

Modelo de simulación para fabricar losa tradicional en la región sureste de México*

Simulation Model for the Production of Traditional Roof Slabs in Southeastern Mexico

Modelo de simulacro para a fabricação de louça tradicional na região sudeste do México

*Julio Rodrigo Baeza Pereyra***

* Fecha de recepción: 29 de agosto de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 31 de marzo de 2008. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Simulación estocástica de rendimientos de mano de obra en procesos de construcción*, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), de México, con número de proyecto 33335U.

** Ingeniero civil, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Máster en Ingeniería de Construcción, Universidad Autónoma de Yucatán. PhD en Ingeniería Civil, Worcester Polytechnic Institute, Estados Unidos. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, México. Correo electrónico: bpereyra@tunku.uady.mx

Resumen

En este artículo se expone el proceso para elaborar un modelo matemático de fabricación de losa tradicional, conocida también como vigueta y bovedilla, tal y como se usa en la región sureste de México. Este método es el más utilizado para construir viviendas, a escala masiva, en dicha región, por lo que el estudio de los procesos para su obtención resulta de gran importancia, a fin de poder compararlo con otros métodos constructivos. Se usó la técnica de muestreo de trabajo para identificar sus procesos y duraciones. De esta se obtuvo una tabla comparativa de las duraciones de los procesos, que se analizaron bajo diferentes distribuciones de probabilidad. Para cada operación en el método constructivo se eligió la distribución de probabilidades que más se apegara a los resultados observados. Finalmente, se elaboró un esquema gráfico de operaciones, que se simuló en EzStrobe©. Se concluyó que la gran cantidad de actividades hacen difícil la representación de dicho método constructivo, pero se puede realizar un modelo en hormigón para simularlo.

Palabras clave

Vigas de celosía, losas, simulación por computadores, materiales de construcción.

Abstract

This article presents the process for making a mathematical model for the production of traditional roof slabs, as used in southeastern Mexico. This type of slab is the one most frequently used in large-scale affordable housing construction in this region; thus, the study of the process involved in its production is of great interest and importance, in case it should be compared with other types of construction methods. The job sampling technique was used to identify the stages of the process and their durations. A comparative table of durations was obtained and an analysis of factors under different probability distributions was performed. For each operation in the production process, the probability distribution most adequate for the population was chosen. Finally, a graphical model of operations was made using EzStrobe©. It was concluded that the large number of activities involved in this method makes its representation difficult. However, a representation of the process can be formulated for simulation purposes.

Key words

Trusses, slabs, computer simulation, building materials.

Resumo

Expõe-se o processo para a elaboração de um modelo matemático da fabricação de louça tradicional, conhecida também como de vigote e abobadilha, assim como se usa na região sudeste do México. Este método é o mais utilizado para a elaboração de viviendas em escala massiva na região, pelo qual o estudo dos processos para sua obtenção resulta de grande importância para poder compará-lo com outros métodos constructivos. Foi usada a técnica de amostra de trabalho para identificar os processos e as durações dos mesmos. Obteve-se uma tabela comparativa das durações e dos processos e foram analisados baixo diferentes distribuições de probabilidade. Para cada operação no método construtivo foi eleita uma distribuição de probabilidades que mais se aderisse aos resultados observados. Finalmente elaborou-se um esquema gráfico de operações simuladas com EzStrobe©. Concluiu-se que a grande quantidade de atividades são difícil para a representação deste método construtivo, mas não obstante, é possível realizar um modelo de concreto armado para sua simulação.

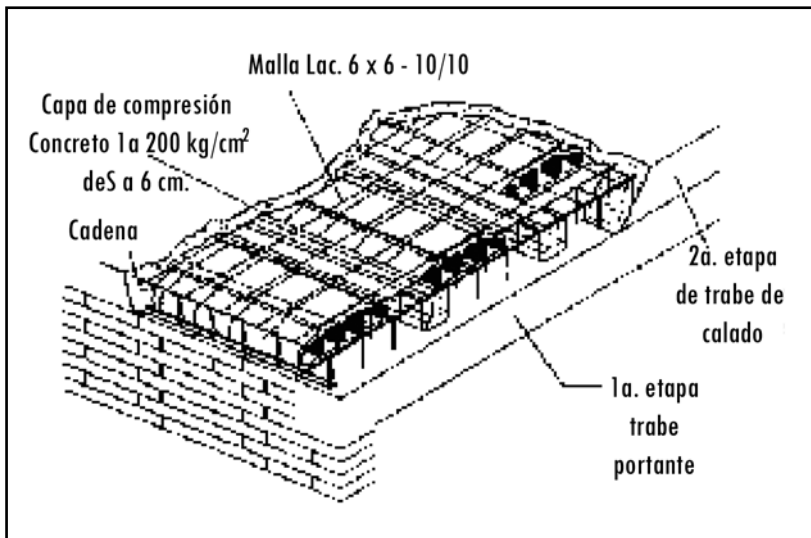
Palavras chaves

Método de vigote e abobadilha, amostra de trabalho, simulação computadorizada.

Introducción

El sistema de construcción de losa tradicional a base de viguetas y bovedillas prefabricadas de hormigón (Figura 1) es el más usado en la construcción de losa, desde 1978, en la península de Yucatán. Este sistema ha mostrado una gran versatilidad de construcción y grandes ahorros de tiempo para los constructores, en comparación con el sistema de losa armada que se tenía. Sin duda, este sistema de losa a base de piezas prefabricadas de hormigón abatió los costos que se tenían por los tiempos de fabricación principalmente, pago por mano de obra e insumos, como madera para cimbras, apuntalamiento, acero de refuerzo, cemento, etc.

Figura 1. Sistema de vigueta y bovedilla



Fuente: Sosa Canto (2005).

Sin embargo, a medida que se le ha venido empleando, principalmente en los proyectos de vivienda, se han observado algunos problemas (Tun, 1996):

- El esfuerzo físico intensivo de la fuerza laboral, lo cual se transforma en altos costos de mano de obra, así como de heridas y accidentes.
- El decremento de productividad y calidad en la fabricación del producto final.
- Algunas fallas de colapso, fisuras, humedad, entre otras, por un mal proceso constructivo.
- Los tiempos de espera y los costos por desperdicios, que llegan a ser muy altos en la fabricación de vivienda masiva.
- Algunas dificultades en el control de calidad de los materiales y resistencias de diseño, debido a la poca supervisión en los procesos de fabricación del hormigón.
- Algunos problemas de logística para el suministro, colocación o almacenaje de las piezas.

No obstante lo anterior, los fabricantes de vivienda masiva requieren una metodología concreta, a fin de comparar los beneficios y las desventajas de dicho sistema con otras opciones de techumbre. Por ello se han hecho modelos para colocar otros tipos de techumbres prefabricada, tal como la del sistema L-18 (Sosa *et al.*, 2007), pero se carece de medios para poder compararlos con los del método tradicional, debido a que no se precisan todas las tareas que involucra dicho método y porque no se han medido los tiempos de realización de dichas tareas. Además, no existe una secuencia fija para cada actividad.

Este trabajo se concentra en la creación de un modelo para simular techumbres de viguetas y bovedilla, con los siguientes fines:

- Identificar las tareas que dicho proceso necesita para su ejecución.
- Determinar las duraciones promedio de cada actividad.
- Establecer el tipo de distribución estadística más apropiada para cada tarea.
- Elaborar una secuencia cíclica para el modelo.

1. Metodología

En este trabajo se observó directamente el proceso de fabricación de la losa tradicional en campo. Las observaciones tuvieron lugar en un proyecto de construcción de cien viviendas. Las características del proyecto no se presentan en este trabajo, debido a que son parte del acervo de la empresa constructora, pero para cualquier duda al respecto se puede consultar a dicha empresa (Grupo Promotora Residencial). Sin embargo, se tuvo acceso al complejo habitacional para la toma de los datos.

Para lograr hacer el seguimiento del proceso hubo visitas continuas al proyecto de construcción durante semana y media. En ese lapso se grabaron videos y se anotaron datos y observaciones sobre dicho trabajo. Pasado ese tiempo, se identificó una lista de las actividades observadas, duraciones y recursos utilizados.

A continuación se grabaron videos durante las visitas a la obra y se apuntaron en las cédulas diseñadas los tiempos de inicio y terminación de las actividades observadas (Figura 2). Posteriormente, tales tiempos se restaban para obtener un tiempo total en términos de las unidades de media establecidas (Sosa Canto, 2005).

En resumen, la secuencia en general para realizar el muestreo para el método fue la siguiente:

- Observación del proceso, con el fin de determinar las operaciones según las actividades realizadas en el sistema de losa.
- Elaboración de una cédula de registro de datos, acorde con la variable de estudio, que se genere en cada una de las actividades observables en el funcionamiento operacional dentro del sistema tradicional en obra (Figura 2).
- Recopilación y anotación, en la cédula de registro (instrumento de captura), de datos primarios y secundarios y del papel de las actividades en cada proceso.

La unidad de análisis cualitativa para este estudio fue la losa de cubierta para conjuntos habitacionales de interés social; en términos cuantitativos, el metro cuadrado, en el proceso constructivo de la losa en comparación. Las muestras fueron no probabilísticas, porque no hubo un proceso de selección formal y arbitrario de muestras dentro de una población (como en el laboratorio), pero a partir de los datos obtenidos del muestreo se pudieron hacer inferencias sobre la población. Para la medición y la evaluación técnica del proceso constructivo del método se siguió el siguiente procedimiento:

1. A partir de los datos obtenidos de cada actividad involucrada en el proceso constructivo, se determinaron las curvas de distribución estadística que más se ajustaran a la población de duraciones.
2. Se elaboró el modelo de operación del proceso constructivo, que fue la base para crear el modelo de simulación.
3. Se creó el modelo que se iba a simular en función de las características del proyecto de vivienda en la obra.
4. Se elaboró el modelo de simulación utilizando el programa EzStrobe©.
5. Se realizó una prueba piloto de investigación, corriendo el modelo, y se verificaron los resultados con la realidad.

Figura 2. Cédula de registro y análisis de datos por actividad para variable tiempo

Cédula de registro de tiempos

Actividad: _____

Unidad de medida: _____

Método _____

Recursos utilizados: _____

Equipo y/o herramienta: _____

Materiales: _____

Otros: _____

Ciclo	Ubicación	Inicio		Fin		Total	T
		Hr	Min	Hr	Min		
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Datos estadísticos

Sum

max

min

Media

D.E.

Var

Rango

Interv

Categorías

Ran/café

Ancho interv

Continúa

Ciclo	Ubicación	Inicio			Fin			Total min	T Min/unidad
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg		
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									

Datos histograma					
Intervalo	LI	LS	Mk	Histograma	
1	0.00	0.00	0	0	
2	0.00	0.00	0	0	
3	0.00	0.00	0	0	
4	0.00	0.00	0	0	
5	0.00	0.00	0	0	
6	0.00	0.00	0	0	
7	0.00	0.00	0	0	
	0.00	0.00	0	0	

Datos actividad	
m ² de losa observados =	m ² aprox
Vol. concreto 1 m ² de losa:	M ³ aprox
Rendimiento:	0.00 min/m ²
Simbología:	Col = colado, # = colado observado, Ly = losa vigueta y bovesilla, m ² de la losa

Fuente: Sosa Canto (2005).





El primer paso del procedimiento metodológico consistió en agrupar todos los datos obtenidos para las diferentes actividades mencionadas y determinar para cada una de ellas su comportamiento estadístico de probabilidad o curvas de distribución de la siguiente manera:

- Se capturaron de manera ordenada y agrupada todos los datos obtenidos en el formato de la cédula de registro.
- Se verificó el comportamiento real de la población de las actividades para los datos que se tenían, utilizando el paquete estadístico SPSS© v. 10, que permitió visualizar especialmente la dispersión de los datos de las distribuciones.
- Se determinaron los siguientes parámetros estadísticos de los datos: valor máximo, mínimo, media, desviación estándar, rango, un intervalo de categorías y un ancho de intervalo o marca de clase.
- Con los datos anteriores, se graficó el histograma del comportamiento de los datos, cuyo fin era tener una idea de la curva de distribución del comportamiento de la población de cada actividad en particular (Law y Kelton, 2000).
- Se conceptualizaron las distribuciones para las actividades del sistema de losa tradicional.
- Se analizó la dispersión de los datos por actividad, evaluando el área bajo la curva del histograma obtenido con los datos. Esta fue comparada con cada una de las áreas de las curvas totales de distribución obtenidas con SPSS©. De dicha comparación se obtuvieron diferencias de medias y desviaciones estándar para cada actividad y se eligió la distribución correspondiente, atendiendo a la menor diferencia en valor absoluto entre los arrojados por cada distribución teórica y los histogramas de datos.
- El modelo de operación del proceso constructivo y la creación del modelo que se iba a simular consistieron en elaborar los modelos gráficos de operación para cada proceso identificado en la fabricación de la losa tradicional, lo cual al final forma el modelo completo para simular el sistema constructivo total (Kamat y Martínez, 2005).

La Tabla 1 muestra los elementos que componen la lógica del proceso o actividad estudiada. Cada elemento representa el estado en el cual se encuentran los insumos y las tareas por realizar (Martínez, 2001). Siguiendo la representación mencionada, se codificó el modelo operativo en lenguaje de computadora, y con este se simuló el modelo completo de todo el proceso constructivo para este sistema de losa. En esta etapa se utilizaron los parámetros estadísticos obtenidos

de las curvas de distribución poblacional para el proceso constructivo, resultantes del análisis de los datos registrados para cada una de las actividades involucradas dentro del sistema constructivo de la losa tradicional.

Tabla 1. Descripción de elementos básicos para crear modelos de simulación

Símbolo del elemento	Nombre de la actividad	Descripción
	Actividad normal	Se utiliza para modelar una tarea de trabajo, que no tiene una dependencia de comienzo lógico y representa una actividad que procesa recursos.
	Actividad combinada	Se utiliza para modelar una o más tareas de trabajo, que sí tienen una dependencia de comienzo lógico y representa a una o más actividades que procesan recursos.
	Nodo Q o cola de espera	Representa las cantidades producidas resultado del proceso de una actividad normal o combinada, por el uso de cantidades parciales del recurso definido.
	Flecha de precedencia	Indica la dirección en la que fluye la simulación.

Fuente: presentación propia del autor.

El lenguaje de computadora empleado para la simulación —y con el cual se transcribieron los modelos operativos— fue EzStrobe© v. 10. Posteriormente, se muestran los resultados correspondientes al análisis estadístico de los datos, donde se verifica la equivalencia de los resultados obtenidos del análisis de los datos de campo con las distribuciones de probabilidad obtenidas con SPSS©, contra los obtenidos con el simulador y las distribuciones de probabilidad equivalentes al simulador (Leach *et al.*, 2007). Según lo observado en el campo:

- Se considera que el total de cuadrillas de dos personas por casa no llevaría el mismo ritmo de producción hasta la etapa de la colocación del hormigón, por tres factores: la pericia del trabajador, el suministro de materiales y la agrupación de las cuadrillas al momento de colocar el hormigón; por lo que se consideran cinco viviendas listas para el hormigón por día.
- El jornal considerado fue de 9 horas efectivas, en promedio. La cantidad de equipo, tanto humano como mecánico, está descrita dentro de las características de los proyectos observados.

- La cantidad de obreros disponibles durante cada ejecución de simulación se reduce en un 13%, debido al ausentismo.
- Se consideran dentro del modelo de simulación de la losa tradicional tres posibles demoras en el proceso de fabricación: la falta de materia prima, el ausentismo y la falla de la mezcladora de hormigón.
- Los modelos simulan el tiempo que se tardaría en fabricar una cantidad de losas simultáneamente en función de los recursos humanos y equipos disponibles a partir de la etapa de nivelación sobre los muros de una vivienda.

2. Resultados

2.1 Descripción de las actividades realizadas

En la observación del proceso constructivo de este sistema de losa se registraron 40 actividades, agrupadas en 5 partidas, con el fin de facilitar el análisis de los datos utilizados en el proceso de simulación (Tabla 2). A continuación se presentan la lista general de actividades observadas y se explica brevemente el contenido de las partidas (Tabla 3).

Tabla 2. Partidas y actividades relacionadas

Acarreos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Acarreo de acero del almacén a la obra 2. Acarreo de polines y tablas por parte del contratista; el tiempo depende de la distancia recorrida
Preliminares 1: habilitado, cimbra y colocación de estructura de la losa	<ol style="list-style-type: none"> 3. Habilitado de los armados de las vigas de entepiso que se colocarán integralmente con la losa; incluye corte, forjado de estribos y amarres 4. Cimbrado y apuntalamiento del fondo de las vigas de entepiso 5. Habilitado del acero de las losas de hormigón, como volados, losa de baño, balcones, etc. 6. Cimbrado y apuntalamiento del paso 5
Preparación de la cubierta de la losa	<ol style="list-style-type: none"> 7. Acarreo de las viguetas junto a los muros 8. Marcado de la posición de viguetas sobre los muros, según croquis 9. Izado de viguetas y colocación de bovedillas guía en los extremos 10. Acarreo y colocación de bovedillas de hormigón 11. Apuntalamiento de viguetas 12. Colocación de tableado perimetral

Continúa

	<ol style="list-style-type: none"> 13. Despuntado de bovedillas laterales 14. Colocación de armado perimetral a base de armex 15. Colocación de bastones para refuerzo negativo en losas 16. Tendido de poliducto para instalación eléctrica
<p>Preliminares 2: actividades antes de colocar el hormigón</p>	<ol style="list-style-type: none"> 17. Supervisión del estado final de la losa, apuntalamientos, armados, instalación eléctrica, etc., y autorización 18. Acarreo de recursos en el lugar de la colocación del hormigón, revolvedora y cemento 19. Cortado a la mitad de sacos de cemento 20. Colocación de fibra de vidrio en cada mitad del saco 21. Llenado de tambores de agua o piletas con una manguera conectada a la bomba más cercana al pozo de extracción 22. Acarreo de la revolvedora cerca del lugar de la colocación del hormigón 23. El oficial a cargo de la colocación del hormigón reúne a los obreros para la colocación del hormigón 24. Organización del grupo de trabajo 25. Arranque de la revolvedora 26. Humedecimiento de la superficie para la colocación del hormigón con cubetas de agua o directamente con la manguera
<p>Colocación del hormigón de losa</p>	<ol style="list-style-type: none"> 27. Llenado de cubetas con agregado o agua 28. Acarreo de polvo, incluye idas y vueltas 29. Acarreo de grava, incluye idas y vueltas 30. Acarreo de agua, incluye idas y vueltas 31. Acarreo cemento, incluye idas y vueltas 32. Revoltura del hormigón y vaciado de la olla 33. Llenado de las cubetas con hormigón 34. Acarreo de cubetas a la persona que sube el hormigón, incluye los retornos con cubetas vacías 35. Izado de las cubetas de hormigón 36. Acarreo y vaciado para acomodo del hormigón; incluye el retorno con cubetas vacías 37. Acomodo del hormigón en cadenas perimetrales 38. Acomodo de hormigón en vigas de entrepiso 39. Acomodo del hormigón en losa armada 40. Acomodo del hormigón en losa

Fuente: presentación del propia del autor.

Tabla 3. Partidas en las que se agruparon las actividades

Partida	Unidades de análisis	Descripción
Acarreos	Lote	Se refiere al total de tiempo erogado para trasladar los recursos, acero, tablas y polines, necesarios para la fabricación de una cubierta.
Preliminares 1: habilitado, cimbra y colocación de estructura de la losa	m y m ²	Contempla el tiempo total de la fabricación del acero y la cimbra para la colocación del hormigón de vigas y losa armada por cubierta.
Preparación de la cubierta de la losa	m ²	Contempla el tiempo total necesario para la preparación de una cubierta antes de la colocación del hormigón, según las actividades observadas.
Preliminares 2: actividades antes de colocar el hormigón	Lote	Se refiere al total de tiempo erogado para juntar a la cuadrilla de trabajo, acarrear los elementos (cemento y revolvedora) y dejar listos los recursos (agua, cemento y agregados) que se van a utilizar.
Colocación del hormigón de losa	ml y m ²	Contempla el tiempo total necesario para colocar el hormigón de la estructura, vigas y losa.

Fuente: presentación propia del autor.

Las cuarenta actividades mostradas en la Tabla 2 son realizadas por la cuadrilla de trabajo con un mínimo uso de maquinaria. Esto se da sólo cuando se emplea la mezcladora de hormigón.

2.2 Datos y distribuciones de probabilidad estadística

En esta parte se resumen los tipos de distribución poblacional identificados para cada una de las actividades por partida dentro de cada sistema constructivo de losa tradicional, utilizando el programa SPSS©. A continuación se muestran, a modo de ejemplo, los resultados para la actividad de acarreo (Figura 3). Para las demás actividades se sugiere revisar lo dicho por Sosa Canto (2005).

Figura 3. Cédula de captura de datos acarreo del recurso acero

Cédula de registro de tiempos

Actividad: Acarreo de acero del almacén a la obra. Necesario para la losa armada y de vigueta. Incluye varilla para parrillas, vigas y bastones, armex, alambroñ y A.R ec.

Unidad de medida: Lote

Método: Losa de vigueta y bovedilla

Recursos utilizados: M.O. 1 chofer (contratista) + ayudante

Equipo y/o herramienta: Camioneta

Materiales: Varillas de 3/8" y 1/2", armex, alambroñ, alambre recocido.

Otros: Gasolina

Ciclo	Ubicación	Inicio			Fin			Total	T
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg		
1	Losa 1	10	29	19	10	58	42	29,38	
2	Losa 2	10	16	4	10	47	33	31,48	
3	Losa 3	9	30	32	10	1	21	30,82	
4	Losa 4	11	14	20	12	5	48		
5	Losa 5	10	46	11	11	16	38	30,45	
6	Losa 6	16	6	22	16	39	19	32,95	
7	Losa 7	15	36	15	16	3	49	27,57	
8	Losa 8	15	25	27	15	57	48	32,35	
9	Losa 9	10	35	6	11	6	27	31,35	
10	Losa 10	12	24	33	12	54	57	30,4	
11	Losa 11	10	16	19	10	45	32	29,22	
12	Losa 12	16	34	52	17	6	9	31,28	

Datos estadísticos	
Sum	797,87
max	39,13
min	23,23
Media	30,51
D.E.	3,34
Var	11,18
Rango	15,90
Interv	7,00
Categorías	6,00
Ran/café	2,65
Ancho interv	1,33

Continúa

Ciclo	Ubicación	Inicio			Fin			Total min	T Min/unidad
		Hr	Min	Seg	Hr	Min	Seg		
13	Losa 13	15	13	10	16	4	46		
14	Losa 14	15	27	50	15	58	12	30,37	
15	Losa 15	10	15	8	10	42	24		
16	Losa 16	10	50	8	11	25	23		
17	Losa 17	9	25	7	10	1	4		
18	Losa 18	11	22	59	11	52	36		
19	Losa 19	10	22	40	10	49	43		
20	Losa 20	10	5	20	10	37	32		
21	Losa 21	16	23	11	16	54	20		
22	Losa 22	15	14	22	15	56	11		
23	Losa 23	15	45	15	16	16	22		
24	Losa 24	11	26	27	11	59	15		
25	Losa 25	10	39	19	11	18	27		
26	Losa 26	16	21	52	16	45	6		
27	Losa 27	15	41	10	16	13	11		
28	Losa 28	15	32	21	15	56	22		
29	Losa 29	10	18	48	10	43	15		
30	Losa 30	12	30	38	13	12	46		

Datos histograma				
Intervalo	LI	LS	Mk	Histograma
1,00	20,58	24,56	22,57	0,00
2,00	24,56	25,88	25,22	2,00
3,00	27,21	28,53	27,87	3,00
4,00	29,86	31,18	30,52	7,00
5,00	32,51	33,83	33,17	11,00
6,00	35,16	36,48	35,82	1,00
7,00	37,81	39,13	38,47	1,00

Datos actividad	
Las losas son de	40.000 m ² aprox
El total de datos cuestionados	30.000 m ² aprox
Rendimiento:	30,51 min/lote
El tonelaje de acero requerido por losa es	

Histograma

Ciclo	Valor
1	1,00
2	2,00
3	3,00
4	4,00
5	5,00
6	6,00
7	7,00

Fuente (Sosa Canto, 2005).

La Tabla 4 resume los análisis estadísticos para todas las partidas, utilizando el programa SPSS©. Se muestran los datos de tiempo resultantes de comparar los datos a la luz de las de diferentes distribuciones. De esta comparación se seleccionaron las que se muestran en la tabla indicada.

Tabla 4. Datos estadísticos poblacionales de tiempo por unidad de análisis para el sistema de losa tradicional

Actividad	Tipo de distribución
Demora por suministros	Triangular con parámetros: 0,5, 1, 2 jornales
Acarreos	Uniforme 0,154 jornal/losa
Preliminares 1	Triangular: 0,794, 1, 1,23 jornal/losa
Preparación de cubierta	Triangular: 0,28, 0,36, 0,43 jornal/losa
Preliminares 2	Triangular: 0,036, 0,056, 0,071 jornal/losa
Colocación del hormigón	Triangular: 0,133, 0,157, 0,184 jornal/losa
Descompostura de la mezcladora de hormigón	Triangular: 0,554, 0,081, 0,1018
Traslado de maquinaria a la bodega	Uniforme: 0,02, 0,05 jornales

Fuente: presentación propia del autor.

Se cotejaron los parámetros obtenidos de manera teórica con los datos reales usando el programa estadístico y se seleccionaron las distribuciones teóricas que más se apegaron a los datos. Los parámetros de cada distribución que se muestran en la Tabla 4 fueron extrapolados usando el paquete estadístico VTFIT© (Cooke, 1993). Con ellos se completaron las diferentes actividades del modelo mostrado en la Tabla 5 y la Figura 4. En la Tabla 5 se muestra el modelo computacional que describe el proceso propuesto, dividido en nueve actividades combinadas.

Tabla 5. Modelo computacional del proceso propuesto

A	Desfase en producción	Esta actividad se utiliza para que se divida el trabajo entre las diferentes cuadrillas que componen al modelo y así evitar que todas ellas comiencen a la vez.
B	Demora por suministros	Tiene a su cargo simular la demora en los suministros de mano de obra y materiales, si llegare a ocurrir. Está antecedida por un elemento de decisión con una probabilidad de 13% de ocurrencia.
C	Acarreos	Resume la duración de los acarreos de recursos materiales y humanos requeridos para la ejecución de las demás etapas del proceso.
D	Preliminares 1	Resume la duración que se espera para las actividades la fabricación del acero y la cimbra para la colocación del hormigón de vigas y losa armada por cubierta.
E	Preparación de cubierta	Representa el tiempo total necesario para la preparación de una cubierta, tal como se mencionó en la Tabla 3.
F	Preliminares 2	Es la actividad que corresponde a juntar a la cuadrilla de trabajo, acarrear los elementos cemento, etc. (Tabla 3).
G	Colocación del hormigón	Simula el tiempo para la colocación del hormigón.
H	Descompostura de la mezcladora de hormigón	Simula el tiempo que pasaría si ocurre una descompostura en dicha máquina. Está antecedida por un nodo de decisión que le asigna una probabilidad de 18% de ocurrencia.
I	Traslado de maquinaria a la bodega	Simula el final del ciclo de colocación del hormigón y comienzo de tareas, como limpieza de herramienta, maquinaria, personal, etc.

Fuente: presentación propia del autor.

Los resultados del modelo de simulación de la Figura 4 se muestran en la Tabla 6. El tiempo que arroja construir 120 m² de losa es de aproximadamente 842 minutos, teniendo en cuenta que se fabrican cuatro losas en una sola sesión de catorce horas, que corresponde a una jornada más larga que la asumida, pero común en el trabajo en campo.

Tabla 6. Resultado de la simulación de las actividades usando el modelo de la Figura 2

Recursos	Queue	Res	Cur	Total	AvWait	AvCont	SDCont	MinCont	MaxCont
Bovedillas ezs	0	226	555,23	149,07	102,6	0	226		
CadenasinC ezs	0	0,8	774,95	0,74	0,2	0	0,8		
Camioneta ezs	1	4	189,59	0,9	0,3	0	1		
Concreto ezs	0	1,62	20,3	0,04	0,1	0	0,39		
Cuadrilla ezs	1	57	9,57	0,65	0,48	0	1		
Cuadrilla2 ezs	1	152	3,35	0,6	0,49	0	1		
Cuadrilla3 ezs	1	10	80,19	0,95	0,21	0	1		
Cuadrilla4 ezs	1	3	278,53	0,99	0,09	0	1		
Cuadrilla5 ezs	1	16	48,82	0,93	0,26	0	1		
LosaAColada ezs	0,18	0,18	18,27	0	0,02	0	0,18		
LosaAsinC ezs	0	0,17	821,61	0,17	0,02	0	0,17		
LoteAcero ezs	0	40	0	0	0	0	40		
Maderas ezs	0	1	277,68	0,33	0,47	0	1		
Material ezs	985	1.000	840,67	998,7	3,52	985	1		
Recuperabilita2 ezs	1	1	123,39	0,15	0,35	0	1		
Recursos ezs	0	1	697,63	0,83	0,38	0	1		
Recurxhabilitar ezs	0	1	0	0	0	0	1		
Revolvedora ezs	1	16	48,82	0,93	0,26	0	1		
Supervisor ezs	1	47	17,39	0,97	0,17	0	1		
TirabeSinC ezs	0	0,17	733,42	0,14	0,05	0	0,17		
Viguetas ezs	0	56,4	238,9	16,01	24,48	0	56,4		
Viguetas2 ezs	0	56,4	426,64	28,59	26,34	0	56,4		
cadenaColada ezs	0,81	0,81	65,24	0,06	0,19	0	0,81		
Cuadrilla6 ezs	1	91	8,02	0,87	0,34	0	1		
espacio ezs	0,03	1,65	194,74	0,38	0,13	0	0,43		
kgAcerxHabilit ezs	0	40	191,13	9,08	7,44	0	40		

Continúa

Recursos	Queve	Rés	Cur	Total	AvWriti	AvCont	SDCont	MinCont	MaxCont
kgacero1H ezs	28,36	0	28,36	28,36	733,51	24,71	8,45	0	28,36
kgacero1SH ezs	0	3	0	26	83,4	2,58	6,75	0	26
kgacero2H ezs	3	0	3	3	654,49	2,33	1,22	0	3
kgacero2SH ezs	0	0,05	0	3	173	0,62	1,19	0	3
losaVBC ezs	0,05	1,03	0	0,05	3,45	0	0	0	0,05
losaVBSinC ezs	1,03	0	1,03	1,08	841,53	1,08	0	1,03	1,08
miviguexlevan ezs	0	0	0	56,4	426,64	28,59	26,34	0	56,4
miviguexacarr ezs	0	37	0	56,4	238,9	16,01	24,48	0	56,4
m ² apuntala2 ezs	3	0	3	37	209,84	9,22	15,55	0	37
m ² cimbraC ezs	3	0	3	3	507,49	1,81	1,45	0	3
m ² cimbraSC ezs	0	7	0	2,5	316,92	0,94	1,19	0	2,5
m ² cimbrapeColo ezs	7	0	7	7	163,6	1,36	2,71	0	7
m ² cimbrapeSC ezs	0	27,05	0	6,35	671,35	5,06	2,5	0	6,35
m ² cubierta ezs	27,05	9	27,05	36,05	809,03	34,65	3,17	27,05	36,05
m ² cubiertaPrepaezs	9	46	9	9	126,68	1,35	3,12	0	9
m ² cubiertaSuperezs	46	1	46	46	110,89	6,06	15,23	0	46
m ² cubiertahumedezs	1	27,05	1	1	118,17	0,14	0,35	0	1
m ² cubiertaxPrezs	27,05	0	27,05	36,05	809,03	34,65	3,17	27,05	36,05
m ² cubiertaxSup ezs	0	0	0	45,08	730,11	39,1	14,97	0	45,08
m ² cubiertaxhumeezs	0	3	0	1	718,87	0,85	0,35	0	1
m ² maderaxhab ezs	3	0	3	50	326,25	19,38	21,87	0	50
m ² xapuntalar ezs	0	0	0	36,15	629,89	27,05	15,26	0	36,15
pzaBexcolocar ezs	0	57	0	226	555,23	149,07	102,6	0	226
totalmlacarre2 ezs	57	57	57	57	601,14	40,71	24,79	0	57
totalmllevan2 ezs	57	231,25	57	57	411,45	27,86	26,6	0	57
totalpzacoloca ezs	231,25	0,18	231,25	231,2	282,91	77,72	104,55	0	231,25
trabecolada ezs	0,18	0	0,18	0,18	106,84	0,02	0,06	0	0,18

Continúa

Conceptos	Total	IstSt	LstSt	AvDur	SDDur	MinD	MaxD	AvInt	SDInt	Mini	Maxi
Activity											
AcarViguetas	57	201,93	276,47	1,33	0,08	1,16	1,51	1,33	0,08	1,16	1,51
Acaracero	1	0	0	37,54		37,54	37,54				
Acamaderas	1	277,68	277,68	26,56		26,56	26,56				
Acarrecursos	1	697,63	697,63	19,3		19,3	19,3				
Acerolosaam	3	159,09	185,73	14,28	2,42	11,56	16,2	13,32	2,49	11,56	15,08
Acerotrabes	6	37,54	138,48	20,26	0,2	20,05	20,61	20,19	0,12	20,05	20,31
ApuntalosaVyBc	37	604,26	656,09	1,43	0,2	1,06	1,79	1,44	0,2	1,06	1,79
Cimbperimetral	7	657,29	688,95	5,18	0,99	4,01	6,53	5,28	1,05	4,01	6,53
Cimbtrablosa	3	304,25	335,71	14,22	2,62	11,21	15,95	15,73	0,31	15,51	15,95
ColocBovedillas	37	509	601,48	2,57	0,75	1,36	3,72	2,57	0,76	1,36	3,72
ElabConcreto	15	723,6	837,16	4,04	0,14	3,75	4,25	8,11	3,42	3,75	14,22
Humedosa	1	718,87	718,87	4,73		4,73	4,73				
LevanViguetas	57	346,92	505,79	2,84	0,44	2,18	3,52	2,84	0,44	2,18	3,52
PrelColado	1	716,93	716,93	1,44		1,44	1,44				
Prepacubierta	9	693,55	728,55	4,43	0,58	3,38	5,18	4,37	0,6	3,38	5,18
SupervColado	46	718,37	742,01	0,53	0,1	0,3	0,72	0,53	0,1	0,3	0,71
coladocadena	60	741,47	809,32	1,15	0,03	1,11	1,19	1,15	0,03	1,11	1,19
coladorrabe	13	727,34	740,37	1,09	0,05	1,02	1,18	1,09	0,05	1,02	1,18
losaVB	4	834,54	841,01	1,13	0,29	0,75	1,45	2,16	1,47	1,16	3,85
losarmada	13	810,47	832,74	1,85	0,05	1,77	1,95	1,86	0,05	1,77	1,95

Fuente (Sosa Canto, 2005).

3. Discusión

El modelo propuesto puede ser mejorado, pero representa el primer paso para comparar el sistema tradicional con otros, tal como el estudiado por Sosa *et al.* (2007). El modelo de colocación de cubierta L-18 toma en promedio 299,13 minutos contra 842 minutos del método tradicional, para cubrir un área equivalente a la que se estudia en este trabajo. Sin embargo, el método tradicional es el más empleado en la región, debido a que el costo de la mano de obra es menor para los constructores de vivienda.

Otra ventaja aparente del método tradicional es que requiere menor capacitación que cualquier otro sistema industrializado. Sin embargo, al comparar el modelo presentado en este trabajo con el de Sosa Canto (2005), salta a la vista que se manejan muchas más actividades que en el modelo de losas prefabricadas estudiadas por dicho autor, lo cual incrementa los problemas de logística de las cuadrillas de trabajo. Por otra parte, para poder comparar ambos sistemas, se necesitaría un estudio que presente las mismas condiciones para ambos sistemas, como volumen de obra, modularización de las unidades de vivienda, etc., que son importantes para saber hasta qué punto el sistema tradicional deja de tener sus ventajas aparentes y localizar el punto de equilibrio en volumen de obra (el punto en el que el sistema industrializado comienza a ser rentable).

Con respecto al modelo presentado en este estudio, se puede objetar que tan solo se basa en un ejemplo y que las 40 actividades deberían de ser representadas tal como son en el programa y no agruparlas en partidas. Sin embargo, la dificultad de representar todas y cada una de las actividades aumenta de manera exponencial con la lógica de la secuencia del método. Otro punto débil del método es que se podría hacer un arreglo con una lógica diferente. El modelo para la losa tradicional presentado en este trabajo requeriría ajustes para obras compuestas de dos o más cuadrillas de trabajo, puesto que la logística de los recursos es manejada al arbitrio del jefe de obra. En resumidas cuentas, es preciso profundizar en el estudio de este modelo, con diferentes variables.

4. Conclusiones

El modelo presentado contiene muchas actividades que están sujetas al desempeño de la mano de obra; sin embargo, es el primer paso para poder comparar el desempeño de este sistema en cuestiones de tiempo. También se puede inferir que la metodología empleada en este trabajo puede aplicarse en otros trabajos de simulación. Con esto también se puede decir que se tienen los fundamentos para crear una base de datos de modelos constructivos para la construcción de vivienda económica en forma masiva.

Referencias

- COOKE, R. *VTFIT, A Routine for Fitting Homogeneous Probability Density Functions* [documento en línea]. 1993. VA 24061-0303. [Blacksburg, Virginia]: Department of Agricultural Engineering Virginia Polytechnic Institute Blacksburg, <<http://age-web.age.uiuc.edu/faculty/rac/soft.html>> [Consulta: 30-04-2008].
- KAMAT, V. R. and MARTÍNEZ, J. C. Dynamic 3D Visualization of Articulated Construction Equipment. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE. 2005, vol. 19, núm. 4, pp. 356-368.
- LAW, A. and KELTON, D. *Simulation Modeling and Analysis*. 3rd ed. Boston: McGraw Hill, 2000.
- LEACH, N.; BARRETT, K., and MORGAN, G. *SPSS for Intermediate Statistics. Use and Interpretation*. 3rd ed. Denver: Lawrence Erlbaum, 2007. 288 p. ISBN 978-0805862676.
- MARTÍNEZ, J. C. EZStrobe: General-purpose Simulation System based on Activity Cycle Diagrams. *33rd Conference on Winter Simulation*. Arlington, Va., December 9-12, 2001. Arlington: Inst Elect & Electronic Engineers. ISBN-10: 0-7803-7309-X.
- SOSA CANTO, J. A. *Evaluación técnico-económica entre dos tipos de losa mediante un proceso de simulación* [tesis de Maestría]. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán, 2005.
- SOSA CANTO, J. A.; BAEZA PEREYRA, J. R., y ARCUDIA ABAD, C. E. Modelo para simulación computarizado del proceso constructivo de la losa prefabricada L-18. *Ingeniería y Universidad*. 2007, vol. 11, núm. 1, pp. 71-87.
- TUN T., J. F. *Fallas estructurales típicas de la región yucateca* [monografía]. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán, 1996.