



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

TRANSMISIÓN DE CARGAS EN LOSAS Y PUNTUALES DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DE MÚLTIPLES PLANTAS

Saulo López-Montalbán

Piura, julio de 2014

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

López, S. (2014). *Transmisión de cargas en losas y puntuales durante la construcción de edificios de múltiples plantas*. Tesis de pregrado no publicado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERIA



TRANSMISIÓN DE CARGAS EN LOSAS Y PUNTALES DURANTE LA
CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DE MÚLTIPLES PLANTAS.

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Saulo Yoel López Montalbán

Asesor: Dr. Danny Yong Ayón

Piura, Julio 2014

A Dios por todo lo bueno que me ha dado en esta vida, a mis padres por el gran esfuerzo realizado al apoyarme en mis estudios y darme su constante motivación.

Prólogo

En la construcción de un edificio de concreto armado, habitualmente se considera que las cargas de construcción no son mayores a las cargas características de servicio y cargas mayoradas establecidas en las normativas, que son las que normalmente se utilizan para el diseño de los edificios. Sin embargo, esto no siempre ocurre así, puesto que las losas pueden estar sometidas a cargas mayores durante el proceso de construcción que durante el uso normal del edificio. Además, en la mayoría de las obras, las cargas de construcción normalmente solicitan al concreto antes de que alcance la resistencia prevista a los 28 días.

Estas cargas prematuras toman cada vez más importancia debido a que existe actualmente una tendencia a acelerar el proceso de construcción de los edificios de concreto armado. Por lo tanto, debería comprobarse en cada etapa de la construcción que los elementos estructurales son capaces de resistir las cargas que actúan sobre la estructura.

En el presente trabajo se analizó la transmisión de cargas en losas y puntales durante el proceso constructivo de un edificio, trabajando con dos de los métodos más conocidos que entregan resultados más aproximados: El Método de Pórtico Equivalente (EFM) y el Método Simplificado Mejorado. Estos métodos se aplicaron a diferentes sistemas constructivos. Los resultados encontrados al final se compararon con los resultados del método recomendado por la guía de la norma ACI 347 2R-05.

Esta tesis no es más que el fruto del esfuerzo y dedicación de todos los años de estudio, que días tras día me ayudaron a desarrollarme y a ser mejor como profesional y como persona. No puedo desaprovechar la oportunidad para dar las gracias a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería, por motivarme siempre a ser cada día mejor y a conseguir todo lo que me proponga. Agradezco también a mis compañeros de clase y amigos, por alentarme a seguir adelante y continuar con este trabajo hoy logrado. Agradezco de forma especial al Dr. Ing. Danny Yong por su apoyo incondicional y gran parte de su tiempo dedicado al asesoramiento de esta tesis. Por último agradezco a las personas más importantes de mi vida, mi familia, en especial a mis padres por toda la ayuda y esfuerzo puesto en educación y formación, a su incansable sacrificio y preocupación; agradezco a Dios por su infinita sabiduría y haberme permitido tener todo lo que tengo, y que me siga guiando para continuar siendo buen profesional y un buen ser humano.

INDICE GENERAL

INDICE DE GENERAL	I
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	VII
Introducción.....	IX
Justificación.....	IX
Objetivos.....	X
Metodología.....	X
Capítulo 1.	1
Sistema de construcción.....	1
1.1. Proceso de construcción en la estructura.....	1
1.2. Sistemas constructivos.	5
1.3. Dos apuntalamientos (2S).....	6
1.4. Dos apuntalamientos y un reapuntalamiento (2S+1R).....	8
1.5. Dos apuntalamientos y dos reapuntalamientos (2S+2R).....	10
1.6. Dos apuntalamientos y tres reapuntalamientos (2S+3R).	12
Capítulo 2.	15
Modelos teóricos de la transmisión de cargas en losas y puntales	15
2.1. Método recomendado por la Norma ACI 347-2005	15
2.2. Método Simplificado [Grundy y Kabaila (1963)]......	15
2.3. Método Refinado [Liu et al. (1985)].	19
2.3.1. Modelo Bidimensional.....	19
2.3.2. Modelo Tridimensional.....	22
2.4. Método del Pórtico Equivalente-EFM [Stivaros y Halvorsen (1990)]......	23
2.5. Método Simplificado Mejorado [Duan y Chen (1995)]......	27
2.6. Comparación de los resultados obtenidos por los distintos autores.	29

Capítulo 3.	31
Cálculo de la transmisión de cargas usando el Método Simplificado Mejorado	31
3.1. Descripción del Método Simplificado Mejorado.....	31
3.2. Aplicación del Método Simplificado Mejorado en pórticos de un solo vano.....	31
3.2.1. Descripción del Método.....	31
3.2.2. Procesos de cálculo.....	35
3.2.3. Modelo estructural a analizar.....	36
3.2.4. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos (2S).....	38
3.2.5. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos y Un Reapuntalamiento (2S+1R).....	42
3.2.6. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos y Dos Reapuntalamientos (2S+2R).....	44
3.2.7. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos y Tres Reapuntalamientos (2S+3R).....	46
3.3. Discusión de resultados.....	48
Capítulo 4.	51
Obtención de nuevos resultados usando el Método de EFM y el programa SAP2000.	51
4.1. Descripción del modelo.....	51
4.2. Descripción del análisis secuencial por etapas “Staged construction”-SAP2000.....	53
4.3. Propiedades de los materiales utilizados en el modelo.....	55
4.4. Cálculo de las proporciones de carga en losas y puntales para uno, dos y tres vanos con cuatro sistemas constructivos.....	57
4.4.1. Proporciones de carga para Sistema Constructivo de Dos Apuntalamientos (2S).....	58
4.4.2. Proporciones de carga para el Sistema Constructivo de Dos apuntalamientos y Un Reapuntalamiento (2S+1R).....	63
4.4.3. Proporciones de carga para Sistema Constructivo de Dos Apuntalamientos y Dos Reapuntalamientos (2S+2R).....	67
4.4.4. Proporciones de carga para Sistema Constructivo de Dos Apuntalamientos y Tres Reapuntalamientos (2S+3R).....	71
4.5. Discusión de resultados.....	75
Capítulo 5.	77
Estudio comparativo entre los métodos estudiados	77
5.1. Comparación del Método EFM SAP2000 con la Norma ACI 347.....	77
5.2. Comparación del Método EFM SAP2000 con el Método Simplificado Mejorado.....	80
5.3. Resumen comparativo.....	83
Conclusiones y recomendaciones	85
Referencia bibliográfica	87
ANEXO A	89
Sistemas constructivos	89

ANEXO B.....	95
Tutorial de la herramienta “Staged construction” del SAP2000 V14.1	95

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Partes típicas de un puntal.....	2
Figura 1.2 Componentes de regulación de los puntales ULMA.....	3
Figura 1.3 Fases típicas de construcción para edificios de concreto armado según la ACI 347.	4
Figura 1.4 Sistema constructivo Dos apuntalamientos (2S).....	7
Figura 1.5 Sistema constructivo Dos apuntalamientos y un reapuntalamiento (2S+1R).	9
Figura 1.6 Sistema constructivo Dos apuntalamientos y dos reapuntalamientos (2S+2R). 11	
Figura 1.7 Sistema constructivo Dos apuntalamientos y tres reapuntalamientos (2S+3R). 13	
Figura 2.1 Operaciones de vaciado y desapuntalamiento según el Método Simplificado.	17
Figura 2.2 Distribución de cargas para el ciclo de dos plantas apuntaladas según el Método Simplificado. [Grundy y Kabaila (1963)]	17
Figura 2.3 Distribución de cargas para el ciclo de tres plantas apuntaladas según el Método Simplificado. [Grundy y Kabaila (1963)]	18
Figura 2.4 Distribución de cargas para el ciclo de dos plantas apuntaladas y una reapuntalada según el Método Simplificado. [Grundy y Kabaila (1963)].....	18
Figura 2.5 Modelo de cálculo bidimensional - Liu et al. (1985).	20
Figura 2.6 Modelo estructural del Método Refinado tridimensional - Liu et al. (1985).	23
Figura 2.7 Modelo típico de un edificio con varios vanos empleado para aplicar el EFM - Stivaros y Halvorsen (1990).	24
Figura 2.8 Planta típica de edificio con varios vanos empleada para aplicar el EFM - Stivaros y Halvorsen (1990).	25
Figura 2.9 Comparación de máximas proporciones de carga entre los métodos de análisis - Stivaros y Halvorsen (1990).	25
Figura 2.10 Proporción de carga máxima en losas para una planta apuntalada - Stivaros y Halvorsen (1990)	26
Figura 2.11 Proporción de carga máxima en losas para dos plantas apuntaladas - Stivaros y Halvorsen (1990)	27
Figura 2.12 Historia de carga en losa durante la construcción. [Duan y Chen (1995)].	29
Figura 3.1 Vaciado de una estructura típica de concreto.....	32
Figura 3.2 Coeficiente γ para losa biempotrada.	33
Figura 3.3 Transmisión de cargas en una operación de desapuntalamiento.....	34
Figura 3.4 Variación del modulo de elasticidad según el Código Euro Internacional (CEB-FIP-90).....	37
Figura 3.5 Historia de carga en losas. -2S	41

Figura 3.6 Historia de carga en losas. -2S+1R.....	42
Figura 3.7 Historia de carga en losas. -2S+2R.....	44
Figura 3.8 Historia de carga en losas. -2S+3R.....	46
Figura 3.9 Historia de carga de la losa del 1° Nivel.....	49
Figura 3.10 Historia de carga de la losa del 2° Nivel.....	50
Figura 3.11 Historia de carga de la losa del 3° Nivel.....	50
Figura 4.1 Idealización del modelo estructural en pórtico de tres vanos.....	52
Figura 4.2 Planta típica del modelo en pórtico de tres vanos.....	52
Figura 4.3 Modelo de losa recién vaciada.....	54
Figura 4.4 Modelo de pórtico de uno y tres vanos en SAP2000.....	55
Figura 4.5 Variación del modulo de elasticidad según el Código Euro Internacional (CEB-FIP-90).....	57
Figura 4.6 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo 2S.....	62
Figura 4.7 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo de 2S+1R.....	66
Figura 4.8 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo 2S+2R.....	70
Figura 4.9 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo 2S+3R.....	74
Figura 4.10 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas usando los cuatro sistemas constructivos con los tres modelos de pórtico.....	75
Figura 4.11 Gráfico de máximas proporciones de carga en las losas del 1° al 5° nivel (1 vano - 2S+1R).....	76
Figura 5.1 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 1° nivel (1 vano - 2S+1R).....	79
Figura 5.2 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 2° nivel (1 vano - 2S+1R).....	79
Figura 5.3 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 1° nivel (1 vano - 2S+1R).....	82
Figura 5.4 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 2° nivel (1 vano - 2S+1R).....	82
Figura 5.5 Gráfico de Comparación de máximas proporciones de carga en losas.....	84
Figura A.1 Sistema constructivo dos apuntalamientos (2S).....	91
Figura A.2 Sistema constructivo dos apuntalamientos y un reapuntalamiento (2S+1R)....	92
Figura A.3 Sistema constructivo dos apuntalamientos y dos reapuntalamientos (2S+2R). 93	
Figura A.4 Sistema constructivo dos apuntalamientos y tres reapuntalamientos (2S+3R). 94	
Figura B.1 Ventana de asignación de propiedades a los elementos – Frame Properties. . 100	
Figura B.2 Ventana Define Load Cases.....	100
Figura B.3 Ventana Load Case Data.....	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación de resultados entre el Método Simplificado y Método Refinado (bordes empotrados – 2S+1R) - Liu et al. (1985).	21
Tabla 2.2 Comparación de resultados entre el Método Simplificado y Método Refinado (bordes apoyados – 2S+1R) - Liu et al. (1985).....	21
Tabla 2.3 Comparación de proporciones máximas de carga (2S+1R) - Liu et al. (1985)...	22
Tabla 2.4 Resultados comparativos entre el Método Simplificado Mejorado, Método Simplificado y mediciones de campo de Agarwal y Gardner (1974) – (2S+1R).....	28
Tabla 2.5 Resultado de las máximas proporciones de carga en losas para un proceso constructivo 2S +1R.....	29
Tabla 2.6 Comparación entre los resultados obtenidos por los distintos métodos. Azkune (2007).....	30
Tabla 3.1 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S	40
Tabla 3.2 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S+1R	43
Tabla 3.3 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S+2R	45
Tabla 3.4 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S+3R.	47
Tabla 3.5 Máximas proporciones de carga en losas.	48
Tabla 3.6 Máxima proporción de carga en la losa del 2º nivel a los 14 días.....	48
Tabla 3.7 Máximas proporciones de carga en puntales.....	49
Tabla 4.1 Proporciones de carga en losas – 2S.....	59
Tabla 4.2 Proporciones de carga en puntales – 2S.	60
Tabla 4.3 Proporciones de carga en losas – 2S+1R.....	64
Tabla 4.4 Proporciones de carga en puntales – 2S+1R.	65
Tabla 4.5 Proporciones de carga en losas – 2S+2R.....	68
Tabla 4.6 Proporciones de carga en puntales – 2S+2R.	69
Tabla 4.7 Proporciones de carga en losas – 2S+3R.....	71
Tabla 4.8 Proporciones de carga en puntales – 2S+3R.	72
Tabla 5.1 Proporciones de carga en puntales y en losas, obtenidas con el Método EFM SAP2000 y el Método Simplificado para pórticos de 1 vano – 2S+1R.....	78
Tabla 5.2 Proporciones de carga en puntales y en losas, obtenidas con el Método EFM SAP2000 y el Método Simplificado Mejorado para pórticos de 1 vano – 2S+1R.	81
Tabla 5.3 Comparación de proporciones de cargas en losas con el sistema constructivo 2S+1R para pórticos de 1 vano.	83

Resumen

En la presente tesis se realizó un estudio del proceso de transmisión de cargas en losas y puntales durante la construcción de edificios de concreto armado de múltiples plantas. Para este estudio se tomó en cuenta la influencia del sistema constructivo que se elija y el número de vanos presentes en los pórticos. Los sistemas constructivos considerados son los de dos plantas apuntaladas y un número variable de plantas reapuntaladas. Asimismo se desarrollaron el Método Simplificado Mejorado y el Método de Pórtico Equivalente (EFM), este último con la ayuda del programa SAP2000. Los resultados de ambos métodos fueron comparados con los del Método Simplificado recomendado por la norma ACI 347-05. De esta comparación se concluye que los resultados del Método Simplificado Mejorado se ajustan bastante bien a los resultados del EFM; y en general ambos métodos brindan mayores valores de transmisión de cargas en losas a los calculados por el Método Simplificado. Se concluye además que a medida que se tiene más plantas reapuntaladas en los sistemas constructivos, se logra una disminución en los valores de transmisión de cargas en losas.

Introducción

Justificación

En los últimos años en nuestro país ha existido una gran demanda de construcción de edificios de múltiples plantas. Como ejemplo se puede mencionar la construcción, en la ciudad de Lima, del multifamiliar Golf Millenium (2009) que cuenta con un edificio de 28 pisos, el Hotel Westin Libertador (2010) de 30 pisos, actualmente considerado el más alto del Perú, y del futuro edificio RIMAC que superará en altura al Westin Libertador. Asimismo, en el mercado nacional existe una tendencia en el uso de paneles para encofrados y puntales de acero en la construcción de edificios, y empresas como ULMA, PERI, EFCO y muchas otras que son las que suministran esos accesorios.

Un tema de interés de los ingenieros proyectistas y de las empresas que suministran accesorios temporales para la construcción, es conocer la transmisión de cargas en losas y en puntales para determinar la cantidad de puntales a colocar en cada planta, elegir el sistema constructivo apropiado y reducir el tiempo de ejecución de la obra. Es preciso mencionar que una reducción en el tiempo de ejecución de un edificio conlleva muchas veces a someter al concreto de la losa, de edad prematura, a cargas que pueden superar su resistencia. Si los encofrados y los puntales son retirados antes de tiempo, se producen grandes deflexiones en la losa e incluso podría ocurrir el colapso total de la edificación por un efecto dominó al colapsar una o varias plantas. La mayoría de los colapsos durante la construcción de los edificios de concreto armado y de múltiples plantas se debe principalmente al retiro prematuro de los puntales.

El trabajo de esta tesis se centra en el estudio de la transmisión de cargas en losas y puntales en la construcción de edificios de concreto armado de múltiples plantas, considerando sistemas constructivos con plantas apuntaladas y reapuntaladas. Cabe indicar que el reapuntalamiento no es muy utilizado en nuestro país debido a la poca información que se tiene sobre su influencia en la transmisión de cargas, sin embargo estudios realizados en EEUU y Europa demostraron que el sistema de reapuntalamiento permite disminuir las cargas en las losas y en los puntales de los pisos inferiores, siendo éstos los más cargados en un sistema de apuntalamiento normal.

Objetivos

Estudiar el proceso de transmisión de cargas en losas y puntales durante la construcción de edificios de concreto armado de múltiples plantas, y determinar las magnitudes de dichas cargas. Este estudio se realizó tomando en cuenta la influencia del sistema constructivo que se elija y el número de vanos presentes en los pórticos de la edificación. La única carga que se consideró para este análisis fue el peso propio de la losa. Los sistemas constructivos considerados en este estudio fueron: dos plantas apuntaladas (2S), dos plantas apuntaladas y una planta reapuntalada (2S+1R), dos plantas apuntaladas y dos plantas reapuntaladas (2S+2R), y dos plantas apuntaladas y tres plantas reapuntaladas (2S+3R).

Metodología

Primero, se realizó un estudio de cada uno de los métodos propuestos por diferentes autores para estimar las cargas transmitidas a losas y puntales. De estos métodos, se eligieron dos de ellos: el Método Simplificado Mejorado por ser uno de los más simples y que no necesita un programa de elementos finitos para el desarrollo de la estructura del edificio, y el Método del Pórtico Equivalente (EFM) por tener consideraciones más reales en lo que se refiere a la estructura y al sistema de apuntalamiento. Para aplicar este último método, se empleó un programa de elementos finitos como el SAP2000, que cuenta con el módulo “Staged Construction” y que permite realizar un análisis estructural secuencial del proceso constructivo de un edificio. Con este método se encontraron resultados para pórticos de uno, dos y tres vanos.

Cabe indicar que el programa SAP2000 tiene incorporado la curva de maduración del concreto dada por la Norma CEB-FIP 90. Con esta curva, e ingresando al SAP2000 la edad del concreto correspondiente a cada etapa constructiva, se puede obtener el valor del módulo de elasticidad del concreto para cada elemento estructural. Con este valor, el programa calcula la resistencia y las deformaciones en losas y columnas.

Para cada uno de los métodos seleccionados, se analizaron los cuatro sistemas constructivos mencionados en el objetivo de la tesis, y se encontraron las proporciones de cargas en las losas y puntales de cada piso tomando en cuenta las etapas del proceso constructivo. La proporción de carga en la losa o en los puntales es la relación entre la carga actuante en la losa o en los puntales y el peso propio de la losa de cada nivel.

Los resultados que se obtuvieron en este estudio, se presentan en tablas y gráficos que permiten apreciar la variación de las proporciones de carga en cada sistema constructivo y la influencia del reapuntalamiento y del número de vanos que tienen los pórticos de la edificación. Por último, en la medida de lo posible, se cotejaron estos resultados con los de la Norma ACI 347 para advertir algunas discrepancias, y aplicar algunas medidas correctivas.

Capítulo 1.

Sistema de construcción

1.1. Proceso de construcción en la estructura

Durante la construcción de los diversos elementos de un edificio de concreto armado, los pisos recién vaciados son soportados temporalmente por pisos inferiores a través de un conjunto de elementos constituido por encofrado, puntales y repuntales requeridos. Este conjunto que sirve de apoyo a las losas, se denomina sistema de apuntalamiento.

A continuación se presentan algunas definiciones importantes que se emplearán en el desarrollo de la presente tesis:

Encofrado: Superficies horizontales metálicas o de madera sobre las cuales se coloca directamente el concreto. Sirven para moldear los elementos estructurales, conformando el edificio de la forma especificada en el proyecto. (ACI 318 -2005).

Puntales: Elementos de apoyo verticales o inclinados, diseñados para soportar el peso de los encofrados, peso del concreto y las cargas de construcción actuando sobre ellos. (ACI 318-2005).

Repuntales (Puntales de reapuntalamiento): Puntales colocados ajustadamente bajo una losa de concreto u otro elemento estructural, después de que los encofrados y puntales originales hayan sido retirados de un área extensa. El propósito de que se retire los encofrados y puntales es lograr que la nueva losa o elemento estructural se deforme, cargue su propio peso y soporte las cargas de construcción existentes antes de la instalación de los repuntales.

Desencofrado de losas: Retiro del encofrado del fondo de las losas.

Desapuntalado: retiro de los puntales que soportan temporalmente una losa.

Proporciones de carga (k): Son factores que expresan una relación entre las cargas de construcción en las losas o en los puntales y el peso propio de la losa, se define como:

$$k = \frac{\text{Carga actuante en la losa (o puntales)}}{\text{Peso propio de la losa}} \quad (1.1)$$

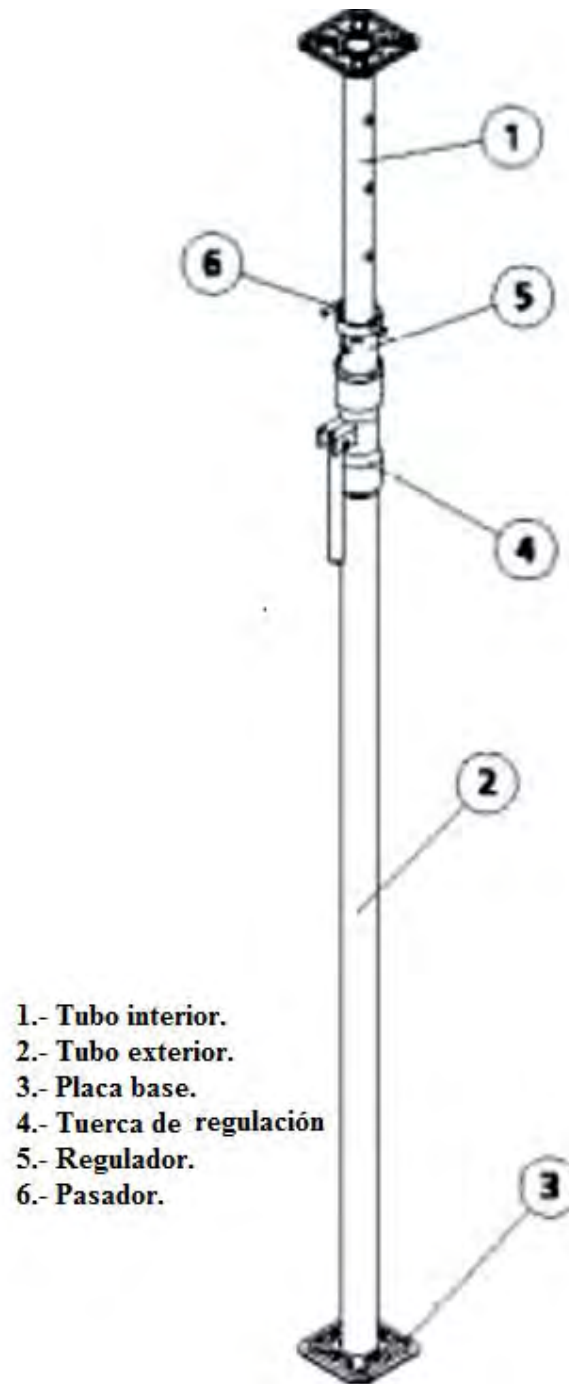


Figura 1.1 Partes típicas de un puntal.



Figura 1.2 Componentes de regulación de los puntales ULMA

Los puntales en su gran mayoría son elementos telescópicos, que como se observa en la Figura 1.1 y Figura 1.2 están conformados por un tubo interior y un tubo exterior, unidos a un regulador y fijados por una tuerca permitiendo un ajuste rápido de los mismos. El regulador permite la utilización de los puntales a diferentes alturas. En el mercado hay diferentes marcas y tipos, pero la función del puntal es la misma, es decir ser un elemento capaz de transmitir las cargas de la losa a construir hacia los pisos inferiores, y que sea regulable a las diferentes alturas que se le requiere.

Las cargas en las losas de concreto son impuestas durante el período de construcción a través de una secuencia repetitiva de operaciones. Generalmente un ciclo típico de construcción, para el vaciado de una losa en un edificio de múltiples plantas, se hace en cuatro fases, en un proceso que puede tener un número variado de niveles de apuntalamiento y reapuntalamiento. Estas operaciones, indicadas en la Figura 1.3 están constituidas por:

- Fase 1: Instalación de los puntales y encofrados, seguidos por el vaciado de la losa.
- Fase 2: Eliminación de los puntales y el encofrado, permitiendo que la losa se deforme y resista su peso propio.
- Fase 3: Eliminación de los repuntales del piso más bajo apuntalado.
- Fase 4: Colocar repuntales en el nivel donde se retiraron los puntales. Los repuntales se colocan cómodamente sin llevar carga alguna.

Si se utiliza un sistema con apuntalamiento y ningún reapuntalamiento, las Fases 3 y 4 no se toman en cuenta. Según el comité ACI 347, los repuntales deben instalarse cómodamente debajo de la losa, de modo que son relativamente libres de carga durante la instalación. Este procedimiento permite la deflexión de la losa bajo su propio peso.

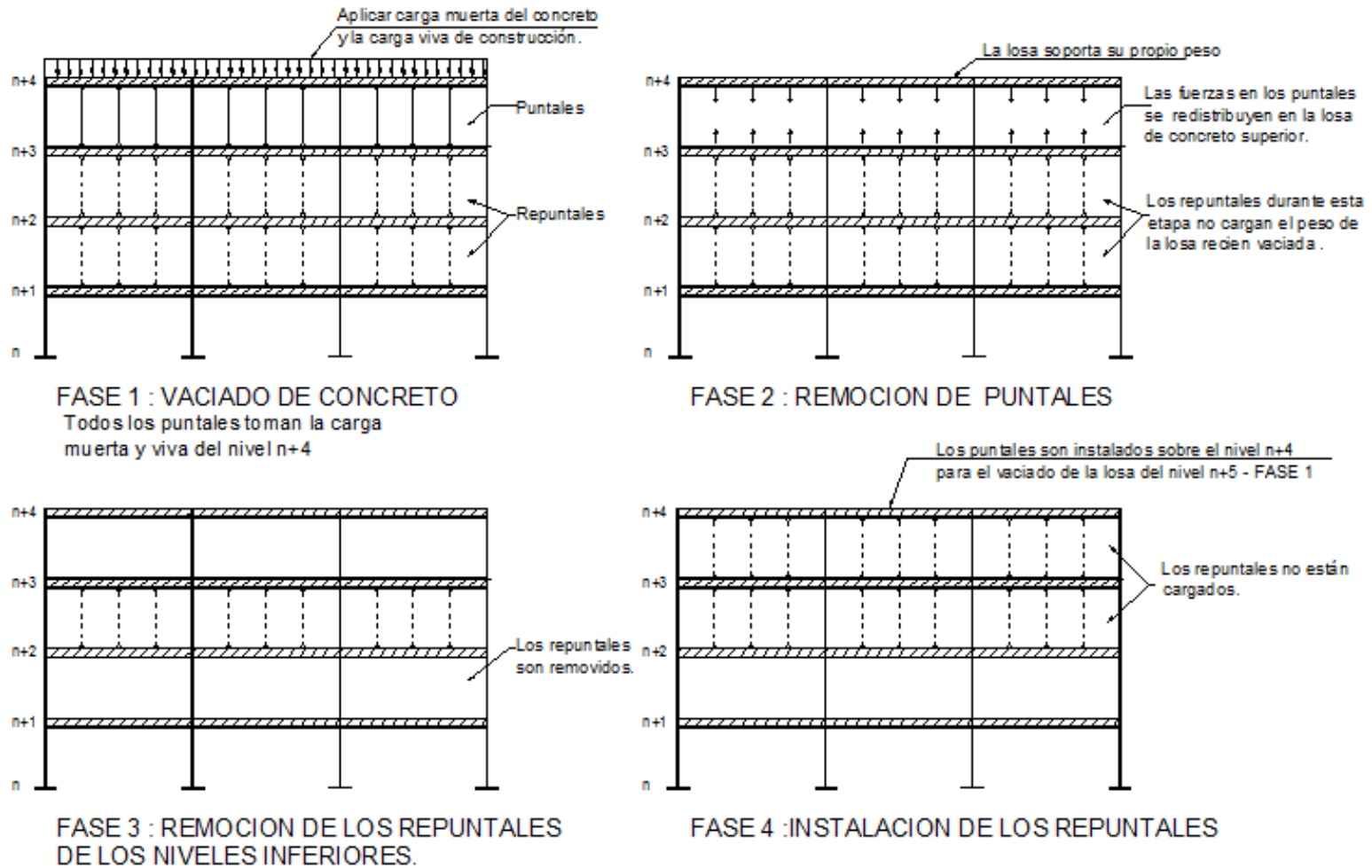


Figura 1.3 Fases típicas de construcción para edificios de concreto armado según la ACI 347.

Como se puede apreciar en la Figura 1.3, la FASE 1 consiste en el vaciado del piso (n+4) produciendo una transmisión de cargas a los pisos inferiores de la carga muerta y la carga viva de construcción a través del sistema de apuntalamiento y reapuntalamiento. En la FASE 2 la losa se encuentra endurecida y no hay carga viva de construcción. En esta fase se procede a remover los puntales que están sobre el piso (n+3) originando que las cargas de ese piso se distribuyan a la losa del piso superior. En la FASE 3 se realiza la remoción de los repuntales que están sobre el piso (n+1) y la carga de los repuntales es redistribuida en las losas superiores. En la FASE 4 se instalarán los repuntales sobre el piso (n+3), y posteriormente se instalarán los puntales sobre el piso (n+4) para realizar el vaciado de la losa del nivel (n+5).

Entre la FASE 3 y la FASE 4, el edificio no sufre alteración en la distribución de cargas puesto que se asume que durante la instalación de los repuntales, éstos están libres de carga. El ejemplo de la ACI 347 mostrado es para un sistema de un nivel de apuntalamiento y dos niveles de reapuntalamiento. Para decidir cuántos niveles de reapuntalamiento requiere un proyecto de edificación se debe realizar un análisis del edificio variando el número de niveles apuntalados y reapuntalados, y definir qué sistema constructivo es mejor para dicho edificio evaluando las variables tiempo, costo y seguridad.

1.2. Sistemas constructivos.

Antes de presentar los sistemas constructivos, se dan algunas definiciones de las actividades que se realizan durante la ejecución de un edificio de múltiples plantas:

- *Apuntalado + encofrado*: Estado que corresponde al tiempo anterior al fraguado del concreto. El concreto es vaciado sobre el encofrado, y dicho encofrado no se retiran hasta que el concreto haya fraguado. El encofrado a su vez se encuentra apoyado sobre el apuntalamiento.
- *Apuntalado*: Recuperado el encofrado, la planta vaciada se mantiene apuntalada hasta que pase un número de días. En esta situación el concreto aún no es lo suficientemente resistente.
- *Desapuntalado total*: Fase de recuperación de los puntales para volver a hacer uso de ellos en la planta superior. Esta recuperación se realiza en un número determinado de días tras el vaciado, una vez que el concreto haya desarrollado una resistencia suficiente.
- *Reapuntalado*: La técnica del reapuntalado consiste en retirar el apuntalamiento de toda una planta permitiendo así la deformación de la losa por su propio peso y a continuación, colocar de nuevo el apuntalamiento. Mediante el empleo de esta técnica se reducen considerablemente las solicitaciones en el apuntalamiento.
- *Desapuntalado parcial*: El desapuntalado parcial consiste en la retirada de una parte de los puntales en una fase anterior al desapuntalado total. Se suele emplear cuando se requieren puntales para el apuntalamiento de la planta superior, pero la losa inferior aún no es capaz de resistir los esfuerzos que supondría su desapuntalado total. El

desapuntalado parcial puede realizarse de distintas maneras en función del porcentaje de puntales a eliminar.

- *Preapuntalado*: El preapuntalado podría definirse como un reapuntalado controlado. En esta operación se retiran parte de los puntales dejando el resto en su sitio, situación en la que la losa empieza a trabajar y se deforma. Una vez deformado la losa en esta fase inicial, los puntales retirados se vuelven a colocar en su sitio y se procede a la retirada del resto de puntales de la planta. Finalmente, deformada nuevamente la losa, los puntales retirados en esta última fase vuelven a colocarse en su sitio. Con el preapuntalado se consigue que la losa joven no tenga que resistir todo su peso, como ocurre en el caso del reapuntalado. Sin embargo, los puntales en esta fase de obra están más cargados que en el reapuntalado.

Combinando este tipo de operaciones se selecciona un sistema constructivo que proporcione una adecuada transmisión de cargas entre losas y puntales. En el presente estudio sólo se trabajará con las operaciones de apuntalado, desapuntalado total y reapuntalado.

El proceso constructivo seleccionado para la ejecución de un edificio será válido si todos los elementos del edificio de concreto, son capaces de resistir los esfuerzos a los que serán sometidos durante las diferentes etapas de su construcción. Una vez diseñado la estructura de concreto, debe buscarse un proceso constructivo seguro y lo más económico posible.

Los sistemas constructivos que se trabajarán en este estudio son los siguientes:

Dos apuntalamientos (2S).

Dos apuntalamientos y un reapuntalamientos (2S+1R).

Dos apuntalamientos y dos reapuntalamientos (2S+2R).

Dos apuntalamientos y tres reapuntalamientos (2S+3R).

Para el desarrollo de estos sistemas constructivos sólo se considera el peso propio de la losa de los pisos, obviando el peso del encofrado y carga viva.

1.3. Dos apuntalamientos (2S).

En la Figura 1.4 se muestra la secuencia de pasos a seguir para desarrollar este sistema constructivo.

Paso 1: Levantar el encofrado y puntales de la losa del primer nivel, y luego vaciar el concreto fresco para la losa de ese nivel. Toda la carga es transmitida por los puntales al terreno. Al final de esta operación, el total del peso de la losa es distribuido en todos los puntales.

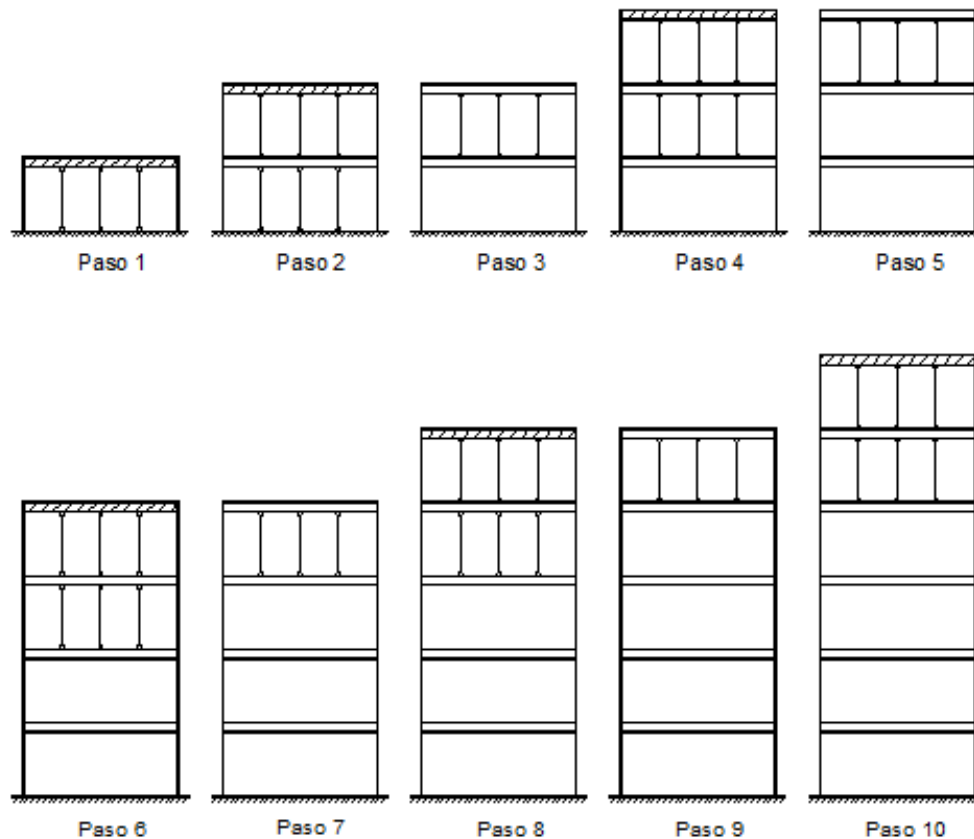
Paso 2: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del primer nivel y vaciar el concreto para la losa del segundo nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales.

Paso 3: Retirar los puntales del primer nivel después de que el concreto de la losa del segundo nivel endurezca.

Paso 4: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del segundo nivel y vaciar el concreto para la losa del tercer nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Paso 5: Retirar los puntales del segundo nivel después de que el concreto de la losa del tercer nivel endurezca.

En el resto de pasos se repiten los pasos anteriores, se vacía la losa del nivel que continua como se indica en el Paso 1 y luego se desapuntala la losa del nivel anterior después de que la losa haya endurecido; así sucesivamente hasta llegar al último nivel que se desea construir.



LEYENDA:



Figura 1.4 Sistema constructivo Dos apuntalamientos (2S).

1.4. Dos apuntalamientos y un reapuntalamiento (2S+1R).

En la Figura 1.5 se muestra la secuencia de pasos a seguir para desarrollar este sistema constructivo:

Paso 1: Levantar el encofrado y puntales de la losa del primer nivel, y luego vaciar el concreto fresco para la losa de ese nivel. Toda la carga es transmitida por los puntales al terreno. Al final de esta operación, el total del peso de la losa es distribuido en todos los puntales.

Paso 2: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del primer nivel y vaciar el concreto para la losa del segundo nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales.

Paso 3: Retirar los puntales del primer nivel después de que el concreto de la losa del segundo nivel endurezca.

Paso 4: Reapuntalar el primer nivel después de que la losa haya deformado y soporte su propio peso.

Paso 5: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del segundo nivel y vaciar el concreto para la losa del tercer nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales. Como se puede apreciar en la Figura 1.5, con este paso se obtiene la configuración de 2 apuntalamientos y 1 reapuntalamiento.

Paso 6: Retirar los repuntales de la losa del primer nivel después de que el concreto de la losa del tercer nivel endurezca.

Paso 7: Retirar los puntales de la losa del segundo nivel.

Paso 8: Colocar repuntales debajo de la losa del segundo nivel.

Paso 9: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del tercer nivel y vaciar el concreto para la losa del cuarto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Paso 10: Retirar los repuntales de la losa del segundo nivel cuando la losa del cuarto nivel haya endurecido.

Paso 11: Retirar los puntales de la losa del tercer nivel.

Paso 12: Colocar repuntales debajo de la losa del tercer nivel.

Paso 13: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del cuarto nivel y vaciar el concreto para la losa del quinto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Los pasos siguientes son repetitivos y similares al Paso 6 en adelante, es decir se desapuntala el nivel reapuntalado cuando la última losa vaciada haya endurecido, el siguiente paso es desapuntalar el penúltimo nivel apuntalado, luego se reapuntala el nivel

que se desapuntaló para finalmente apuntalar y vaciar la siguiente losa, así sucesivamente hasta llegar el último nivel que se desea construir.

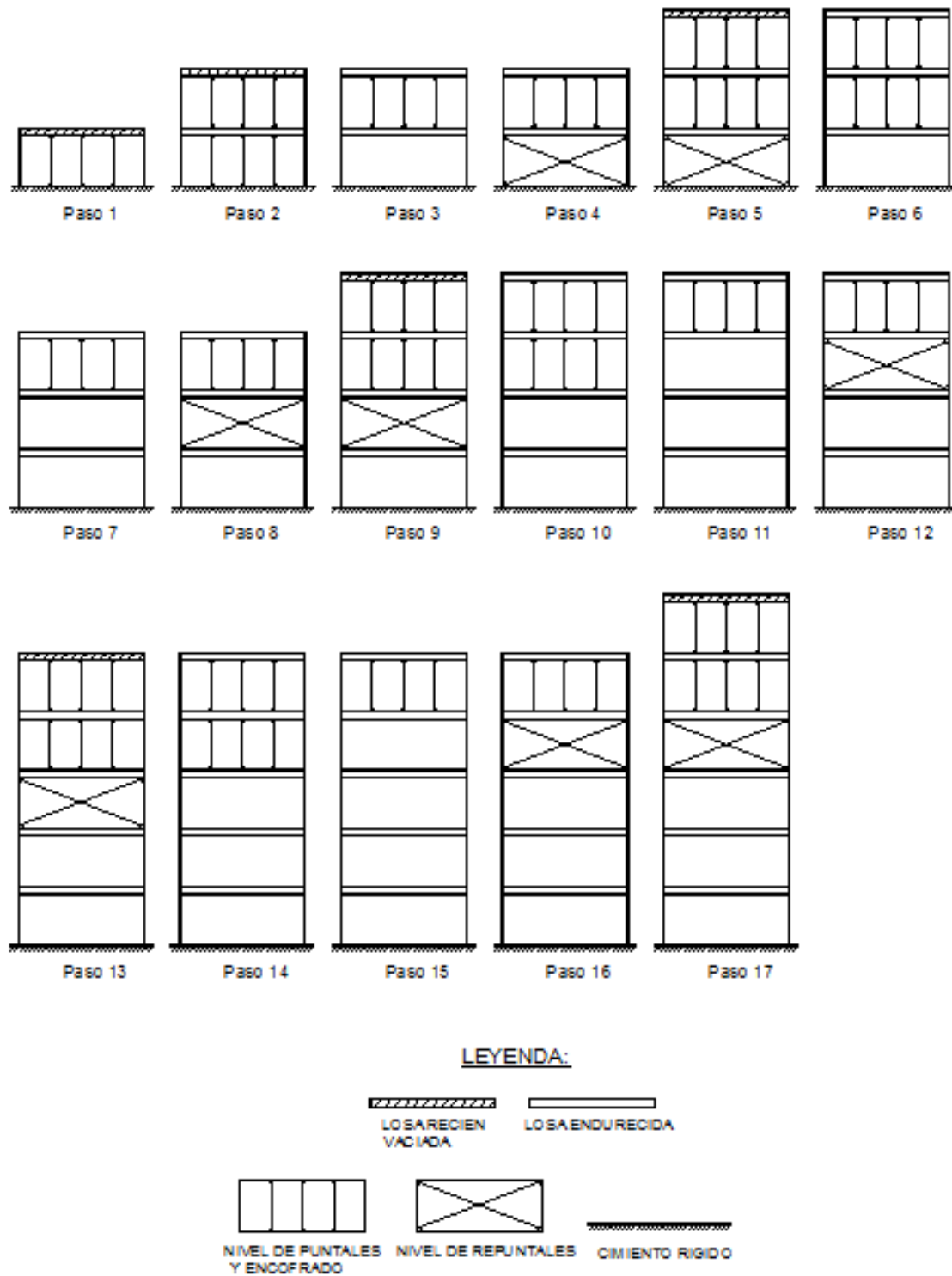


Figura 1.5 Sistema constructivo Dos apuntalamientos y un reapuntamiento (2S+1R).

1.5. Dos apuntalamientos y dos reapuntalamientos (2S+2R).

En la Figura 1.6 se muestra la secuencia de pasos a seguir para desarrollar este sistema constructivo:

Paso 1: Levantar el encofrado y puntales de la losa del primer nivel, y luego vaciar el concreto fresco para la losa de ese nivel. Toda la carga es transmitida por los puntales al terreno. Al final de esta operación, el total del peso de la losa es distribuido en todos los puntales.

Paso 2: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del primer nivel y vaciar el concreto para la losa del segundo nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales.

Paso 3: Retirar los puntales del primer nivel después de que el concreto del segundo nivel endurezca.

Paso 4: Reapuntalar el primer nivel después de que la losa haya deformado y soporte su propio peso.

Paso 5: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del segundo nivel y vaciar el concreto para la losa del tercer nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales.

Paso 6: Retirar los puntales de la losa del segundo nivel después de que el concreto endurezca y luego reapuntalarla.

Paso 7: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del tercer nivel y vaciar el concreto para la losa del cuarto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales. Como se puede apreciar en la Figura 1.6, con este paso se obtiene la configuración de dos apuntalamientos y dos reapuntalamientos.

Paso 8: Retirar los repuntales de la losa del primer nivel.

Paso 9: Retirar los puntales de la losa del tercer nivel y luego reapuntalarla.

Paso 10: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del cuarto nivel y vaciar el concreto para la losa del quinto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Paso 11: Retirar los repuntales de la losa del segundo nivel.

Paso 12: Retirar los puntales de la losa del cuarto nivel y luego reapuntalarla.

Paso 13: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del quinto nivel y vaciar el concreto para la losa del sexto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Paso 14: Retirar los repuntales del tercer nivel.

Paso 15: Retirar los puntales de la losa del quinto nivel y luego reapuntalarla.

Paso 16: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del sexto nivel y vaciar el concreto para la losa del séptimo nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Los pasos siguientes son repetitivos y similares al Paso 8 en adelante, es decir se desapuntala el nivel inferior de repuntales, cuando la última losa vaciada haya endurecido, el siguiente paso es desapuntalar el penúltimo nivel apuntalado, luego se reapuntala el nivel que se desapuntaló para finalmente apuntalar y vaciar la siguiente losa, así sucesivamente hasta llegar el último nivel que se desea construir.

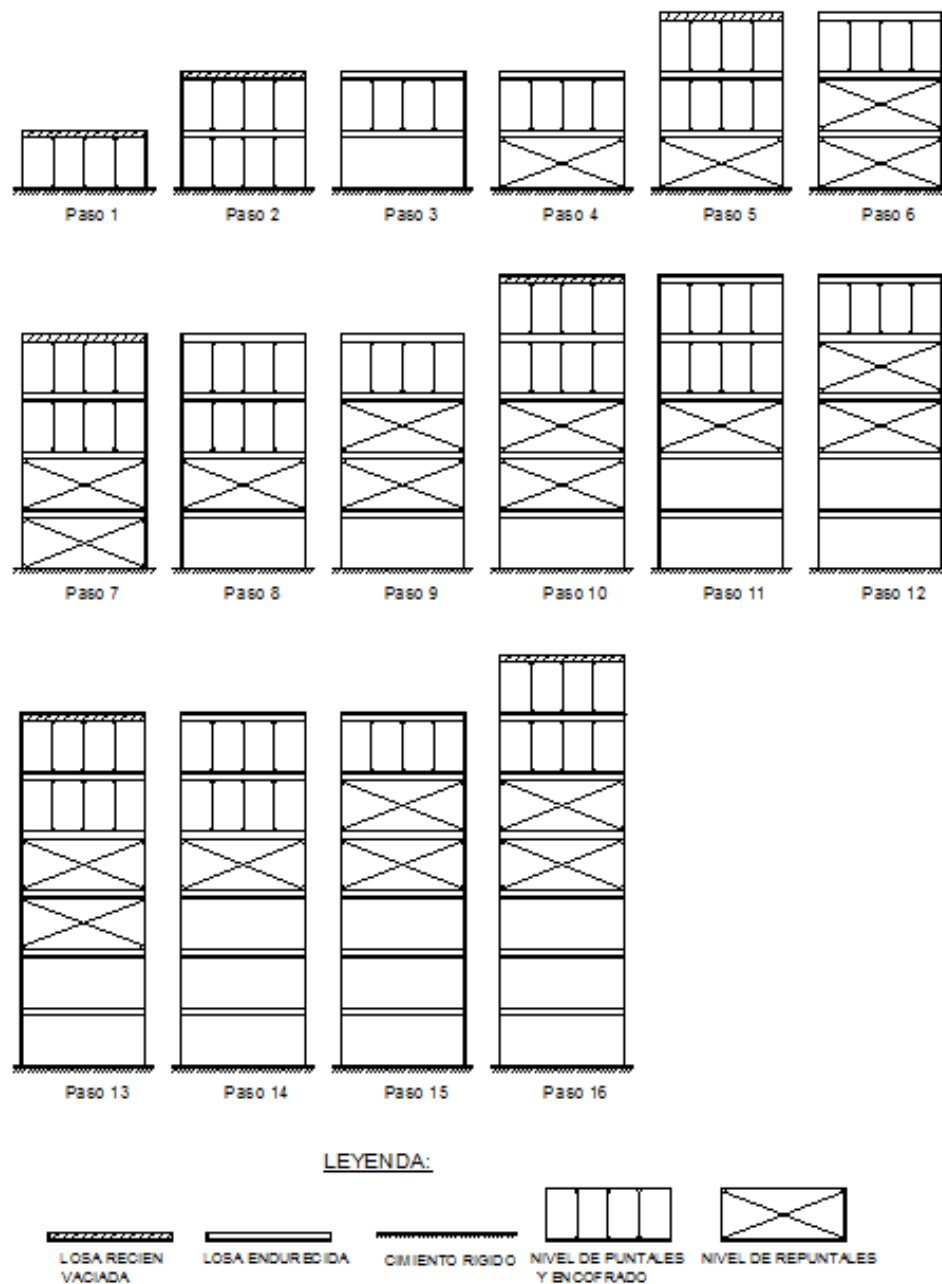


Figura 1.6 Sistema constructivo Dos apuntalamientos y dos reapuntamientos (2S+2R).

1.6. Dos apuntalamientos y tres reapuntalamientos (2S+3R).

En la Figura 1.7 se muestra la secuencia de pasos a seguir para desarrollar este sistema constructivo:

Paso 1: Levantar el encofrado y puntales de la losa del primer nivel, y luego vaciar el concreto fresco para la losa de ese nivel. Toda la carga es transmitida por los puntales al terreno. Al final de esta operación, el total del peso de la losa es distribuido en todos los puntales.

Paso 2: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del primer nivel y vaciar el concreto para la losa del segundo nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales.

Paso 3: Retirar los puntales del primer nivel después de que el concreto del segundo nivel endurezca.

Paso 4: Reapuntalar el primer nivel después de que la losa haya deformado y soporte su propio peso.

Paso 5: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del segundo nivel y vaciar el concreto para la losa del tercer nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales.

Paso 6: Retirar los puntales de la losa del segundo nivel después de que el concreto endurezca y luego reapuntalarla.

Paso 7: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del tercer nivel y vaciar el concreto para la losa del cuarto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales.

Paso 8: Retirar los puntales de la losa del tercer nivel y luego reapuntalar cuando el piso de cuarto nivel haya endurecido.

Paso 9: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del cuarto nivel y vaciar el concreto para la losa del quinto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior. Toda la carga va directamente al terreno a través de los puntales. Como se puede apreciar en la Figura 1.7, con este paso se obtiene la configuración de dos apuntalamientos y tres reapuntalamientos.

Paso 10: Retirar los repuntales de la losa del primer nivel cuando el concreto de la losa del quinto nivel haya endurecido.

Paso 11: Retirar los puntales de la losa del cuarto nivel y luego reapuntalarla.

Paso 12: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del quinto nivel y vaciar el concreto para la losa del sexto nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Paso 13: Retirar los puntales de la losa del segundo nivel cuando la losa del sexto nivel haya endurecido.

Paso 14: Retirar los puntales de la losa del quinto nivel y luego reapuntarla.

Paso 15: Levantar el encofrado y puntales sobre la losa del sexto nivel y vaciar el concreto para la losa del séptimo nivel, sin remover los puntales del nivel anterior.

Paso 16: Retirar los repuntales de la losa del tercer nivel cuando la losa del séptimo nivel haya endurecido.

Paso 17: Retirar los puntales de la losa del sexto nivel y luego reapuntarla.

Los siguientes pasos son repetitivos y similares al Paso 9 hasta el Paso 11.

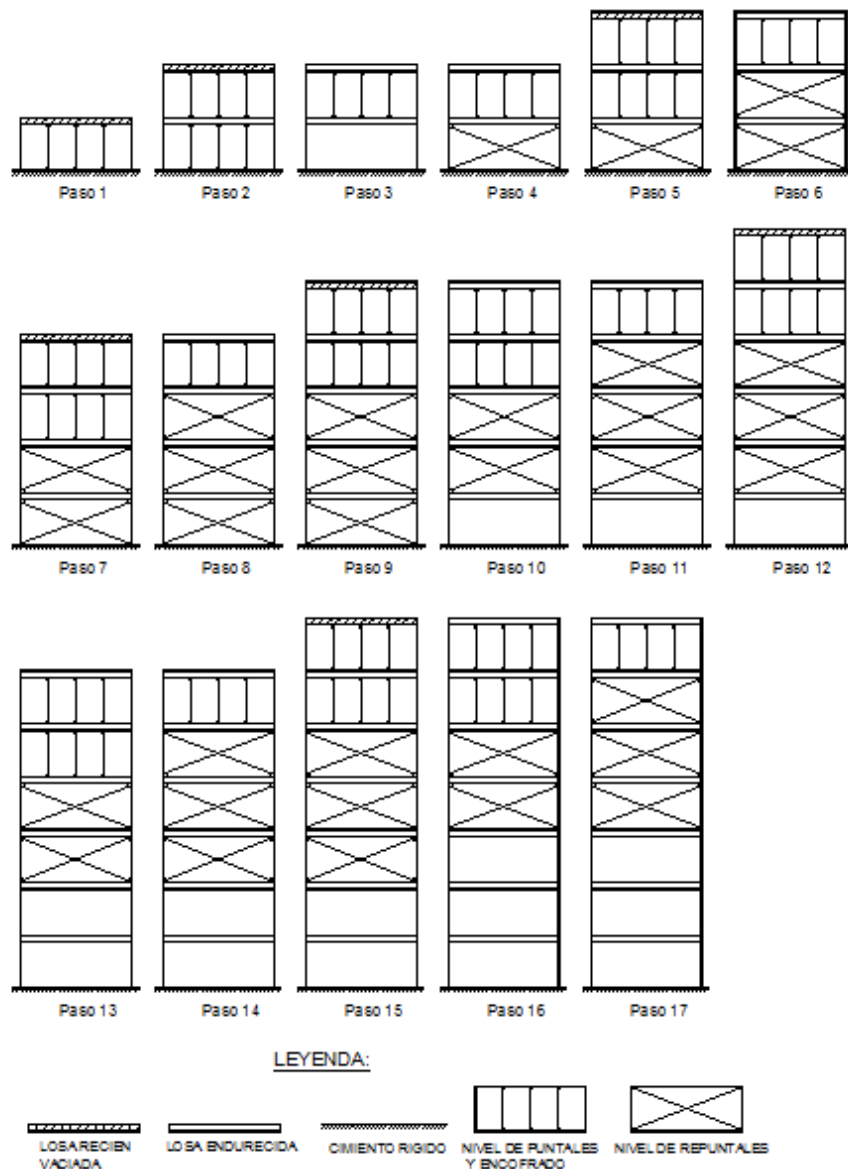


Figura 1.7 Sistema constructivo Dos apuntalamientos y tres repuntamientos (2S+3R).

Capítulo 2.

Modelos teóricos de la transmisión de cargas en losas y puntales

Actualmente existen métodos teóricos validados con resultados tomados de campo y enfocados al cálculo de la distribución de cargas que se generan durante el proceso constructivo de un edificio de múltiples plantas. Sin embargo debido a la complejidad en el cálculo, ninguno de estos métodos está completamente aceptado en las normas vigentes.

A continuación se hace una descripción de los principales métodos propuestos hasta la actualidad.

2.1. Método recomendado por la Norma ACI 347-2005

El ACI en su edición de 1989 sólo recomienda el método descrito por Grundy y Kabaila (1963) para evaluar la distribución de cargas de construcción en losas y puntales. Este método de análisis, que considera hipótesis simplificadas, sirvió de base para la mayoría de las investigaciones realizadas posteriormente. A partir de entonces, se desarrolló numerosos estudios teóricos para determinar la distribución de cargas de construcción y el grado de influencia de los diversos parámetros que intervienen en ella. El método simplificado se describirá con mayor detalle en el Apartado 2.2.

En el año 2005, el Comité ACI 347 presentó en su reporte ACI 347 2R-05, la “*Guide for Shoring/Reshoring of Concrete Multistory Buildings*”. Esta publicación presenta información y criterios de diseño para la operación de apuntalamiento y reapuntalamiento durante la construcción de edificios de concreto reforzado de varios pisos en donde se incluyen los diferentes tipos de carga que actúan en los encofrados, las fases típicas de construcción y los factores que afectan la distribución de cargas en la construcción.

2.2. Método Simplificado [Grundy y Kabaila (1963)].

El primero de los métodos encontrados en la bibliografía data del año 1963 cuando Grundy y Kabaila desarrollaron el denominado Método Simplificado. Debido a su sencillez, este modelo es muy empleado en la actualidad y fue la base de muchos de los trabajos realizados posteriormente.

El Método Simplificado asume una serie de hipótesis que hacen que el modelo sea fácilmente aplicable a cualquier tipo de obra. Las principales suposiciones del modelo son las siguientes:

1. Se considera que los puntales son infinitamente rígidos, comparados con la rigidez a flexión de las losas.
2. Todas las losas de concreto poseen la misma rigidez aunque sus edades sean muy distintas. Las solicitaciones obtenidas con rigidez variable de losas no difieren excesivamente respecto a las obtenidas mediante la suposición de rigidez constante.
3. Los puntales se encuentran suficientemente cerca como para que sus cargas sean asumidas como cargas uniformemente distribuidas sobre las losas.
4. Los efectos de retracción y fluencia lenta del concreto son despreciables.
5. Los puntales ubicados bajo la planta inferior del edificio se apoyan sobre un suelo infinitamente rígido.

Respecto a la primera hipótesis, los autores del modelo señalaron que esta suposición está justificada cuando se emplean puntales de acero. Cuando se emplean puntales menos rígidos, como pueden ser los de madera, esta afirmación no será tan exacta, pero los resultados obtenidos se encontrarían por el lado de la seguridad. En un ciclo constructivo típico de un edificio de concreto de varias plantas, existen dos tipos de operaciones que afectan a las solicitaciones en las losas de concreto. Atendiendo a las hipótesis asumidas por el modelo, las ecuaciones que rigen el cálculo de cargas correspondiente a cada operación son las siguientes:

a) Vaciado de una nueva planta: Si hay “n” plantas apuntaladas, el peso propio “q” de la planta recién vaciada se distribuye equitativamente entre las “n” losas inferiores apuntaladas, correspondiendo a cada uno:

$$= \frac{q}{n} \text{ kg/m}^2 \quad (2.1)$$

b) Desapuntalado de la planta inferior: Si hay “n” plantas apuntaladas, al desapuntalar la inferior, la diferencia entre la carga total “q₁” que resistía la losa de dicha planta y su peso propio “q”, se distribuye entre las “n” losas superiores, correspondiendo a cada uno:

$$\frac{(q_1 - q)}{n} \text{ kg/m}^2 \quad (2.2)$$

La carga en los puntales de la losa recién vaciada será igual al peso de la nueva losa; y en los puntales que se encuentran en los niveles inferiores, será la suma de la carga que tienen los puntales en el paso anterior más la carga adicional generada por el vaciado de la nueva losa o desapuntalado de una losa inferior.

En la Figura 2.1 se ilustran ambas operaciones para el caso de tres plantas apuntaladas.

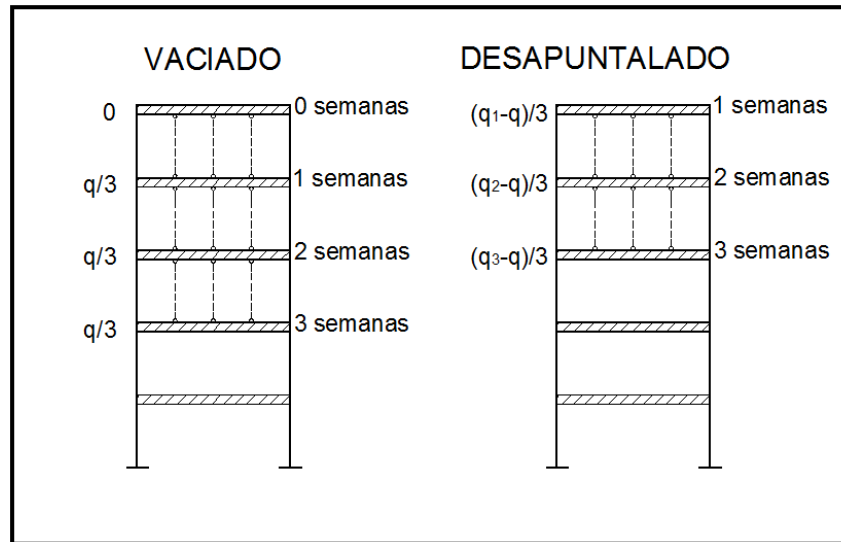


Figura 2.1 Operaciones de vaciado y desapuntalado según el Método Simplificado.

Por lo tanto, la aplicación del Método Simplificado conduce a distribuciones de cargas que son independientes de algunos parámetros importantes de la obra, como por ejemplo la distancia entre columnas, la altura libre entre plantas, el ritmo constructivo, las dimensiones de las losas o la resistencia característica del concreto empleado. En consecuencia, el método presenta una distribución de cargas en la estructura que es función exclusivamente del esquema constructivo empleado, es decir, del número de plantas apuntaladas y reapuntaladas.

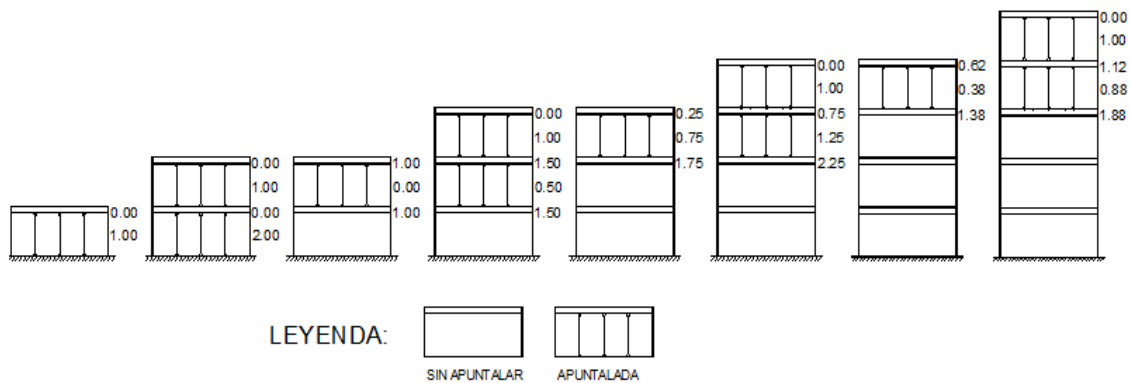


Figura 2.2 Distribución de cargas para el ciclo de dos plantas apuntaladas según el Método Simplificado. [Grundy y Kabaila (1963)]

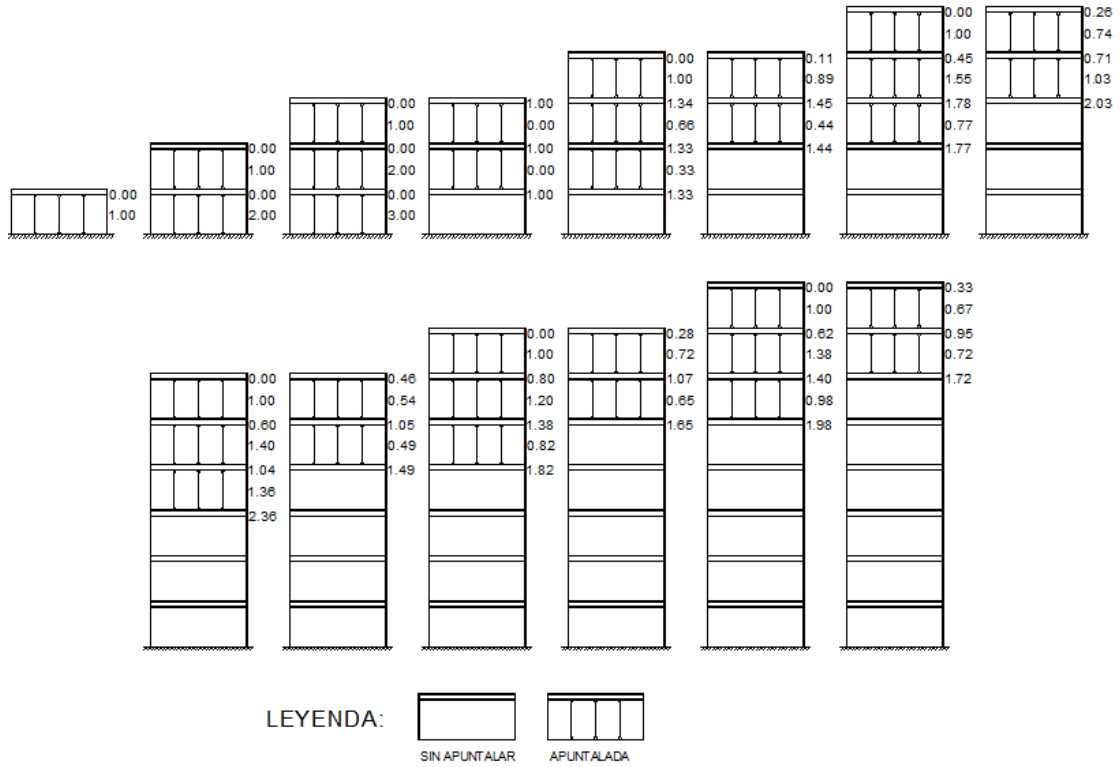


Figura 2.3 Distribución de cargas para el ciclo de tres plantas apuntaladas según el Método Simplificado. [Grundy y Kabaila (1963)]

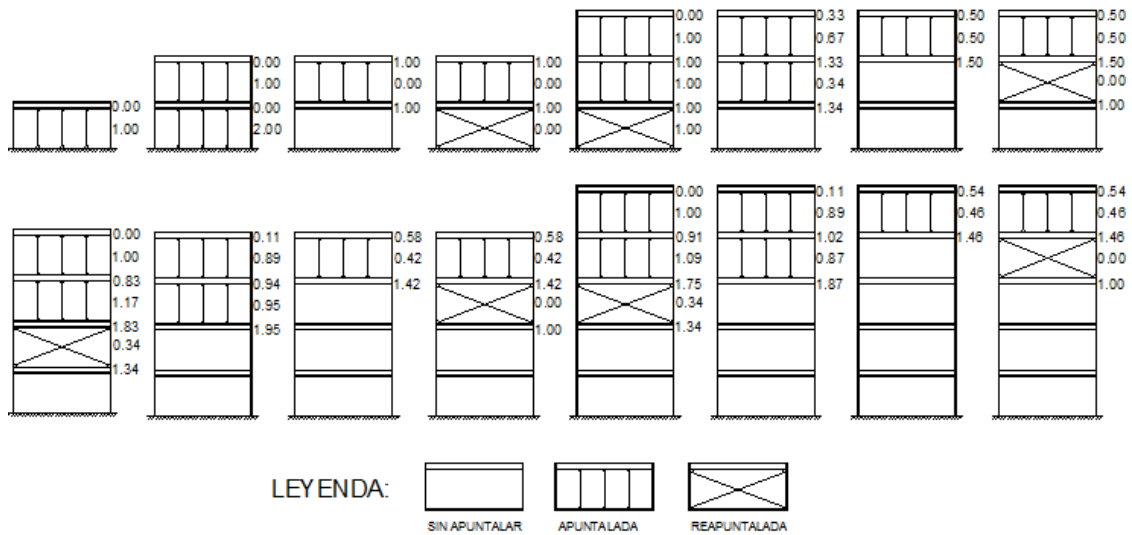


Figura 2.4 Distribución de cargas para el ciclo de dos plantas apuntaladas y una reapuntalada según el Método Simplificado. [Grundy y Kabaila (1963)]

En la Figura 2.2, Figura 2.3 y Figura 2.4 se muestran las cargas en losas y puntales calculadas mediante el Método Simplificado para distintos esquemas constructivos típicos: dos plantas apuntaladas (2S), tres plantas apuntaladas (3S) y dos plantas apuntaladas y una reapuntalada (2S+1R). Estas cargas se expresan con un coeficiente llamado proporción de carga, que resulta de dividir la carga que soporta el elemento entre la que soportaría si estuviese sometido únicamente a la acción del peso propio de una losa. De esta manera, con el Método Simplificado se determinan las distintas solicitaciones máximas para losas y puntales en función del ciclo constructivo seleccionado.

Comparando los resultados de las proporciones de carga de los tres sistemas constructivos se observa que en el sistema constructivo de tres plantas apuntaladas se obtienen las máximas solicitaciones. La proporción de carga máxima para losas es de 2.36, mientras que en el caso de dos plantas apuntaladas la proporción de carga máxima es de 2.25. Sin embargo, la edad de la losa cuando se dan dichas solicitaciones máximas es menor con dos plantas apuntaladas, por lo que este caso podría resultar más perjudicial. Al emplear la técnica del reapuntado, se reduce esta carga máxima hasta un valor de 1.95. En cuanto a los puntales, la situación más crítica se produce con tres plantas apuntaladas. En este sistema constructivo, los puntales ubicados en la planta inferior deben ser capaces de transmitir tres veces la carga correspondiente a su área tributaria. El reapuntado también ayuda a reducir considerablemente estas solicitaciones máximas.

2.3. Método Refinado [Liu et al. (1985)].

Ayudándose de un programa de cómputo Liu, Chen y Bowman (1985) desarrollaron un método capaz de tratar en una forma más realista la interacción que se produce entre las losas y los puntales con el fin de cuantificar el error que se comete al usar el Método Simplificado para predecir las cargas máximas en losas y puntales. Este método es conocido como el Método Refinado.

Se sabe que las principales hipótesis del Método Simplificado consisten en asumir que los puntales son infinitamente rígidos y que todas las losas de concreto poseen la misma rigidez. Sin embargo, el Método Refinado trabaja con la rigidez real de los puntales de acero y con la rigidez variable en el tiempo de las losas de concreto.

El Método Refinado inicialmente se basó en un modelo bidimensional. Posteriormente, para verificar su exactitud y determinar la influencia de diversos parámetros en la distribución de cargas, se desarrolló también un modelo tridimensional. El peso propio de las losas fue la única condición de carga considerada en ambos análisis. Con este estudio se encontró que el Método Simplificado estima de forma adecuada los pasos críticos constructivos en los cuales se presenta la máxima carga en el puntal y en la losa pero generalmente con una subestimación del 10% de la carga.

2.3.1. Modelo Bidimensional

El Modelo Refinado Bidimensional fue el primer modelo que se planteó para demostrar que el Método Simplificado incurría en errores. El modelo se basa en las siguientes suposiciones:

1. Las losas tienen en todo momento un comportamiento elástico y sus rigideces dependen del tiempo.
2. Los puntales son tratados como apoyos elásticos uniformemente distribuidos con una rigidez axial finita.
3. Debido a su escasa influencia, se desprecia la deformación vertical de las losas en las uniones con las columnas. Es decir, las columnas de concreto son consideradas como apoyos fijos ya sea bordes empotrados o simplemente apoyados.
4. La cimentación es infinitamente rígida.

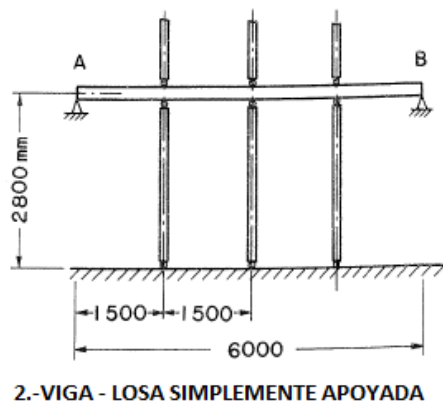
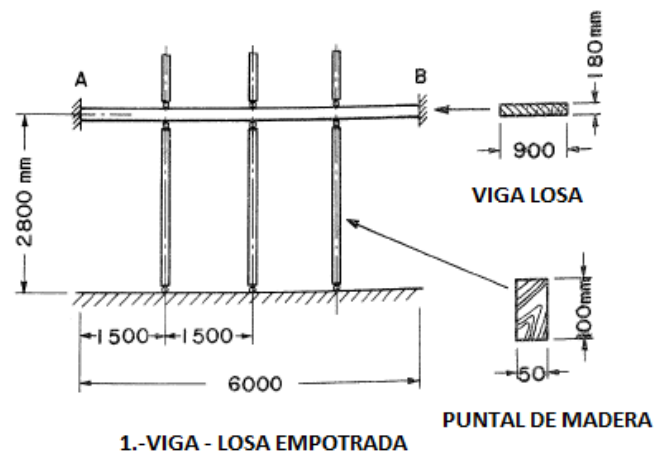


Figura 2.5 Modelo de cálculo bidimensional - Liu et al. (1985).

En la Figura 2.5 se muestra el esquema del modelo utilizado por Liu et al. (1985) en el cálculo bidimensional. Se consideró la existencia de una sección viga – losa rectangular de 900 mm X 180 mm. Los puntales se asumieron de madera con una sección de 50 mm X 100 mm.

En la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 se muestra la comparación de los resultados obtenidos por Liu et al. utilizando el Método Refinado y el Método Simplificado tanto para un modelo de losa con bordes empotrados como con bordes apoyados. El proceso constructivo que se siguió es el de dos niveles apuntalados y uno reapuntado (2S+1R) con un avance de un piso por semana. Se puede observar que ambos métodos predicen la misma ubicación del paso donde ocurre la máxima proporción de carga en losas y puntales. En los resultados mostrados en las tablas se puede observar dos características relacionadas con los efectos de la rigidez de la losa. Primero, la influencia de la edad del concreto en la rigidez de la losa no es considerada por el Método Simplificado. Como consecuencia, el Método Simplificado subestima la carga de las losas endurecidas y sobrestima la carga de la losa del concreto recién vaciadas. Segundo, las diferencias entre los resultados obtenidos usando el Método Refinado y Método Simplificado son más pequeñas en la Tabla 2.2 que en la Tabla 2.1. Esto es razonable, porque la rigidez de los puntales con respecto a la losa en el caso de losa con bordes apoyados, es mayor que en el caso con bordes empotrados, acercándose más a la consideración de rigidez infinita de los puntales del Método Simplificado.

Tabla 2.3 Comparación de proporciones máximas de carga (2S+1R) - Liu et al. (1985).

	PUNTAL			LOSA		
	Método Simplificado (1)	Método Refinado (2)	$\frac{(1)-(2)}{(1)}$	Método Simplificado (3)	Método Refinado (4)	$\frac{(3)-(4)}{(3)}$
Bordes empotrados	2.00D	1.83D	9%	1.95D	2.06D	-6%
Bordes apoyados	2.00D	2.07D	-4%	1.95D	2.02D	-4%

En la Tabla 2.3 se muestran las máximas proporciones de carga para puntales y losas, determinadas por los Métodos Simplificado y Refinado. El Método Refinado predijo cargas máximas en puntal menores a las calculadas por el Método Simplificado para bordes empotrados de losa, observándose una diferencia máxima de 9%. Para losas simplemente apoyadas, sin embargo, el Método Refinado predijo cargas máximas en puntal aproximadamente 4% mayores que el Método Simplificado. En cuanto a las proporciones de carga máximas en losas, las obtenidas por el Método Refinado superan alrededor del 5% a las predichas por el Método Simplificado para ambas condiciones de borde.

2.3.2. Modelo Tridimensional

En este modelo, Liu et al. (1985) consideraron las siguientes suposiciones simplificadas:

1. Las losas se comportan elásticamente y sus rigideces dependen del tiempo.
2. Los bordes de losa son libres a la rotación o empotrados.
3. Se desprecia la deflexión vertical de las losas en las uniones losa - columna.
4. Los puntales y repuntales se comportan como soportes elásticos ideales con igual rigidez axial.
5. Las uniones entre puntales y losas son rotuladas, y la cimentación es rígida.

En el proceso de construcción se asumió un sistema constructivo de dos niveles apuntalados y uno reapuntalado, con una velocidad de avance de un piso por semana. Los puntales y repuntales serán distribuidos uniformemente bajo las losas en todos los pisos conectados por el sistema de apuntalamiento. Al igual que el Modelo Bidimensional el módulo de elasticidad (E_c) y la resistencia a la compresión (f_c) del concreto se consideran variables en el tiempo. En este modelo se consideraron cuatro diferentes condiciones de borde: Un caso con todos los bordes empotrados, otro con todos los bordes libres a la rotación y los otros dos casos con bordes opuestos empotrados y libres a la rotación. En la Figura 2.6 se muestra el modelo estructural utilizado para el análisis. Las medidas se encuentran en mm. Según los autores, la verificación de cargas solamente debe realizarse hasta el paso 10 (retiro de repuntales del nivel 2) con el fin de alcanzar la carga máxima que soporta la losa.

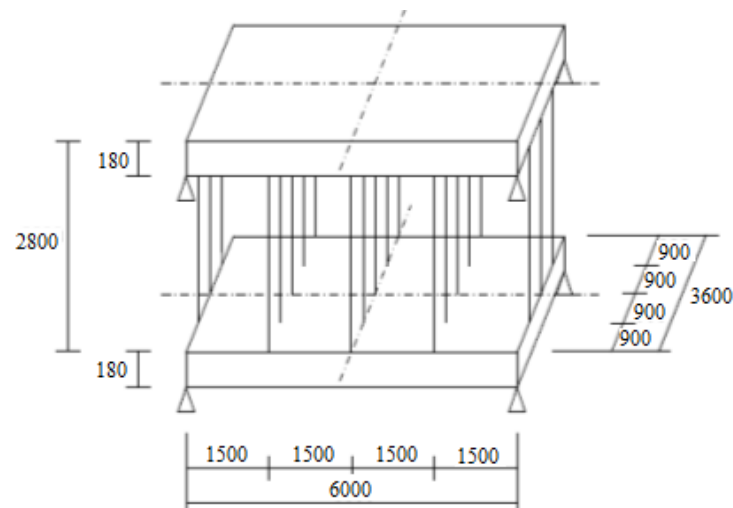


Figura 2.6 Modelo estructural del Método Refinado tridimensional - Liu et al. (1985).

Los autores obtuvieron resultados prácticamente idénticos con la aplicación de los modelos Bidimensional y Tridimensional. Por otra parte, señalaron que los resultados del Método Simplificado deben corregirse mediante un coeficiente comprendido entre 1.05 y 1.10 para poder ser utilizados de forma conservadora.

2.4. Método del Pórtico Equivalente-EFM [Stivaros y Halvorsen (1990)].

En 1990, Stivaros y Halvorsen propusieron el Método del Pórtico Equivalente conocido como EFM por sus siglas en inglés, para intentar mejorar los resultados obtenidos por los dos pioneros métodos ya descritos.

Cabe indicar que el EFM fue propuesto como método de diseño de estructuras de concreto por primera vez en la revisión del código de edificación de la *ACI Committee 311* (1970). Corley y Jirsa (1970) comprobaron su validez comparando los resultados de este modelo teórico con los resultados experimentales obtenidos en la Universidad de Illinois. Estos resultados experimentales consistieron en medir los momentos positivos y negativos originados en distintos tipos de losas planas bidireccionales. Por lo general, los resultados teóricos obtenidos con el EFM se ajustaron bien a las medidas experimentales, con desviaciones menores al 20%, independientemente del tipo de losa estudiado.

En su trabajo, Stivaros y Halvorsen recomiendan extender el EFM al diseño de procesos constructivos de edificios de concreto. Al igual que el Método Refinado, la aplicación del EFM también exige la utilización de un software para el análisis de la estructura.

El EFM propone un modelo 2D de la estructura que se basa en las siguientes suposiciones:

1. Los puntales o repuntales correspondientes a una fila dentro del ancho tributario del pórtico son reemplazados por un único puntal o repuntal con una rigidez equivalente a la suma de las rigideces de los puntales o repuntales correspondientes a la fila.
2. Se supone que los repuntales no toman carga al momento de su instalación, por lo que las losas se deforman libremente antes de la colocación de éstos.
3. Se asume que las uniones entre losas y puntales son articulaciones.
4. El peso del concreto recién vaciado se aplica directamente a los puntales en forma de carga concentrada.
5. Los puntales asumen carga de acuerdo a sus áreas tributarias.
6. Los puntales del primer nivel descansan sobre un suelo infinitamente rígido.

Los coeficientes de rigidez de los miembros del pórtico se determinan aplicando los conceptos del Método del Pórtico Equivalente. Para evaluar las fuerzas en los diferentes miembros del pórtico, incluyendo las cargas axiales en los puntales, se analiza elásticamente el pórtico bidimensional usando métodos de rigidez convencionales.

La principal diferencia respecto al Método Refinado 2D reside en que el EFM sí considera la deformación vertical de las columnas de concreto. De hecho, el EFM presenta dos variantes: el modelo de la estructura como pórtico de un único vano, y el modelo como pórtico de varios vanos. En la Figura 2.7 se presenta el modelo típico de edificación que fue empleado por Stivaros y Halvorsen para aplicar el EFM, mientras que en la Figura 2.8 se presenta la planta típica correspondiente a dicha edificación. Se emplearon puntales de madera como elementos verticales tipo barra con una rigidez equivalente a la rigidez total de los puntales ubicados en una fila. Las losas fueron representadas como elementos tipo viga, de ancho igual a la distancia entre columnas y de peralte igual al peralte real de la losa. Las columnas de concreto fueron consideradas también como elementos tipo viga con dimensiones de la sección transversal iguales a las reales.

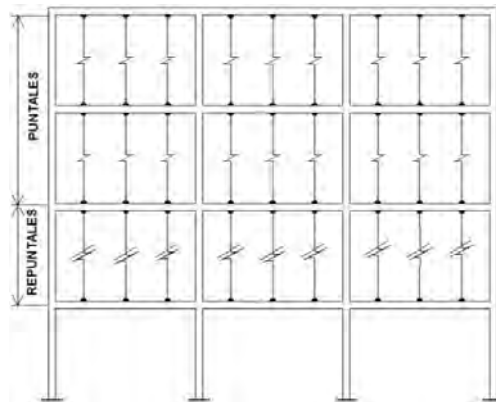


Figura 2.7 Modelo típico de un edificio con varios vanos empleado para aplicar el EFM - Stivaros y Halvorsen (1990).

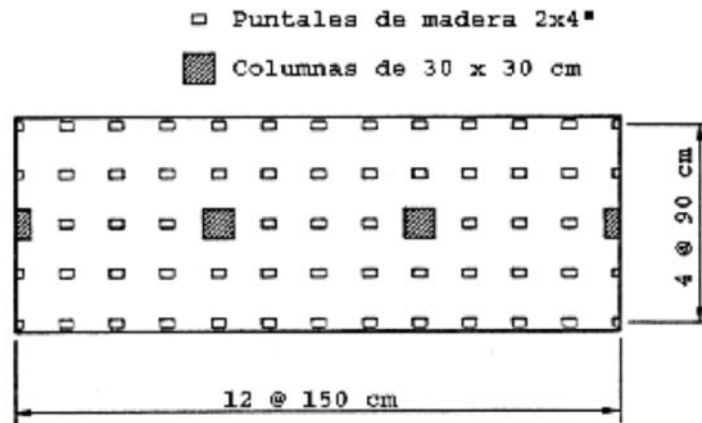


Figura 2.8 Planta típica de edificio con varios vanos empleada para aplicar el EFM - Stivaros y Halvorsen (1990).

Stivaros y Halvorsen emplearon el ejemplo de Liu et al. (1985) ya descrito en el acápite anterior, para la comparación y validación de los resultados de su nuevo método.

En la Figura 2.9 se pueden apreciar las cargas máximas en losas calculadas con el modelo del EFM tanto para pórticos de un solo vano como pórticos de tres vanos, y también los resultados de los Métodos Simplificado y Refinado graficados para el sistema constructivo de 2S+1R. Los resultados del EFM de tres vanos que se han graficado corresponden a los de los vanos internos.

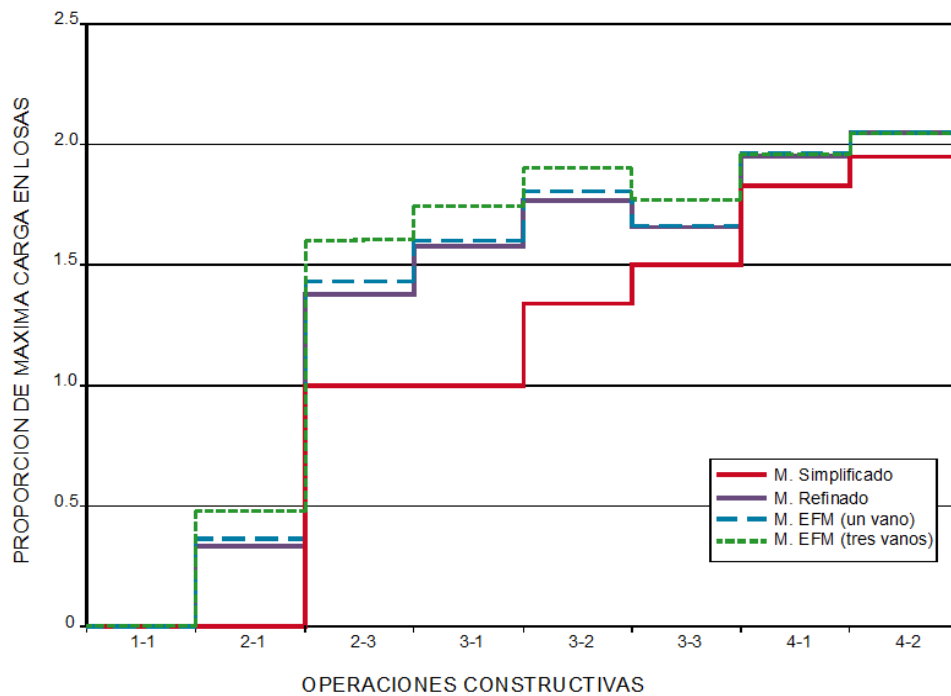


Figura 2.9 Comparación de máximas proporciones de carga entre los métodos de análisis - Stivaros y Halvorsen (1990).

Las operaciones constructivas se expresan mediante dos números. El primero de ellos hace referencia a la planta que se ha vaciado en último lugar y el segundo indica la fase constructiva. Según esto, el 1 se refiere al vaciado del nivel superior, el 2 se corresponde con la retirada del reapuntalamiento del nivel inferior, y el 3 indica la retirada del apuntalamiento del nivel inferior.

Como se aprecia en la Figura 2.9 existen grandes diferencias entre los resultados de las máximas proporciones de carga en cada operación obtenidos con el Método Refinado y con el EFM de varios vanos. Por lo tanto, al considerar un pórtico de más de un vano, la deformación de las columnas influye sobre las cargas máximas soportadas por las losas. Stivaros y Halvorsen recomiendan la utilización del modelo de varios vanos, porque la estructura de concreto se representa mediante un pórtico continuo más real. Además, este modelo de varios vanos también puede proporcionar información sobre los esfuerzos cortantes que aparecen en las uniones losa-columna.

La diferencia entre las máximas proporciones de carga del Método Simplificado y EFM de todo el proceso constructivo se encuentra por debajo del 5%. Sin embargo, Stivaros y Halvorsen señalaron que esta diferencia puede resultar significativa en otros esquemas constructivos, por lo que los coeficientes de modificación de 1.05 a 1.10 propuestos por Liu et al.(1985) pueden llevar a resultados erróneos. Para estudiar esto, Stivaros y Halvorsen consideraron distintas combinaciones de número de plantas apuntaladas y reapuntaladas y la única carga que se consideró en este análisis fue el peso propio de la losa.

En las Figura 2.10 y Figura 2.11 se muestran las máximas cargas en losas, obtenidas por el Método Simplificado y el EFM para una y dos plantas apuntaladas respectivamente, combinadas con un número de plantas reapuntaladas. A partir de las figuras, se concluye que existen diferencias entre el Método Simplificado y el EFM según el sistema constructivo seleccionado. Efectivamente, como se dijo anteriormente la diferencia entre los resultados del Método Simplificado y EFM se encuentran por debajo del 5% utilizando un sistema constructivo 2S+1R. Sin embargo, éstas son mucho mayores para otros sistemas constructivos.

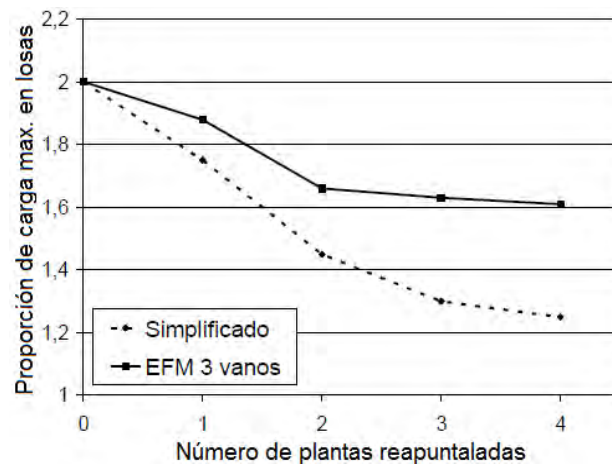


Figura 2.10 Proporción de carga máxima en losas para una planta apuntalada - Stivaros y Halvorsen (1990)

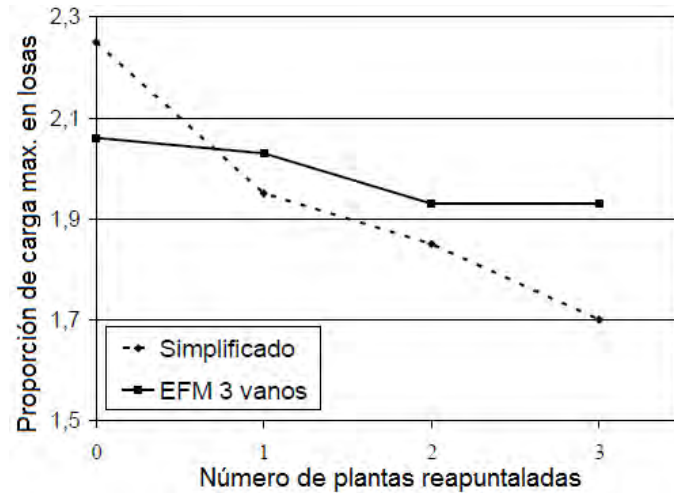


Figura 2.11 Proporción de carga máxima en losas para dos plantas apuntaladas - Stivaros y Halvorsen (1990)

2.5. Método Simplificado Mejorado [Duan y Chen (1995)].

Los métodos propuestos hasta ahora, excepto el Simplificado, exigen la utilización de un software de análisis estructural para calcular la distribución de cargas en la estructura.

En 1995, Duan y Chen indicaron que el principal error del Método Simplificado es considerar que la rigidez de los puntales es infinita, y desarrollaron un nuevo modelo conocido como el Método Simplificado Mejorado, basado en el Método Simplificado, que tiene la ventaja de no emplear un software de análisis estructural.

Duan y Chen introdujeron el concepto de ratio de rigidez losa – puntal que representa la medición completa de la geometría, las propiedades del material y condiciones de contorno del sistema de apoyo. El ratio de rigidez losa – puntal se define mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_S' = \frac{K_{sh}}{K_S} = \frac{\frac{H}{E_{sh}A}}{\gamma \frac{L^2}{E_c 28I}} \quad (2.3)$$

Siendo:

H: Altura de los puntales.

E_{sh} : Módulo de elasticidad del material del puntal.

A.: Área de la sección transversal del puntal.

γ : Coeficiente que depende de las condiciones de contorno de la losa, y tiene los siguientes valores:

$$\text{Para losa biempotrada: } \gamma = \frac{L}{384 b}$$

$$\text{Para losa simplemente apoyada: } \gamma = \frac{5 L}{384 b}$$

L: Longitud de eje a eje de columnas.

E_{c28} : Módulo de elasticidad del concreto a los 28 días.

I: Inercia de la sección de la losa analizada con un ancho equivalente a la unidad.

El ratio de rigidez losa – puntal es un parámetro importante para definir el grado de influencia de la rigidez de los puntales en la distribución de cargas en las losas.

Tabla 2.4 Resultados comparativos entre el Método Simplificado Mejorado, Método Simplificado y mediciones de campo de Agarwal y Gardner (1974) – (2S+1R).

Edad	Operación	Nivel	Mediciones en campo		Metodo Simplificado		Metodo Simplificado Mejorado	
			Carga en puntal (D*)	Carga en losa(D)	Carga en puntal (D)	Carga en losa(D)	Carga en puntal (D)	Carga en losa(D)
0	Vaciado del nivel 19	19	0.99	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
3	Desapuntalado del nivel 17	19	0.83	0.17	0.73	0.27	0.79	0.21
8	Vaciado del nivel 20	20	1.01	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		19	1.48	0.53	1.41	0.59	1.45	0.54
11	Desapuntalado del nivel 18	20	0.79	0.21	0.73	0.27	0.79	0.21
		19	0.88	0.91	0.75	0.98	0.87	0.90
14	Vaciado del nivel 21	21	1.02	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		20	1.44	0.58	1.44	0.56	1.45	0.54
		19	1.12	1.32	1.11	1.33	1.19	1.23
17	Desapuntado del nivel 19	21	0.77	0.23	0.70	0.30	0.78	0.22
		20	0.85	0.92	0.75	0.95	0.83	0.93
		19	-	1.85	-	1.75	-	1.81
20	Vaciado del nivel 22	22	1.02	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		21	1.45	0.57	1.41	0.59	1.44	0.55
		20	1.11	1.34	1.11	1.30	1.16	1.26
		19	-	2.11	-	2.11	-	-

* : D = Peso de losa + peso de encofrado.

En la Tabla 2.4, se muestran los resultados de la comparación que realizaron Duan y Chen con el Método Simplificado Mejorado, Método Simplificado y con las medidas registradas en campo por Agarwal y Gardner (1974) en un edificio llamado Alta Vista Tower (Ottawa) que era un caso típico de pórtico de luz grande con pequeño valor de ratio de rigidez losa – puntal de 0.14. Las medidas de campo fueron hechas para los pisos 19 al 22 y para un ciclo completo de construcción. Asimismo, en la Figura 2.12 se muestra una comparación de las cargas de losa correspondientes al piso 19 para un ciclo completo de construcción. Estas cargas fueron tomadas de la Tabla 2.4.

En la Figura 2.12 se puede apreciar que el Método Simplificado Mejorado se aproxima mejor a los valores registrados en campo por Agarwal y Gardner.

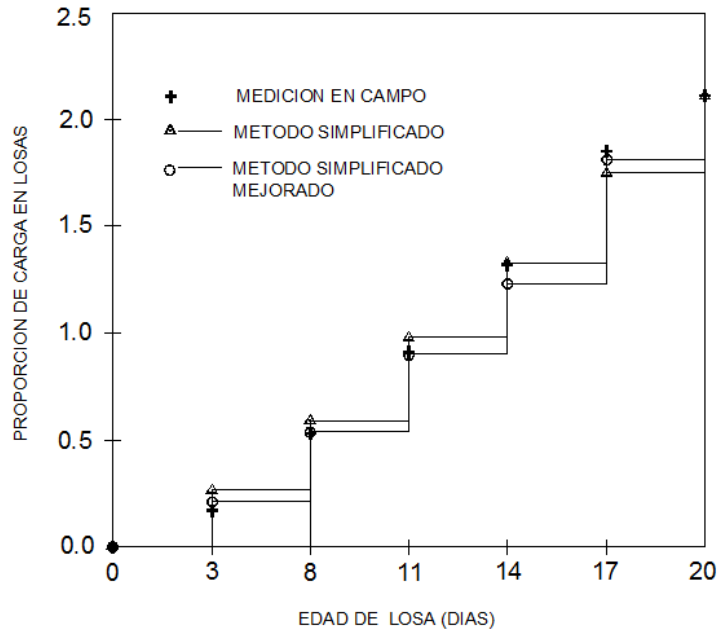


Figura 2.12 Historia de carga en losa durante la construcción. [Duan y Chen (1995)].

2.6. Comparación de los resultados obtenidos por los distintos autores.

En los acápites anteriores se describió cada uno de los métodos más conocidos en el cálculo de transmisión de cargas en la construcción de edificios. Se describieron los métodos que necesitan la utilización de un cálculo matricial complejo como el Método Refinado y Método del Pórtico Equivalente (EFM), y los métodos que utilizan funciones analíticas sencillas como el Método Simplificado y Método Simplificado Mejorado. Los resultados que se han encontrado son diversos y en algunos casos coinciden.

A continuación se presentan la Tabla 2.5 y Tabla 2.6 en donde se muestran los resultados de proporciones de carga en losas y puntales, obtenidos por los autores de los métodos estudiados anteriormente. Estos resultados fueron recopilados de la bibliografía de cada autor y se puede llegar a un punto de comparación puesto que fueron calculados para un sistema constructivo de dos plantas apuntaladas y una reapuntalada (2S+1R), con un ciclo constructivo de 7 días.

Tabla 2.5 Resultado de las máximas proporciones de carga en losas para un proceso constructivo 2S +1R.

Paso	M.Simplificado	M.Refinado	M.S.Mejorado	EFM (1 Vano)
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.34	0.35	0.48
3,4	1.00	1.38	1.39	1.60
5	1.00	1.58	1.59	1.75
6	1.33	1.77	1.78	1.90
7,8	1.50	1.66	1.65	1.79
9	1.83	1.95	1.94	1.98
10	1.95	2.06	2.05	2.06

En la Tabla 2.5 se observan las máximas proporciones de carga en losas para cada paso de un proceso constructivo de 2S+1R. Los valores más altos obtenidos corresponden a los del Método de Pórtico equivalente. Por otro lado se puede apreciar que existe una gran diferencia entre los resultados del Método Simplificado y los otros métodos en los seis primeros pasos siendo éstos menores, lo cual indica que el Método Simplificado es menos conservador que los otros Métodos al subestimar la carga de las losas.

Tabla 2.6 Comparación entre los resultados obtenidos por los distintos métodos. Azkune (2007)

Paso	Nivel	Simplificado		Refinado		Simplificado Mejorado	
		Puntales	Losa	Puntales	Losa	Puntales	Losa
1	1	1'00	0'00	1'00	0'00	1'00	0'00
2	2	1'00	0'00	1'00	0'00	1'00	0'00
	1	2'00	0'00	1'63	0'37	1'65	0'35
3,4	2	0'00	1'00	0'38	0'62	0'39	0'61
	1	0'00	1'00	0'00	1'38	0'00	1'39
5	3	1'00	0'00	1'00	0'00	1'00	0'00
	2	1'00	1'00	0'92	1'08	0'97	1'07
6	1	1'00	1'00	0'34	1'58	0'33	1'59
	3	0'67	0'33	0'94	0'06	0'95	0'05
7,8	2	0'33	1'34	0'77	1'17	0'78	1'16
	1	0'00	1'33	0'00	1'77	0'00	1'78
9	3	0'50	0'50	0'66	0'34	0'66	0'34
	2	0'00	1'50	0'00	1'66	0'00	1'65
10	1	0'00	1'00	0'00	1'00	0'00	1'00
	4	1'00	0'00	1'00	0'00	1'00	0'00
9	3	1'17	0'83	1'14	0'86	1'14	0'86
	2	0'34	1'83	0'19	1'95	0'19	1'94
10	1	0'00	1'34	0'00	1'19	0'00	1'19
	4	0'89	0'11	0'97	0'03	0'97	0'03
10	3	0'95	0'94	1'06	0'91	1'06	0'91
	2	0'00	1'95	0'00	2'06	0'00	2'05
10	1	0'00	0'80	0'00	1'00	0'00	1'00

La Tabla 2.6 muestra las proporciones de carga por cada nivel de un edificio, calculadas para el sistema constructivo 2S+1R con los métodos revisados anteriormente. La compilación fue realizada por Azkune (2007). En la tabla se aprecia que el método Simplificado Mejorado se ajusta bien a los resultados del Método Refinado. Mientras el Método Simplificado en general subestima las solicitaciones debido a la consideración de la rigidez infinita en los puntales.

A pesar que el Método Simplificado Mejorado se basa en un cálculo analítico sencillo, la diferencia es mínima si se comparan sus resultados con los del Método Refinado y el Método EFM. Por esta razón se optó por el Método Simplificado Mejorado para validar algunos de los nuevos resultados que se obtendrán en esta tesis cuando se tienen sistemas constructivos con pórticos de un solo vano. Cabe indicar que este método, el Simplificado Mejorado, tiene la limitante de aplicarse sólo a pórticos de un solo vano.

En el siguiente Capítulo de la tesis se desarrollará con más detalle el proceso de cálculo del Método Simplificado Mejorado. Por otra parte, para desarrollar el presente estudio se emplearán las hipótesis del Método del Pórtico Equivalente (EFM) debido a las consideraciones más reales en referencia a los puntales, losas y apoyos.

Capítulo 3.

Cálculo de la transmisión de cargas usando el Método Simplificado Mejorado

3.1. Descripción del Método Simplificado Mejorado.

El Método Simplificado Mejorado, propuesto por Duan y Chen en 1995, considera la elasticidad de los puntales en la distribución de carga a diferencia del Método Simplificado que considera que todos los puntales son infinitamente rígidos. Esta consideración hace que la transmisión de cargas en el sistema de soporte sea diferente durante el vaciado de las losas y durante la remoción de los puntales.

Los autores introducen el concepto de ratio de rigidez losa-puntal, y lo utilizan como una mejora al Método Simplificado tradicional.

Cabe indicar que los resultados de la transmisión de cargas calculados con el Método Simplificado Mejorado, para sistemas constructivos de un solo vano, servirán para validar algunos de los nuevos resultados obtenidos en esta tesis.

3.2. Aplicación del Método Simplificado Mejorado en pórticos de un solo vano.

3.2.1. Descripción del Método.

Para explicar el desarrollo del Método Simplificado Mejorado de Duan y Chen (1995), se tomará una estructura típica de concreto en construcción como la que se muestra en la Figura 3.1. El peso propio “P” de la losa “n” recién vaciada se reparte entre las losas inferiores que han sido previamente vaciadas y que se encuentran conectadas mediante puntales. Si “j” es un índice que indica el nivel, las relaciones entre los incrementos de carga en losas “P_j” e incrementos de carga en puntales “F_j” serán las siguientes:

$$F_1 = P_1$$

$$F_2 = P_1 + P_2$$

.

.

.

$$F_j = P_1 + P_2 + \dots + P_j$$

.

$$F_n = P_1 + P_2 + P_3 \dots + P_n = P \quad (3.1)$$

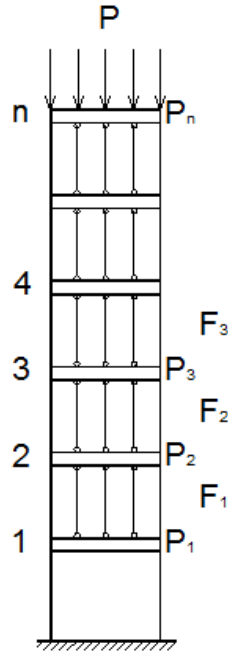


Figura 3.1 Vaciado de una estructura típica de concreto.

Estas relaciones indican que la carga total transmitida por los puntales ubicados en cualquier nivel es soportada por las losas inferiores. Al asumir que las cargas en puntales se encuentran uniformemente distribuidas sobre las losas, Duan y Chen expresaron la deformación de los puntales ubicados en la parte central mediante la deformación media de los puntales en ese nivel. Aplicando la compatibilidad de desplazamientos para la parte central de las losas ubicadas en los niveles “j” y “j-1”:

$$\Delta_j = \Delta_{j-1} + \Delta_{sh,j-1} \quad (3.2)$$

donde “ Δ_j ” y “ Δ_{j-1} ” son las flechas en los centros de las losas “j” y “j-1”, respectivamente. “ $\Delta_{sh,j-1}$ ” es la deformación media de los puntales ubicados sobre el nivel “j-1”. Sustituyendo las deformaciones por los esfuerzos y expresando las cargas en los puntales en función de las solicitaciones en las losas, se obtiene que:

$$K_j P_j = K_{j-1} P_{j-1} + K_{sh,j-1} (P_1 + P_2 + \dots + P_{j-1}) \quad (3.3)$$

donde los factores K se definen como las deformaciones del elemento estructural (puntal o losa) bajo la acción de una carga unitaria. Las expresiones que se emplean para el cálculo de estos coeficientes son las siguientes:

$$K_j = \gamma \frac{L^2}{E_j I} \quad \text{para losas} \quad (3.4)$$

$$K_{sh,j-1} = \frac{H}{E_{sh} A} \quad \text{para puntales} \quad (3.5)$$

Siendo “ γ ” un coeficiente que depende de las condiciones de contorno y de la relación longitud/ancho de la losa. “ E_j ” y “ E_{sh} ” son los módulos de elasticidad del concreto de las

losas y del acero de los puntales, respectivamente. “L” es la longitud del vano más largo de la losa, e “I” es el momento de inercia de la losa por unidad de ancho de losa, es decir la inercia de la losa suponiendo que la losa tiene anchura igual a la unidad. “H” y “A” son la altura y la sección transversal total de todos los puntales ubicados en el vano.

En el Método Simplificado Mejorado la losa se modela como una viga de longitud “L” y de ancho “b”, que depende del área tributaria de los puntales situados en el vano modelado. Si la viga se encuentra sometida a una carga uniformemente distribuida de valor “q”, el valor de la flecha en el centro del vano dependerá de las condiciones de contorno de la losa considerada. En la Figura 3.2 se muestran los valores de “ γ ” correspondientes al caso de losa biempotrada.

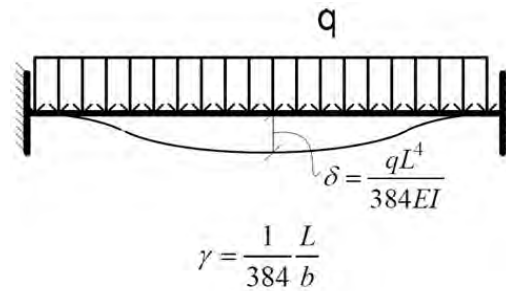


Figura 3.2 Coeficiente γ para losa biempotrada.

De esta manera, calculados los coeficientes K correspondientes a puntales y losas, se pueden definir los ratios de incremento de carga “ α ” entre dos losas consecutivas usando la Ecuación (3.3):

$$\alpha_{2,1} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{K_1}{K_2} + \frac{K_{sh}}{K_2}$$

$$\alpha_{3,2} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{K_2}{K_3} + \frac{K_{sh}}{K_3} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{2,1}}\right)$$

$$\alpha_{4,3} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{K_3}{K_4} + \frac{K_{sh}}{K_4} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{3,2}} + \frac{1}{\alpha_{2,1}\alpha_{3,2}}\right)$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\alpha_{n,n-1} = \frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{K_{n-1}}{K_n} + \frac{K_{sh}}{K_n} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{n-1,n-2}} + \frac{1}{\alpha_{n-1,n-2}\alpha_{n-2,n-3}} + \dots\right) \quad (3.6)$$

Además, se sabe que el peso propio “P” de la losa recién vaciada se reparte en las “n” losas inferiores que se encuentran conectadas por puntales. En consecuencia, debe cumplirse que:

$$\sum_{j=1}^n P_j = P \quad (3.7)$$

Obtenidos todos los ratios de carga entre losas, la carga “P₁” soportada por la primera losa se calcula mediante la siguiente expresión general:

$$P_1 = \frac{P}{1 + \alpha_{2,1} + \alpha_{2,1}\alpha_{3,2} + \alpha_{2,1}\alpha_{3,2}\alpha_{4,3} + \dots + \alpha_{2,1}\alpha_{3,2} \dots \alpha_{n-1,n-2}} \quad (3.8)$$

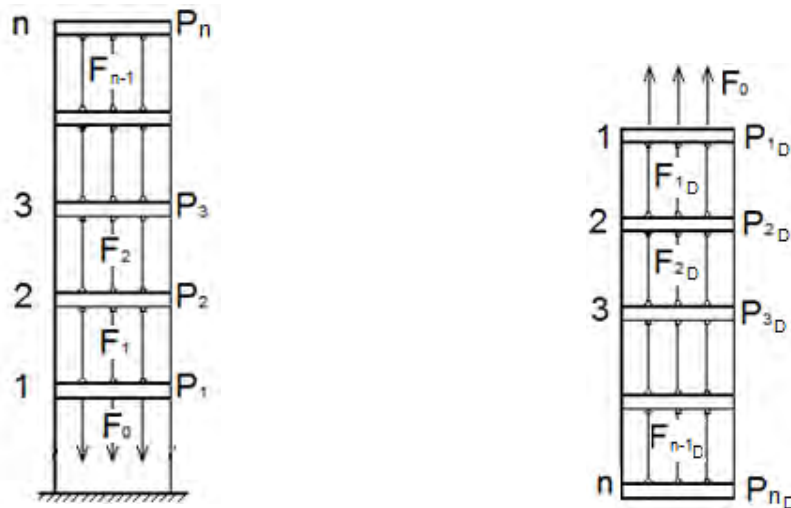
Las solicitaciones en el resto de las losas pueden obtenerse mediante esta otra expresión:

$$P_j = \alpha_{j,j-1} P_{j-1} \quad \text{siendo } j = 2, 3, \dots, n \quad (3.9)$$

La operación de retirada de puntales genera una carga que se reparte en los niveles superiores de la edificación. Esta carga es equivalente a aplicar una serie de fuerzas en la losa desapuntalada con la misma magnitud a las cargas transmitidas por los puntales retirados en sentido descendente. Las fórmulas empleadas en el caso del desapuntalado son análogas a las del vaciado, pero con fuerzas en sentido contrario como se observa en la Figura 3.3 b).

F_1, F_2, F_n = Incremento de carga en puntales.
 P_1, P_2, P_n = Incremento de cargas en losa
 Ambas cargas son para un estado del proceso constructivo antes de realizar la operación de desapuntalamiento:

F_{1D}, F_{2D}, F_{n-1D} = Incremento de cargas en los puntales debido a F_0 .
 P_{1D}, P_{2D}, P_{nD} = Incremento de cargas en losa debido a F_0 .



a) Carga F_0 transmitida en los niveles superiores de la edificación debido al desapuntalamiento del 1º nivel.

b) Analogía del desapuntalamiento con la operación del vaciado de losa.

Figura 3.3 Transmisión de cargas en una operación de desapuntalamiento.

En consecuencia, las relaciones entre los incrementos de carga en losas P_{jD} e incrementos de carga en puntales F_{jD} , originados por el desapuntalado de la losa inferior, son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 F_{1D} &= -(P_{2D} + P_{3D} + \dots + P_{nD}) \\
 F_{2D} &= -(P_{3D} + P_{4D} + \dots + P_{nD}) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 F_{jD} &= -(P_{j+1D} + P_{j+2D} + \dots + P_{nD}) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 F_{n-1D} &= -P_{nD}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Las ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos empleadas para el cálculo de la distribución de cargas son similares al caso del vaciado de concreto. Además, como la carga transmitida por los puntales retirados F_0 se reparte entre las losas superiores, se cumple que:

$$\sum_{j=1}^n P_{jD} = F_0 \tag{3.11}$$

Por lo tanto, el Método Simplificado Mejorado permite calcular los incrementos de carga originados por las operaciones de construcción básicas (vaciado y desapuntalado) mediante fórmulas matemáticas sencillas.

3.2.2. Procesos de cálculo.

Con la modelación anterior se puede realizar el cálculo de la transmisión de cargas en puntales y losas para los sistemas constructivos más comunes. El análisis considera que las losas son biempotradas y se trabaja con un pórtico de un vano debido a las limitaciones del método.

El análisis del presente trabajo se realiza para un ciclo de construcción de un piso por semana, y para hacer más simple el cálculo no se tomará en cuenta las cargas vivas ni cargas de impacto, sólo se considera la carga muerta debido al peso propio de la losa.

Así se elaboró una hoja de cálculo en Excel para cada uno de los sistemas constructivos, teniendo como datos de entrada para la losa: la longitud “L”, el peralte “h”, el ancho tributario de la losa que es cargada por la fila de puntales “b”, el peso unitario del concreto “W” y módulo de elasticidad del concreto para diferentes edades “E”. Los datos de entrada para los puntales son: el área equivalente de la sección del puntal “A”, la altura del puntal “H” y el número de puntales en la fila del vano modelado “# punt”.

Con estos datos se calcula primero el área del puntal equivalente, que para este análisis es la suma de áreas de todos los puntales de la fila ($A * \# \text{ punt}$). Luego usando las Ecuaciones (3.4) y (3.5) se procede a calcular los factores K tanto para las losas en los diferentes días

del análisis como para los puntales. Con los factores K se calcula los ratios de carga " α " entre dos losas consecutivas usando la ecuación (3.6) y posteriormente la carga en losas "P" y en puntales "F" con las Ecuaciones (3.8), (3.9) y (3.10).

Conocida la carga en los puntales y losas se pueden obtener las proporciones de carga en esos elementos para cada nivel y en cada uno de los pasos analizados.

A continuación se determinarán, usando la metodología del Método Simplificado Mejorado, las proporciones de carga en losas y puntales para los procesos constructivos 2S, 2S+1R, 2S+2R, 2S+3R. Estos resultados servirán para validar los resultados que se obtendrán con el SAP2000 empleando la Metodología del Método de Pórtico Equivalente para pórticos de un solo vano.

3.2.3. Modelo estructural a analizar.

El análisis de transmisión de cargas se realizó utilizando el modelo bidimensional de Liu. et al.(1985), presentado en el Acápito 2.3.1. De este modelo se tomaron las dimensiones de las losas y puntales, pero considerando puntales de acero de tal manera que los resultados obtenidos puedan ser comparados con los de los otros métodos descritos en esta tesis.

Las losas fueron idealizadas como una viga con extremos empotrados y los puntales fueron idealizados como elementos articulados en sus extremos.

Losas:

Dimensiones:

Peralte = 18 cm.

Longitud de losa, de eje a eje de columna = 6 m.

Ancho efectivo= 0.9 m.

Columnas:

Dimensiones:

Peralte = 30 cm.

Ancho = 30 cm.

Altura de entrepiso = 2.8 m.

Propiedades del material de losas y columnas:

Concreto armado: $f'_c = 41 \text{ MPa}$ (418 kg/cm^2).

Peso específico: $W = 25000 \text{ N/m}^3$ (2549 kg/m^3).

Módulo de elasticidad: $E_c = 35 \text{ GPa}$ ($3.56 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$) a los 28 días.

Puntal y repuntal:

Tipo: Ulma PN 1.75 - 3.10.

Altura: 2.80 m.

Área de sección transversal = 1.54 cm^2

Número de puntales por piso en ancho efectivo= 3 unid.

Propiedades del material:

Esfuerzo de fluencia = 248.2 MPa. (2532 kg/cm²).

Esfuerzo último a la tensión = 399.8 MPa. (4077 kg/cm²).

Módulo de elasticidad, $E_s = 210$ GPa. (2.1×10^6 kg/cm²).

Peso específico = 76970 N/m³. (7850 kg/m³).

Existen varias expresiones para determinar la variación del módulo de elasticidad del concreto en el tiempo como son las indicadas por el CEB-FIP-90 (Código Euro Internacional), la ACI-318 (Código Norteamericano), BS-8110 (Código Británico) y otros, pero por no ser el objetivo de este estudio analizar cuáles son las más precisas, se utilizarán las expresiones del CEB-FIP-90 puesto que éstas están incorporadas en el programa SAP2000.

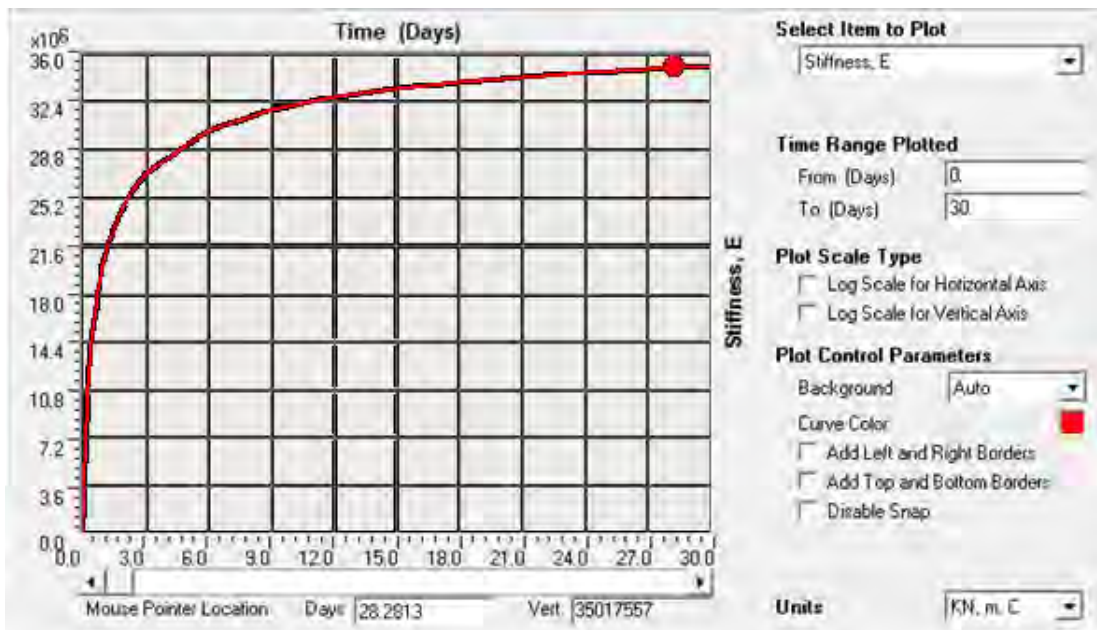


Figura 3.4 Variación del módulo de elasticidad según el Código Euro Internacional (CEB-FIP-90).

En la Figura 3.4 se muestra la gráfica de variación del módulo de elasticidad del concreto en el tiempo acorde con Código Europeo CEB-90, que será utilizado para calcular la rigidez de la losa en los diferentes días del proceso constructivo.

En los siguientes acápites se mostrarán los resultados de las proporciones de carga obtenidos para los sistemas constructivos de 2S, 2S+1R, 2S+2R y 2S+3R que son los planteados para desarrollar el estudio.

3.2.4. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos (2S).

El proceso que se ha seguido para el cálculo de las proporciones de carga fue el que se explicó anteriormente en el Acápite 1.3. A continuación se desarrollan los dos primeros pasos del sistema constructivo:

Paso 1: Vaciado de la losa del primer nivel.

Considerando que el nivel 0 es la cimentación y el nivel 1 es la losa del primer piso, primero se calcula el valor $\alpha_{1,0}$:

$$\alpha_{1,0} = \frac{K_0}{K_1} + \frac{K_{sh}}{K_1} = \frac{K_0}{1.29 \times 10^5} + \frac{2.89 \times 10^{-8}}{1.29 \times 10^5} \approx 0$$

$$K_0 = \gamma \frac{L^2}{EI} = 0.0173 \times \frac{6^2}{\infty \times (4.86 \times 10^{-4})} \approx 0$$

$$\gamma = \frac{L}{384 \times b} = \frac{6}{384 \times 0.9} = 0.0173$$

$E = \infty$ (Se considera que la rigidez de la cimentación es infinita)

$$K_1 = \gamma \frac{L^2}{E_0 I} = 0.0173 \times \frac{6^2}{(0.01) \times (4.86 \times 10^{-4})} = 1.29 \times 10^5$$

$$K_{sh} = \frac{H}{E_{sh} A} = \frac{2.80}{(2.1 \times 10^{11}) \times (4.62 \times 10^{-4})} = 2.89 \times 10^{-8}$$

El peso total de la losa, de ancho tributario de 0.9 m, es $P = 24300$ N

La carga que se transmite al nivel 0, es decir a la cimentación es:

$$P_0 = \frac{P}{1 + \alpha_{1,0}} = \frac{24300}{1 + 0} = 24300 \text{ N}$$

La carga que se transmite al nivel 1, es decir a la losa del primer piso es:

$$P_1 = \alpha_{1,0} \times P_0 = 0 \times 24300 = 0 \text{ N}$$

La carga en los puntales que están sobre la cimentación y soportan el 1º nivel es:

$$F_0 = P_0 = 24300 \text{ N}$$

Con estos resultados se demuestra que durante el paso 1 del sistema constructivo, la losa del primer nivel no es capaz de soportar su propio peso y todo es transferido a los puntales. Estos resultados se pueden ver a continuación en la Tabla 3.1.

Paso 2: Vaciado de la losa del segundo nivel.

Primero se calcula los ratios de carga $\alpha_{1,0}$ y $\alpha_{2,1}$

$$\alpha_{1,0} = \frac{K_0}{K_1} + \frac{K_{sh}}{K_1} = \frac{0}{4.48 \times 10^{-8}} + \frac{2.89 \times 10^{-8}}{4.48 \times 10^{-8}} = 0.64$$

$$K_0 \approx 0, \quad K_1 = \gamma \frac{L^2}{E_7 I} = 0.0173 \times \frac{6^2}{(2.87 \times 10^{10}) \times (4.86 \times 10^{-4})} = 4.48 \times 10^{-8}$$

$$\alpha_{2,1} = \frac{K_1}{K_2} + \frac{K_{sh}}{K_2} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{1,0}}\right) = \frac{4.48 \times 10^{-8}}{1.29 \times 10^5} + \frac{2.89 \times 10^{-8}}{1.29 \times 10^5} \left(1 + \frac{1}{0.64}\right) \approx 0$$

$$K_2 = \gamma \frac{L^2}{E_0 I} = 0.0173 \times \frac{6^2}{(0.01) \times (4.86 \times 10^{-4})} = 1.29 \times 10^5$$

El peso total de la losa del segundo nivel, de ancho tributario de 0.9 m, es $P = 24300$ N

A continuación se calcula los incrementos de carga en losas (P) y puntales (F) debido al vaciado de la losa del segundo nivel:

La carga que se transmite al nivel 0, es decir a la cimentación, es:

$$P_0 = \frac{P}{1 + \alpha_{1,0} + \alpha_{1,0} \times \alpha_{2,1}} = \frac{24300}{1 + 0.64 + 0.64 \times 0} = 14780.37 \text{ N}$$

La carga que se transmite al nivel 1, es decir a la losa del primer piso:

$$P_1 = \alpha_{1,0} \times P_0 = 0.64 \times 14780.37 = 9519.63 \text{ N}$$

La carga que se transmite al nivel 2, es decir a la losa del segundo piso:

$$P_2 = \alpha_{2,1} \times P_1 = 0 \times 9519.63 = 0 \text{ N}$$

La carga en los puntales que están sobre la cimentación y soportan el 1° nivel es:

$$F_0 = P_0 = 14780.37 \text{ N}$$

La carga en los puntales que están sobre la losa del primer nivel y soportan el 2° nivel es:

$$F_1 = P_0 + P_1 = 14780.37 + 9519.63 = 24300 \text{ N}$$

Para calcular las cargas totales en las losas y puntales se deben sumar los incrementos de carga que se calcularon en el paso 1 más los incrementos que se calcularon en el paso 2:

$$\text{Carga total en la losa del primer nivel: } P_{T1} = 0 + 9519.63 = 9519.63 \text{ N}$$

$$\text{Carga total en la losa del segundo nivel: } P_{T2} = 0 = 0 \text{ N}$$

$$\text{Carga total en los puntales del primer nivel: } F_{T0} = 24300 + 14780.37 = 39080.37 \text{ N}$$

$$\text{Carga total en los puntales del segundo nivel: } F_{T1} = 24300 = 24300 \text{ N}$$

Tabla 3.1 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S

Paso	Nivel	Edad (Días)	α	Incremento Carga Losa - P (N)	Incremento Carga Puntal - F (N)	Carga Total Losa Pt (N)	Carga Total Puntal - Ft (N)	Proporción Losa	Proporción puntal
1	1	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	-	-	-	24300.00					
2	2	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	1	7	0.64	9519.63	14780.37	9519.63	39080.37	0.39	1.61
	0	-	-	14780.37					
3	2	7	1.90	13454.10	-13454.10	13454.10	10845.90	0.55	0.45
	1	14	-	25626.27	-39080.37	35145.90	78160.74	1.45	3.22
4	3	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	2	7	1.51	14608.03	9691.97	28062.13	20537.87	1.15	0.85
	1	14	-	9691.97	0.00	44837.87	78160.74	1.85	3.22
5	3	7	1.90	7070.52	-7070.52	7070.52	17229.48	0.29	0.71
	2	14	-	13467.35	-20537.87	41529.48	0.00	1.71	0.00
	1	21	-	-		24300.00		1.00	0.00
6	4	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	3	7	1.51	14608.03	9691.97	21678.55	26921.45	0.89	1.11
	2	14	-	9691.97	0.00	51221.45	0.00	2.11	0.00
	1	21	-	0.00	0.00	24300.00	0.00	1.00	0.00
7	4	7	1.90	9268.18	-9268.18	9268.18	15031.82	0.38	0.62
	3	14	0.00	17653.27	-26921.45	39331.82	0.00	1.62	0.00
	2	21	0.00	0.00	0.00	24300.00	0.00	1.00	0.00
8	1	28	0.00	0.00	0.00	24300.00	0.00	1.00	0.00
	5	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	4	7	1.51	14608.03	9691.97	23876.21	24723.79	0.98	1.02
	3	14	0.00	9691.97	0.00	49023.79	0.00	2.02	0.00
8	2	21	0.00	0.00	0.00	24300.00	0.00	1.00	0.00
	1	28	0.00	0.00	0.00	24300.00	0.00	1.00	0.00

losa:	
L (m) =	6.00
b(m) =	0.90
h(m) =	0.18
W(N/m3) =	25000.00
γ =	0.02
I (m4/m) =	4.86E-04
P (N) =	24300.00
puntal:	
H(m) =	2.80
A(cm2) =	1.54
#puntales x fila =	3.00
E _{sh} (N/m2) =	2.10E+11
A equiv(m2) =	4.62E-04
Ksh =	2.89E-08

	E (N/m2)	K
E ∞	2.87E+22	4.48E-20
E ₂₈	3.50E+10	3.67E-08
E ₂₁	3.43E+10	3.75E-08
E ₁₄	3.33E+10	3.87E-08
E ₇	2.87E+10	4.48E-08
E ₀	0.01	1.29E+05

* Las unidades de las cargas están dadas en Newtons.

En la Tabla 3.1 se aprecian los resultados de la transmisión de cargas para el sistema constructivo de 2S. En las columnas se muestran los resultados que se van obteniendo en cada paso del proceso constructivo, denominándose: “Incremento Carga Losas - P” e “Incremento Carga Puntal - F” a los incrementos de cargas en losas y puntales respectivamente, “Carga Total losa - P_T” y “Carga Total puntal - F_T” son las cargas en las losas y puntales acumuladas después de cada paso del proceso constructivo y “Proporción losa” y “Proporción puntal” son las proporciones de carga tanto para las losas como para los puntales respectivamente. Se puede observar que la máxima proporción de carga en las losas es **2.11**, y se produce en el paso 6 cuando se tiene 4 niveles levantados y después de haber vaciado la losa del último nivel. La carga máxima se da en la losa del 2º nivel cuando ésta tiene 14 días después de haberse vaciado. Este valor indica que la losa carga 2.11 veces su peso propio, lo que hace suponer que si no se prevé esta situación en el diseño la losa podría fallar durante la etapa constructiva. Esta proporción de carga es la máxima que se presenta para un sistema constructivo 2S cuando se analiza un edificio de 5 niveles, y la tendencia de este valor es ser menor a 2.11 cuando se analice un edificio de más pisos.

La máxima proporción de carga para los puntales es de **1.61** y se presenta en los puntales del primer nivel, durante el paso 2 del proceso constructivo. Este valor indica que los 3 puntales que se han analizado por fila están cargando 1.61 veces el peso de la losa. Cabe recordar que se han considerado estos tres puntales como un solo puntal equivalente.

La historia de la proporción de carga de las losas del 1º, 2º y 3º nivel se muestra en la Figura 3.5, en donde se observa que las tres losas siguen la misma tendencia pero desfasadas en el paso de inicio. Las cargas en las losas después de haber llegado a su máximo valor decaen a un valor de 1.00 manteniéndose constante para los siguientes pasos. Este valor de proporción de carga se produce cuando se retiran los puntales del nivel superior de las losas, permitiendo que éstas se liberen y no carguen más que su propio peso.

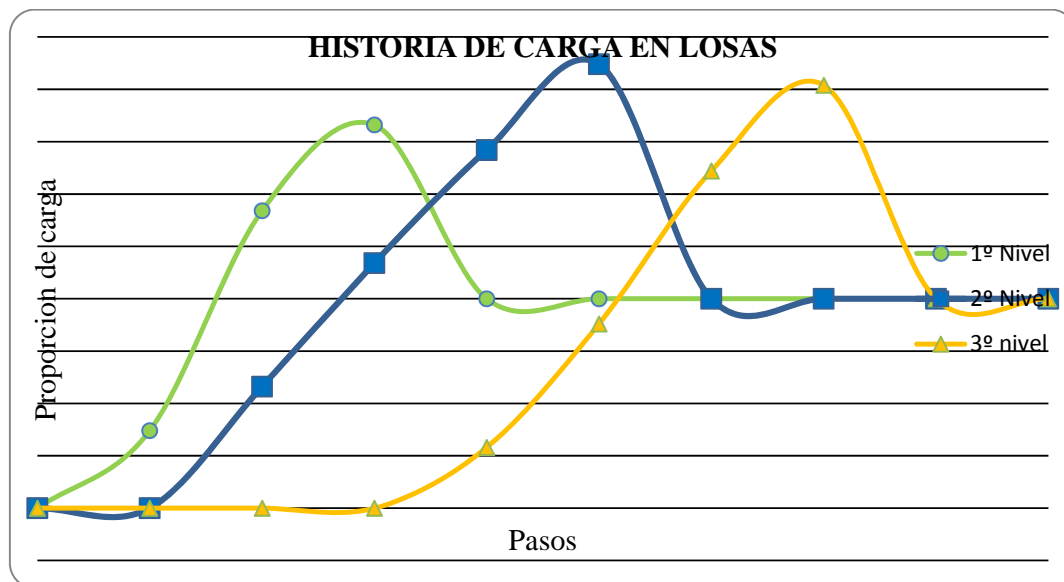


Figura 3.5 Historia de carga en losas. - 2S.

3.2.5. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos y Un Reapuntalamiento (2S+1R).

El proceso que se siguió para el cálculo de las proporciones de carga para un sistema constructivo de 2S+1R fue el que se describió en Acápite 1.4. Este cálculo se realizó para cada uno de los niveles de cada paso del sistema constructivo, logrando analizar hasta el 5° nivel del edificio. Los resultados son presentados en la Tabla 3.2. Se observa que la máxima proporción de carga en losas durante todo el proceso es **2.06**, es decir esta losa está cargando 2.06 veces su peso propio. Este máximo valor se presenta en la losa del 2° nivel cuando tiene 21 días de edad en el paso 10, cuya operación corresponde a la retirada de puntales del reapuntalamiento que soportan a esta losa. Se estima que los máximos valores de proporción de carga que se presentan del 5° nivel hacia adelante son menores a 2.06.

En los puntales el máximo valor de carga es **1.61** y se presenta en los puntales del 1° nivel, al igual que en el sistema constructivo 2S. Esto se debe a que este paso es el mismo en ambos sistemas constructivos.

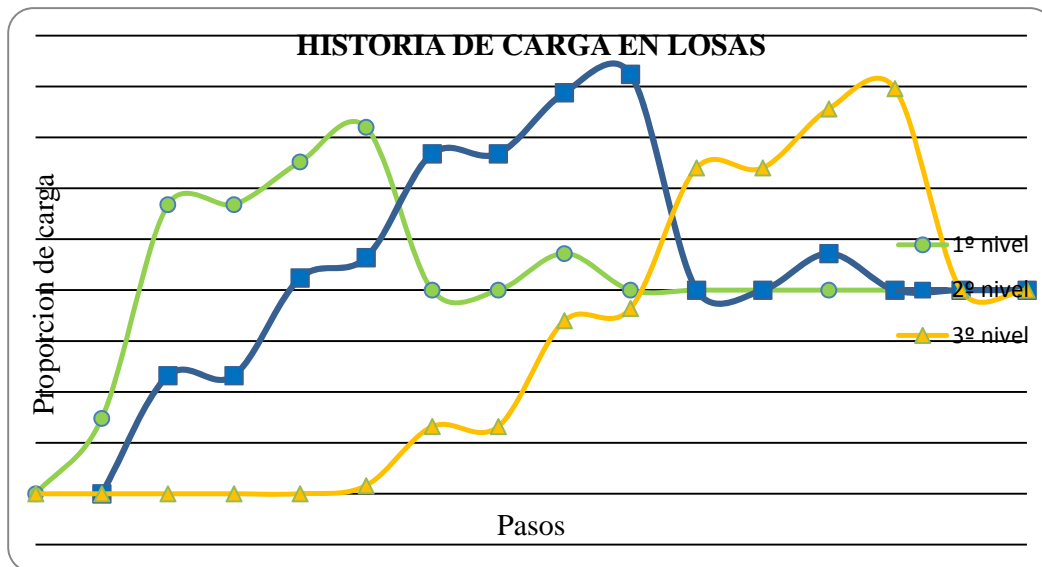


Figura 3.6 Historia de carga en losas. -2S+1R.

En la Figura 3.6 se muestra el historial de proporción de carga de las losas del 1º, 2º y 3º nivel durante cada paso del proceso constructivo. Las curvas de carga de las losas tienen la misma tendencia y convergen a un valor de 1.00 después de haber alcanzado el máximo valor de proporción de carga. Esto se debe a que en el siguiente paso, después de alcanzar su máximo valor, se le retiran los puntales que están sobre ella, haciendo que no le llegue carga de las losas superiores, lo cual implica que su propio peso es la única carga soportada por dicha losa. En los dos pasos siguientes se produce un incremento de la carga por el reapuntalamiento que se realiza sobre la losa en análisis, y por el vaciado de la última losa; sin embargo este nuevo valor es menor al máximo valor de proporción de carga.

Tabla 3.2 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S+1R

Paso	Nivel	Edad (Días)	α	Incremento Carga Losa - P (N)	Incremento Carga Puntal - F (N)	Carga Total Losa - PT (N)	Carga Total Puntal - FT (N)	Proporción Losa	Proporción puntal
1	1	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	0	=		24300.00					
2	2	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	1	7	0.64	9519.63	14780.37	9519.63	39080.37	0.39	1.61
	0	=		14780.37					
3, 4	2	7	1.90	13454.10	-13454.10	13454.10	10845.90	0.55	0.45
	1	14		25626.27	-39080.37	35145.90	0.00	1.45	0.00
5	3	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	2	7	2.37	12227.98	12072.02	25682.08	22917.92	1.06	0.94
	1	14	0.75	5158.64	6913.38	40304.54	6913.38	1.66	0.28
	0	=		6913.38					
6	3	7	2.32	922.26	-922.26	922.26	23377.74	0.04	0.96
	2	14	1.80	2138.68	-3060.93	27820.75	19856.99	1.14	0.82
	1	21		3852.45	-6913.38	44156.99	0.00	1.82	0.00
7, 8	3	7		6836.12	-6836.12	7758.37	16541.63	0.32	0.68
	2	14	1.90	13020.87	-19856.99	40841.63	0.00	1.68	0.00
	1	21				24300.00	1.00	0.00	
9	4	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	3	7	1.88	13200.94	11099.06	20959.32	27640.68	0.86	1.14
	2	14	1.72	7011.86	4087.19	47853.49	4087.19	1.97	0.17
	1	21		4087.19		28387.19	0.00	1.17	0.00
10	4	7	2.32	545.24	-545.24	545.24	23754.76	0.02	0.98
	3	14	1.80	1264.39	-1809.62	22223.70	25831.06	0.91	1.06
	2	21		2277.57	-4087.19	50131.06	0.00	2.06	0.00
	1	28		0.00		24300.00	0.00	1.00	0.00
11,12	4	7		8892.79	-8892.79	9438.03	14861.97	0.39	0.61
	3	14	1.90	16938.27	-25831.06	39161.97	0.00	1.61	0.00
	2	21				24300.00	0.00	1.00	0.00
	1	28				24300.00	0.00	1.00	0.00
13	5	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	4	7	1.88	13200.94	11099.06	22638.98	25961.02	0.93	1.07
	3	14	1.72	7011.86	4087.19	46173.83	4087.19	1.90	0.17
	2	21		4087.19		28387.19	0.00	1.17	0.00
14	1	28				24300.00	0.00	1.00	0.00
	5	7	2.32	545.24	-545.24	545.24	23754.76	0.02	0.98
	4	14	1.80	1264.39	-1809.62	23903.36	24151.40	0.98	0.99
	3	21		2277.57	-4087.19	48451.40	0.00	1.99	0.00
	2	28		0.00		24300.00	0.00	1.00	0.00
15,16	1	35		0.00		24300.00	0.00	1.00	0.00
	5	7		8314.54	-8314.54	8859.78	15440.22	0.36	0.64
	4	14	1.90	15836.86	-24151.40	39740.22	0.00	1.64	0.00
	3	21				24300.00	0.00	1.00	0.00
	2	28				24300.00	0.00	1.00	0.00
1	35				24300.00	0.00	1.00	0.00	

losa:
 L (m) = 6.00
 b(m) = 0.90
 h(m) = 0.18
 W(N/m3) = 25000.00
 $\gamma =$ 0.02
 I (m4/m) = 4.86E-04
 P (N) = 24300.00
puntal:
 H(m) = 2.80
 A(cm2) = 1.54
 #puntales x fila = 3.00
 Esh (N/m2) = 2.10E+11
 Aequiv(m2) = 4.62E-04
 Ksh = 2.89E-08

	E (N/m2)	K
E ∞	2.87E+22	4.48E-20
E28	3.50E+10	3.67E-08
E21	3.43E+10	3.75E-08
E14	3.33E+10	3.87E-08
E7	2.87E+10	4.48E-08
E0	0.01	1.29E+05

* Las unidades de las cargas estan dadas en Newtons.

3.2.6. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos y Dos Reapuntalamientos (2S+2R).

El proceso que se siguió para el cálculo de las proporciones de carga para un sistema constructivo 2S+2R fue el que se describió en el Acápite 1.5. El análisis se realizó hasta el 5° nivel del edificio. Los resultados para este Sistema constructivo son presentados en la Tabla 3.3. Se observa que la máxima proporción de carga en la losa es **1.96**, lo cual quiere decir que esta losa carga 1.96 veces su peso propio. Esta máxima proporción se produce en el 2° nivel a los 21 días después de haber vaciado esta losa, durante el paso 8, cuya operación corresponde a la retirada de los repuntales del 1° nivel. La losa del 2° nivel asume una carga adicional aumentando su proporción de carga de 1.93, que tenía en el paso 7, a 1.96 porque los puntales que soportan esta losa se relajan.

En el paso 11 se repite un ciclo del sistema constructivo y el esquema de los puntales es el mismo al del paso 8. Sin embargo la proporción de carga máxima en el paso 11 se presenta en el 3° nivel obteniendo un valor de 1.89, siendo menor que al obtenido en el paso 8, lo cual indica que los pasos siguientes al 11 se esperan proporciones de carga menores a la presentada en la losa del 2° nivel del paso 8.

Al igual que en los sistemas constructivos anteriores el máximo valor de carga en puntales es **1.61** y se presenta en los puntales del 1° nivel al igual que en los sistemas constructivos 2S y 2S+1R. Esto es debido a que este paso es el mismo en los tres sistemas constructivos.

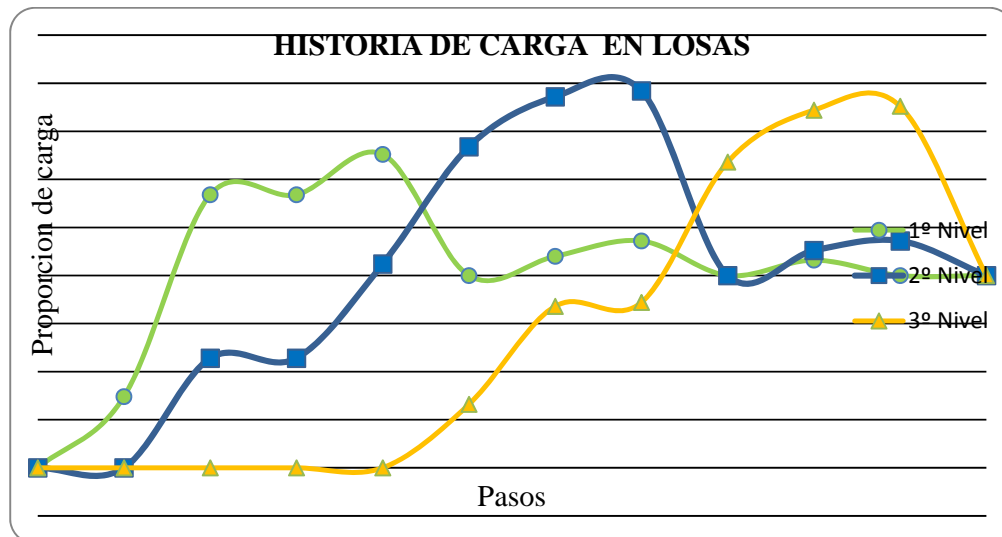


Figura 3.7 Historia de carga en losas. -2S+2R.

En la Figura 3.7 se muestra la historia de cargas de los diferentes pasos del proceso constructivo para las losas del 1°, 2° y 3° nivel. Se puede observar que los valores máximos de proporción para cada losa se presentan en los pasos 5, 8 y 11 para la losa del 1°, 2° y 3° nivel respectivamente. Las graficas de carga de la losas del 2° y 3° nivel presentan una tendencia similar pero desfasadas, donde después de llegar a su máximo valor de proporción de carga descienden hasta un valor de 1.00.

Tabla 3.3 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S+2R

Paso	Nivel	Edad (Días)	α	Incremento Carga Losa - P (N)	Incremento Carga Puntal - F (N)	Carga Total Losa - PT (N)	Carga Total Puntal - FT (N)	Proporción Losa	Proporción puntal
1	1	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	0	-		24300.00					
2	2	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	1	7	0.64	9519.63	14780.37	9519.63	39080.37	0.39	1.61
	0	-		14780.37					
3,4	2	7	1.90	13454.10	-13454.10	13454.10	10845.90	0.55	0.45
	1	14		25626.27	-39080.37	35145.90	0.00	1.45	0.00
5	3	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	2	7	2.37	12227.98	12072.02	25682.08	22917.92	1.06	0.94
	1	14	0.75	5158.64	6913.38	40304.54	6913.38	1.66	0.28
	0	-		6913.38					
6	3	7	1.90	7889.89	-7889.89	7889.89	16410.11	0.32	0.68
	2	14		15028.03	-22917.92	40710.11	0.00	1.68	0.00
	1	21		0.00		24300.00		1.00	0.00
7	4	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	3	7	2.06	12778.28	11521.72	20668.18	27931.82	0.85	1.15
	2	14	2.68	6206.82	5314.90	46916.92	5314.90	1.93	0.22
	1	21	0.77	2311.70	3003.20	26611.70	3003.20	1.10	0.12
8	4	7	1.90	176.94	-176.94	176.94	24123.06	0.01	0.99
	3	14	2.21	337.02	-513.96	21005.20	27417.86	0.86	1.13
	2	21	2.35	743.28	-1257.24	47660.20	4057.66	1.96	0.17
	1	28		1745.96	-3003.20	28357.66	0.00	1.17	0.00
9	4	7	1.90	9439.08	-9439.08	9616.02	14683.98	0.40	0.60
	3	14		17978.78	-27417.86	38983.98	0.00	1.60	0.00
	2	21				24300.00	0.00	1.00	0.00
	1	28				24300.00	0.00	1.00	0.00
10	5	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	4	7	1.95	12848.06	11451.94	22464.08	26135.92	0.92	1.08
	3	14	2.14	6605.65	4846.29	45589.63	4846.29	1.88	0.20
	2	21	1.75	3083.84	1762.45	27383.84	1762.45	1.13	0.07
11	1	28		1762.45		26062.45	0.00	1.07	0.00
	5	7	1.90	103.84	-103.84	103.84	24196.16	0.00	1.00
	4	14	2.21	197.78	-301.62	22661.86	25834.30	0.93	1.06
	3	21	2.35	436.20	-737.82	46025.83	4108.47	1.89	0.17
12	2	28		1024.63	-1762.45	28408.47	0.00	1.17	0.00
	1	35				24300.00	0.00	1.00	0.00
	5	7	1.90	8893.91	-8893.91	8997.75	15302.25	0.37	0.63
12	4	14		16940.39	-25834.30	39602.25	0.00	1.63	0.00
	3	21				24300.00	0.00	1.00	0.00
	2	28				24300.00	0.00	1.00	0.00
	1	35				24300.00	0.00	1.00	0.00

* Las unidades de las cargas estan dadas en Newtons.

losa:
 L (m) = 6.00
 b(m) = 0.90
 h(m) = 0.18
 W(N/m3) = 25000.00
 γ = 0.02
 I (m4/m) = 4.86E-04
 P (N) = 24300.00
 puntal:
 H(m) = 2.80
 A(cm2) = 1.54
 #puntales x fila = 3.00
 Esh (N/m2) = 2.10E+11
 Aequiv(m2) = 4.62E-04
 Ksh = 2.89E-08

	E (N/m2)	K
E∞	2.87E+22	4.48E-20
E35	3.54E+10	3.63E-08
E28	3.50E+10	3.67E-08
E21	3.43E+10	3.75E-08
E14	3.33E+10	3.87E-08
E7	2.87E+10	4.48E-08
E0	0.01	1.29E+05

3.2.7. Resultados para el sistema constructivo de Dos Apuntalamientos y Tres Reapuntalamientos (2S+3R).

El proceso que se siguió para el cálculo de las proporciones de carga para un sistema constructivo de 2S+3R fue el que se describió en el Acápite 1.6. Los resultados para este sistema constructivo son mostrados en la Tabla 3.4. Se observa que la máxima proporción de carga en la losa es **1.93**, y se produce en el 2° nivel, durante el paso 7, a los 14 días de haber vaciado esta losa. En el paso 6, la losa del 2° nivel tiene una proporción de carga de 1.68, incrementándose en un 15% al pasar al paso 7, cuando se hace el vaciado de la losa del 4° nivel.

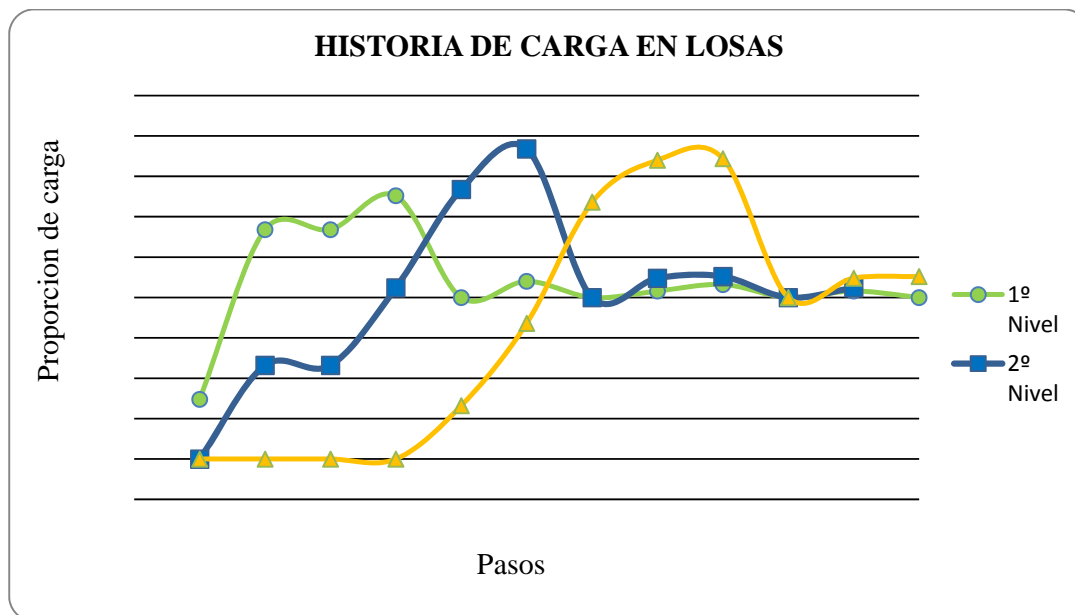


Figura 3.8 Historia de carga en losas. -2S+3R.

En Figura 3.8, se observa que la losa del 2° nivel, después de haber alcanzado la máxima proporción de carga, se descarga, y la proporción de carga pasa a ser 1.00 en el siguiente paso. Esto se debe a que se desapuntala el 3° nivel, permitiendo que la losa del 2° nivel se libere y no cargue más que su propio peso. En los siguientes pasos, cuando se reapuntala la losa del 3° nivel para seguir construyendo los niveles superiores, estos repuntales transmiten carga a la losa del 2° nivel, pero en menor magnitud originando que las proporciones de carga se incremente de 1.00 a 1.13 y luego desciende a 1.00, cuando una losa que se encuentra por encima de la losa del 2° nivel se le retiran los puntales y luego se reapuntala, para seguir construyendo los niveles superiores.

El máximo valor de carga en puntales, al igual que en los sistemas constructivos anteriores, es **1.61** y se presenta en los puntales del 1° nivel.

Tabla 3.4 Proporciones de carga en losa y puntales para sistema constructivo 2S+3R.

Paso	Nivel	Edad (Días)	α	Incremento Carga Losa - P (N)	Incremento Carga Puntal - F	Carga Total Losa - PT (N)	Carga Total Puntal - FT (N)	Proporción Losa	Proporción puntal
1	1	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	0	-		24300.00					
2	2	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	1	7	0.64	9519.63	14780.37	9519.63	39080.37	0.39	1.61
	0	-		14780.37					
3,4	2	7	1.90	13454.10	-13454.10	13454.10	10845.90	0.55	0.45
	1	14		25626.27	-39080.37	35145.90	0.00	1.45	0.00
5	3	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	2	7	2.37	12227.98	12072.02	25682.08	22917.92	1.06	0.94
	1	14	0.75	5158.64	6913.38	40304.54	6913.38	1.66	0.28
	0	-		6913.38					
6	3	7	1.90	7889.89	-7889.89	7889.89	16410.11	0.32	0.68
	2	14		15028.03	-22917.92	40710.11	0.00	1.68	0.00
	1	21		0.00		24300.00		1.00	0.00
7	4	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	3	7	2.06	12778.28	11521.72	20668.18	27931.82	0.85	1.15
	2	14	2.68	6206.82	5314.90	46916.92	5314.90	1.93	0.22
	1	21	0.77	2311.70	3003.20	26611.70	3003.20	1.10	0.12
8	4	7	1.90	9616.02	-9616.02	9616.02	14683.98	0.40	0.60
	3	14		18315.80	-27931.82	38983.98	0.00	1.60	0.00
	2	21				24300.00	0.00	1.00	0.00
	1	28				24300.00	0.00	1.00	0.00
9	5	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	4	7	2.01	12879.96	11420.04	22495.98	26104.02	0.93	1.07
	3	14	2.34	6400.49	5019.55	45384.47	5019.55	1.87	0.21
	2	21	2.73	2738.83	2280.72	27038.83	2280.72	1.11	0.09
	1	28	0.79	1003.33	1277.39	25303.33	1277.39	1.04	0.05
10	5	7	1.90	31.59	-31.59	31.59	24268.41	0.00	1.00
	4	14	2.21	60.17	-91.76	22556.15	26012.26	0.93	1.07
	3	21	2.35	132.70	-224.46	45517.17	4795.09	1.87	0.20
	2	28	2.38	311.71	-536.17	27350.54	1744.55	1.13	0.07
	1	35		741.22	-1277.39	26044.55	0.00	1.07	0.00
11	5	7	1.90	8955.17	-8955.17	8986.76	15313.24	0.37	0.63
	4	14		17057.09	-26012.26	39613.24	0.00	1.63	0.00
	3	21				24300.00	0.00	1.00	0.00
	2	28				24300.00	0.00	1.00	0.00
12	6	0	0.00	0.00	24300.00	0.00	24300.00	0.00	1.00
	5	7	2.00	12911.55	11388.45	21898.32	26701.68	0.90	1.10
	4	14	2.25	6460.66	4927.79	46073.89	4927.79	1.90	0.20
	3	21	2.18	2871.53	2056.26	27171.53	2056.26	1.12	0.08
	2	28	1.77	1315.04	741.22	25615.04	741.22	1.05	0.03
13	6	7	1.90	18.33	-18.33	18.33	24281.67	0.00	1.00
	5	14	2.21	34.91	-53.24	21933.23	26648.44	0.90	1.10
	4	21	2.35	77.00	-130.24	46150.89	4797.55	1.90	0.20
	3	28	2.38	180.87	-311.12	27352.41	1745.14	1.13	0.07
	2	35		430.10	-741.22	26045.14	0.00	1.07	0.00
1	42		0.00		24300.00	0.00	1.00	0.00	

* Las unidades de las cargas estan dadas en Newtons.

losa:
 L (m) = 6.00
 b(m) = 0.90
 h(m) = 0.18
 W(N/m3) = 25000.00
 γ = 0.02
 I (m4/m) = 4.86E-04
 P (N) = 24300.00

puntal:
 H(m) = 2.80
 A(cm2) = 1.54

#puntales x fila = 3.00

Esh (N/m2) = 2.10E+11
 Aequiv(m2) = 4.62E-04

Ksh = 2.89E-08

	E (N/m2)	K
E ∞	2.87E+22	4.48E-20
E ₃₅	3.54E+10	3.63E-08
E ₂₈	3.50E+10	3.67E-08
E ₂₁	3.43E+10	3.75E-08
E ₁₄	3.33E+10	3.87E-08
E ₇	2.87E+10	4.48E-08
E ₀	1.00	1.29E+03

3.3. Discusión de resultados

A continuación se presentan en la Tabla 3.5 y Tabla 3.7 dos cuadros resumen de los máximos valores de proporción de carga encontrados tanto en losas como en puntales para los cuatro sistemas constructivos analizados.

Tabla 3.5 Máximas proporciones de carga en losas.

SISTEMA CONSTRUCTIVO	MAX. PROPORCION DE CARGA	NIVEL DE LA LOSA	TIEMPO DEL CONCRETO (DIAS)	PASO CONSTRUCTIVO
2S	2.11	2º Nivel	14	Paso 6: Es durante el vaciado de la losa del 4º nivel, sólo teniendo apuntaladas las losas del 3º y 4º nivel.
2S+1R	2.06	2º Nivel	21	Paso 10 : Es durante la retirada de los repuntales de la losa del 2º nivel, teniendo apuntalados el 3º y 4º nivel, habiendo pasado 7 días del vaciado de la losa de 4º nivel.
2S+2R	1.96	2º Nivel	21	Paso 8 : Es durante la retirada de los repuntales de la losa del 1º nivel, teniendo reapuntalado el 2º nivel y apuntalados el 3º y 4º nivel, habiendo pasado 7 días del vaciado de la losa de 4º nivel.
2S+3R	1.93	2º Nivel	14	Paso 7: Es durante el vaciado de la losa del 4º nivel, teniendo reapuntalados el 1º y 2º nivel, y apuntalados el 3º y 4º nivel.

En la Tabla 3.5 se observa, como se vio anteriormente, el máximo valor de proporción de carga se presenta en la losa del 2º nivel para los sistemas constructivos analizados. También se aprecia que la proporción de carga máxima disminuye a medida que se suma un nivel más de reapuntales al sistema constructivo. Esto se puede ver en el sistema de dos niveles apuntalados y uno reapuntalado (2S+1R), donde el máximo valor de proporción de carga es 2.06. Al aumentar un nivel de reapuntamiento es decir al pasar al sistema de 2S+2R el valor de proporción de carga disminuye a 1.96. De igual manera sucede al pasar de un sistema constructivo 2S+2R al sistema 2S+3R donde el valor de proporción de carga disminuye de 1.96 a 1.93.

Tabla 3.6 Máxima proporción de carga en la losa del 2º nivel a los 14 días.

SISTEMA CONSTRUCTIVO	MAX. PROPORCION DE CARGA	PASO CONSTRUCTIVO
2S	2.11	Paso 6: Es durante el vaciado de la losa del 4º nivel, sólo teniendo apuntaladas las losas del 3º y 4º nivel.
2S+1R	1.97	Paso 9: Es durante el vaciado de la losa de 4º nivel, sólo teniendo apuntalado el 3º y 4º nivel, y reapuntalado el 2º nivel.
2S+2R	1.93	Paso 7: Es durante el vaciado de la losa de 4º nivel, sólo teniendo apuntalado el 3º y 4º nivel, y reapuntalado el 2º nivel y 1º nivel.
2S+3R	1.93	Paso 7: Es durante el vaciado de la losa del 4º nivel, teniendo reapuntalados el 1º y 2º nivel, y apuntalados el 3º y 4º nivel.

Con los resultados de la Tabla 3.6 se puede afirmar que si se busca tener valores menores de proporción de carga en losas, durante el proceso constructivo de un edificio, se deberá trabajar con niveles reapuntalados en la cantidad que sea necesaria.

Tabla 3.7 Máximas proporciones de carga en puntales.

SISTEMA CONSTRUCTIVO	MAX. PROPORCION DE CARGA	NIVEL DE LOS PUNTALES	TIEMPO DEL CONCRETO (DIAS)	PASO CONSTRUCTIVO
2S	1.61	1° Nivel	7	Paso 2: Es durante el vaciado de la losa del 2° nivel, teniendo apuntalados el 1° y 2° nivel.
2S+1R	1.61	1° Nivel	7	
2S+2R	1.61	1° Nivel	7	
2S+3R	1.61	1° Nivel	7	

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados de las máximas proporciones de cargas en los puntales para los sistemas constructivos estudiados. Se concluye que cuando se trabaja con dos niveles apuntalados y sin importar el número de niveles reapuntalados, el máximo valor de proporción de carga es el mismo para todos los sistemas constructivos y se presenta en los puntales del 1° nivel cuando la losa de este nivel tiene 7 días después de su vaciado.

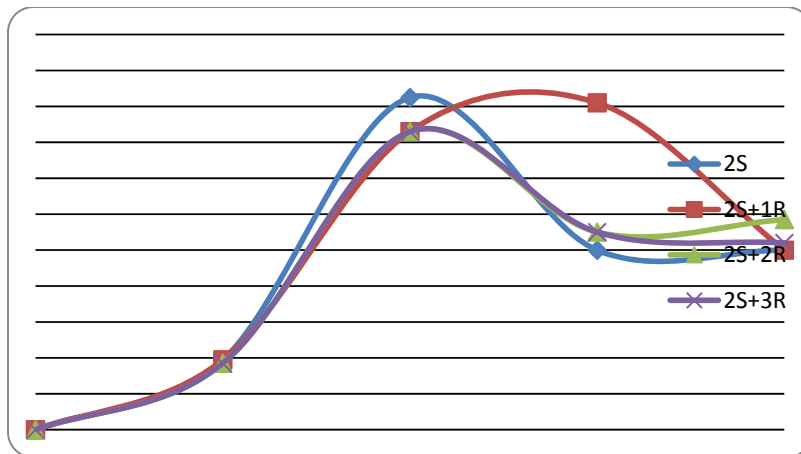


Figura 3.9 Historia de carga de la losa del 1° Nivel.

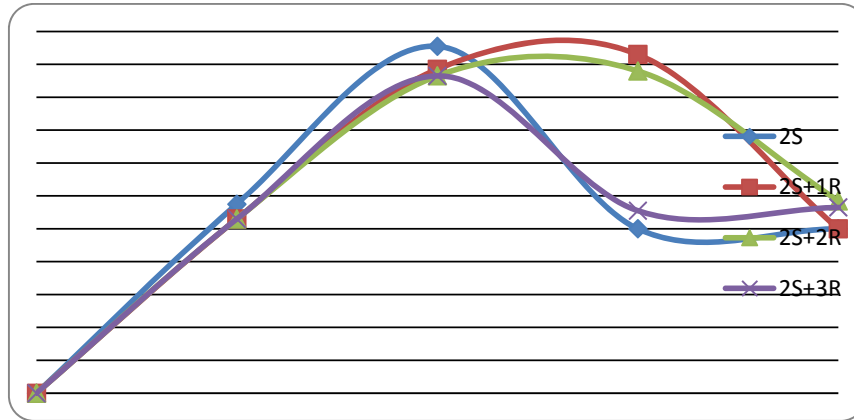


Figura 3.10 Historia de carga de la losa del 2º Nivel.

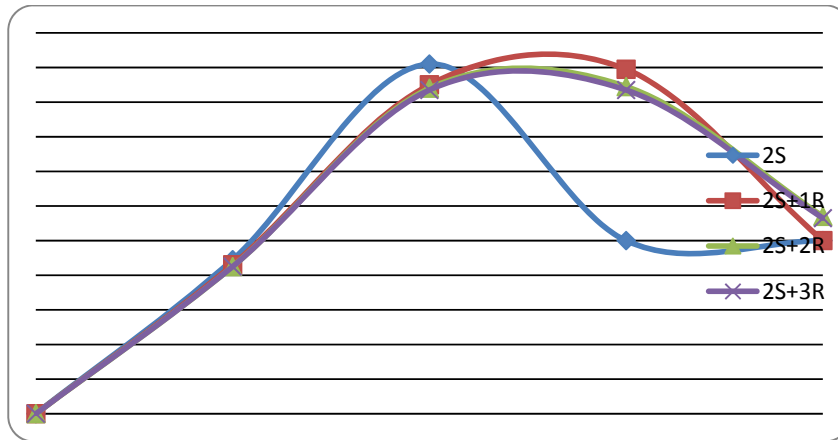


Figura 3.11 Historia de carga de la losa del 3º Nivel.

En la Figura 3.9, Figura 3.10 y Figura 3.11 se muestra la historia de carga de las losas del 1º, 2º y 3º nivel respectivamente, para los cuatro sistemas constructivos. En las figuras se observa que la edad crítica de las losas se encuentra entre los 14 y 21 días después de su vaciado, puesto que a esa edad se presentan los mayores valores de proporciones de carga durante el proceso constructivo. En los resultados de proporción de carga mostrados en las tres losas a los 14 días, se observa que la mayor diferencia entre los resultados es de 2.1% entre los sistemas constructivos 2S+1R, 2S+2R y 2S+3R; y la mayor diferencia entre éstos y el sistema 2S es de 11.4%.

Con respecto a los resultados de las losas a los 21 días, se observa que existe una mayor diferencia entre los sistemas 2S y 2S+1R; mientras que la diferencia entre los sistemas 2S+2R y 2S+3R es menor.

En líneas generales se puede afirmar que cuando se trabaja con sistemas constructivos de dos apuntalamientos y niveles reapuntalados, no es necesario utilizar en el sistema constructivo más de dos niveles reapuntalados puesto que a los 14 días de edad la disminución de los valores de proporción de carga en las losas no es tan considerable.

Capítulo 4.

Obtención de nuevos resultados usando el Método de EFM y el programa SAP2000.

4.1. Descripción del modelo.

Con las consideraciones del Método de Pórtico Equivalente (EFM) de Stivaros y Halvorsen (1990) se elaboró, usando el programa SAP2000, un modelo que permita obtener nuevos resultados de transmisión de cargas en losas y puntales.

Estas consideraciones son las siguientes:

- Las losas y las columnas tienen un comportamiento elástico, y su módulo de elasticidad varía en el tiempo. No se consideran los efectos del flujo plástico (*creep*) ni de contracción (*shrinkage*).
- Los puntales y repuntales son elementos continuos y elásticos, y tienen una rigidez acorde a las dimensiones de su sección y al módulo de elasticidad del material (acero).
- Se asume que los repuntales no toman carga al momento de su instalación, por lo que las losas se deforman libremente antes de la colocación de éstos.
- Las conexiones entre puntales o repuntales y losas de piso se suponen articuladas.

En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se muestra una idealización de la estructura en 2D, conformada principalmente por columnas y losas que se apoyan en puntales y repuntales durante el proceso constructivo. Las columnas se encuentran distanciadas cada 6 m con 3 puntales internos en la fila de cada vano distanciados a 1.5 m. La altura de entrepiso del modelo es 2.8 m.

En base al modelo del Método del Pórtico Equivalente (EFM), se asume que los puntales y repuntales son reemplazados por un número igual de soportes elásticos, teniendo cada uno el área y rigidez igual al área y rigidez de los puntales correspondientes. También se asume que los repuntales no cargan cuando se han instalado inicialmente, es decir, previamente se permite deflectar las losas por carga del propio peso y cargas de construcción. La carga de la losa fresca recién vaciada, correspondiente al área tributaria de cada puntal es aplicada como una carga concentrada en la parte superior del piso apuntalado.

La conexión entre los puntales o repuntales y la losa de piso, razonablemente puede asumirse como articulada; y en lo que se refiere al nivel de cimentación, los puntales y repuntales pueden considerarse que son soportados en una cimentación rígida, y las columnas empotradas en la base.

El programa SAP2000 permite obtener resultados como por ejemplo las fuerzas axiales que se presentan en los puntales durante cada proceso constructivo. Estas fuerzas se obtienen de los diagramas de carga axial que brinda el programa. Haciendo la sumatoria en cada nivel de las cargas axiales que se transmiten a través de cada puntal o repuntal, y dividiendo entre el peso de la losa se calcula la proporción de carga de los puntales de cada nivel. Por diferencia de cargas de los puntales ubicados entre la parte superior e inferior de la losa se determina la proporción de carga que es transmitida a las losas.

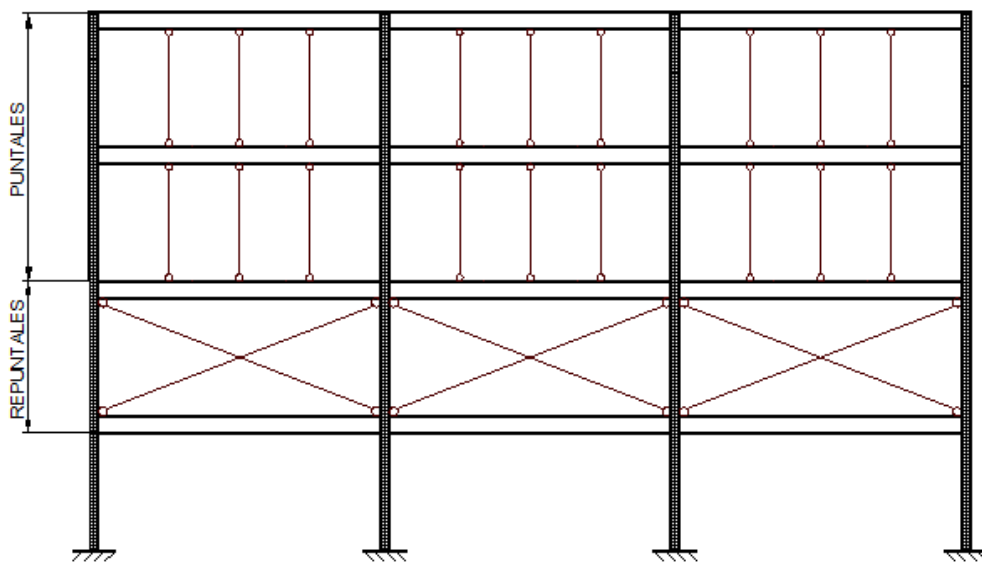


Figura 4.1 Idealización del modelo estructural en pórtico de tres vanos.

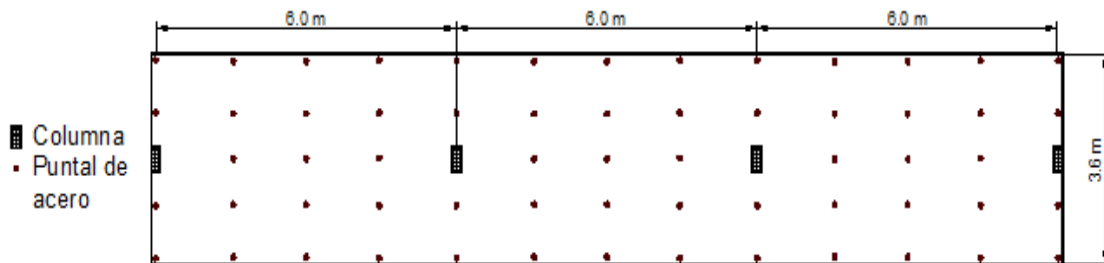


Figura 4.2 Planta típica del modelo en pórtico de tres vanos.

4.2. Descripción del análisis secuencial por etapas “Staged construction”- SAP2000.

En general el análisis estructural de un edificio de concreto armado se realiza considerando que todos los elementos estructurales existen cuando son solicitados por las diversas cargas. De este modo, los esfuerzos solicitantes obtenidos mediante un análisis, son empleados para dimensionar las secciones de los elementos estructurales en el estado último. En principio, esta consideración es válida para las cargas horizontales debido al viento y sismo, y para las cargas verticales aplicadas a la estructura terminada. Pero para las cargas, como el peso propio, que son impuestas gradualmente en las diferentes etapas de la construcción, este análisis general no sería muy preciso. En tal caso, es más conveniente que se considere la secuencia de construcción del edificio.

Para las cargas que se generan durante el proceso constructivo de una edificación, es necesario conocer el cronograma de la obra para saber en qué etapas éstas van a actuar.

Normalmente cuando se analiza un edificio ante las cargas de peso propio sin considerar el análisis secuencial por etapas, se somete a las losas y columnas de los pisos superiores a los efectos del peso propio de los pisos inferiores, generando desplazamientos verticales inexistentes. Por eso es necesario realizar un análisis estructural secuencial que tenga en cuenta las etapas de construcción.

El análisis secuencial por etapas es un análisis que permite un comportamiento más real de la estructura puesto que tiene en cuenta la secuencia natural de la construcción, con este análisis se logra resultados más precisos de fuerzas y deformaciones en los elementos.

Este procedimiento de análisis toma en cuenta todo el cronograma constructivo, y trabaja con la superposición gradual de efectos de los diferentes pisos y del modelado del sistema de apuntalamiento con valores representativos de la rigidez. De esta manera, son consideradas las distintas etapas de la construcción, todas con características de resistencia y deformación de losas y columnas en función de la edad y maduración del concreto. Asimismo este tipo de análisis hace posible obtener el historial de cargas de los elementos estructurales, desde el inicio hasta el final de la obra, previo conocimiento del cronograma de trabajo.

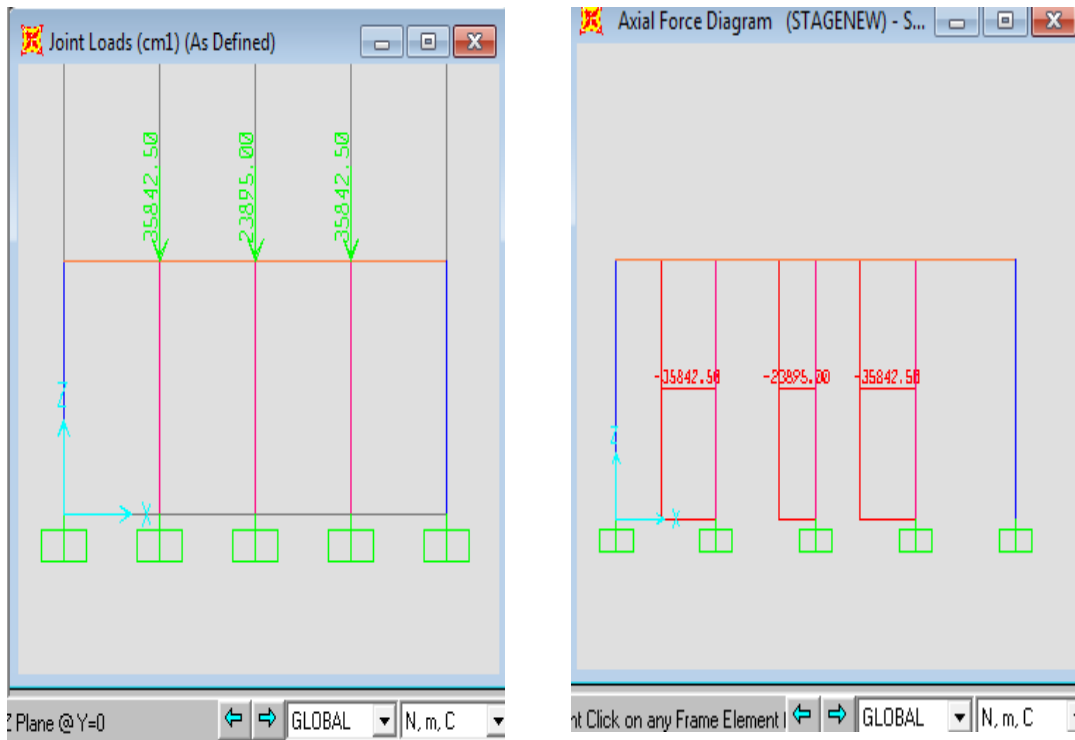
Cada etapa de la construcción es tratada como un modelo en dos dimensiones y el método de los elementos finitos se aplica para resolver la estructura, considerado un análisis estático no-lineal, ya que la estructura puede cambiar durante el curso del análisis, tanto geométrica como físicamente, dado el hecho que cada etapa se aplica sobre un piso en estado deformado y el módulo de elasticidad de la losa varía en el tiempo.

La magnitud de los esfuerzos y deformaciones en los elementos estructurales y puntales es incremental, debido a que la estructura es cargada a medida en que es construida. De este modo, se suman los esfuerzos o deformaciones iniciales, causados por las cargas ya existentes en el sistema temporal de soporte. Esa secuencia progresiva debe continuar hasta el retiro de los puntales de sustentación del último piso.

La distribución de esa carga cambia conforme madura el concreto del piso vaciado. Al poco tiempo después del vaciado, el concreto será capaz de absorber parte de su propio peso. Teniendo en cuenta que el ciclo de construcción es de una losa por semana, interesa saber la nueva distribución de las cargas 7 días después del vaciado.

Se realizará el modelado de las etapas donde el piso no posee la capacidad para absorber carga (piso recién vaciado) sólo para valorar momentáneamente la seguridad de la construcción y para establecer el historial de cargas de los elementos estructurales. En la Figura 4.3 se puede observar el modelo de una losa fresca con la carga de peso propio asignada. También con el diagrama de carga axial en los puntales se puede observar que toda la carga es tomada por los puntales.

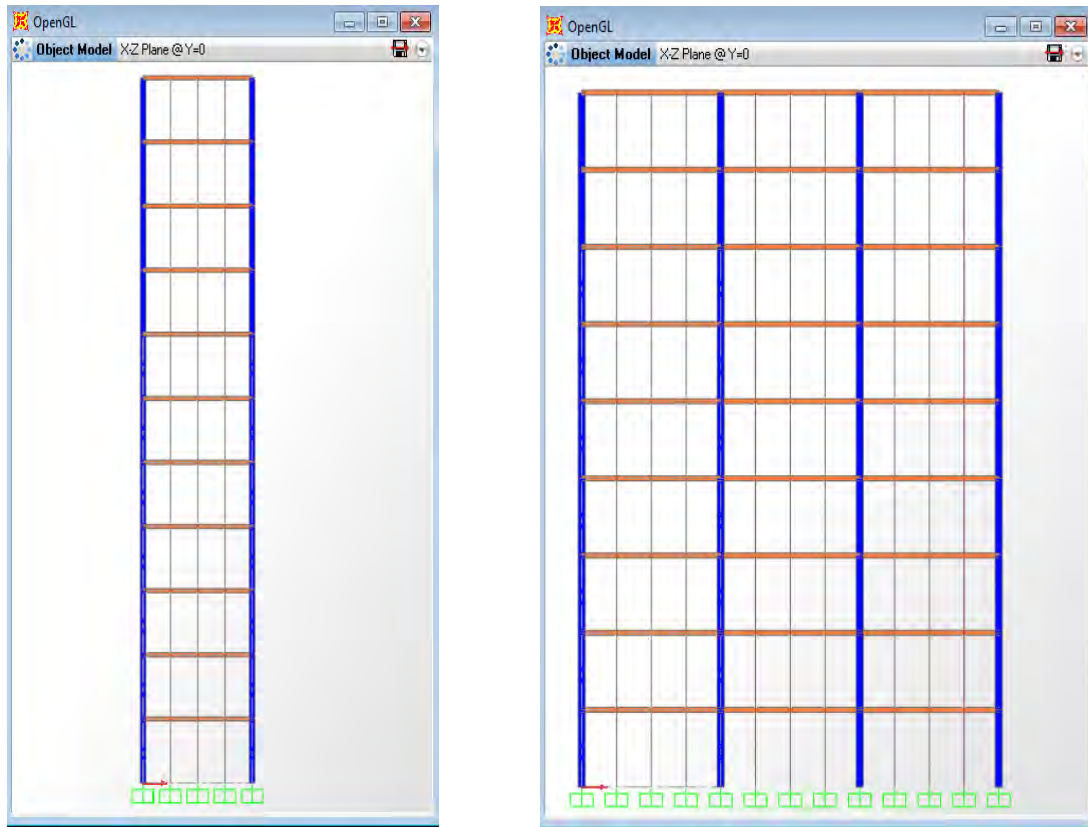
Es preciso indicar que sería complicado obtener la distribución real de esfuerzos entre el concreto fresco y los encofrados, puesto que la interacción entre los dos materiales involucrados es compleja. Además, tal nivel de realismo no se requiere en este estudio.



a) Asignación de carga en losa.

b) Diagrama de carga axial en puntales.

Figura 4.3 Modelo de losa recién vaciada.



a) Pórtico de un vano.

b) Pórtico de tres vanos.

Figura 4.4 Modelo de pórtico de uno y tres vanos en SAP2000.

En la Figura 4.4 se observa la estructura modelada en el programa SAP2000. En la figura de la izquierda se muestra el modelo de la estructura de un solo vano, y en la figura de la derecha el modelo de la estructura de tres vanos. Estas estructuras fueron modeladas teniendo en cuenta las consideraciones expuestas anteriormente y las propiedades de los materiales que se expondrán en el Acápite 4.3.

Finalmente en el Anexo B, se adjunta un pequeño tutorial de los pasos a seguir en el análisis secuencial por etapas usando el módulo *Staged Construction* del SAP2000; el cual será la herramienta para la obtención de nuevos resultados de transmisión de cargas.

4.3. Propiedades de los materiales utilizados en el modelo.

Los materiales empleados en el modelo fueron los mismos que se utilizaron para el modelo del Método Simplificado Mejorado de Duan y Chen (1995). Esto con el propósito de comparar resultados.

Las medidas y propiedades de los materiales de los elementos se detallan a continuación:

Losas:

Dimensiones:

Peralte = 18 cm.

Longitud de losa, de eje a eje de columna = 6 m.

Ancho tributario = 3.6 m.

Columnas:

Dimensiones:

Peralte = 30 cm.

Ancho = 30 cm.

Altura de entrepiso = 2.8 m.

Propiedades del material de losas y columnas:

Concreto armado: $f'_c = 41 \text{ MPa}$ (418 kg/cm^2).Peso específico: $W = 25000 \text{ N/m}^3$ (2549 kg/m^3).Módulo de elasticidad: $E_c = 35 \text{ GPa}$ ($3.56 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$) a los 28 días.Puntal y repuntal:

Tipo: Ulma PN 1.75 - 3.10.

Altura: 2.8 m.

Área de sección transversal = 1.54 cm^2 .

El número de puntales por piso en el ancho efectivo es de 15 unidades, distribuidas en 3 filas y 5 puntales en cada fila. De acuerdo al método, en el modelo se idealizarán sólo 3 puntales que tendrán una rigidez equivalente a la rigidez total de los puntales ubicados en cada fila.

Propiedades del material:

Esfuerzo de fluencia = 248.2 MPa . (2532 kg/cm^2).Esfuerzo último a la tensión = 399.8 MPa . (4077 kg/cm^2).Módulo de elasticidad, $E_s = 210 \text{ GPa}$. ($2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$).Peso específico = 76970 N/m^3 . (7850 kg/m^3).

Como se mencionó en el capítulo anterior existen varias expresiones para determinar la variación del módulo de elasticidad del concreto en el tiempo. En este estudio se utilizará la expresión del código Euro Internacional CEB-FIP-90, que aparece por defecto en el programa SAP2000. Cabe indicar que esta expresión también se utilizó para obtener resultados con el Método Simplificado Mejorado desarrollado anteriormente.

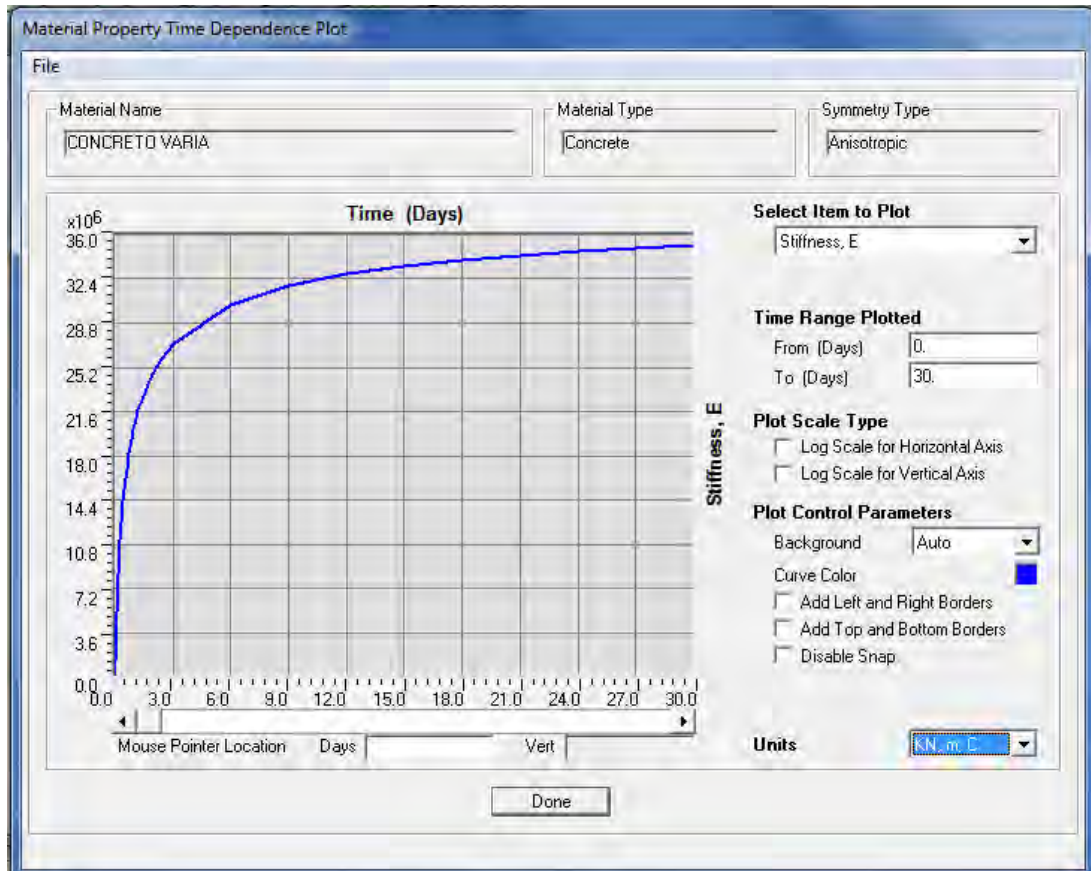


Figura 4.5 Variación del módulo de elasticidad según el Código Euro Internacional (CEB-FIP-90).

En la Figura 4.5 se muestra la gráfica de variación del módulo de elasticidad del concreto en el tiempo acorde al Código Europeo CEB-FIP-90. Esta gráfica se empleará para calcular la rigidez de la losa en los diferentes días del proceso constructivo.

4.4. Cálculo de las proporciones de carga en losas y puntales para uno, dos y tres vanos con cuatro sistemas constructivos.

Los cuatro sistemas constructivos aplicados a pórticos con uno, dos y tres vanos fueron modelados siguiendo los pasos y esquemas descritos en el Capítulo 1.

Para calcular las proporciones de carga en losas y puntales se necesita saber cuánta carga es transmitida por cada elemento. Estas cargas se determinarán a partir de los resultados del análisis secuencial realizado con el SAP2000 teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas en los ítems anteriores.

Primero se determinan las cargas que son transmitidas por los puntales y repuntales. Estas cargas se toman del diagrama de carga axial de la estructura determinado por el programa para cada paso. Con la carga axial total en los puntales se calcula la proporción de carga dividiendo la carga total de los puntales de un nivel entre la carga del peso de la losa. Con

la carga que toman los puntales, se puede saber por diferencia de cargas entre los puntales del nivel superior e inferior, cuánta carga es tomada por la losa, y calcular la proporción de carga de la losa del piso analizado.

En los siguientes ítems se expondrán los resultados de transmisión de cargas que se han encontrado con el método del EFM utilizando el programa SAP2000.

4.4.1. Proporciones de carga para Sistema Constructivo de Dos Apuntalamientos (2S).

Los resultados del presente método para el sistema constructivo 2S se muestran en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2. Estos resultados corresponden a las proporciones de carga tanto para losas como para puntales de cada nivel y para cada paso del proceso constructivo. Se muestra también la edad de las losas en días. Estos resultados fueron calculados con modelos de pórticos de uno, dos y tres vanos.

En la Tabla 4.1 se observa que el máximo valor de proporción de carga en losas para este sistema constructivo se presenta en el paso número 6, siendo el mismo paso para los pórticos de uno, dos y tres vanos. Este valor máximo se presenta después de culminar el vaciado de la losa del 4º nivel, lo cual genera que la carga en la losa del 2º nivel se incremente hasta llegar a un valor de proporción de carga de **2.16** para pórtico de un vano. En este paso la losa del 2º nivel, sólo tiene 14 días desde que se vació.

Si antes de iniciada la construcción no se prevé que la losa cargará 2.16 veces su peso cuando tenga sólo 14 días de maduración, la losa podría estar sobreesforzada y podría fallar durante el proceso constructivo puesto que a esta edad la losa no tiene el 100% de la resistencia esperada.

En el paso 7, cuando se desapuntala el piso del tercer nivel ya habiendo pasado 7 días, la losa del 2º nivel queda descargada y solo llega a cargar su propio peso, pasando de un valor de proporción de carga de **2.16** a **1.00**.

En los resultados mostrados en la Tabla 4.1 también se puede apreciar que no hay mucha diferencia entre los resultados de proporción de carga obtenidos cuando se analiza el modelo considerando pórticos de uno, dos o tres vanos. Por ejemplo el valor de proporción de carga máxima es de 2.16 para pórtico de un vano, y 2.14 para pórtico de dos y tres vanos, siendo la diferencia de resultados de tan solo 1% en este caso. En general hay una diferencia no mayor de 5% entre los resultados de las máximas proporciones de carga en cada paso para el análisis de un vano y dos vanos; y no mayor de 7% entre el análisis de un vano y tres vanos; esto en situaciones en donde no existen puntales apoyados sobre el suelo.

Tabla 4.1 Proporciones de carga en losas – 2S.

			EFM-SAP2000		
PASO	NIVEL	DIAS	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	0	0.00	0.00	0.00
2	2	0	0.00	0.00	0.00
	1	7	0.23	0.32	0.41
3	2	7	0.58	0.56	0.53
	1	14	1.42	1.44	1.47
4	3	0	0.00	0.00	0.00
	2	7	1.15	1.15	1.14
	1	14	1.85	1.85	1.86
5	3	7	0.33	0.30	0.26
	2	14	1.67	1.70	1.74
	1	21	1.00	1.00	1.00
6	4	0	0.00	0.00	0.00
	3	7	0.84	0.86	0.86
	2	14	2.16	2.14	2.14
	1	21	1.00	1.00	1.00
7	4	7	0.47	0.41	0.36
	3	14	1.53	1.59	1.64
	2	21	1.00	1.00	1.00
	1	28	1.00	1.00	1.00
8	4	0	0.00	0.00	0.00
	4	7	0.98	0.98	0.97
	3	14	2.02	2.02	2.03
	2	21	1.00	1.00	1.00
	1	28	1.00	1.00	1.00
9	5	7	0.41	0.37	0.32
	4	14	1.59	1.63	1.68
	3	21	1.00	1.00	1.00
	2	28	1.00	1.00	1.00
	1	35	1.00	1.00	1.00
10	6	0	0.00	0.00	0.00
	5	7	0.92	0.93	0.94
	4	14	2.08	2.07	2.06
	3	21	1.00	1.00	1.00
	2	28	1.00	1.00	1.00
	1	35	1.00	1.00	1.00

Tabla 4.2 Proporciones de carga en puntales – 2S.

		EFM-SAP2000		
PASO	NIVEL	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	1.00	1.00	1.00
2	2	1.00	1.00	1.00
	1	1.77	1.68	1.59
3	2	0.42	0.44	0.47
	1	0.00	0.00	0.00
4	3	1.00	1.00	1.00
	2	0.85	0.85	0.86
	1	0.00	0.00	0.00
5	3	0.67	0.70	0.74
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
6	4	1.00	1.00	1.00
	3	1.16	1.14	1.14
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
7	4	0.53	0.59	0.64
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
8	4	1.00	1.00	1.00
	4	1.02	1.02	1.03
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
9	5	0.59	0.63	0.68
	4	0.00	0.00	0.00
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
10	6	1.00	1.00	1.00
	5	1.08	1.07	1.06
	4	0.00	0.00	0.00
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00

En la Tabla 4.2, se observa que el máximo valor de proporción de carga en los puntales se presenta en los puntales del 1° nivel durante el paso 2, después del vaciado de la losa del 2° nivel. El valor máximo de proporción de carga en los puntales es de **1.77** para pórticos de un vano, **1.68** para pórticos de dos vanos y **1.59** para pórticos de tres vanos.

Para evitar posibles fallas por sobrecarga en los puntales se debe contemplar en el diseño que los puntales que se requieran en la construcción de un edificio con este sistema constructivo (2S) van a estar sometidos a una carga promedio de 1,77 veces el peso de la losa.

Al igual que en los resultados de valores de transmisión de cargas en losas, los valores de carga en puntales que se predicen no difieren mucho en los modelos de pórtico de uno, dos o tres vanos. El valor máximo de proporción de carga que se predice con un modelo de pórtico de un vano es mayor en 5% al que se predice con un modelo de dos vanos, y 10% mayor al que se predice con un modelo de tres vanos.

En la Figura 4.6 se muestra un gráfico de las máximas proporciones de carga en las losas para un modelo de pórtico de un vano analizado hasta el paso 20 el cual corresponde al vaciado de la losa del nivel 11. Se puede observar que la máxima proporción de carga durante todo el proceso constructivo se produce durante el paso 6 en la losa del 2° nivel con un valor de **2.16**. En los pasos posteriores la máxima proporción de carga de cada paso durante el proceso constructivo es menor a 2.16, y a partir del paso 11 cuando se retira los puntales del 5° nivel las máximas proporciones de carga oscilan entre **1.56 y 2.07**. Con los resultados mostrados en la gráfica se puede deducir que del paso 6 en adelante no habrá un valor de proporción de carga de losas mayor a 2.16.

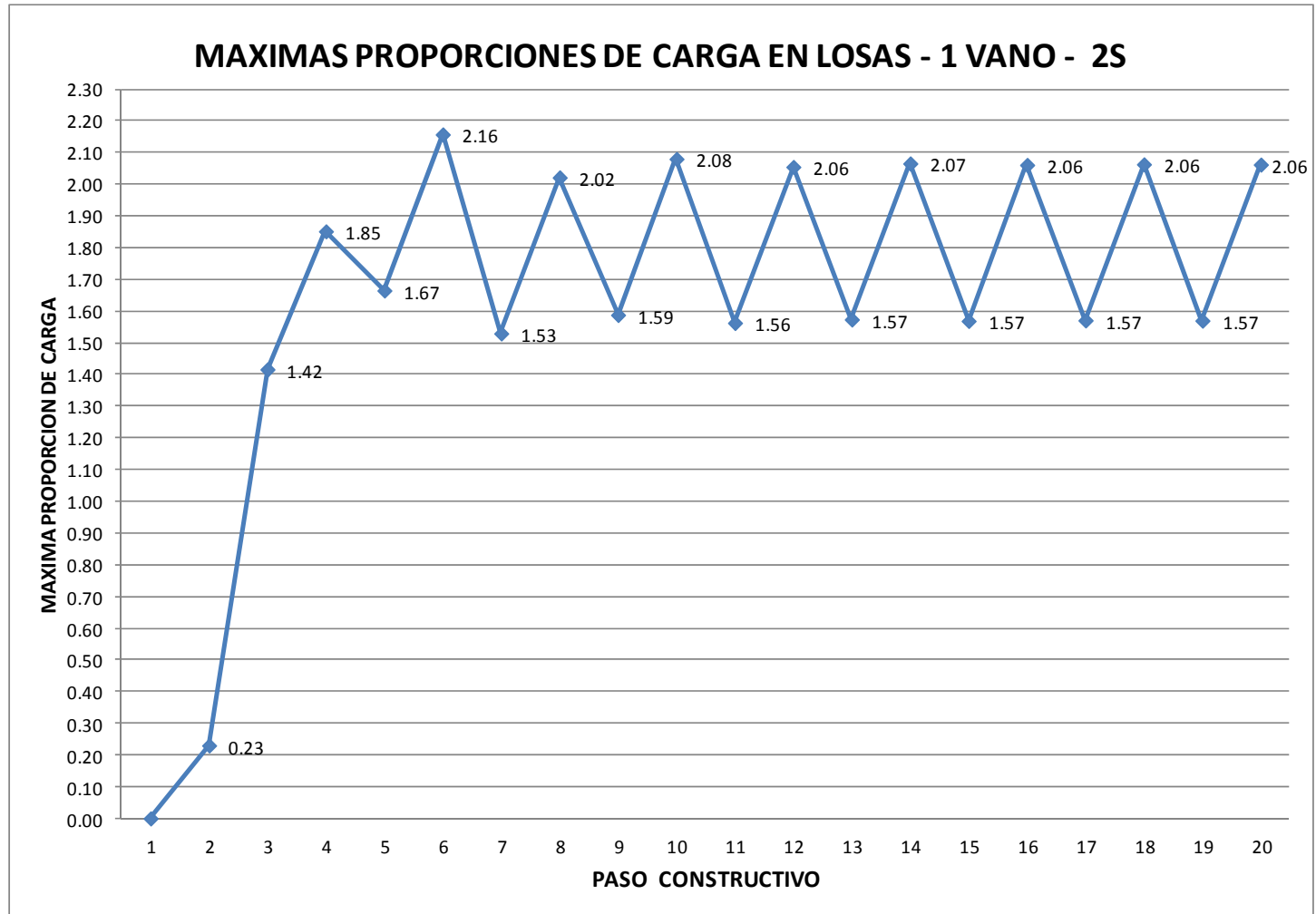


Figura 4.6 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo 2S.

4.4.2. Proporciones de carga para el Sistema Constructivo de Dos apuntalamientos y Un Reapuntalamiento (2S+1R).

En la Tabla 4.3 y Tabla 4.4 se muestran los resultados de las proporciones de carga para losas y puntales respectivamente, obtenidos con SAP2000 usando el Método EFM para tres tipos de modelos con pórticos de uno, dos y tres vanos. Los resultados son mostrados para cada nivel del modelo estructural y en cada uno de los pasos del sistema constructivo de dos apuntalamientos y un reapuntalamiento (2S+1R).

Los pasos 3 y 4, arrojan el mismo resultado de proporción de carga en los diferentes niveles, por eso se ha considerado una sola fila de resultados para ambos pasos. De igual manera esto sucede en los pasos 7 y 8, y 11 y 12. El primer paso corresponde a un nivel desapuntalado y el segundo paso, al reapuntalamiento de ese nivel. Como se mencionó en los capítulos previos el reapuntalamiento no causa ninguna variación de cargas porque los repuntales se colocan de tal manera que al inicio no toman ninguna carga.

En la Tabla 4.3, además de mostrar las proporciones de carga en las losas de los diferentes niveles para cada paso del proceso, se muestra también la edad que tienen las losas cuando se analiza cada paso. Esto permite saber si las cargas máximas de cada losa se presentan antes de los 28 días.

Para este sistema constructivo (2S+1R) la máxima proporción de carga se presenta en la losa del 2° nivel cuando la losa tiene 21 días desde su vaciado. Esta situación corresponde al paso 10 del proceso constructivo y los resultados fueron obtenidos para los tres modelos analizados. Esta losa en el paso anterior tiene un valor de 1.96 que corresponde al vaciado de la losa de 4° nivel; 7 días después cuando se pasa al paso 10, que consisten en el desapuntalamiento del 2° nivel, la losa del 2° nivel se carga más llegando a su valor máximo de proporción de carga. El valor de la proporción de carga máximo es **2.06** para modelo de pórtico con un vano, y **2.07** para pórtico de dos y tres vanos, existiendo tan solo una diferencia de 0.5% entre ambos resultados. Con esto se puede decir que si el diseño no contempla el hecho de que la losa del 2° nivel va a cargar 2.07 veces su peso a la edad de 21 días después de su vaciado, podrían presentarse sobreesfuerzos o fisuración en esa losa al terminar esta etapa.

En la Tabla 4.4 se observan las proporciones de carga en puntales de los diferentes niveles para cada paso del proceso constructivo. Al igual que en el sistema constructivo 2S, se observa que el máximo valor de proporción de carga en los puntales se presenta en los puntales del 1° nivel durante el paso 2, después del vaciado de la losa del 2° nivel. Esto se debe a que los pasos 1 y 2 son comunes en los dos sistemas constructivos. El máximo valor de proporción de carga en los puntales es de 1.77 para pórticos de un vano, 1.68 para pórticos de dos vano y 1.59 para pórticos de tres vanos.

Para evitar posibles fallas por sobrecarga en los puntales se debe prever en la etapa de diseño que los puntales que se requieran en la construcción de un edificio con este sistema constructivo (2S+1R) van a estar sometidos a una carga promedio de 1,77 veces el peso de la losa.

Tabla 4.3 Proporciones de carga en losas – 2S+1R.

			EFM – SAP2000		
PASO	NIVEL	DIAS	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	0	0.00	0.00	0.00
2	2	0	0.00	0.00	0.00
	1	7	0.23	0.32	0.41
3,4	2	7	0.58	0.56	0.53
	1	14	1.42	1.44	1.47
5	3	0	0.00	0.00	0.00
	2	7	0.96	1.00	1.02
	1	14	1.55	1.58	1.63
6	3	7	0.09	0.07	0.05
	2	14	1.13	1.12	1.11
	1	21	1.78	1.81	1.84
7,8	3	7	0.39	0.35	0.31
	2	14	1.61	1.65	1.69
	1	21	1.00	1.00	1.00
9	4	0	0.00	0.00	0.00
	3	7	0.80	0.82	0.85
	2	14	1.96	1.95	1.94
	1	21	1.24	1.23	1.21
10	4	7	0.05	0.04	0.03
	3	14	0.89	0.89	0.90
	2	21	2.06	2.07	2.07
	1	28	1.00	1.00	1.00
11,12	4	7	0.48	0.42	0.37
	3	14	1.52	1.58	1.63
	2	21	1.00	1.00	1.00
	1	28	1.00	1.00	1.00
13	5	0	0.00	0.00	0.00
	4	7	0.88	0.90	0.91
	3	14	1.88	1.88	1.88
	2	21	1.24	1.23	1.21
	1	28	1.00	1.00	1.00
14	5	7	0.05	0.04	0.03
	4	14	0.97	0.97	0.96
	3	21	1.98	1.99	2.01
	2	28	1.00	1.00	1.00
	1	35	1.00	1.00	1.00

Tabla 4.4 Proporciones de carga en puntales – 2S+1R.

		EFM – SAP2000		
PASO	NIVEL	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	1.00	1.00	1.00
2	2	1.00	1.00	1.00
	1	1.77	1.68	1.59
3,4	2	0.42	0.44	0.47
	1	0.00	0.00	0.00
5	3	1.00	1.00	1.00
	2	1.04	1.00	0.98
	1	0.49	0.42	0.34
6	3	0.91	0.93	0.95
	2	0.78	0.81	0.84
	1	0.00	0.00	0.00
7,8	3	0.61	0.65	0.69
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
9	4	1.00	1.00	1.00
	3	1.20	1.18	1.15
	2	0.24	0.23	0.21
	1	0.00	0.00	0.00
10	4	0.95	0.96	0.97
	3	1.06	1.07	1.07
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
11,12	4	0.52	0.58	0.63
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
13	5	1.00	1.00	1.00
	4	1.12	1.10	1.09
	3	0.24	0.23	0.21
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
14	5	0.95	0.96	0.97
	4	0.98	0.99	1.01
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00

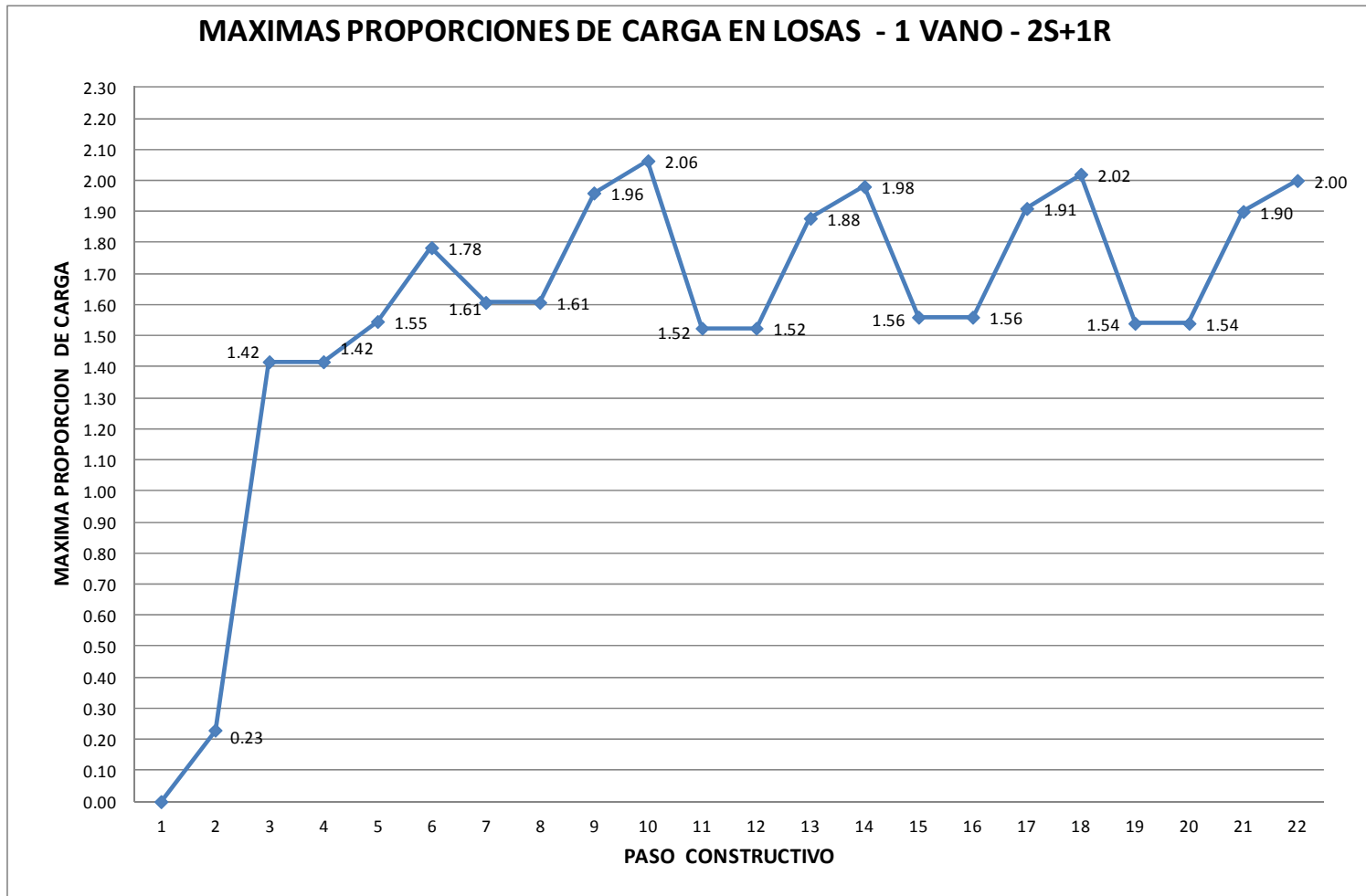


Figura 4.7 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo de 2S+1R.

En la Figura 4.7 se muestra un gráfico de las máximas proporciones de carga en losas, para el sistema constructivo 2S+1R con un modelo de pórtico de un vano analizado hasta el paso 22, cuando se retiran los repuntes de la losa del 5° nivel a 7 días de haber vaciado la losa del 7° nivel. Se puede observar que la máxima proporción de carga durante todo el proceso constructivo se produce durante el paso 10, cuando se retiran los repuntes de la losa del 2° nivel y su valor es **2.06**. A partir del paso 11, las máximas proporciones de carga de cada paso son menores a **2.06**, y oscilan entre **1.52** y **2.02**.

4.4.3. Proporciones de carga para Sistema Constructivo de Dos Apuntalamientos y Dos Reapuntalamientos (2S+2R).

En la Tabla 4.5 y Tabla 4.6 se muestran los resultados de proporción de carga para losas y puntales respectivamente, y para los tres tipos de modelos de pórticos, empleando un sistema constructivo de dos plantas apuntaladas y dos reapuntaladas (2S+2R).

La Tabla 4.5 presenta las proporciones de carga en las losas de los diferentes niveles para cada paso del proceso; también muestra la edad que tienen las losas cuando se analiza cada paso.

En este sistema constructivo (2S+2R), la máxima proporción de carga se presenta también, al igual que en los sistemas constructivos 2S y 2S+1R, en la losa del 2° nivel cuando tiene 21 días después de haberse vaciado. El máximo valor de proporción de carga es **1.94**, y se da en el paso 8 en los tres modelos de pórticos.

Al comparar los resultados obtenidos se puede afirmar que no hay mucha diferencia en los valores de máximas proporciones de carga en losas de cada paso entre los tres modelos de pórticos. En general hay una diferencia no mayor de 3% entre los resultados de las máximas proporciones de carga en cada paso para el análisis de uno y dos vanos; y no mayor de 7% entre el análisis de un vano y tres vanos. Esto en situaciones en donde no existen puntales apoyados sobre el suelo. En la losa del 1° nivel del paso 2, el resultado de pórtico de dos vanos es 39% mayor que para un vano, y el de tres vanos es 78% mayor que para el pórtico de un vano, siendo éstos los mismos resultados para el sistema constructivo de 2S y 2S+1R, porque como se comentó anteriormente el paso 2 es común para los cuatro sistemas constructivos analizados.

En la Tabla 4.6 se observan las proporciones de carga en puntales de los diferentes niveles para cada paso del proceso constructivo. Al igual que en los sistemas constructivos 2S y 2S+1R, se observa que el máximo valor de proporción de carga en los puntales se presenta en los puntales del 1° nivel durante el paso 2, después del vaciado de la losa del 2° nivel. El máximo valor de proporción de carga en los puntales es de **1.77** para pórticos de un vano, **1.68** para pórticos de dos vano y **1.59** para pórticos de tres vanos. Se puede notar que después del paso 2, no existe un valor de proporción de carga en puntales superior al encontrado en este paso, el más cercano es el de 1.26 para pórticos de un vano, que se presenta en los puntales del 3° nivel en el paso 7, después de haber vaciado la losa del 4° nivel.

Tabla 4.5 Proporciones de carga en losas – 2S+2R.

			EFM – SAP2000		
PASO	NIVEL	DIAS	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	0	0.00	0.00	0.00
2	2	0	0.00	0.00	0.00
	1	7	0.23	0.32	0.41
3,4	2	7	0.58	0.56	0.53
	1	14	1.42	1.44	1.47
5	3	0	0.00	0.00	0.00
	2	7	0.96	1.00	1.02
	1	14	1.55	1.58	1.63
6	3	7	0.39	0.35	0.31
	2	14	1.61	1.65	1.69
	1	21	1.00	1.00	1.00
7	4	0	0.00	0.00	0.00
	3	7	0.74	0.78	0.82
	2	14	1.86	1.87	1.89
	1	21	1.09	1.08	1.07
8	4	7	0.03	0.02	0.01
	3	14	0.79	0.82	0.84
	2	21	1.94	1.94	1.94
	1	28	1.23	1.22	1.21
9	4	7	0.49	0.44	0.38
	3	14	1.51	1.56	1.62
	2	21	1.00	1.00	1.00
	1	28	1.00	1.00	1.00

Tabla 4.6 Proporciones de carga en puntales – 2S+2R.

		EFM – SAP2000		
PASO	NIVEL	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	1.00	1.00	1.00
2	2	1.00	1.00	1.00
	1	1.77	1.68	1.59
3,4	2	0.42	0.44	0.47
	1	0.00	0.00	0.00
5	3	1.00	1.00	1.00
	2	1.04	1.00	0.98
	1	0.49	0.42	0.34
6	3	0.61	0.65	0.69
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
7	4	1.00	1.00	1.00
	3	1.26	1.22	1.18
	2	0.40	0.35	0.30
	1	0.31	0.26	0.22
8	4	0.97	0.98	0.99
	3	1.18	1.16	1.15
	2	0.23	0.22	0.21
	1	0.00	0.00	0.00
9	4	0.51	0.56	0.62
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00

En la Figura 4.8 se muestra un gráfico de las máximas proporciones de carga en losas con el sistema constructivo 2S+2R para un modelo de pórtico de un vano, analizado hasta el paso 17 del proceso constructivo, cuando se retiran los repuntales de la losa del 4° nivel a 7 días de haber vaciado la losa del 7° nivel. Se puede observar que la máxima proporción de carga durante todo el proceso constructivo se presenta en el paso 8 con un valor de **1.94** en la losa del 2° nivel. A partir del paso 9 los valores de máxima proporción de carga oscilan entre **1.51** y **1.90**.

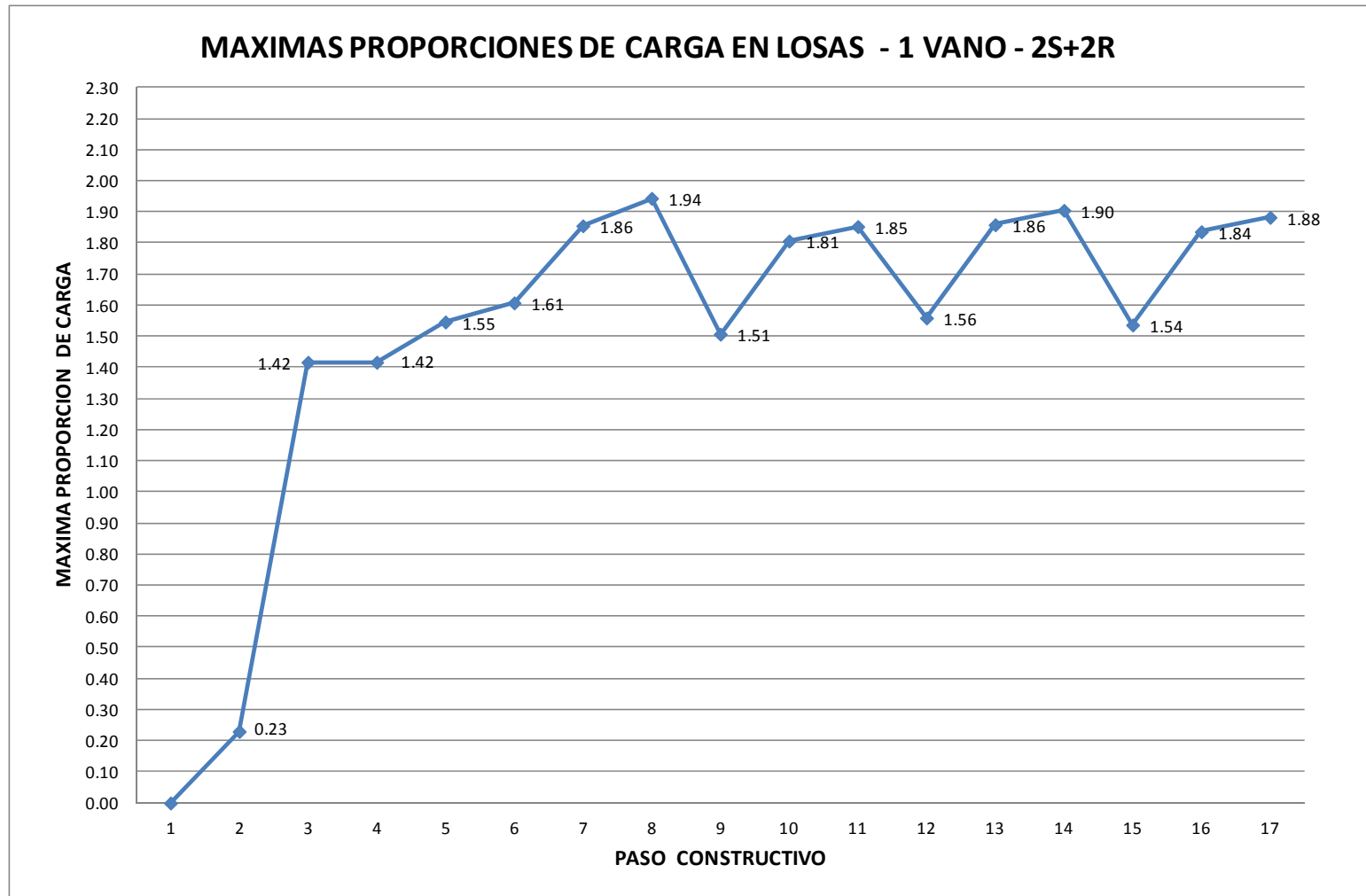


Figura 4.8 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo 2S+2R.

4.4.4. Proporciones de carga para Sistema Constructivo de Dos Apuntalamientos y Tres Reapuntalamientos (2S+3R).

La Tabla 4.7 y Tabla 4.8 presentan los resultados de proporción de carga en losas y puntales respectivamente para los tres tipos de modelos con pórticos de uno, dos y tres vanos. Estos resultados corresponden a un sistema constructivo de dos plantas apuntaladas y tres reapuntaladas (2S+3R).

Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del Capítulo 1, los pasos del 1 al 7 son los mismos para el sistema constructivo de 2S+2R y 2S+3R. Esto dará lugar a que ambos sistemas constructivos tengan los mismos resultados de transmisión de cargas.

Tabla 4.7 Proporciones de carga en losas – 2S+3R.

			EFM – SAP2000		
PASO	NIVEL	DIAS	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	0	0.00	0.00	0.00
2	2	0	0.00	0.00	0.00
	1	7	0.23	0.32	0.41
3,4	2	7	0.58	0.56	0.53
	1	14	1.42	1.44	1.47
5	3	0	0.00	0.00	0.00
	2	7	0.96	1.00	1.02
	1	14	1.55	1.58	1.63
6	3	7	0.39	0.35	0.31
	2	7	1.61	1.65	1.69
	1	14	1.00	1.00	1.00
7	4	0	0.00	0.00	0.00
	3	7	0.74	0.78	0.82
	2	14	1.86	1.87	1.89
	1	21	1.09	1.08	1.07
8	4	7	0.49	0.44	0.38
	3	14	1.51	1.56	1.62
	2	21	1.00	1.00	1.00
	1	28	1.00	1.00	1.00
9	5	0	0.00	0.00	0.00
	4	7	0.85	0.88	0.89
	3	14	1.77	1.79	1.82
	2	21	1.12	1.10	1.08
	1	28	1.05	1.04	1.03

Tabla 4.8 Proporciones de carga en puntales – 2S+3R.

		EFM – SAP2000		
PASO	NIVEL	1 VANO	2 VANOS	3 VANOS
1	1	1.00	1.00	1.00
2	2	1.00	1.00	1.00
	1	1.77	1.68	1.59
3,4	2	0.42	0.44	0.47
	1	0.00	0.00	0.00
5	3	1.00	1.00	1.00
	2	1.04	1.00	0.98
	1	0.49	0.42	0.34
6	3	0.61	0.65	0.69
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
7	4	1.00	1.00	1.00
	3	1.26	1.22	1.18
	2	0.40	0.35	0.30
	1	0.31	0.26	0.22
8	4	0.51	0.56	0.62
	3	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00
	1	0.00	0.00	0.00
9	5	1.00	1.00	1.00
	4	1.15	1.12	1.11
	3	0.38	0.33	0.29
	2	0.25	0.23	0.20
	1	0.20	0.19	0.17

En la Tabla 4.7 se presentan las proporciones de carga en las losas de los diferentes niveles para cada paso del proceso constructivo; también se presenta la edad correspondiente de las losas cuando se analiza cada paso. Al igual que en los sistemas constructivos analizados anteriormente, la máxima proporción de carga de este sistema constructivo (2S+3R) se presenta en la losa del 2° nivel pero a la edad de la losa de 14 días. Esta máxima proporción de carga corresponde al paso 7 del proceso constructivo, en donde se hace el vaciado de la losa del 4° nivel. El máximo valor de proporción de carga es **1.86** para el modelo de pórtico de un vano, **1.87** para el modelo de pórtico de dos vanos y **1.89** para el modelo de pórtico de tres vanos. Cuando se realiza el vaciado de la losa del 4° nivel, la proporción de carga de la losa del 2° nivel aumenta, de 1.61 a 1.86 para los pórticos de un vano.

La diferencia promedio entre los máximos valores de proporciones de carga en losas en cada paso durante el proceso constructivo es de 6% en los modelos de pórticos de un vano y dos vanos; y de 10% entre los modelos de pórticos de un vano y tres vanos.

En la Tabla 4.8 se observan las proporciones de carga en puntales de los diferentes niveles para cada paso del proceso constructivo. Al igual que en los sistemas constructivos analizados anteriormente se observa que el máximo valor de proporción de carga en los puntales se presenta en los puntales del 1° nivel durante el paso 2, después del vaciado de la losa del 2° nivel. Esto se debe a que los pasos 1 y 2 son comunes en los cuatro sistemas constructivos. El valor máximo de proporción de carga en los puntales es de **1.77** para pórticos de un vano, **1.68** para pórticos de dos vanos y **1.59** para pórticos de tres vanos. Se puede notar que después del paso 2, no existe un valor de proporción de carga en puntales superior al encontrado en este paso; el más cercano para el caso de pórtico de un vano es de 1.26 que se presenta en los puntales del tercer nivel del paso 7, durante el vaciado de la losa del 4° nivel.

En la Figura 4.9 se muestra un gráfico de las máximas proporciones de carga en losas con el sistema constructivo 2S+3R, para un modelo de pórtico de un vano analizado hasta el paso 16 del proceso constructivo, que corresponde al retiro de los repuntes de la losa del 3° nivel a 7 días de haber vaciado la losa del 7° nivel. Se puede observar que la máxima proporción de carga durante todo el proceso constructivo se presenta en el paso 7 en la losa del 2° nivel con un valor de **1.86**. A partir del paso 8 las máximas proporciones de carga en cada paso oscilan entre **1.51** y **1.85**.

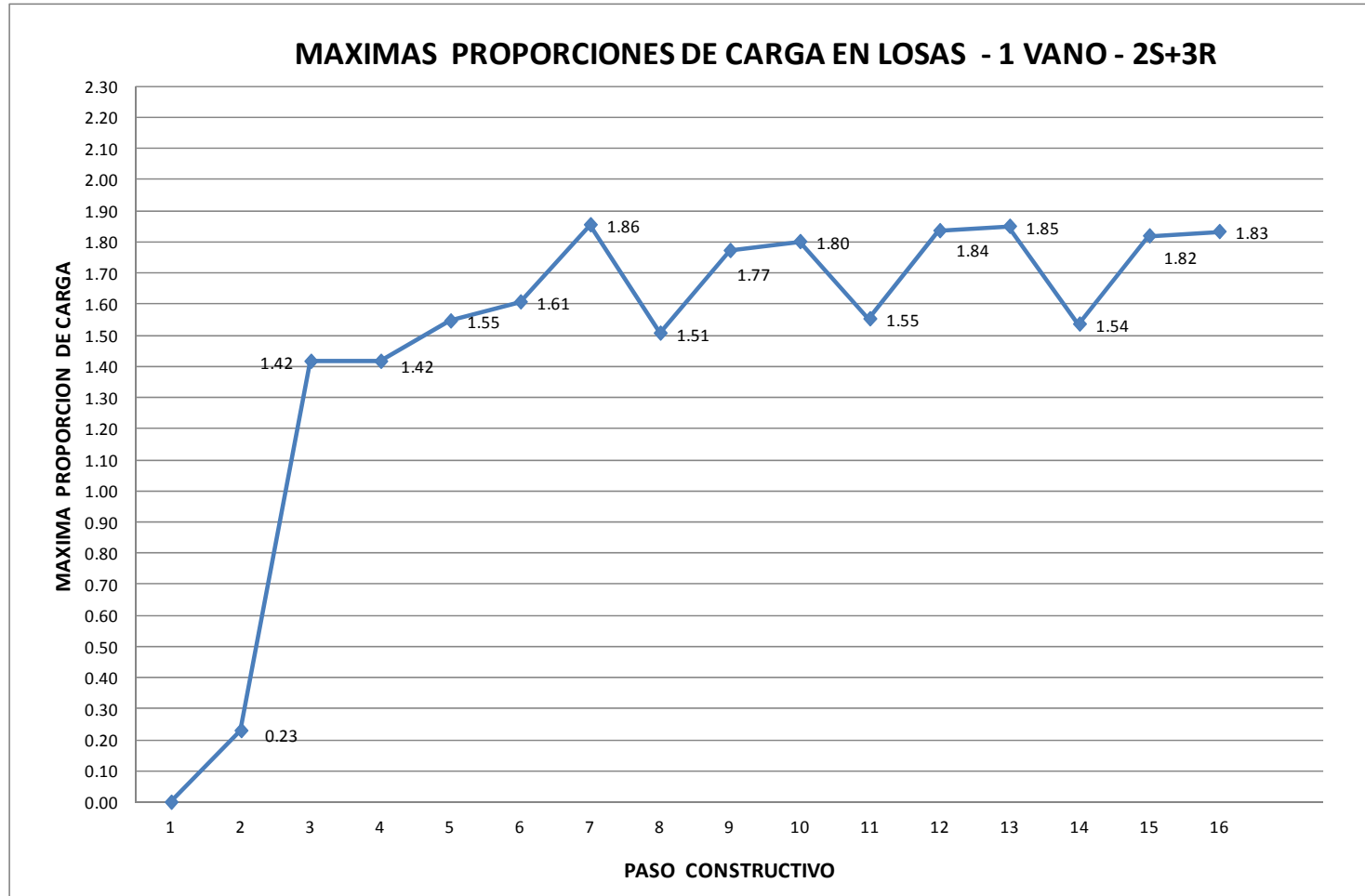


Figura 4.9 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas para pórticos de un vano con un sistema constructivo 2S+3R.

4.5. Discusión de resultados.

Los resultados obtenidos muestran que para un determinado sistema constructivo de dos plantas apuntaladas, el valor de máxima proporción de carga en losa se presenta en el mismo paso, independiente si el pórtico tiene uno, dos o tres vanos.

En la Figura 4.10 se muestra la gráfica comparativa de los máximos valores de proporción de carga en losa encontrados en este análisis, y lo primero que se puede observar es que no hay mucha diferencia entre los resultados encontrados cuando se analiza pórticos con uno, dos o tres vanos. Además se puede observar que a medida que se incrementa el número de niveles reapuntalados se obtienen menores valores de proporción de carga en las losas. Esto se debe a que mientras más niveles reapuntalados se tengan, se logrará una mejor distribución de la carga en las losas, evitando que las losas de los primeros niveles se carguen demasiado.

Asimismo el tipo de sistema constructivo no afecta la predicción del valor máximo de proporción de carga en puntales. Como ya se ha visto el máximo valor en puntales se encuentra en los puntales del 1° nivel durante el paso 2, y es el mismo valor en los 4 sistemas constructivos estudiados.

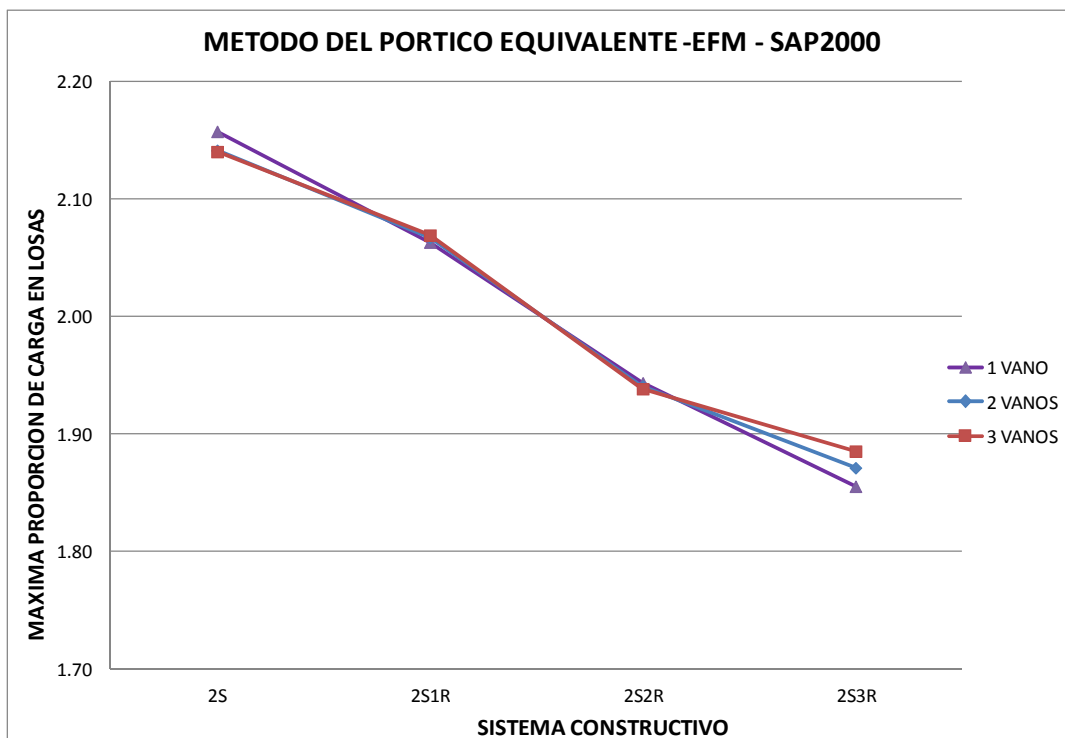


Figura 4.10 Gráfico de máximas proporciones de carga en losas usando los cuatro sistemas constructivos con los tres modelos de pórtico.

En la Figura 4.11 se muestran los resultados de proporciones de carga en las losas de los cinco primeros niveles de un pórtico de un solo vano para un proceso constructivo de 2S+1R. Como se puede observar, los resultados de las losas del 2° al 5° nivel son similares y tienen la misma tendencia, por lo que se puede decir que los valores de proporción de cargas para las losas del 6° nivel en adelante también tendrán resultados parecidos y guardarán la misma tendencia. En la losa del 1° nivel se obtiene la misma tendencia de las losas de los otros niveles, pero con valores de proporción de carga más bajos. Esto se puede deber a que la transmisión de cargas de la losa del 1° nivel a la cimentación rígida se realiza a través de los puntales o repuntales generando que los puntales se carguen más en comparación a los puntales de los otros niveles, donde la carga es transmitida a través de los puntales o repuntales a una losa inferior que no tiene la rigidez suficiente para evitar deflexiones y asemejarse a un nivel rígido como es el caso del suelo de cimentación.

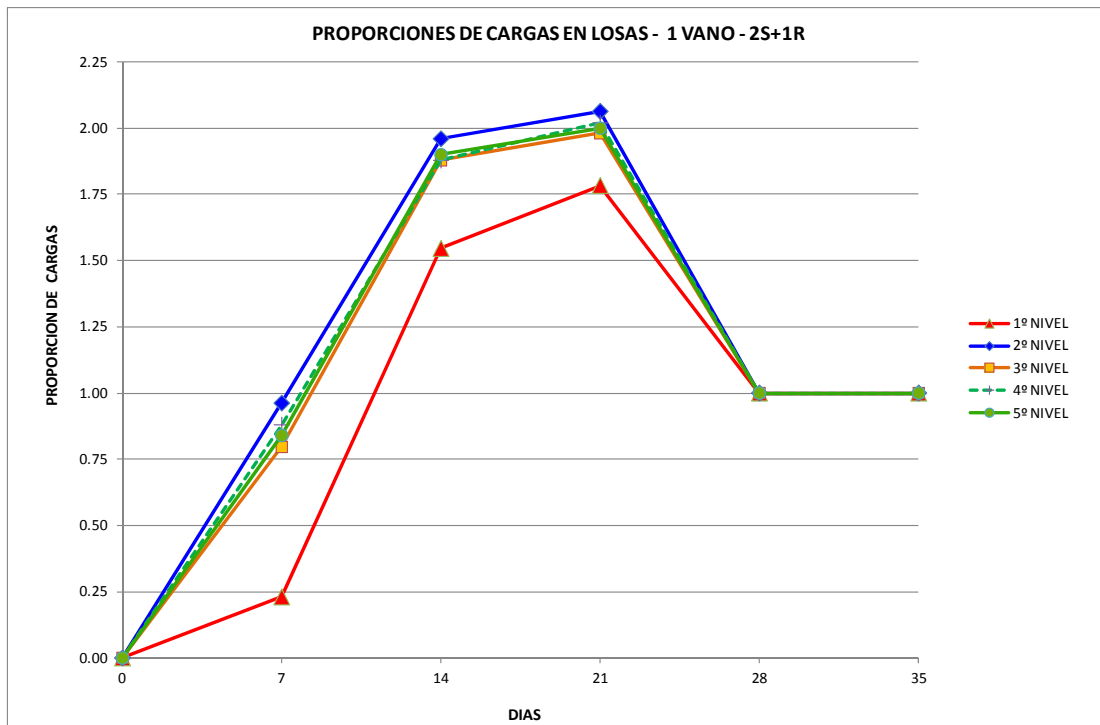


Figura 4.11 Gráfico de máximas proporciones de carga en las losas del 1° al 5° nivel (1 vano - 2S+1R)

Capítulo 5.

Estudio comparativo entre los métodos estudiados.

En este capítulo se presenta un estudio comparativo entre el Método de Pórtico Equivalente desarrollado con SAP2000 (EFM SAP2000) y los Métodos Simplificado (Norma ACI 347) y Simplificado Mejorado, para un Sistema Constructivo de Dos Apuntalamiento y Un Reapuntalamiento (2S+1R) en pórticos de un solo vano. Asimismo para los cuatro sistemas constructivos desarrollados en esta tesis se realiza una comparación de las máximas proporciones de carga obtenidas con los tres métodos mencionados.

5.1. Comparación del Método EFM SAP2000 con la Norma ACI 347.

Como ya se sabe el método recomendado por la Norma ACI 347 para la determinación de las cargas en losas y puntales es el Método Simplificado. Según Duan y Chen (1995), este método predice adecuadamente los pasos donde se dan las máximas proporciones de carga en puntales y losas, y en algunos casos subestima los valores de proporciones de carga en losas, brindando valores bajos con respecto a los valores reales de proporción de carga medidos en campo.

La diferencia entre los resultados obtenidos con el Método EFM utilizando el SAP2000 y los obtenidos con el Método Simplificado del ACI 347 se debe a las consideraciones no tan reales de este último, como por ejemplo asumir que la rigidez es infinita en los puntales y repuntales, y no considerar los efectos del cambio de las propiedades del concreto durante los ciclos del proceso constructivo.

En la Tabla 5.1 se muestra un cuadro comparativo de los valores de proporción de carga en losas y puntales, calculados con el Método EFM SAP2000 y el Método Simplificado para un sistema constructivo de 2R+1R. En estos resultados se observa que el EFM SAP2000 brinda valores de carga menores a los del Método Simplificado en las losas de los últimos niveles cuando éstas tienen poco tiempo de maduración. Por ejemplo en el paso 10, los resultados de carga en las losas del 3° y 4° nivel calculados con el Método Simplificado son **0.94** y **0.11** respectivamente, mientras que con el EFM SAP2000 se encontraron valores de **0.89** y **0.05** respectivamente. Contrariamente en las losas del 2° nivel, el valor obtenido con el Método Simplificado es **1.95**; mientras que el Método EFM SAP2000 se encontró el valor de **2.06** siendo mayor al obtenido por el Método Simplificado. Esto se puede observar en la Figura 5.1 y Figura 5.2, donde la losa del 1° nivel entre los días 14 y 21 del

proceso constructivo y la losa del 2° nivel entre los días 21 y 28, presentan proporciones de carga mayores en el Método EFM SAP2000 que en el Método Simplificado.

Tabla 5.1 Proporciones de carga en puntales y en losas, obtenidas con el Método EFM SAP2000 y el Método Simplificado para pórticos de 1 vano – 2S+1R.

PASO	NIVEL		EFM- SAP2000		SIMPLIFICADO	
			Losas	Puntales	Losas	Puntales
1	1	0	0.00	1.00	0.00	1.00
2	2	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	1	7	0.23	1.77	0.00	2.00
3,4	2	7	0.58	0.42	1.00	0.00
	1	14	1.42	0.00	1.00	0.00
5	3	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	2	7	0.96	1.04	1.00	1.00
	1	14	1.55	0.49	1.00	1.00
6	3	7	0.09	0.91	0.33	0.67
	2	14	1.13	0.78	1.33	0.33
	1	21	1.78	0.00	1.33	0.00
7,8	3	7	0.39	0.61	0.50	0.50
	2	14	1.61	0.00	1.50	0.00
	1	21	1.00	0.00	1.00	0.00
9	4	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	3	7	0.80	1.20	0.83	1.17
	2	14	1.96	0.24	1.83	0.34
	1	21	1.24	0.00	1.34	0.00
10	4	7	0.05	0.95	0.11	0.89
	3	14	0.89	1.06	0.94	0.95
	2	21	2.06	0.00	1.95	0.00
	1	28	1.00	0.00	1.00	0.00
11,12	4	7	0.48	0.52	0.58	0.42
	3	14	1.52	0.00	1.42	0.00
	2	21	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	28	1.00	0.00	1.00	0.00
13	5	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	4	7	0.88	1.12	0.91	1.09
	3	14	1.88	0.24	1.75	0.34
	2	21	1.24	0.00	1.34	0.00
	1	28	1.00	0.00	1.00	0.00
14	5	7	0.05	0.95	0.11	0.89
	4	14	0.97	0.98	1.02	0.87
	3	21	1.98	0.00	1.87	0.00
	2	28	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	35	1.00	0.00	1.00	0.00
15,16	5	7	0.44	0.56	0.54	0.46
	4	14	1.56	0.00	1.46	0.00
	3	21	1.00	0.00	1.00	0.00
	2	28	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	35	1.00	0.00	1.00	0.00

De manera general se puede decir que para el sistema constructivo 2S+1R, la diferencia entre los resultados del Método EFM SAP2000 y los del Método Simplificado es del orden del 6% al 30% en las losas más cargadas que se encuentran en los pisos inferiores como es el caso de la losa del 1º nivel a los 14 días (ver Figura 5.1), siendo el EFM SAP2000 el que predice los valores más altos en cada paso. A pesar que la diferencia máxima es de 30% entre los valores de ambos métodos, la diferencia entre los máximos valores de todo el sistema constructivo es del 6% siendo **2.06** para el Método EFM SAP2000 y **1.95** para el Método Simplificado.

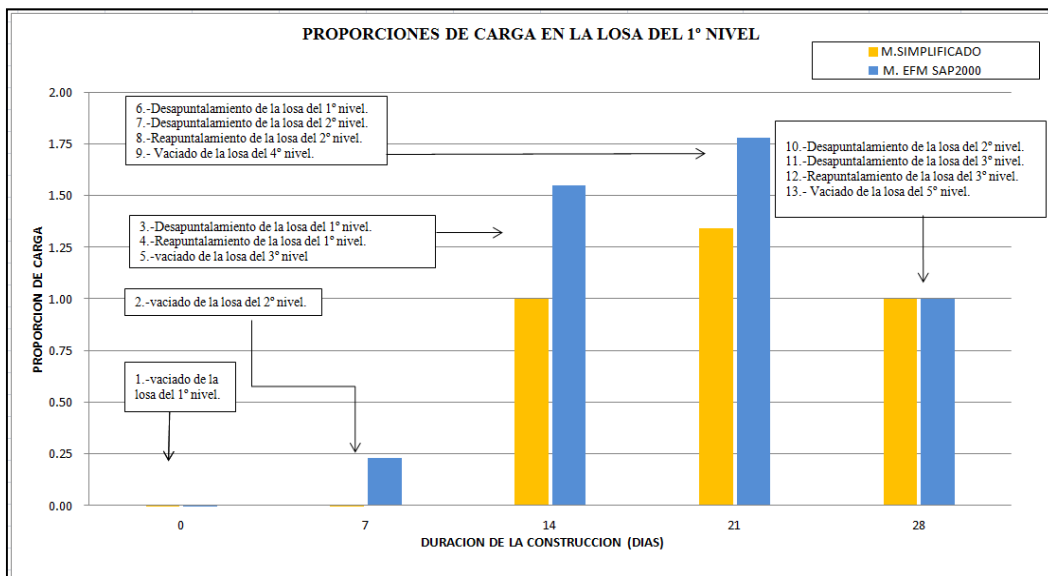


Figura 5.1 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 1º nivel (1 vano - 2S+1R).

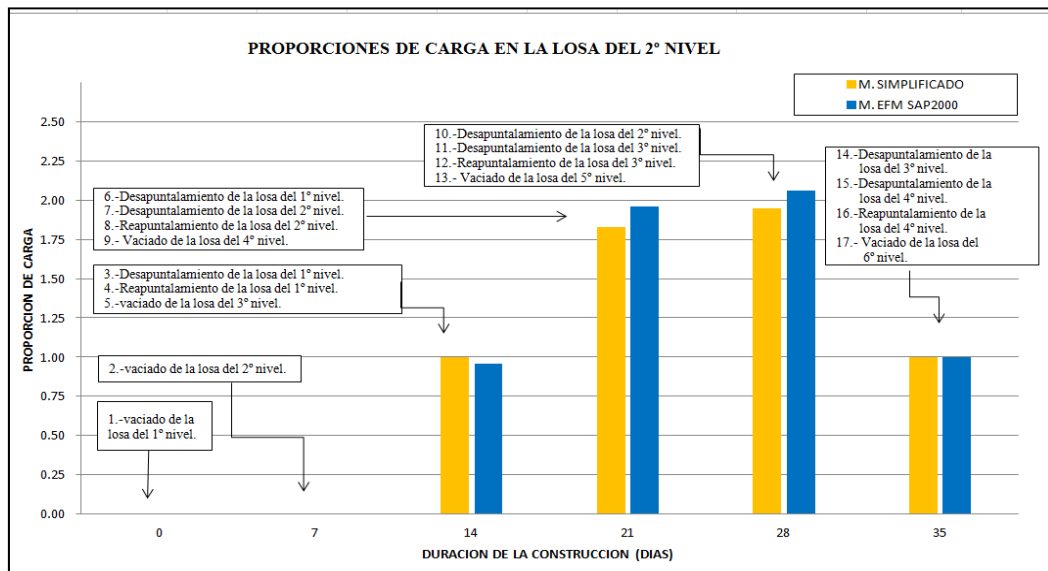


Figura 5.2 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 2º nivel (1 vano - 2S+1R).

El hecho de que el Método Simplificado subestime los valores de carga en las losas más cargadas en cada paso del proceso constructivo, puede deberse a que este método no considera la flexibilidad de los puntales ni tampoco el cambio de rigidez en el tiempo de las losas y columnas, a diferencia del Método EFM SAP2000 que considera ambos efectos en su análisis, permitiendo obtener resultados más aproximados a los reales.

En la Tabla 5.1 también se muestran los resultados de proporción de carga en puntales con ambos métodos para el Sistema Constructivo 2S+1R, y se puede observar que tanto el Método Simplificado como el EFM SAP2000 predicen que el máximo valor de proporción de cargas se presenta en los puntales del primer nivel durante el 2º paso del proceso constructivo, después de haber vaciado la losa del 2º nivel. La diferencia entre ambos resultados es de 13%, siendo el Método simplificado el que predice valores más altos debido a que exagera en su análisis al considerar que los puntales son infinitamente rígidos y no se deforman, por lo tanto transmiten más carga.

5.2. Comparación del Método EFM SAP2000 con el Método Simplificado Mejorado.

El método Simplificado Mejorado a diferencia del Método Simplificado tiene consideraciones que se asemejan más a las reales, como considerar los efectos de la rigidez real de los puntales y la variación en el tiempo de las propiedades del concreto. Estas consideraciones permiten que exista mayor semejanza con el Método EFM SAP2000.

Los resultados obtenidos con los métodos EFM SAP2000 y Simplificado Mejorado se presentan en la Tabla 5.2. Cuando se hace el vaciado de losas nuevas, el Método Simplificado Mejorado arroja valores de carga relativamente mayores a los calculados por el EFM SAP2000 en las losas de los últimos niveles. Asimismo para esas mismas losas cuando se desapuntalan los niveles inferiores, el Método Simplificado Mejorado arroja valores de carga relativamente menores a los calculados con el Método EFM SAP2000.

Se puede entender que cuando se hace el vaciado de una nueva losa, la losa inferior a ésta asumen más carga cuando se trabaja con bordes empotrados en las losas (Método Simplificado Mejorado), que cuando trabaja con los bordes apoyados en columnas (Método EFM SAP2000), es por ello que el Método Simplificado Mejorado en esta etapa arroja valores de carga mayores a los del EFM SAP2000, tal como se puede visualizar en el paso 9 de la Tabla 5.2, el resultado de carga de la losa del nivel 3 con el Método Simplificado Mejorado es 0.86 y con el Método EFM SAP2000 es 0.80. Por otro lado, cuando se desapuntala un nivel inferior sucede algo similar a lo mencionado anteriormente, las losas inferiores más cercanas a la losa desapuntalada tienden a cargarse más cuando se consideran que tienen los bordes empotrados que cuando trabaja con los bordes apoyados en columnas, tal como se puede visualizar en el paso 10 de la Tabla 5.2, el resultado de carga de la losa del nivel 3 con el Método Simplificado Mejorado es 0.91 y con el Método EFM SAP2000 es 0.89.

De manera general se puede decir que la diferencia entre los resultados del Método EFM SAP2000 y los del Método Simplificado Mejorado son del orden del 5% en las losas más cargadas, siendo el Método Simplificado Mejorado el que arroja casi siempre valores más altos tal como se observa en la Figura 5.3 y Figura 5.4. A pesar de estas diferencias el valor de máxima proporción de carga en todo el Sistema constructivo es **2.06**, obtenido por ambos métodos.

Tabla 5.2 Proporciones de carga en puntales y en losas, obtenidas con el Método EFM SAP2000 y el Método Simplificado Mejorado para pórticos de 1 vano – 2S+1R.

PASO			EFM- SAP2000		SIMP. MEJORADO	
	NIVEL	DIAS	Losas	Puntales	Losas	Puntales
1	1	0	0.00	1.00	0.00	1.00
2	2	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	1	7	0.23	1.77	0.39	1.61
3,4	2	7	0.58	0.42	0.55	0.45
	1	14	1.42	0.00	1.45	0.00
5	3	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	2	7	0.96	1.04	1.06	0.94
	1	14	1.55	0.49	1.66	0.28
6	3	7	0.09	0.91	0.04	0.96
	2	14	1.13	0.78	1.14	0.82
	1	21	1.78	0.00	1.82	0.00
7,8	3	7	0.39	0.61	0.32	0.68
	2	14	1.61	0.00	1.68	0.00
	1	21	1.00	0.00	1.00	0.00
9	4	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	3	7	0.80	1.20	0.86	1.14
	2	14	1.96	0.24	1.97	0.17
	1	21	1.24	0.00	1.17	0.00
10	4	7	0.05	0.95	0.02	0.98
	3	14	0.89	1.06	0.91	1.06
	2	21	2.06	0.00	2.06	0.00
	1	28	1.00	0.00	1.00	0.00
11,12	4	7	0.48	0.52	0.39	0.61
	3	14	1.52	0.00	1.61	0.00
	2	21	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	28	1.00	0.00	1.00	0.00
13	5	0	0.00	1.00	0.00	1.00
	4	7	0.88	1.12	0.93	1.07
	3	14	1.88	0.24	1.90	0.17
	2	21	1.24	0.00	1.17	0.00
	1	28	1.00	0.00	1.00	0.00
14	5	7	0.05	0.95	0.02	0.98
	4	14	0.97	0.98	0.98	0.99
	3	21	1.98	0.00	1.99	0.00
	2	28	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	35	1.00	0.00	1.00	0.00
15,16	5	7	0.44	0.56	0.36	0.64
	4	14	1.56	0.00	1.64	0.00
	3	21	1.00	0.00	1.00	0.00
	2	28	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	35	1.00	0.00	1.00	0.00

En la Tabla 5.2, también se muestran los resultados de proporción de carga en los puntales, calculados con ambos métodos. Al tener las mismas consideraciones de rigidez real en los puntales y de variación de la rigidez de las losas en el tiempo, los resultados de proporción de carga dependerán de las consideraciones de borde en las losas.

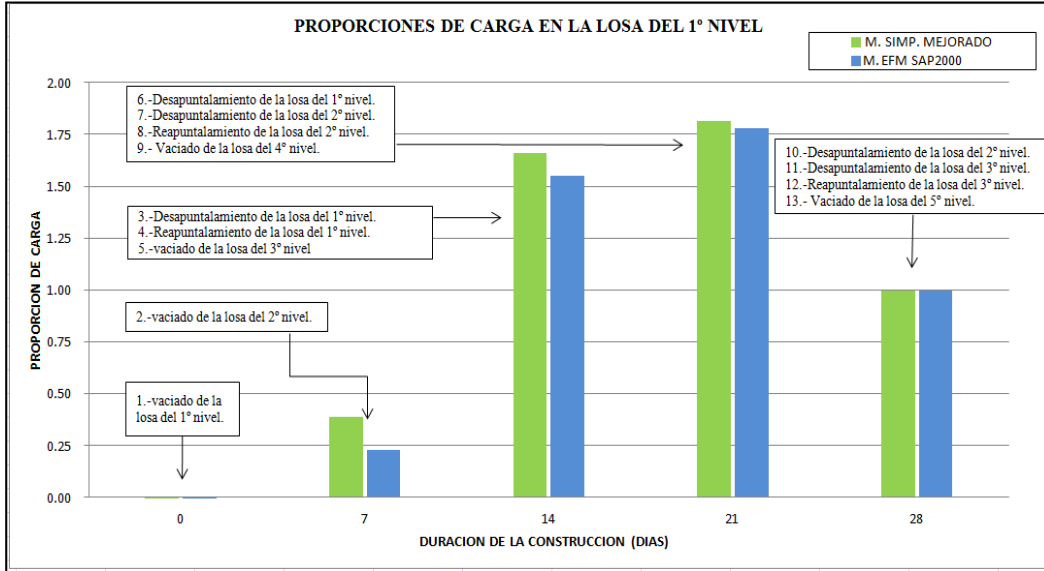


Figura 5.3 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 1º nivel (1 vano - 2S+1R).

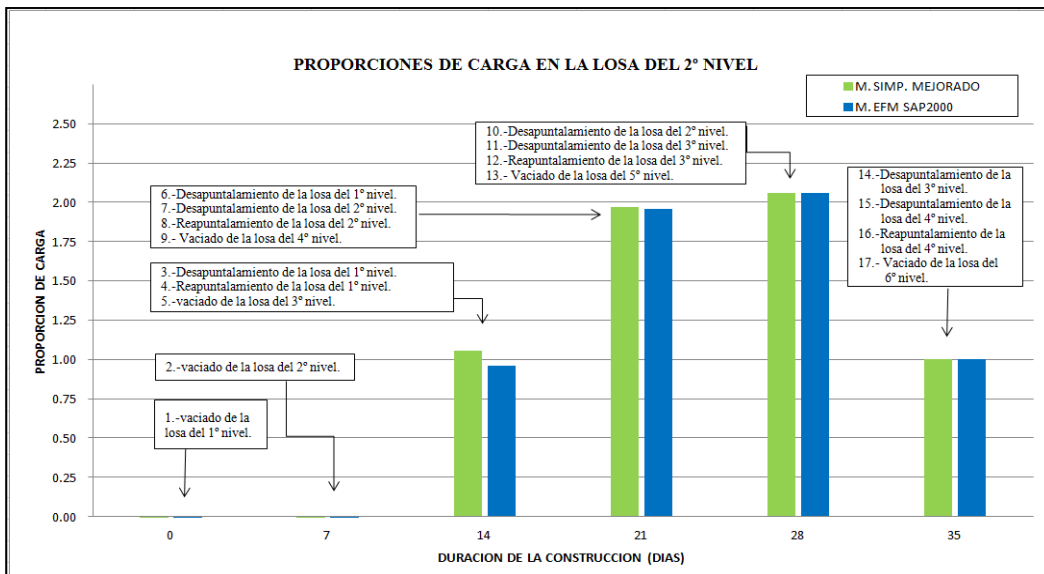


Figura 5.4 Gráfico de máximas proporciones de carga en la losa del 2º nivel (1 vano - 2S+1R).

5.3. Resumen comparativo.

Un resumen de los resultados de proporción de cargas en losas con el sistema constructivo de dos plantas apuntaladas y una reapuntalada (2S+1R) obtenidos con los tres métodos comparados anteriormente, se presenta en la Tabla 5.3. Comparando los resultados se puede decir que los máximos valores de cargas en las losas más cargadas de cada paso obtenidos con el Método Simplificado son menores a los calculados con el Método Simplificado Mejorado y el Método EFM SAP2000, confirmando la afirmación de Duan y Chen (1995) al decir que el Método Simplificado subestima las cargas en las losas más cargadas durante el proceso constructivo. Sin embargo el Método Simplificado acierta con indicar el nivel y el paso en el que se presenta el máximo valor de proporción de cargas tanto en losas como en puntales.

Tabla 5.3 Comparación de proporciones de cargas en losas con el sistema constructivo 2S+1R para pórticos de 1 vano.

			PROPORCIONES DE CARGAS EN LOSAS		
			EFM-SAP2000	SIMP. MEJORADO	SIMPLIFICADO
PASO	NIVEL	DIAS			
1	1	0	0.00	0.00	0.00
2	2	0	0.00	0.00	0.00
	1	7	0.23	0.39	0.00
3,4	2	7	0.58	0.55	1.00
	1	14	1.42	1.45	1.00
5	3	0	0.00	0.00	0.00
	2	7	0.96	1.06	1.00
	1	14	1.55	1.66	1.00
6	3	7	0.09	0.04	0.33
	2	14	1.13	1.14	1.33
	1	21	1.78	1.82	1.33
7,8	3	7	0.39	0.32	0.50
	2	14	1.61	1.68	1.50
	1	21	1.00	1.00	1.00
9	4	0	0.00	0.00	0.00
	3	7	0.80	0.86	0.83
	2	14	1.96	1.97	1.83
	1	21	1.24	1.17	1.34
10	4	7	0.05	0.02	0.11
	3	14	0.89	0.91	0.94
	2	21	2.06	2.06	1.95
	1	28	1.00	1.00	1.00
11,12	4	7	0.48	0.39	0.58
	3	14	1.52	1.61	1.42
	2	21	1.00	1.00	1.00
	1	28	1.00	1.00	1.00

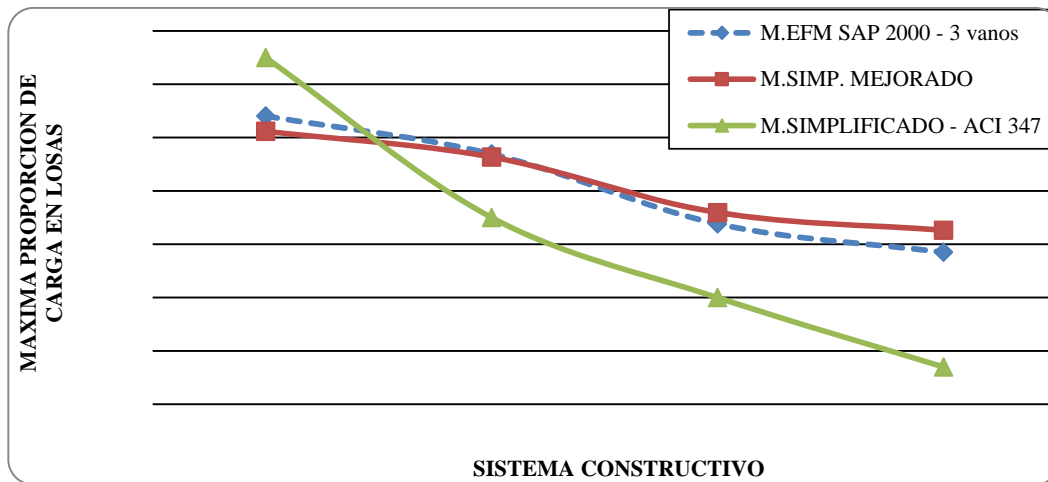


Figura 5.5 Gráfico de Comparación de máximas proporciones de carga en losas.

En la Figura 5.5 se presentan las cargas máximas en losas obtenidas por los métodos Simplificado, Simplificado Mejorado y EFM SAP2000 para cada sistema constructivo. Los resultados del Método EFM SAP2000 que se han graficado es para un análisis de pórticos de tres vanos puesto que es una consideración más real; mientras que para los Métodos Simplificado y Simplificado Mejorado se han graficado los resultados del análisis para pórticos de un vano, ya que estos métodos se limitan al análisis de un vano. Como se observa en la Figura 5.5 los resultados del Método Simplificado Mejorado y el Método EFM SAP2000 se aproximan bastante bien, a diferencia de los resultados del Método Simplificado que arroja valores bajos de proporción de carga y presenta una tendencia descendente pronunciada con respecto a los otros métodos, cuando el sistema constructivo tiene un nivel más de reapuntalamiento. El Método Simplificado predice valores entre el 6% al 14% menores a los encontrados con el Método EFM SAP 2000 y el Método Simplificado Mejorado para los sistemas constructivos 2S+1R, 2S+2R y 2S+3R.

También se puede observar que los valores mayores de proporción de carga en todos los métodos se dan cuando se emplea un sistema constructivo de dos niveles apuntalados (2S). Esto se puede deber a que en este sistema constructivo no se realiza ningún reapuntalamiento y rápidamente en los primeros pasos se pierde el soporte de los puntales a la cimentación rígida, y la única forma de transmitir la carga a la cimentación es a través de las losas y luego de las columnas. De esta forma la losa más cargada será aquella que se encuentre desapuntalada.

Cuando se analiza el sistema constructivo 2S el valor de proporción de carga que se encuentra con el Método Simplificado es 7% mayor al calculado con los otros dos métodos estudiados. En este caso el Método Simplificado sobrestima el valor de proporción de carga en las losas y puede deberse a que, al suponer que los puntales son infinitamente rígidos y que la distribución de cargas es proporcional al número de niveles apuntalados, cuando se hace el vaciado de una losa nueva, las cargas se distribuyen en 50% para cada una de las losas inferiores consecutivas. En el Método EFM SAP2000 y el Método Simplificado Mejorado, esta consideración no es cierta puesto que esta distribución de cargas depende del tiempo de maduración de las losas y de la rigidez de los puntales.

Conclusiones y recomendaciones:

- El Método Simplificado recomendado por la Norma ACI 347-05, predice valores de carga menores a los que se predice con el Método EFM SAP2000 y el Método Simplificado Mejorado, subestimando los máximos valores de carga en un 6% para el sistema constructivo de 2S1R y en 14% para el sistema constructivo de 2S3R. Cabe indicar que el EFM SAP2000 y el Método Simplificado Mejorado tienen mejor aproximación a las condiciones reales de carga de un edificio de múltiples plantas en construcción.
- El Método Simplificado Mejorado se ajusta bastante bien al Método de EFM SAP2000, ya que la diferencia entre los resultados de ambos métodos no es mayor al 5% en los niveles más cargados. Debido a esta pequeña diferencia, se recomienda utilizar el Método Simplificado Mejorado en situaciones donde no se tenga la disponibilidad del programa SAP 2000 para desarrollar el Método EFM y no se requiera un nivel de precisión mayor.
- Según los resultados obtenidos con el Método EFM SAP2000, cuando se analizan sistemas constructivos con dos apuntalamientos y diversos reapuntalamientos no se encuentra una variación sustancial en los resultados de proporción de carga en losas y puntales para pórticos de uno o varios vanos. Salvo en los primeros pasos del proceso constructivo donde la variación es grande pero las proporciones de carga son pequeñas.
- Cuando se trabaja con un sistema constructivo con mayor número de plantas reapuntaladas se presenta un menor valor de carga máxima en las losas, es decir el reapuntalado ayuda a reducir considerablemente las solicitaciones de carga en las losas. Por otro lado los resultados muestran que para un sistema constructivo de dos plantas apuntaladas con un número de reapuntalamiento, realizar más de dos reapuntalamientos no producirá una reducción significativa en el valor de máxima proporción de carga en la losa más cargada.
- La práctica común es trabajar con un sistema constructivo sólo con niveles apuntalados. Sin embargo, después de este estudio se puede decir que es necesario introducir uno o dos niveles reapuntalados en el sistema constructivo si no se desea obtener grandes cargas en las losas que puedan ocasionar fisuración o fracturas.
- En un proceso constructivo para edificios de múltiples plantas, cuando se retiran los puntales de la losa inferior, los puntales de los niveles superiores se relajan mientras que las losas que quedan apuntaladas soportarán mayor carga porque al relajarse los puntales, éstas tendrán la posibilidad de deflectarse más.
- Acorde con los resultados obtenidos, se concluye que en la construcción de un edificio de múltiples plantas con sistema constructivo de dos plantas apuntaladas y un número de plantas reapuntaladas, sólo bastará analizar el primer ciclo constructivo para encontrar la losa más cargada.
- A falta de una metodología en nuestro Reglamento Nacional de Edificaciones para determinar la transmisión de cargas en losas y puntales, se recomienda emplear el Método de Pórtico Equivalente (EFM) si se cuenta con un programa de elementos

finitos, o en todo caso, utilizar el Método Simplificado Mejorado que es el más sencillo de aplicar.

- Una línea de investigación a futuro sobre la transmisión de carga en edificios de múltiples plantas, es estudiar la influencia del flujo plástico (*creep*) y la contracción (*shrinkage*) del concreto, así como también la influencia de la variación de la temperatura en los puntales de acero; de tal manera que los resultados sean comparados con los obtenidos en campo, de obras construidas en nuestro país en las que se hayan aplicado algunos de los sistemas constructivos conocidos.

Referencia bibliográfica:

- ACI Committee 318 (2005), "Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary" ACI 318-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- ACI Committee 347 (2005), "Guide for Shoring/Reshoring of Concrete Multistory Buildings (ACI 347.2R-05)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, 18 pp.
- Agarwal, R. K. y Gardner, N. J. (1974), "Form and shore requirements for multi-story flat slab type buildings", ACI Journal, Proceedings, 71(11), pp: 559-569.
- Azkune Arriada, Mikel (2007), "Transmisión de cargas en la ejecución de edificios de concreto: mediciones en obra y análisis teórico", Tesis Doctoral; Universidad de Navarra-Escuela Superior de Ingenieros San Sebastián, 30 pp.
- CEB –FIP model Code (1990), "Model Code for Concrete Structures.", Committee Euro-International du Beton – Congress of International Federation for Prestressing, Hamburg. 39 pp.
- Corley, W. G. y Jirsa, J. O. (1970), "Equivalent frame analysis for slab design." ACI Journal, Title N° 67-54, pp: 875-884.
- Duan, M. Z. y Chen, W. F. (1995), "Improved simplified method for slab and shore load analysis during construction." Project Report CE-STR-95-24, Purdue University, West Lafayette, Ind.
- Grundy, P. y Kabaila, A. (1963), "Construction Loads on Slabs with Shored Formwork in Multistory Buildings," ACI JOURNAL, Proceedings V. 60, N°. 12, pp. 1729-1738.
- Liu, X. L., Chen, W. F. y Bowman, M. D. (1985), "Construction load analysis for concrete structures." Journal of Structural Engineering, 111(5), pp: 1019-1036.
- Norma Técnica E.060 –Concreto Armado-(2009).
- SAP 2000 v14 (2010) y sus correspondientes manuales.
- Stivaros, P. C. y Halvorsen, G. T. (1990), "Shoring/Reshoring Operations for multistory buildings." ACI Structural Journal, 87(5), pp: 589-596.
- Stivaros, P. C. (2006), "Shoring and reshoring for multistory concrete buildings" Concrete International, 28(2), pp 33-38.

ANEXO A

Sistemas constructivos

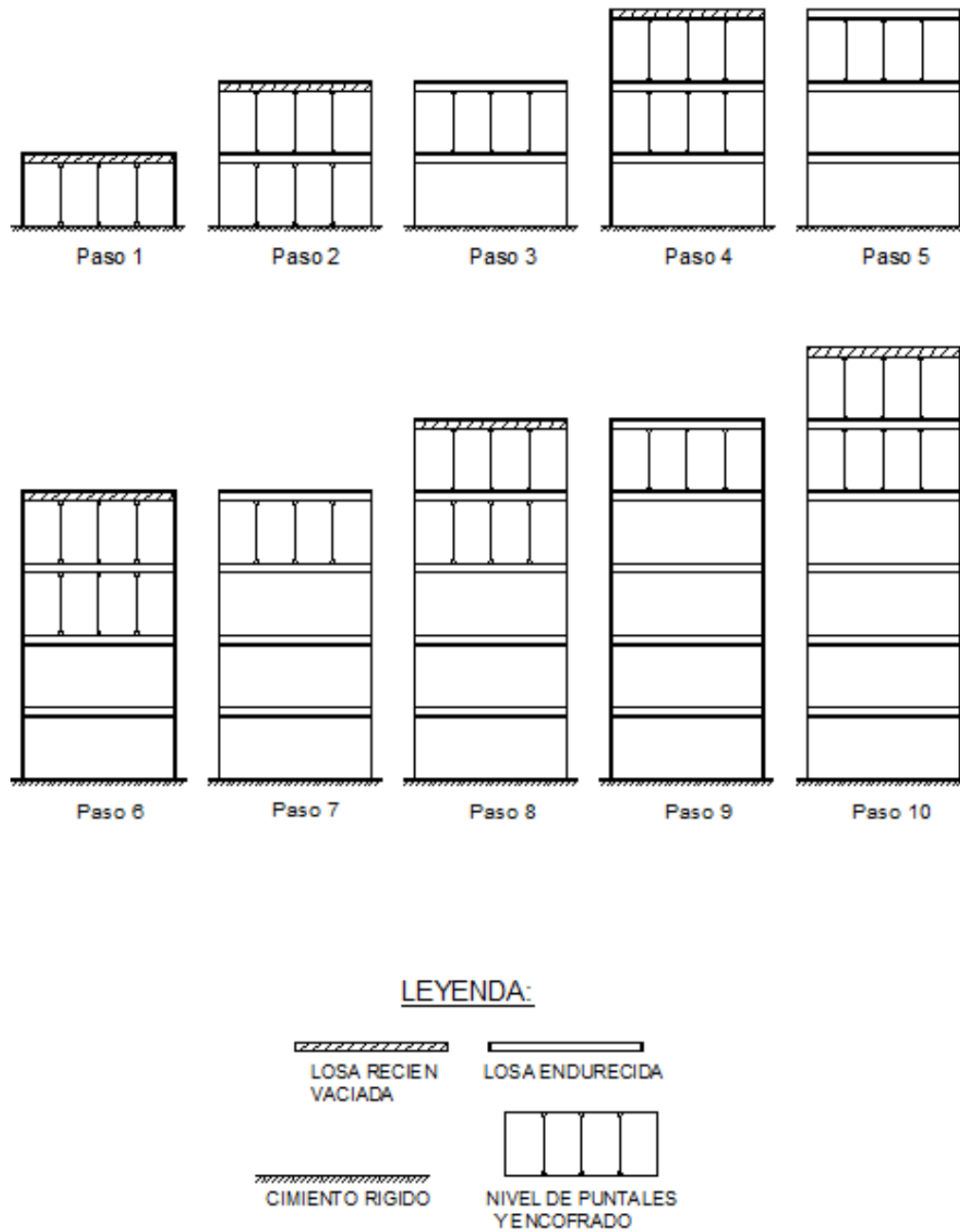


Figura A.1 Sistema constructivo dos apuntalamientos (2S).

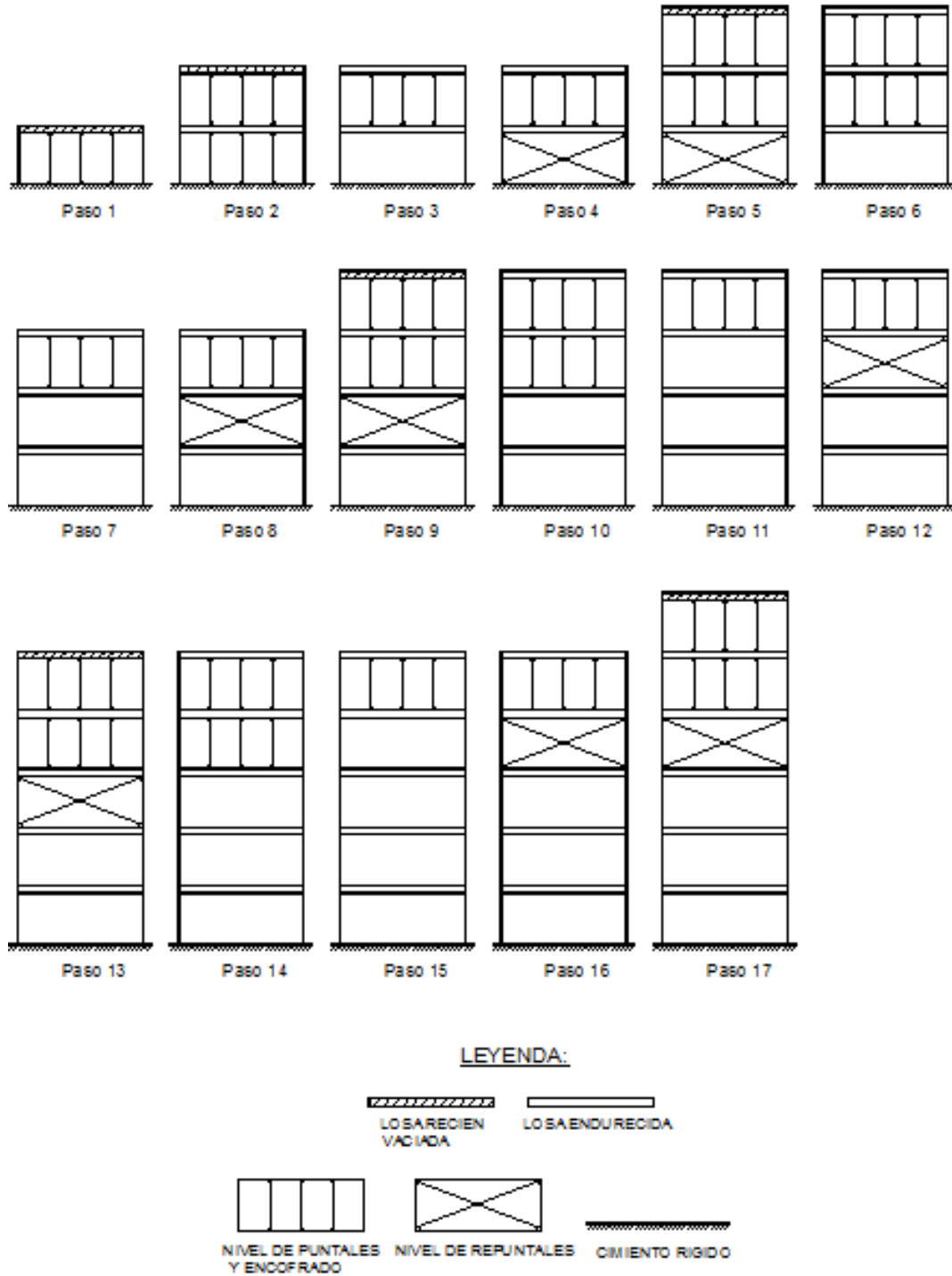


Figura A.2 Sistema constructivo dos apuntalamientos y un reapuntamiento (2S+1R).

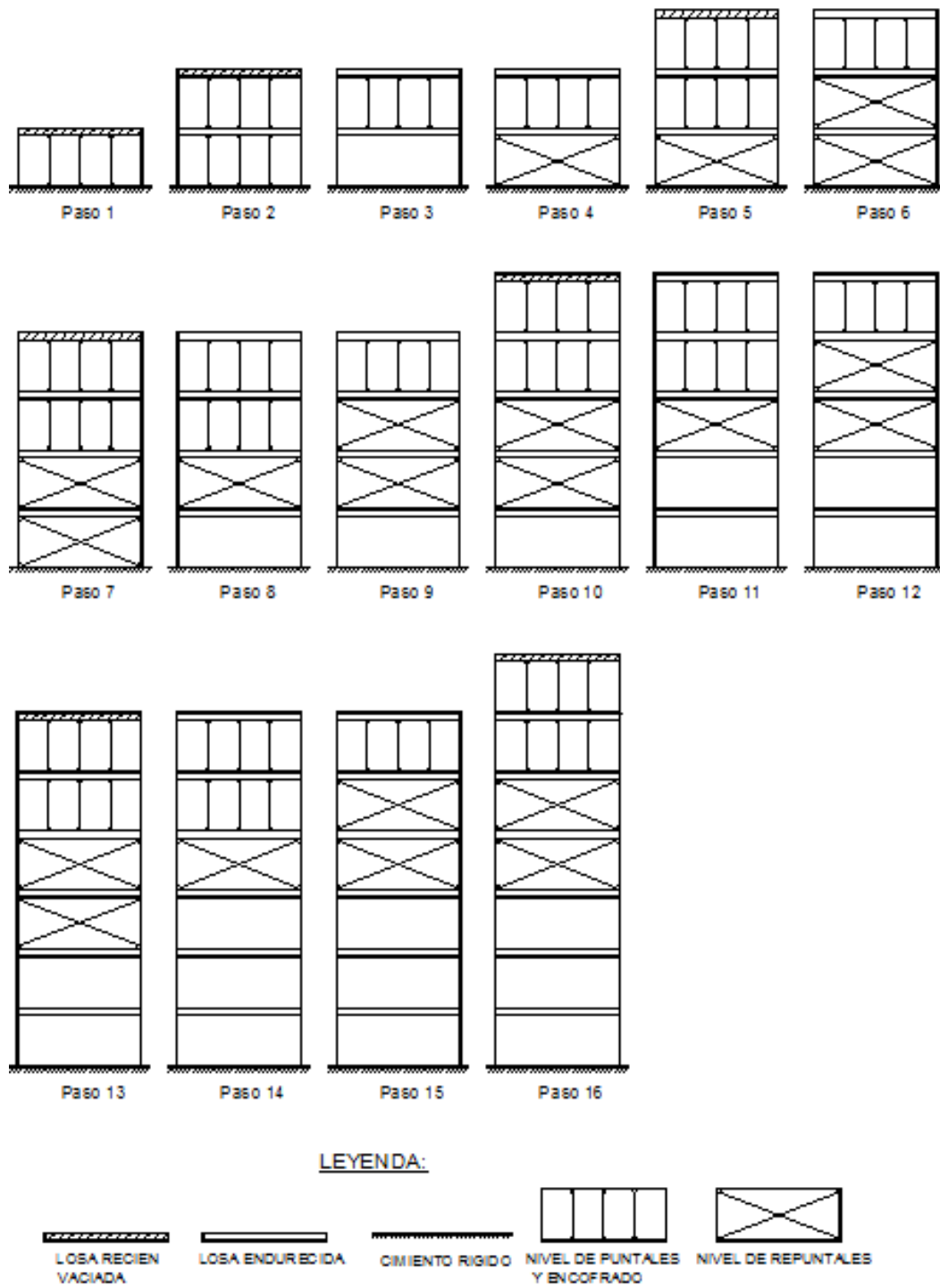


Figura A.3 Sistema constructivo dos apuntalamientos y dos reapuntamientos (2S+2R).

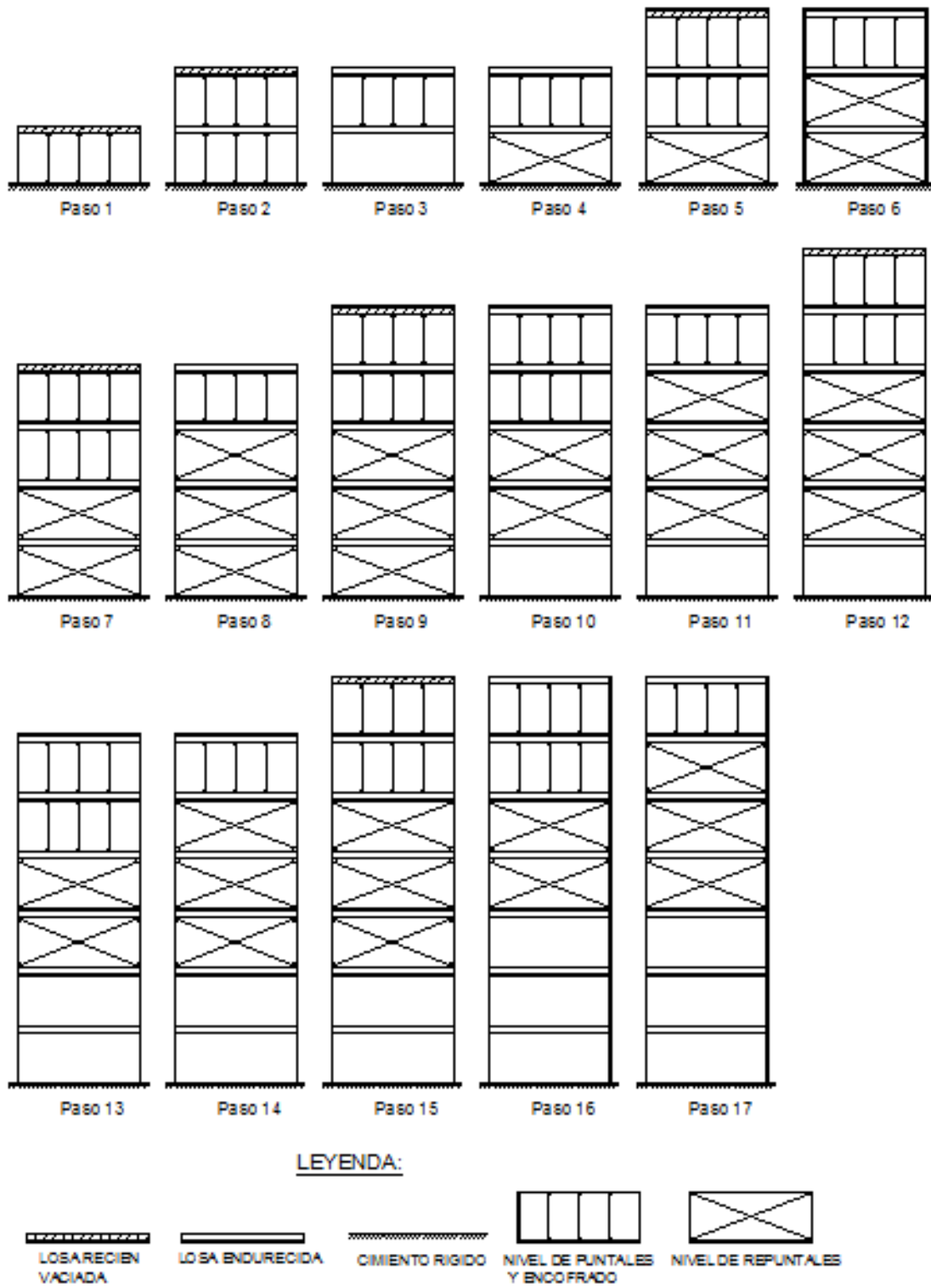


Figura A. 4 Sistema constructivo dos apuntalamientos y tres reapuntamientos (2S+3R).

ANEXO B

Tutorial de la herramienta “Staged Construction” del SAP2000 V14.1

Este tutorial describe el proceso para aplicar el módulo *Staged Construction*, o construcción por etapas, del programa SAP 2000 V14.1, utilizado en el presente estudio para desarrollar la transmisión de cargas durante el proceso constructivo con el Método de Pórtico Equivalente (EFM).

B.1. Presentación de la herramienta *Staged Construction*.

La herramienta *Staged Construction* es un módulo del programa SAP2000 que permite analizar estructuras considerando la secuencia de las etapas de la construcción y los efectos dependientes del tiempo como son el módulo de elasticidad, contracción y flujo plástico del concreto.

Esta herramienta actualmente se utiliza para analizar puentes y edificios durante su etapa constructiva.

B.2. Descripción de los comandos de la herramienta del *Staged Construction*.

Cuando se desea trabajar con la herramienta *staged construction*, se debe empezar definiendo un caso de carga seleccionando la opción *Define* de la barra de herramientas, donde se abrirá la ventana *Define Load Case*. En esta ventana se selecciona la opción *Add New Load Case* para definir el caso de carga *Staged Construction*. En esta nueva ventana se define el tipo de caso de carga seleccionando la opción *Static* del botón desplegable *Load Case Type*, y también se define el tipo de análisis haciendo clic en la opción *Nonlinear Staged Construction* del botón desplegable *Analysis Type*, donde la ventana de trabajo pasará a llamarse *Load Case Data- Nonlinear Static Staged Construction*. Esta ventana está dividida en cuatro secciones bajo los nombres de *Load Case Name*, *Initial Conditions*, *Stage Definition* y *Data for Stage* que se describen a continuación:

Load Case Name:

En esta sección se define el nombre que se desea utilizar para el caso de carga correspondiente al proceso constructivo que se desea trabajar.

Initial Conditions:

En esta sección se define si la estructura que se desea evaluar empezará en una condición sin esfuerzos ni desplazamiento, o si la estructura ya estará esforzada y este estado se sumará al caso de carga que se está evaluando. Para la primera opción se debe seleccionar *Zero initial Condition*, caso contrario se debe seleccionar la opción *Continue from State at End of Nonlinear Case*.

Stage Definition

En esta sección se define cada uno de los *Stages* o etapas del proceso constructivo, y la duración de cada uno.

Stage: Un *Stage* es un conjunto de operaciones que son ejecutadas en un determinado tiempo. Cada *Stage* tiene una duración definida en días que debe ser un número entero mayor o igual a cero. Cada *stage* empieza con las condiciones iniciales iguales a las condiciones finales de un *stage* previo. El primer *stage* empezará con la condición inicial que se defina en la sección *Initial Conditions*.

En la sección *Stage Definition* están disponibles los siguientes botones:

- ✓ Boton *Add*: Sirve para agregar un nuevo *stage*. En un *stage* nuevo se puede ingresar información en las opciones *Duration* y *Provide Output* para escribir la duración del *stage* y para obtener los estados de esfuerzos y deflexiones de la estructura al final de cada *stage*.
- ✓ Boton *Add Copy*: Sirve para agregar una copia a la lista desplegable de los datos de un *Stage* existente.
- ✓ Boton *Modify*: Sirve para editar y revisar los valores o comentarios de un *stage* existente.
- ✓ Boton *Insert*: Sirve para insertar una fila de datos debajo de la fila de datos que se seleccione de la lista desplegable.
- ✓ Boton *Delete*: sirve para borrar alguno de los *Stage* que se desea eliminar.

Data for Stage:

En esta sección se define las diferentes operaciones y cargas que conforman cada uno de los *stage* de la construcción. Por cada uno de los *stage* que se defina en la sección *Stage definition* se activará una sección *Data for Stage*.

En la sección *Data for Stage* están disponibles los siguientes botones:

- ✓ Lista desplegable *Operation*: Es para seleccionar la operación que se desea realizar en el *stage*, y se puede elegir entre las opciones *Add Structure*, *Load Objects*, *Load Objects If Added* y *Remove Structure*.
 - *Add Structure*: Esta operación se activa cuando se desea agregar una nueva estructura.
 - *Change Section*: Esta operación se activa cuando se desea cambiar la sección de un determinado elemento o grupo de elementos.
 - *Load Objects*: Esta operación se activa cuando se desea agregar un patrón de carga (*Load Pattern*) a un objeto (grupo, elemento, área, etc). Este patrón de carga se asigna a objetos que serán activados al final del *stage*.
 - *Load Objects If Added*: Esta operación se activa cuando se desea agregar un patrón de carga (*Load Pattern*) a un objeto (grupo, elemento, área, etc). Este patrón de carga se asigna a objetos que están activos al momento que se les asigna la carga.
 - *Remove Structure*: Esta operación se activa cuando se desea remover un objeto especificado en el modelo. Todas las cargas del elemento también serán removidas.
- ✓ Lista desplegable *Object Type*: Es para seleccionar el tipo de objeto, y se puede elegir entre las opciones *Group*, *Point* y *Frame*.
- ✓ Lista desplegable *Object Name*: Es para seleccionar el nombre del objeto que será incluido en el *Stage* de la lista, ya sea para ser agregado, removido, cargado o cambiado de sección.
- ✓ Cuadro editable *Age at Add*: Este cuadro editable está disponible cuando se ha seleccionado la opción *Add Structure de la lista desplegable Operation*. Sirve para ingresar y editar la edad de la estructura.
- ✓ Lista desplegable *Type*:
Esta opción se activa cuando se está trabajando con la lista desplegable *Operation*, de acuerdo a esto tiene las siguientes opciones:

- Si se despliega *Change Section*: La opción *Type* sirve para seleccionar el tipo de objeto a ser cambiado (group, frame, etc.) y se complementa con la opción *name* para seleccionar el nombre de la sección por la que se desea cambiar.
 - Si se despliega *Load Objects* o *Load Objects If Added*: La opción *Type* sirve para seleccionar el tipo de carga que se desea agregar al objeto y se complementa con la opción *name* para seleccionar el nombre de la carga que se desea agregar.
- ✓ Botón *Add*: Sirve para agregar cada operación que ya se ha configurado en sus respectivas opciones.
- Boton *Modify*: Sirve para modificar cada operación dentro del *stage*.
 - Boton *Delete*: Sirve para eliminar alguna operación dentro del *stage*.

B.3. Proceso de evaluación con la herramienta *Staged Construction*.

A continuación se mostrará paso a paso el proceso de evaluación de una estructura utilizando la herramienta *Staged construction*, desde la etapa previa de definir la estructura hasta finalmente correr el modelo.

Para la descripción del proceso se asumirá el hecho de que el usuario sabe utilizar el programa SAP2000 a nivel básico.

Paso 1: Etapa Previa

Definir la estructuración del edificio.

Establecer el sistema de coordenadas globales (X, Y, Z).

Definir los materiales (concreto, acero, etc.) de los elementos resistentes.

Definir las secciones de los elementos resistentes (columnas, losas, etc.) del edificio.

Dibujar los distintos elementos resistentes y asignar las secciones de cada uno.

Definir y asignar los grupos de elementos resistentes de la estructura (losas, columnas, puntales, etc.).

Asignar el sistema de apoyo a las bases.

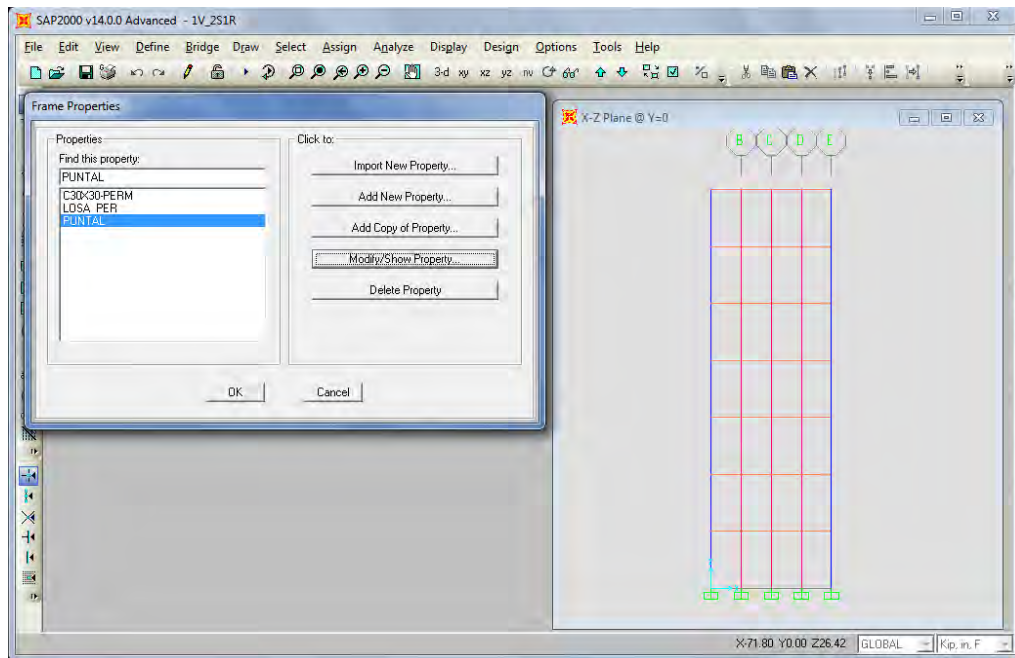


Figura B.1 Ventana de asignación de propiedades a los elementos – *Frame Properties*.

Paso 2: Análisis Secuencial

- ✓ Definir el caso de carga que se desea realizar, para esto se debe seleccionar:
Define – Define Load Cases – Add New Load Case

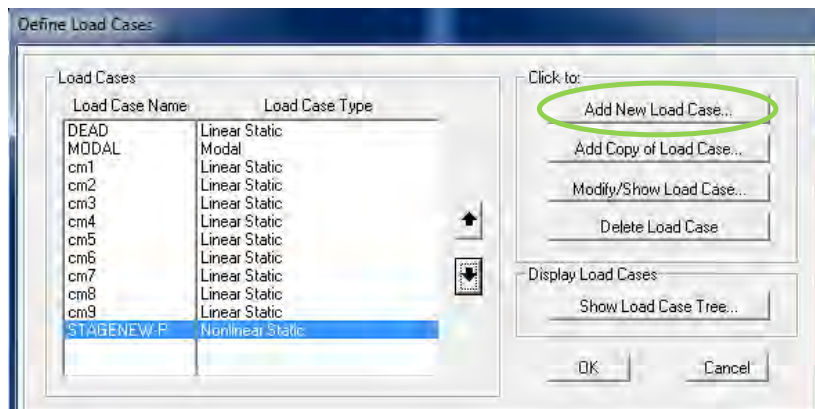


Figura B. 2 Ventana *Define Load Cases*.

- ✓ Después de haber seleccionado *Add New Load Case* se abrirá la ventana *Load Case Data*. El paso siguiente es ir *Load Case Type*, en donde se selecciona el tipo de análisis que se desea efectuar, para esto se seleccionará el *Static - Nonlinear Staged Construction*.

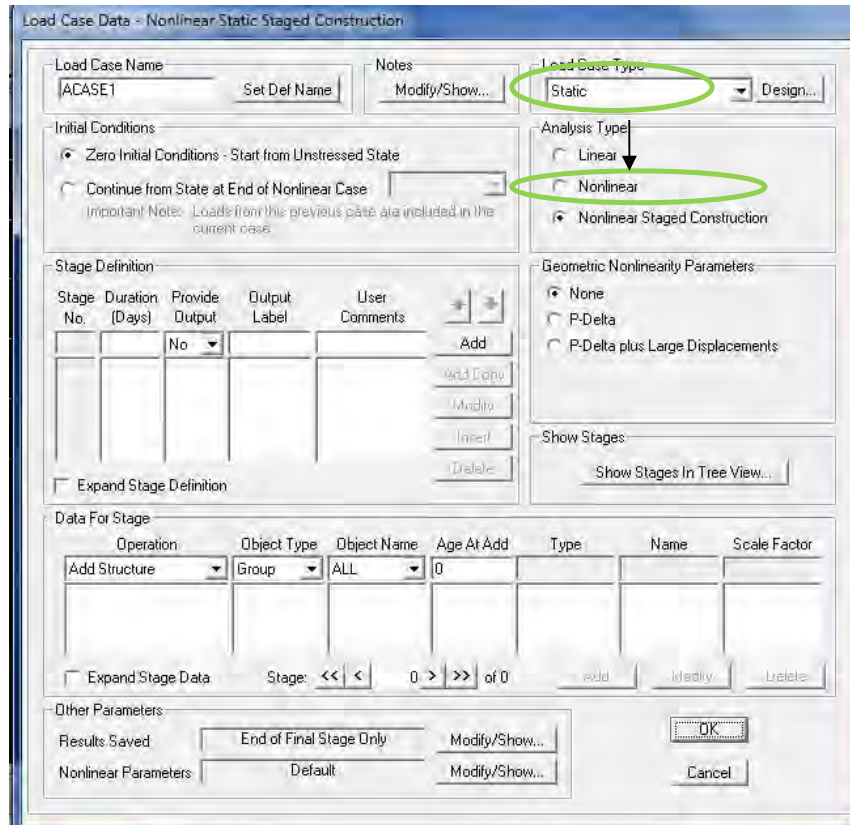


Figura B.3 Ventana *Load Case Data*.

- ✓ Una vez realizado el paso, se debe empezar a crear cada *stage* en la sección *stage definition* con la duración que le corresponde de acuerdo a la secuencia constructiva. Un ejemplo es el conjunto de operaciones que pueden presentarse desde el vaciado de una losa nueva, desapuntalamiento y reapuntalamiento de las losas de ciertos pisos hasta antes del vaciado de la siguiente losa, todo este proceso puede durar 7 días.

Si se requiere hacer cambios se cliquea en una fila existente, se revisan los datos y luego se hace clic en el botón *modify*. Si se desea borrar una carga definida, se hace clic en una fila existente y clic en el botón *delete*.

- ✓ Una vez realizada la entrada del *stage* en la sección *Stage Definición*, y la definición de cada *stage* en la sección *Data for Stage*, siguiendo los tiempos de acuerdo al ciclo constructivo, se presiona el botón OK para terminar.
- ✓ Luego en la pantalla principal, se procede a correr el análisis, con la opción: *Analyze – Run Analysis* (se abre la ventana *Set Load Case to Run) – Run Now*.

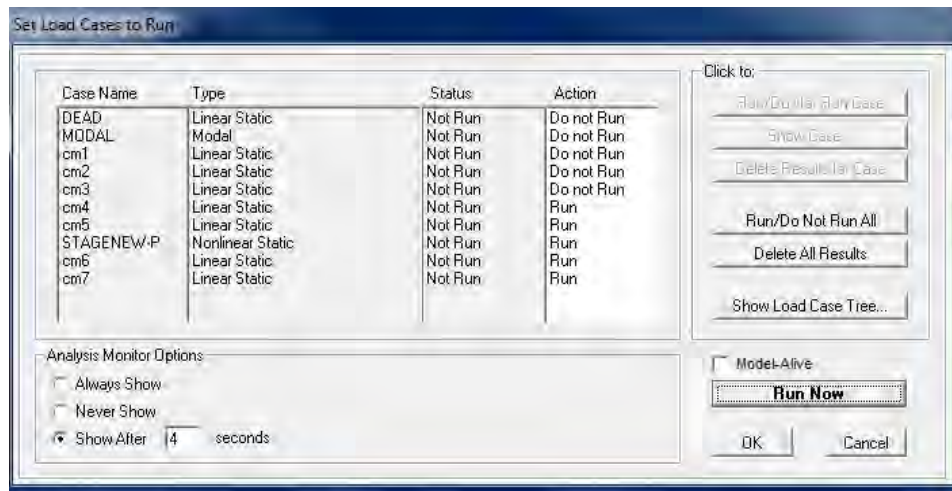


Figura B. 4 Ventana *Set Load Case to Run*.

En esta ventana también se puede seleccionar otros casos de carga.