

FORMULACION OPTIMIZADA EN PROBETAS CUBICAS DE MADERA - - CEMENTO

KATIA MANZANARES , F. MARTINEZ , DIGNA VELAZRUEZ
Y M. SOSA

RESUMEN

Con el empleo de técnicas de optimización se evaluó el comportamiento de las formulaciones obtenidas en probetas cúbicas de madera-cemento fabricadas con la especie *Pinus caribaea* Morelet. Se distribuyeron 16 ensayos de acuerdo con un diseño factorial, fraccionario 2^{7-4} y además se preparó una corrida de 15 experimentos desarrollados bajo forma de un plan cuadrático tridimensional con $\alpha = 2$. Se encontró como alternativa de dosificación una formulación que contiene un consumo de cemento de 225 kg/m³

para una resistencia a compresión de 32,20 kg/cm², con la utilización de los niveles centrales de las variables agua y cal apagada. Se informa que la adición de hidrato de cal a la amasada, como sustituto parcial del material adherente, propicia la disminución del cemento hasta valores de un 40 % como promedio, con una ganancia sustancial de resistencia mecánica.

INTRODUCCION

Las construcciones aisladas han cedido el paso a los grandes conjuntos urbanos, industriales, agropecuarios y turísticos que forman parte de nuevos asentamientos poblacionales con una estructura peculiar de relaciones humanas, cultura, sistema de valores y orientaciones (1).

Sin embargo, en los programas de vivienda aún se emplean técnicas constructivas que van desde la tradicional mejorada hasta las totalmente prefabricadas dotadas de los últimos adelantos técnicos: transportación neumática del hormigón, aceleración del endurecimiento por medio de vapor y líneas de fundición en cadena o en paquetes de moldes verticales (2,3).

Por otra parte, la práctica de la autoconstrucción con el uso de recursos disponibles localmente (preferentemente renovables), se ha realizado con éxito en algunos países latinoamericanos, donde sus moradores han edificado sus propias unidades habitacionales con el propósito de disminuir los recientes crecimientos exponenciales del costo de los materiales de construcción y de la mano de obra (4).

Este artículo informa la obtención de una dosificación óptima de los componentes básicos y complementarios de la amasada realizada a escala de laboratorio en probetas cúbicas de 1000 cm^3 con el objetivo de minimizar los consumos de cemento y otros agregados que garanticen valores racionales de la resistencia característica de los especímenes de prueba, para ser utilizados posteriormente en elementos de paredes de $40\text{ cm}^2 \times 20\text{ cm}^2$. Con ello se hace una pequeña contribución a la satisfacción de las demandas de tabiquería ligera existente en las regiones apartadas del país, que aseguren las condiciones habitacionales para el marco natural y socioeconómico en que se insertan; y al mismo tiempo, permita esbozar un esquema de aprovechamiento de los residuos maderables de acuerdo con los problemas inherentes de cada territorio.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se realizó en el Departamento de Aprovechamiento e Industria del Instituto de Investigaciones Forestales.

Preparación de las muestras. Se emplearon astillas de Pinus caribaea Morelet tomadas de una partida de bolos de áreas de tratamiento silvicultural de la Empresa Macurije, en Pinar del Río. Se utilizó cemento Portland P-350 producido por la fábrica del Mariel, y una solución diluida de silicato de sodio (Na_2SiO_3), como aditivo químico. Se fabricaron

un total de 36 probetas cúbicas de 1 000 cm³ según lo establecido por la tecnología ARBOLIT descrita por Nagy (5) y se prensaron por compactación utilizando matrices triples (Figura 1). Los cubos de prueba se desmoldaron a las 48 horas de fundidas las muestras y fueron sometidos a una cura en sitio cerrado bajo techo (Figura 2).

Descripción del programa experimental. Se aplicó en la primera fase un plan factorial fraccionario saturado 2^{7-4} con el objetivo de determinar cuáles son los factores de mayor influencia en la resistencia a compresión y cómo se deben manejar para promover el rendimiento de la variable dependiente. Las corridas experimentales se efectuaron en orden aleatorio y las relaciones gravimétricas de la mezcla se presentan seguidamente:

Variables codificadas		Niveles	
		(-)	(+)
1. Cemento (g)	(B ₁)	250	350
2. Madera (g)	(B ₂)	150	190
3. Agua (mL)	(B ₃)	400	500
4. Cal	(B ₁₂)	250	350
5. Aditivo (mL) silicato de sodio	(B ₁₃)	10	15

Como segundo paso, se desarrolló un plan cuadrático tridimensional, con $\alpha = 2$ para optimizar el sistema. Los niveles adoptados para cada variable en el diseño experimental aparecen a continuación:

Niveles	Variables codificadas		
	Agua de amasado (x ₁)	Cemento (x ₂)	Cal (x ₃)
	(mL)	(g)	(g)
-2	340	225	185
-1	385	275	205
-0	430	325	225

(Continuación)

+1	475	375	245
+2	520	425	265
Desviación del nivel central (0)	±45	±50	±20

Se tomaron como indicadores constantes de fabricación la cantidad de madera y la solución de silicato de sodio en cantidad de 10 mL para cada experiencia. Se utilizaron 190 g de madera para un 14 % de humedad de las astillas.

Ensayo de resistencia a compresión. Se ensayaron 31 probetas a la edad de 28 días según una variante de la MC 54-109-85 (6).

La carga se obtuvo por una máquina destinada a la aplicación de cargas estáticas en escala de 4 t (Figura 3) y el cálculo del módulo de ruptura a compresión se realizó según lo dispuesto en el apartado "Expresión de los resultados" del referido documento normalizativo.



FIGURA 1. Aspecto de la compactación por barra realizada en moldes triples.

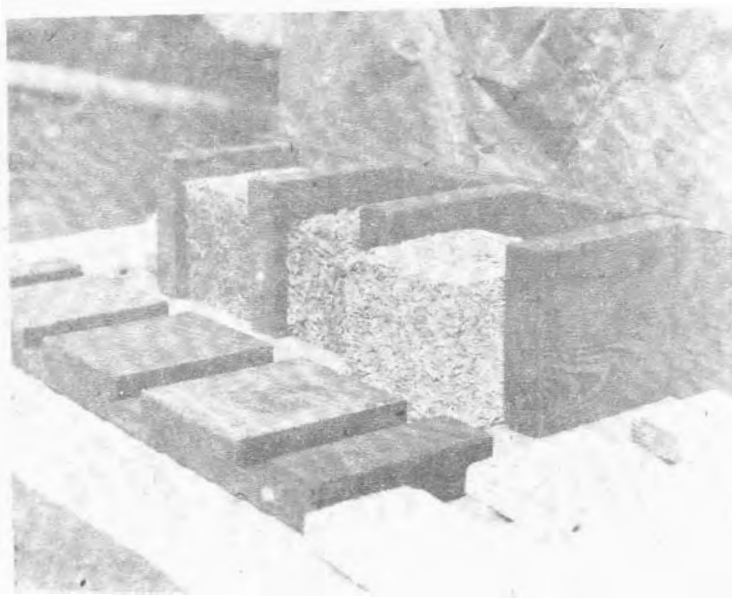


FIGURA 2. Desmoldado de probetas cúbicas a los 28 días de fundidas.

Superficie de nivel de la función de respuesta. Al resolver el plan compuesto central tridimensional con $\alpha = 2$ en la zona del espacio factorial, se obtiene un polinomio con 10 coeficientes de la forma siguiente:

$$R = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (7).$$

Se realizaron cinco réplicas en el centro del plan para calcular la varianza del error puro (s^2_{pe}). Se chequeo la adecuación del modelo mediante la prueba de Fischer (8).

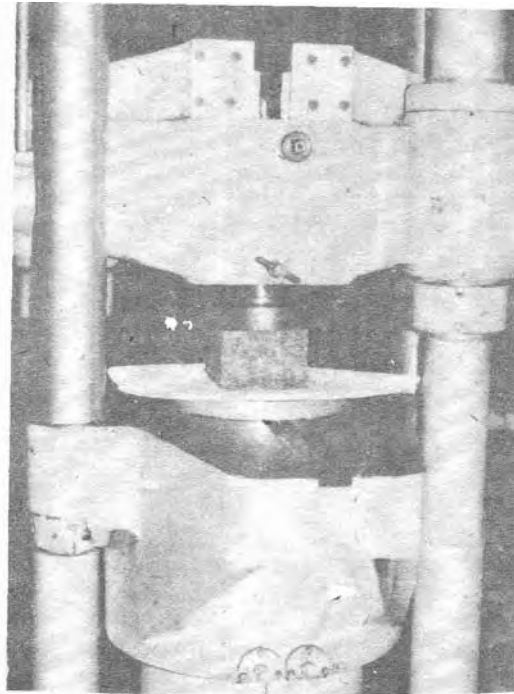


FIGURA 3. Prueba de composición en la mdquina de ensayos mecdnicos modelo AVERY.

RESULTADOS Y DISCUSION

Para el diseño saturado resultaron las variables codificadas **B1** (cemento) y **B3** (agua) significativas con tendencia hacia **su** aumento para favorecer la resistencia mecánica (Anexo 1).

La estimación de las semisumas de los coeficientes de las ochocorridas dadas por la matriz D_1 y la segunda mitad del plan con cambio de signo D_2 , corroboran **que** el cemento y el agua **se** sitúan en primero y segundo órdenes consecutivos.

ANEXO 1. Diseño fraccionario saturado 2^{7-4}

Valores experimentales (kg/cm^2)

	y (1) = 27,50		y (9) = 37,27
	y (2) = 57,90		y (10) = 38,29
	y (3) = 30,30		y (11) = 14,36
D_F	y (4) = 34,93	D_2	y (12) = 38,03
	y (5) = 40,37		y (13) = 51,08
	y (6) = 57,77		y (14) = 73,12
	y (7) = 40,35		y (15) = 62,00
	y (8) = 67,15		y (16) = 61,55
B_1 = 9,891 25 (cemento)*		$B1$ = 5,872 5*	
$B3$ = 6,887 5 (agua)*		$B3$ = 14,887 5*	
B_{13} = 1,333 75 (aditivo)		$B13$ = 0,475 0 (aditivo)	
$B12$ = 2,058 75 (cal)		B_{12} = 0,067 5 (cal)	
$B2$ = 2,098 75 (madera)		$B2$ = 1,593 75 (madera)	
Sbo = 1,962 141			

$$S^c_{pe} = 7,70$$

La variable $B12$ (cal), aunque arrojó no ser significativa para promover los valores de la variable dependiente, presenta claros indicios de que su adición provoca un mejoramiento sustancial de la resistencia mecánica porque aumenta la cantidad de adherente total hasta valores aproximados de 600 kg/m^3 .

Sobre la base de la información aportada por este diseño se considera que el cemento y el agua constituyen un conjunto de componentes muy decisivos en la formulación y que la cal apagada parece tener una marcada influencia en la elevación de la resistencia mecánica, lo que sugiere su inclusión en el plan experimental de optimización.

El desarrollo del plan tridimensional se presenta en el Anexo 2. Se observa que el módulo de ruptura se beneficia con el aumento del cemento (b_1) y el agua (b_2) en proporciones similares por cuanto los valores absolutos de sus coeficientes son casi iguales. Sin embargo, este incremento de la dosificación de estos dos componentes no tiene que llegar a los niveles máximos para lograr una mayor respuesta de la resistencia mecánica; debido a lefecto de la forma cuadr-

tica de estas variables b_{11} y b_{22} (agua y cemento) que están precedidas de signos negativos. La variable cal (b_3) participa en el enriquecimiento de la resistencia con un comportamiento orientado hacia la disminución, pero no se puede suprimir su actuación porque su coeficiente es significativo, a igual que el agua y el cemento, aunque funciona en menor magnitud dentro de la zona experimental. Se advierten interacciones de segundo orden b_{12} (agua-cemento), con una tendencia a aumentar los valores de la variable dependiente en correspondencia con la elevación de la resistencia mecánica, probablemente por el hecho de ser el cemento un aglomerante hidrófilo de mayor avidez por el agua que la cal apagada. Salas y Gómez (9) informan que el incremento de la relación agua/cemento = 0,83 proporcionó una buena manipulación en hormigones tratados con ceniza de cáscara de arroz, pero a costa de una disminución notabilísima de la resistencia, incluso por debajo de los valores obtenidos con la relación agua/cemento inferiores a 0,71.

Sin embargo, en la Tabla 1 se observa que la adición de cal Ca(OH)_2 (hidrato de cal) facilita el incremento de la resistencia a compresión de forma considerable y se alcanzan valores de $62,93 \text{ kg/cm}^2$ con una relación agua/adherente total de 0,81.

Suárez y Ortega (10) plantean que los óxidos de silicio tienen la característica de reaccionar en ciertas condiciones con la presencia de cal y agua a temperaturas ordinarias y formar compuestos cementosos. Por otra parte, la incorporación de un agregado ligero en la mezcla (cal) como sustituto parcial del material adherente disminuye el consumo de

cemento hasta valores de 270 kg/cm^2 , que representa un 40 % de ahorro de dicho aglomerante.

Se puede trabajar, en las condiciones dadas por el experimento E_{11} , el cual alcanzó un módulo de ruptura equivalente a $32,20 \text{ kg/cm}^2$ con la aplicación del nivel mínimo negativo de cemento y los centrales de cab y agua para lograr una adecuada formulación (Tabla 1).

De forma general, es notable la respuesta de la variable dependiente del sistema en los 15 experimentos del diseño de optimización, ya que todos los puntos superan ampliamente las indicaciones de los patrones internacionales ($10-20 \text{ kg/cm}^2$ para muros divisorios), lo cual es claramente apreciable en la representación gráfica presentada en la Figura 4.

TABLA 1. Resultados obtenidos en la dosificación del plan cuadrático tridimensional en Pinus caribaea Morelet.

Exp.	Cemento (g)	Cal (g)	Total adherente (g)	iihorro cemento (%)	Agua (mL)	R a/a	Compresión (kg/cm ²)	MOR R (a/a)
E ₁	275 (-)	205 (-)	480	43	385 (-)	1,40	35,66	0,80
E ₂	275 (-)	205 (-)	480	43	475 (-)	1,72	40,24	0,98
E ₃	375 (1)	205 (-)	580	35	385 (-)	1,87	44,03	0,66
E ₄	375 (1)	205 (-)	580	35	475 (1)	2,31	62,93	0,81
E ₅	275 (-1)	245 (1)	520	47	385 (-1)	1,40	32,92	0,74
E ₆	275 (-1)	245 (1)	520	47	475 (1)	1,72	46,14	0,91
E ₇	375 (1)	245 (1)	620	40	385 (-1)	1,02	38,19	0,62
E ₈	375 (1)	245 (1)	620	40	475 (1)	1,26	59,07	0,76
E ₉	325 (0)	225 (0)	550	41	340 (-2)	1,04	27,95	0,61
E ₁₀	325 (0)	225 (0)	550	41	520 (2)	1,60	45,82	0,94
E ₁₁	225 (-2)	225 (0)	450	50	430 (0)	1,91	32,20	0,95
E ₁₂	425 (2)	225 (0)	650	35	430 (0)	1,01	49,76	0,66
E ₁₃	325 (0)	185 (-2)	510	36	430 (0)	1,32	57,38	0,84
E ₁₄	325 (0)	265 (2)	590	45	430 (0)	1,32	45,33	0,72
E ₁₅	325 (0)	225 (0)	550	41	430 (0)	1,32	50,28	0,78

a/c = agua - cemento

a/a = agua - adherente

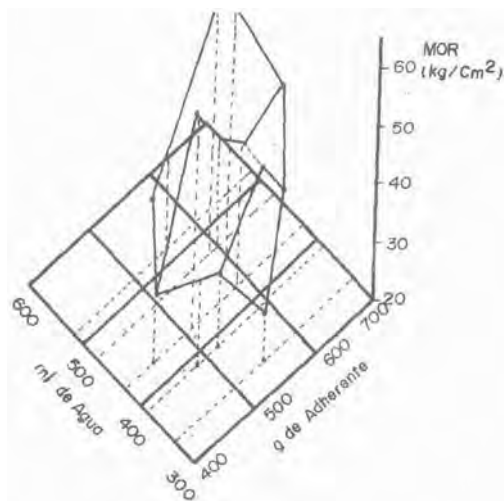


FIGURA 4. Dependencia del MOR (módulo de ruptura) a compresión en relación con la combinación de las formulaciones estudiadas. (Figura geométrica representativa de la superficie de nivel.)

Después de eliminar los coeficientes no significativos y tomando como varianza del error puro los valores de $S^2_{pe} = 7,68$; se obtuvo el polinomio siguiente:

$$R_c = 50.30 + 5.38 x_1 + 5.27 x_2 - 1.92 x_3 - 3.25 x_1^2 - 2.33 x_2^2 + 2.75 x_1 x_2$$

R_c = esfuerzo de ruptura por compresión para el Pinus caribaea Mor. (kg/cm²).

x_1 = volumen de agua (mL)

x_2 = cantidad de cemento (g)

x_3 = cantidad de cal (g) -

$x_1 x_2$ = interacciones a las variables agua-cemento (mL/g).

Se chequeó el ajuste del modelo matemático obtenido y se determinó que es adecuado, puesto que la F calculada resultó menor que el criterio de Fischer, lo cual se verifica

también con la observación de la concordancia entre las cifras dadas por el modelo y los valores experimentales (Anexo 2).

ANEXO 2. Diseñotridimensional con $\alpha = 2$.

Varianza del error puro $S^2_{pe} = 7,68$

Coefficiente significativo = 7

$b_0 = 50,300\ 01$	$b_{11} = -3,351\ 257$
$b_1 = 5,832\ 501$ (aqua)	$b_{22} = -2,327\ 449\ 5$
$b_2 = 5,273\ 75$ (cemento)	$b_{12} = 2,747\ 5$ (aqua-cemento)
$b_3 = -1,915$ (call)	

Valores calculados por el modelo Valores experimentales

MOR = kg/cm ²	MOR = (kg/cm ²)
ye (1) = 38,17	y (1) = 35,66
ye (2) = 44,34	y (2) = 40,24
ye (3) = 43,23	y (3) = 44,03
ye (4) = 60,39	y (4) = 62,93
ye (5) = 34,34	y (5) = 32,92
ye (6) = 40,51	y (6) = 46,14
ye (7) = 39,40	y (7) = 38,19
ye (8) = 56,56	y (8) = 59,07
ye (9) = 25,22	y (9) = 27,95
ye (10) = 48,55	y (10) = 45,82
ye (11) = 30,44	y (11) = 32,20
ye (12) = 51,53	y (12) = 49,76
ye (13) = 54,13	y (13) = 57,38
ye (14) = 46,17	y (14) = 45,33
ye (15) = 50,30	y (15) = 50,28

Error de adecuación s^2 y $x = 13,091\ 52$

F calculada = 1,70	F crítico = 6,04
	95 %

Resulta interesante subrayar que la aplicación de $0,225 \text{ g/cm}^3$ como índice de dosificación de cemento, propuesto por la formulación optimizada-encontrada, contribuye a disminuir el consumo de este aglutinante en un orden aproximado de un 19 % con respecto a la línea trazada por el Ministerio de la Construcción ($\leq 275 \text{ kg/m}^3$).

CONCLUSIONES

1. Se puede adoptar como una solución adecuada la registrada en el experimento E_{11} de Pinus caribaea Mor. con $0,225 \text{ g/cm}^3$ de cemento, $0,225 \text{ g/cm}^3$ de cal y $0,430 \text{ mL/cm}^3$ de agua, cuyo módulo de ruptura alcanza valores equivalentes a $32,20 \text{ kg/cm}^2$ considerándose muy favorable para ser reproducida a escala mayor.
2. La adición de hidrato de cal a la mezcla pudiera valorarse como una alternativa de dosificación con residuos de madera, por constituir un ahorro en la economía de cemento de alrededor de un 40 % (270 kg/m^3), como sustituto parcial del material adherente y una ganancia sustancial de resistencia mecánica.
3. Se determinó y comprobó la concordancia existente entre los valores experimentales y los dados por el polinomio obtenido, lo cual implica que la descripción matemática del modelo propuesto es adecuada y recomendable para ser utilizada en trabajos a mayor escala, para suministrar información y pronóstico del valor cuantitativo de la función "R" (respuesta a compresión) para un régimen de dosificación dado en una zona local del espacio factorial evaluado.
4. La posibilidad de aplicación del nivel mínimo negativo de la variable cemento ($0,225 \text{ g/cm}^3$) constituye un ahorro de, aproximadamente, un 19 % de este aglutinante con relación al consumo de cemento trazado como línea por el MICONS ($0,275 \text{ g/cm}^3$).
5. Se comprobó que la adición de agua con cierto grado de regulación tiene un importante papel en la formulación y su control depende del manejo de la relación agua/adherente total, la cual garantiza el medio acuoso necesario para que los aglutinantes inicien su proceso de hidratación y las partículas maderables intercambien agua con el sistema.

ABSTRACT

OPTIMIZED FORMULATION IN CUBIC PROBES OF CEMENT-WOOD

Using optimization techniques the performance of formulations obtained in cubic probes of cement-woodⁱ from Pinus caribaea Morelet was evaluated. Sixteen trials were distributed according to a fraction

factorial Design 2^{7-4} and a batch with 15 experiments developed under a tridimensional square plan where $d = 2$, was prepared. As dosification alternative, a formulation was found which represents a cement

consumption of 225 kg/m³ for a compresion resistance of 32,20 kg/cm², using mean levels of water and lime. The addition of lime hydrate to the mass, as partial substitute of the adherent material, favours a less consumption of cement up to 40 % in average, with a consistant gain in mechanic strenght.

BIBLIOGRAFIA

1. SEMEVSKI, B. Urbanizacidn y sistemas de asentamientos.-- Ciudad de La Habana: Ed. Ciencias Sociales, 1981.-- 54 p.
2. CUBA. DIRECCION CE EDUCACION TECNICA Y PROFESIONAL. Técnica de construccibn industrializada: Sistemas constructivcs empleados en Cuba.-- Ciudad de La Habana: Ed. Pueblo y Educación1988.-- 103 p.
3. CUBA. MINISTERIO DE LA CONSTRUCCION. Las construcciones con paneles ligeros: Propuesta de desarrollo de la panelización.con bagazo.-- Ciudad de La Habana: Centro Tecnico de la Construccidn y los Materiales, 1987.-- 24 p.
4. CASTRO, J. y A. NAAMAN. Morterode cemento reforzado con fibras vegetales. Revista IMCYC 19 (122): 61-72, 1981.
5. NAGY, V. Informe final asesoría técnica extranjera.-- Ciudad de La Babana: Instituto de Investigaciones Forestales, 1986.-- 38 p.
6. NC 54-109-85. Materiales y productos de la construcción. Hormigón. Ensayo de -ccmpresiónen probetas cilíndricas. 4 p.

7. LOPEZ PLANAS, R. Notas de estadísticas y diseño experimental (Monografía)-- Ciudad de La Habana: Centro Nacional de Investigaciones Científicas, 1987.-- 24 p.
24 p.
8. VILA, VIRGINIA, OLGA HERRERA y R. LOPEZ PLANAS. Obtención de adhesivos para la colocación de guardas en cubiertas. Revista Técnica Gráfica 14 (4): 40-43, 1986.
9. SALAS, J. y G. GOMEZ. Hormigones con ceniza de cáscara de arroz. (R.H.A.). Influencia del curado y del agua de amasado.-- Madrid: Instituto E. Torroja, 1987.-- 32 p.
10. SUAREZ, S. e I. ORTEGA. Viviendas de bajo costo sistema SALVY. Caracas: (s.n.) 1982.-- 12 p.