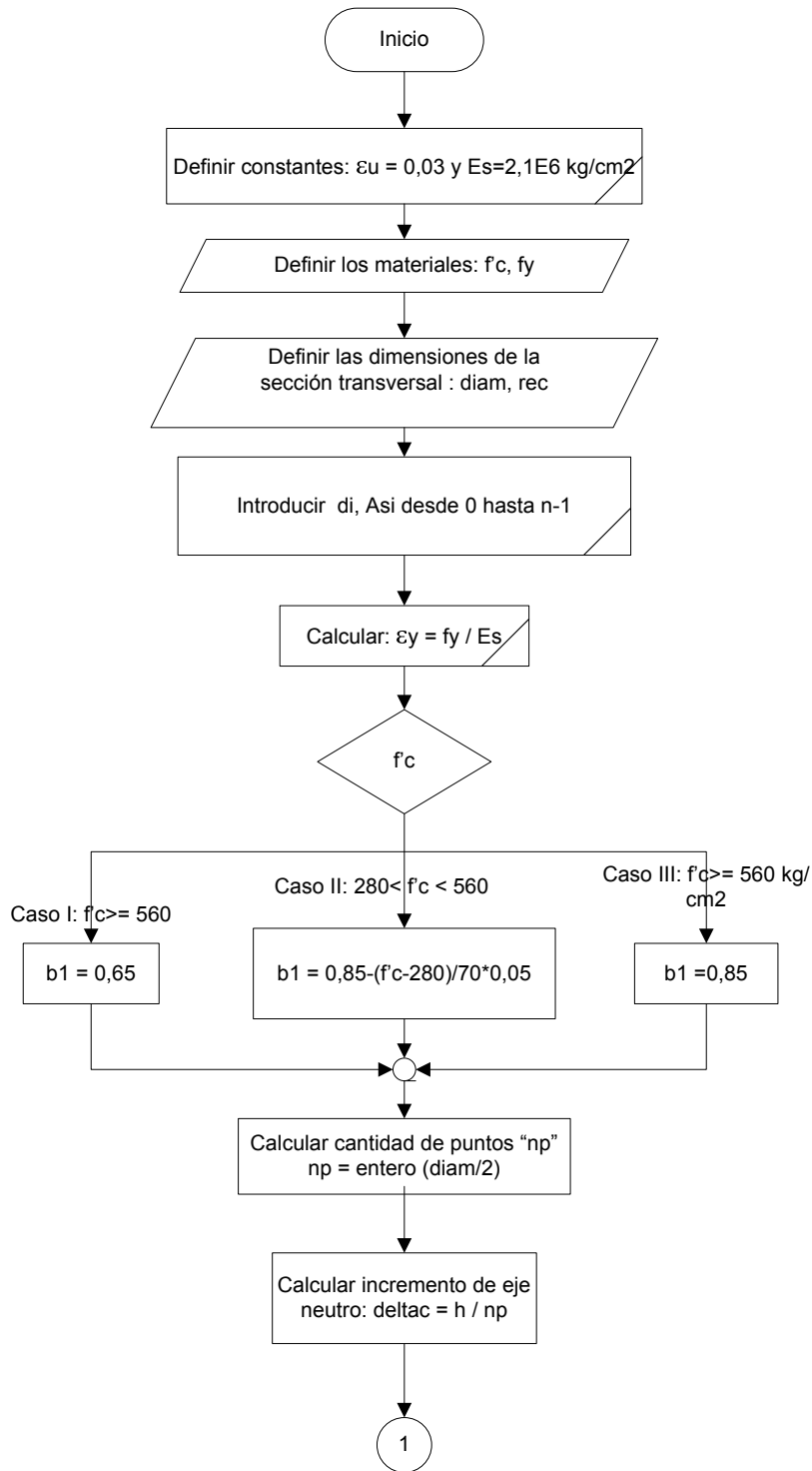
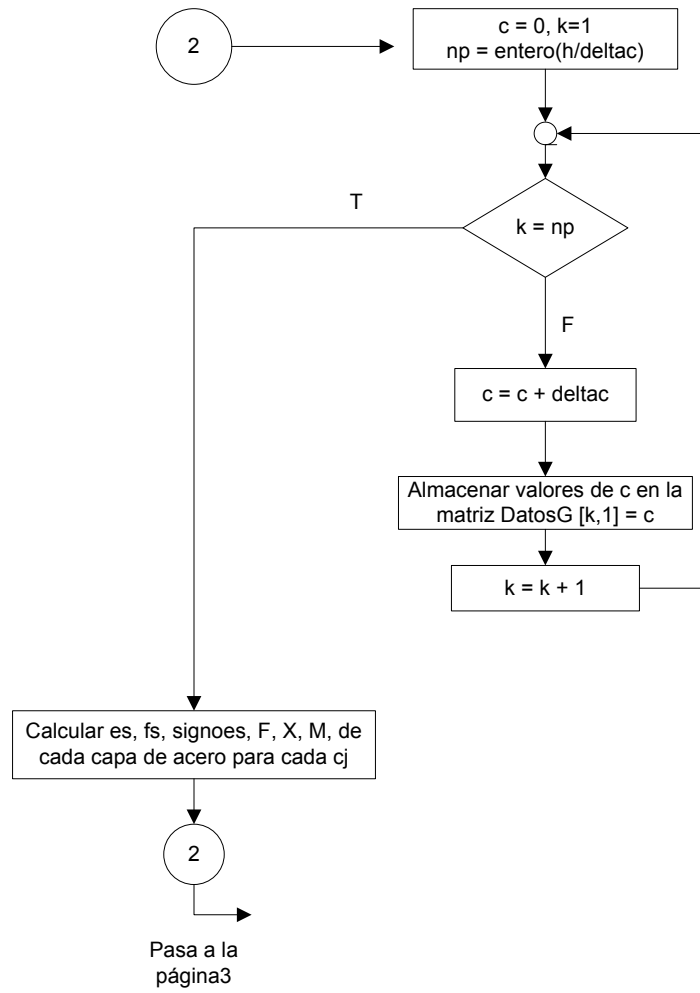
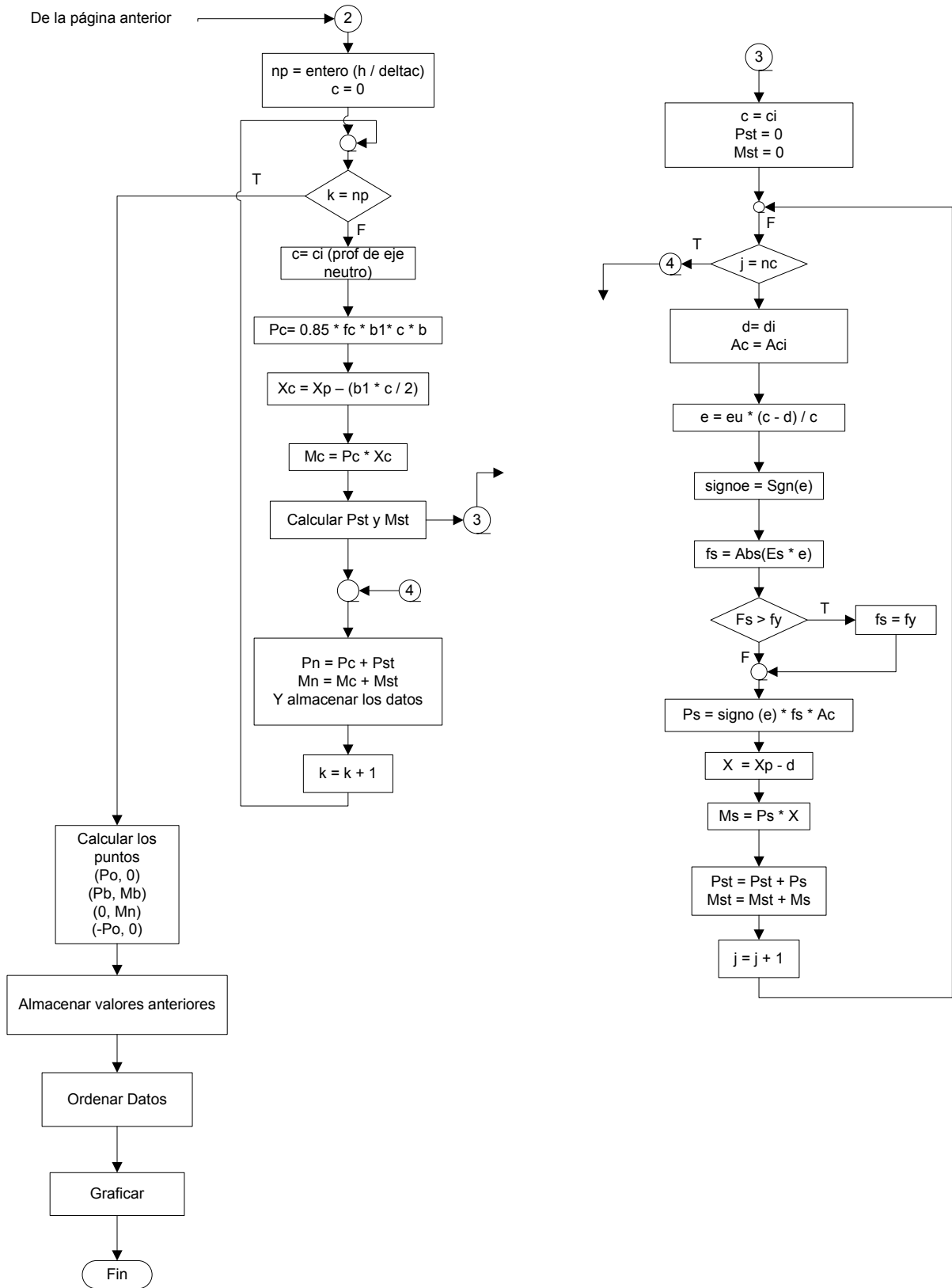


Diagrama de flujo para graficar diagramas de interacción P-M Columnas Circulares







Referencias

- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. 2003. **CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA 2002**. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- ACI International. 2002. **REQUISITOS ESENCIALES PARA EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO**. Colombia: International Publication Series.
- ACI International. 2002. **ACI 318-02 BUILDING CODE AND COMENTARY**. USA.
- Paulay, T. Presley, M. 1991. **SEISMIC DESIGN OF REINFORCED CONCRETE AND MANSORY BUILDINGS**. U.S.A: John Wiley & Sons, Inc.
- Nilson, A. 2001. **DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**. Colombia: Editorial Mc Graw Hill.
- Nawy, E. 1989. **CONCRETO REFORZADO: UN ENFOQUE BÁSICO**. México: Editorial Prentice- Hill Hispanoamericana, S.A.
- Park, R. Paulay, T. 1986. **ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO**. México: Editorial Limusa S.A. Beer, F. Russell, E. 1997. **MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS, ESTÁTICA**. México: Editorial Mc Graw-Hill Interamericana Editores S.A.
- Villón, Máximo. 1999. **DESARROLLO DE APLICACIONES CON VISUAL BASIC**. Costa Rica: Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Villón Bejar, Máximo. 2005. **TRABAJANDO CON VISUAL BASIC 6.0**. Costa Rica: Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Microsoft Press. 1998. **MICROSOFT VISUAL BASIC 6.0. MANUAL DEL PROGRAMADOR**. España: Mc Graw-Hill Interamericana de España S.A..
- Mata T, Ramón. Cushman, Pauline K. 2001. **INTRODUCCIÓN A LA PROGRAMACIÓN**. México: Mc Graw-Hill Interamericana Editores S.A.