

Validación del modelamiento de la respuesta mecánica del cemento puzolanico

1. [Validación](#)
2. [Evolución de la resistencia a la compresión durante los días de curado](#)
3. [Análisis estadístico](#)
4. [Conclusiones y recomendaciones](#)
5. [Bibliografía](#)

1.2 VALIDACION

MODELAMIENTO DE LA RESPUESTA MECANICA

Para la modelación del comportamiento se hizo uso de un algoritmo desarrollado en MATLAB que grafica el comportamiento del cemento sometido a una fuerza de compresión. Este algoritmo usa el Método de Newton Raphson para converger cuadráticamente al resultado más óptimo.

Para la modelación matemática usamos el Módulo de Elasticidad y el Esfuerzo de fluencia obtenidos experimentalmente para cada muestra. Con estos datos se pudo ajustar las curvas del programa a las curvas obtenidas experimentalmente.

El programa desarrollado en MATLAB nos permite por medio del ingreso de los valores de Esfuerzo de Fluencia (σ_y) y Módulo de Elasticidad graficar idealmente el comportamiento del cemento sometido a compresión.

Para este estudio los valores de Esfuerzo de Fluencia y Módulo de Elasticidad de cada muestra obtenida para el 10 y 12,5% fueron ingresados al programa para poder establecer a través del Error relativo si el Modelo matemático es una buena representación de lo que ocurre experimentalmente.

Para trabajar en el modelo matemático se requirió especificar varios puntos de importancia:

- A cada valor de esfuerzo le corresponde un valor de Módulo de Elasticidad.
- La carga a la cual se fractura la muestra indica que con dicha carga se encuentra el valor del esfuerzo de ruptura
- Por último, el módulo de elasticidad requerido en el algoritmo será el promedio de los módulos correspondientes a los puntos que se consideren que pertenecen a la Región elástica.

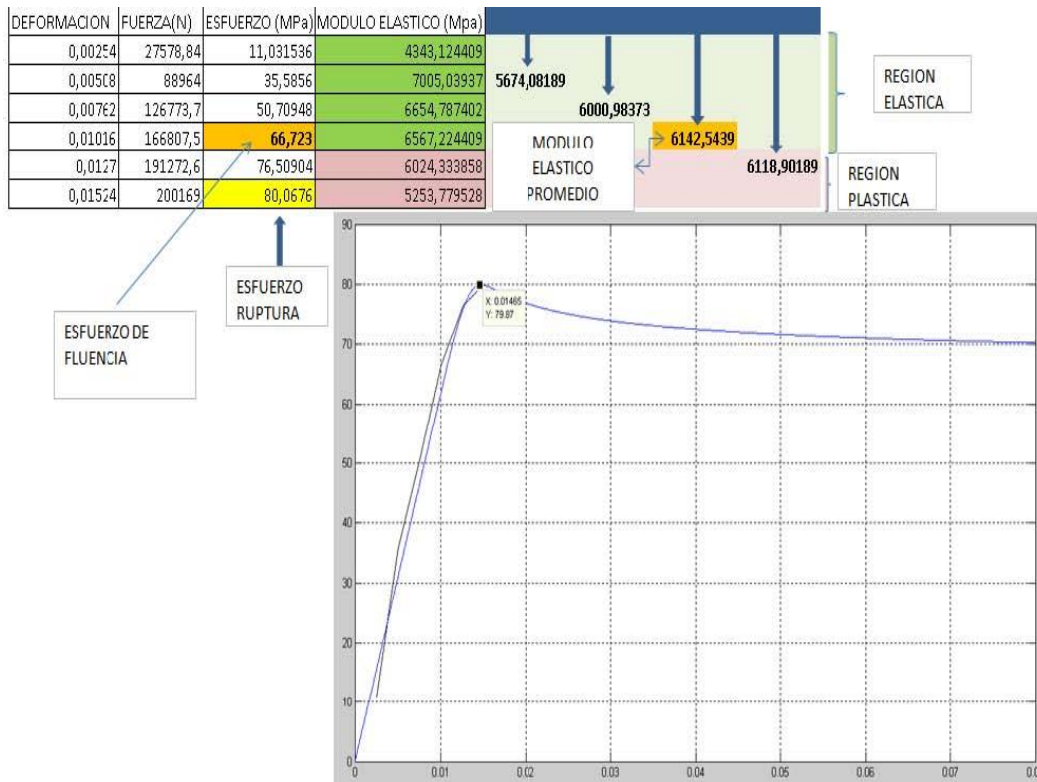
Con estos puntos claramente especificados, se requiere los valores del módulo de elasticidad y del esfuerzo de fluencia experimentales para ingresarlos en el algoritmo y así obtener una curva esfuerzo vs deformación del modelo matemático.

De los datos obtenidos solo se puede indicar con seguridad cual es el esfuerzo de ruptura, para aproximar el esfuerzo de fluencia se hizo uso del algoritmo desarrollado en MATLAB y se graficó las curvas esfuerzo vs deformación tanto del modelo matemático como de los datos experimentales, de esta forma se pudo comparar y acercar estas curvas lo más posible, es decir, limitar la zona elástica del modelo. El procedimiento fue el siguiente:

Para poder disminuir la distancia presente entre la curva del modelo y la experimental se observa que en la tabla de datos se posee el esfuerzo de máximo que resistió la muestra, y por tanto un correspondiente valor de Módulo de Elasticidad; basado en el criterio de que el Módulo de Elasticidad es la pendiente de la curva en la gráfica Esfuerzo vs Deformación, se consideró que si el valor del módulo aumenta por ende lo haría la pendiente de dicha curva.

De tal forma que se comparó el valor de módulo de elasticidad correspondiente al esfuerzo de ruptura con el promedio de los valores de módulo de elasticidad correspondientes a los esfuerzos anteriores al de ruptura, con el fin de obtener el valor más alto resultante de los promedios de dichos valores ; una vez determinado cual es el mayor promedio , el último valor correspondiente a la lista de valores usados para obtener el promedio se lo define como ESFUERZO DE FLUENCIA y a partir de dicho valor , aquellos que estén debajo de él hasta llegar al esfuerzo de ruptura pertenecerán a la región PLASTICA.

A continuación se muestra una figura descriptiva de este procedimiento tomando como ejemplo la muestra 1 con 12,5% de Zeolita a los 25 días de curado.



Este procedimiento se lo repite tantas veces sea necesario hasta obtener el mayor promedio para cada muestra, esto es tan solo una aproximación para poder determinar el esfuerzo de fluencia.

Otros valores muy importantes que se debió aproximar en nuestro modelo matemático son los valores de "m" y "a". Estos valores capturan el esfuerzo óptimo en el modelo. De los cálculos desarrollados por el algoritmo, se desprende una ecuación que nos permitirá saber aproximadamente el valor de "a". La ecuación establece que el esfuerzo de ruptura es aproximadamente igual al producto del esfuerzo de fluencia más uno:

$$F'c = \text{Esfuerzo de fluencia}(1+a)$$

Dado que conocemos el esfuerzo de ruptura experimental y el esfuerzo de fluencia podemos calcular el valor de "a", dicho valor nos servirá para acercar el esfuerzo de ruptura del modelo matemático al esfuerzo de ruptura obtenido experimentalmente.

Después de haber realizado estos procedimientos, se calcula el error relativo con la siguiente fórmula:

$$\text{Error relativo} = \frac{(\sigma_{\text{Programa}} - \sigma_{\text{Maquina}})}{\sigma_{\text{Máquina}}} \times 100$$

Estos datos se calculan para cada valor de deformación experimental, de este modo se puede calcular el error relativo promedio por gráfica. Con este valor del error promedio se pudo establecer que las consideraciones antes expuestas tienen un tanto por ciento de validez.

A continuación se muestra la tabla en la que se muestran los errores obtenidos en el proceso de modelamiento matemático.

TABLA 5. ERRORES RELATIVOS Y CAPACIDAD DE PREDICCION DEL

ALGORITMO

PORCENTAJE	DIA CURADO	ERROR RELATIVO PROMEDIO POR DIA(%)	ERROR RELATIVO PROMEDIO POR PORCENTAJE(%)
10%	7	24,06	35,99
	14	29,66	
	21	44,18	
	25	46,07	
12,5%	4	32,08	51,38
	11	120,77	
	18	40,20	
	25	12,48	
15%	7	41,15	29,00
	14	19,15	
	21	35,78	
	25	19,92	
17,50%	4	62,65	26,90
	11	9,48	
	18	12,82	
	25	22,66	
		ERROR RELATIVO GENERAL	35,82
		CAPACIDAD DE PREDICCION	64,18

Lo cual muestra que la capacidad de predicción del algoritmo desarrollado es del 61.17%, cabe resaltar que este algoritmo no considera los múltiples factores que pueden afectar la resistencia de las muestras , tales como, temperatura, humedad, mal apisonamiento, entre otros; además , muestra que las consideraciones que se hicieron antes de ingresar los datos son hasta cierto punto válidas.

EVOLUCION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DURANTE LOS DIAS DE CURADO.

En esta sección se muestra la tendencia que presentó la resistencia a la compresión de las muestras durante los días de curado; cabe mencionar que para poder describir dichas tendencias se hizo uso del programa MATLAB y de la herramienta POLYFIT la cual permitió expresar los resultados obtenidos para cada porcentaje en términos de un polinomio de 2do grado.

PORCENTAJE	DÍAS DE CURADO	ESFUERZO (Mpa)M1	ESFUERZO (Mpa)M2	ESFUERZO (Mpa)M3	ESFUERZO PROMEDIO (Mpa)
10%	7	66,72	65,7	58,83	63,75
	14	57,82	64,94	64,05	62,27
	21	66,72	66,72	62,27	65,24
	28	64,05	57,82	62,27	61,38



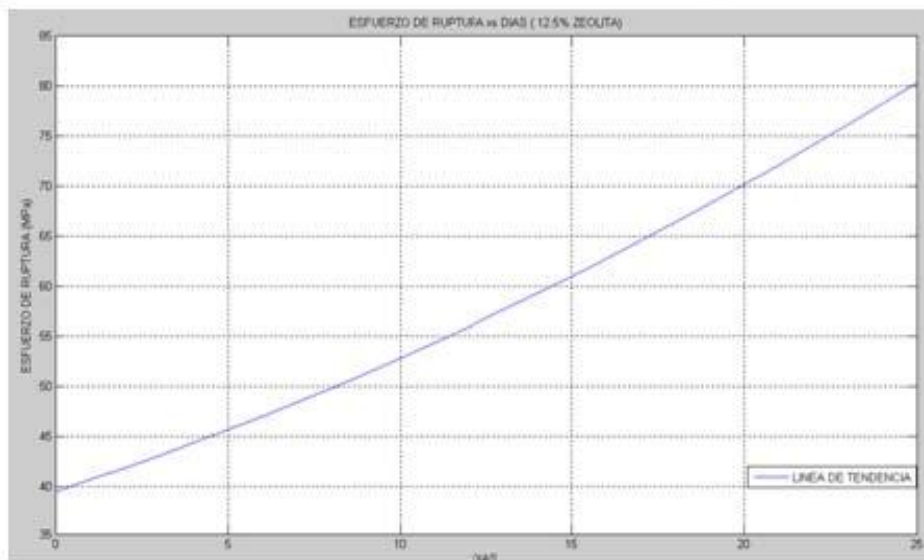
La relación entre el esfuerzo de ruptura y los días de curado es:

$$\text{ESFUERZO} = -0.0121(\text{DIAS})^2 + 0.3652 \cdot \text{DIAS} + 61.2242$$

Como se puede observar la mezcla del 10% incrementa su resistencia hasta su máximo valor aproximadamente a los 15 días, sin embargo, pasado los 15 días la resistencia a la compresión decrece aceleradamente.

Para el 12,5% se tuvo la siguiente tendencia: La relación entre el esfuerzo de ruptura y los días de curado es:

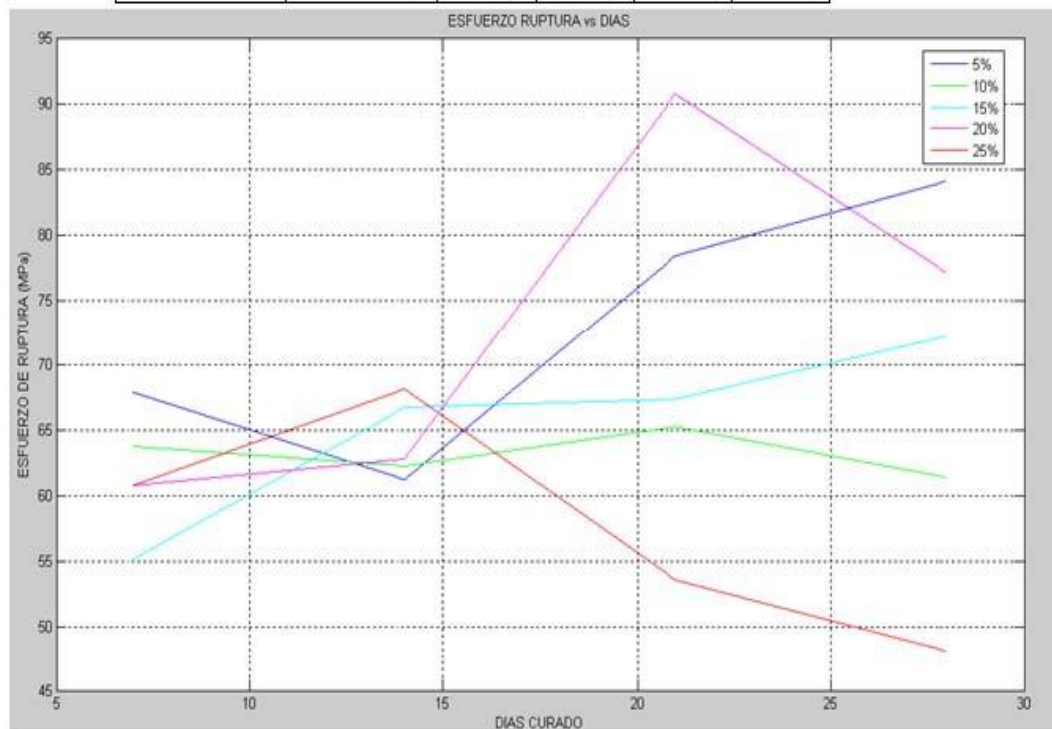
PORCENTAJE	DÍAS DE CURADO	ESFUERZO (Mpa)M1	ESFUERZO (Mpa)M2	ESFUERZO (Mpa)M3	ESFUERZO PROMEDIO (Mpa)
12,5%	4	39,22	36,28	60,8	45,43
	11	24,02	66,72	62,27	51,00
	18	57,82	75,61	75,61	69,68
	25	80,06	77,39	80,06	79,17



$$\text{ESFUERZO} = + 0.02 * (\text{DIAS})^2 + 1.1327 * \text{DIAS} + 39.4680$$

En contraste, la muestra de 12,5% presentó una tendencia creciente durante todos los días de curado. A continuación se muestran las gráficas ESFUERZO vs. DIAS para todos los porcentajes de Zeolita.

PORCENTAJE	5%	10%	15%	20%	25%
7	67,81	63,75	55,13	60,76	60,71
14	61,17	62,27	66,72	62,72	68,12
21	78,4	65,24	67,31	90,74	53,58
28	84,04	61,38	72,13	77,1	48,1



Como se observa, al enfocar los picos de las curvas, la mayor resistencia a la compresión se obtiene a los 21 días de curado para la mezcla con 20% de Zeolita, es decir 90,74 MPa, posteriormente a los 28 días donde disminuye severamente, en contraste, la mezcla con 5% muestra una resistencia de 84 MPa al día 28.

ANALISIS ESTADISTICO.

Para el siguiente análisis se hizo uso de la herramienta estadística MINITAB, los objetivos a cumplir son los siguientes:

1. Obtener una expresión matemática que permita obtener el esfuerzo máximo de compresión mediante el ingreso de los días de curado y el porcentaje de Zeolita.
1. Determinar el mejor tratamiento, es decir, con cuál porcentaje de Zeolita y a lo cuántos días de curado se obtiene la mayor resistencia a la compresión en comparación con un cemento que no posee adición alguna de este material.
1. Determinar de igual forma cuál de estos tratamientos presenta la mayor resistencia a la compresión en comparación a al cemento TIPO

IV.

Para comenzar con el análisis en primer lugar se establecieron las siguientes hipótesis, teniendo

en cuenta que se espera obtener una ecuación de la forma:

$$\text{ESFUERZO DE RUPTURA} = \pm B_1 \pm B_2 \cdot \text{DIASCURADO} \pm B_3 \cdot \% \text{ZEOLITA}$$

Por lo tanto;

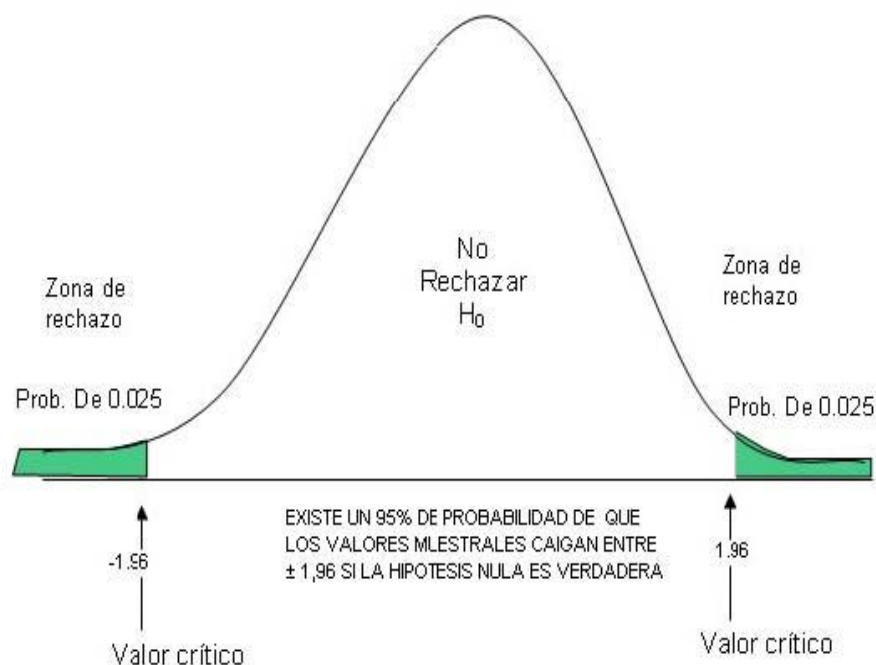
H₀: B_j = 0

H₁: Algún B_j ≠ 0

Donde **H₀** es la hipótesis nula, en la cual se expresa que todos los coeficientes de la ecuación son iguales a cero, es decir, no existe relación entre las variables independientes; **H₁** es la hipótesis alterna, en la cual se expresa que al menos existe algún coeficiente diferente de cero, por tanto que existe una relación entre las variables.

Para poder rechazar **H₀** se debe observar los marcadores estadísticos **P** y **F**, donde **P** es la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el valor observado, como resultado **H₀** se acepta; **F** es la variable de FISHER la cual se emplea para probar si dos muestras provienen de poblaciones que poseen varianzas iguales. Esta prueba es útil para determinar si una población normal tiene una mayor variación que la otra y también se aplica cuando se trata de comparar simultáneamente varias

medias poblacionales, en ambas situaciones las poblaciones deben ser normales. Los criterios para rechazar **H₀** son: **P < α=0.05** o **F > F_α (DF REGRESSION, DF RE)**



El primer paso a seguir es determinar la normalidad de los datos obtenidos, para así, garantizar que los datos son aleatorios e insecuados.

Se presenta la tabla de los datos obtenidos en la experimentación:

TABLA 6. DATOS PARA EL ANALISIS.

Ruptura(Mpa)	Díasdecurado	%zeolita
67,81	7	5
61,17	14	5
78,4	21	5
84,04	28	5
63,75	7	10
62,27	14	10
65,24	21	10

61,38	28	10
55,13	7	15
66,72	14	15
67,31	21	15
72,13	28	15
60,76	7	20
62,72	14	20
90,74	21	20
77,1	28	20
60,71	7	25
68,12	14	25
53,58	21	25
48,1	28	25

Se procedió a realizar la regresión múltiple por medio de MINITAB, teniendo en cuenta que la variable dependiente es **Ruptura** y las independientes **Días de curado** y **%Zeolita**, cuyo resultado fue:

Regression Analysis: ruptura versus dias; %zeolita

The regression equation is

ruptura = 65,7 + 0,394 dias - 0,416 %zeolita

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	65,693	7,072	9,29	0,000
dias	0,3944	0,2789	1,41	0,175
%zeolita	-0,4157	0,3086	-1,35	0,196

S = 9,75991 R-Sq = 18,3% R-Sq(adj) = 8,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	363,32	181,66	1,91	0,179
Residual Error	17	1619,35	95,26		
Total	19	1982,66			

Se tiene que la expresión matemática que relaciona las variables es:

$$\text{ESFUERZO} = 64.7 + 0.394 \cdot \text{DIAS} - 0.416 \cdot \text{\%ZEOLITA}$$

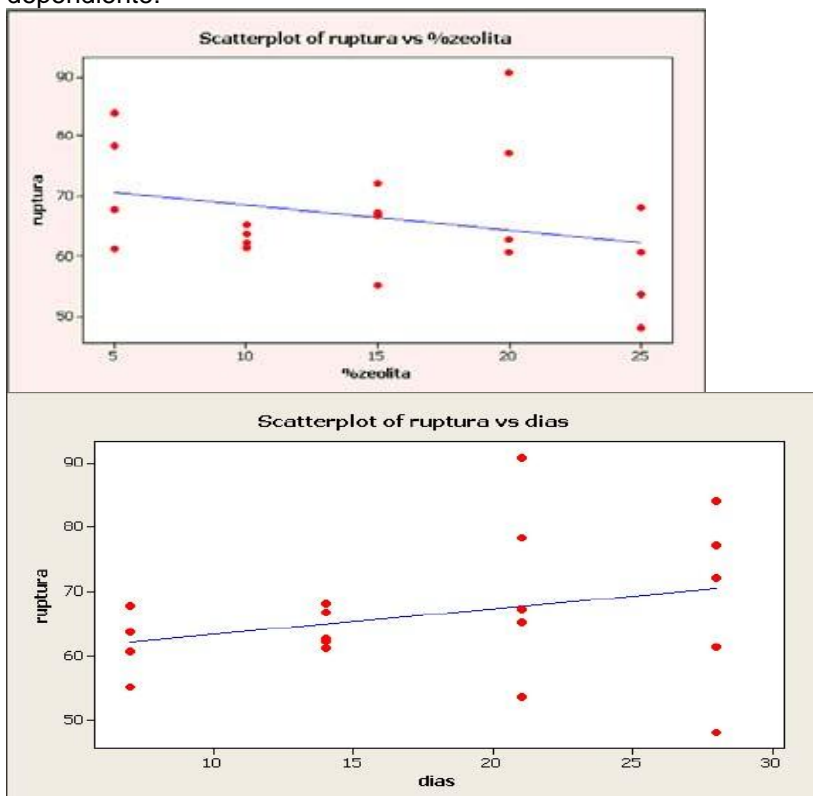
En donde se observa por medio de los valores de P que la probabilidad para que los días de curado tengan una influencia en el esfuerzo de compresión del cemento es de 0.176 y para el porcentaje de zeolita es de 0.196; según el criterio de rechazo ninguno es menor a 0.05, por lo tanto la hipótesis nula no puede ser rechazada.

Otra observación muy importante la brindan el R-SQ, que indica el porcentaje en que ésta regresión a los datos experimentales, valor que fue del 18.3% y los valores generales de F=1.91 y P=0.179 aplicando los criterios de rechazo se tiene:

Para $P = 0.179 > 0.05$, por lo tanto no se rechaza H_0 ; por otro lado, $F = 1.91$ valor que debe ser mayor al valor que expresa la tabla de FISHER para los grados de libertad que son (2,17), el

programa los expresa como DF(degrees of freedom), de la tabla $F(2,17)=19.44$; por lo tanto $1.91 < 19.44$; H_0 no puede ser rechazada.

A continuación se muestra la tendencia que se tuvo entre las variables independientes y la variable dependiente:



Debido a que la expresión no pudo responder a más del 18.3% debido a la variación entre experimentales y los obtenidos por la ecuación de regresión, como se presenta en la siguiente tabla:

TABLA 8. DIFERENCIA ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y OTENIDOS POR REGRESION.

Ruptura(Mpa)	Díasdecurado	%zeolita	REGRESION	RESIDUAL
67,81	7	5	66,378	1,43
61,17	14	5	69,136	-7,97
78,4	21	5	71,894	6,51
84,04	28	5	74,652	9,39
63,75	7	10	64,298	-0,55
62,27	14	10	67,056	-4,79
65,24	21	10	69,814	-4,58
61,38	28	10	72,572	-11,19
55,13	7	15	62,218	-7,08
66,72	14	15	64,976	1,74
67,31	21	15	67,734	-0,42
72,13	28	15	70,492	1,64
60,76	7	20	60,138	0,62
62,72	14	20	62,896	-0,18
90,74	21	20	65,654	25,09
77,1	28	20	68,412	8,69
60,71	7	25	58,058	2,65
68,12	14	25	60,816	7,30
53,58	21	25	63,574	-9,99

48,1	28	25	66,332	-18,23
------	----	----	--------	--------

Con el fin de obtener una expresión que responda mejor a los datos, se procedió a separar por grupos de días de curado, de tal manera que para cada grupo se obtenga una correspondiente ecuación.

TABLA 9 GRUPO DE DATOS PARA LOS 7 DIAS

DIAS	Ruptura(Mpa)	PORCENTAJE
7	67,81	5
	63,75	10
	55,13	15
	60,76	20
	60,71	25

Se muestra el modelo de regresión múltiple para este conjunto de datos:

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is
 ruptura = 66,8 - 0,344 %zeolita

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	66,790	4,570	14,62	0,001
%zeolita	-0,3438	0,2756	-1,25	0,301

S = 4,35688 R-Sq = 34,2% R-Sq(adj) = 12,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	29,55	29,55	1,56	0,301
Residual Error	3	56,95	18,98		
Total	4	86,50			

Para estos datos se observa que la ecuación es:

$$\text{ESFUERZO} = 65.8 - 0.344 \cdot \% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 10. RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 7 DIAS

TABLADERESULTADOS

PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,301	NOCUMPLE	
F	1,56	F>F(DFR,DFRS)	NOSERECHAZA
DF	1;3	NOCUMPLE	NOSERECHAZA
F(1,3)	215,71		
R-SQ	34,20%		

Se observa que la ecuación de regresión múltiple responde en un 31.20% de los valores y que la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial cúbica obteniéndose lo siguiente:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 79,49 - 2,693 \% \text{zeolita} + 0,0972 \% \text{zeolita}^2 - 0,000747 \% \text{zeolita}^3$$

S = 4,62793 R-Sq = 75,2% R-Sq(adj) = 1,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	65,0791	21,6930	1,01	0,606
Error	1	21,4177	21,4177		
Total	4	86,4967			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	29,5496	1,56	0,301
Quadratic	1	35,4040	3,29	0,212
Cubic	1	0,1254	0,01	0,951

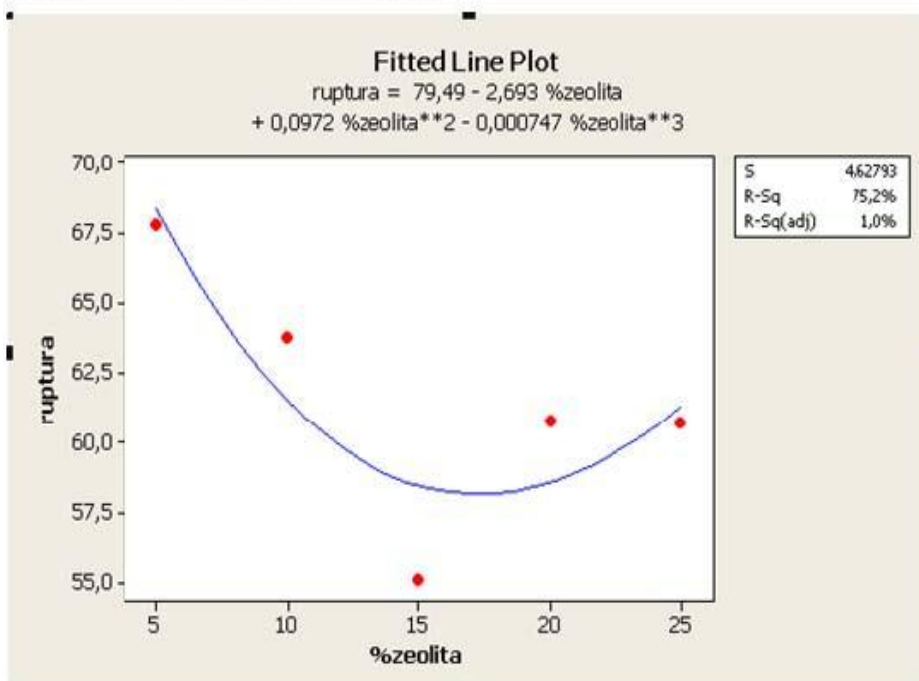


TABLA 11. RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA CUBICA PARA LOS 7 DIAS.

TABLA DE RESULTADOS

PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,951	NOCUMPLE	
F	0,01	F>F(DFR,DFRS)	NOSERECHAZA
DF	3;1		
F(1,3)	10,128	NOCUMPLE	NOSERECHAZA
R-SQ	75,20%		

De donde se observa que el polinomio obtenido responde en un 74.2% de los datos.

Para los 14 días de curado se tiene:

TABLA 11. GRUPO DE DATOS PARA LOS 14 DIAS

DIAS	Ruptura(Mpa)	PORCENTAJE
14	61,17	5
	62,27	10
	66,72	15
	62,72	20
	68,12	25

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 59,9 + 0,287 \% \text{zeolita}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	59,894	2,438	24,57	0,000
%zeolita	0,2870	0,1470	1,95	0,146

$$S = 2,32407 \quad R\text{-}Sq = 56,0\% \quad R\text{-}Sq(\text{adj}) = 41,3\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	20,592	20,592	3,81	0,146
Residual Error	3	16,204	5,401		
Total	4	36,796			

Para estos datos se observa que la ecuación es:

$$\text{ESFUERZO} = 59.9 - 0.287 * \% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 11. RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 14 DIAS.

TABLADERESULTADOS

PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,146	NOCUMPLE	
F	3,81	F>F(DFR,DFRS)	NOSERECHAZA
DF	1;3		
F(1,3)	215,71	NOCUMPLE	NOSERECHAZA
R-SQ	56,00%		

Se observa que la ecuación de regresión múltiple responde en un 56% de los valores y que la resistencia a la compresión aumenta al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial Cúbica obteniéndose lo siguiente:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 51,50 + 2,653 \% \text{zeolita} - 0,1811 \% \text{zeolita}^2 + 0,004033 \% \text{zeolita}^3$$

S = 3,54146 R-Sq = 65,9% R-Sq(adj) = 0,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	24,2543	8,0848	0,64	0,699
Error	1	12,5420	12,5420		
Total	4	36,7962			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	20,5923	3,81	0,146
Quadratic	1	0,0018	0,00	0,990
Cubic	1	3,6602	0,29	0,685

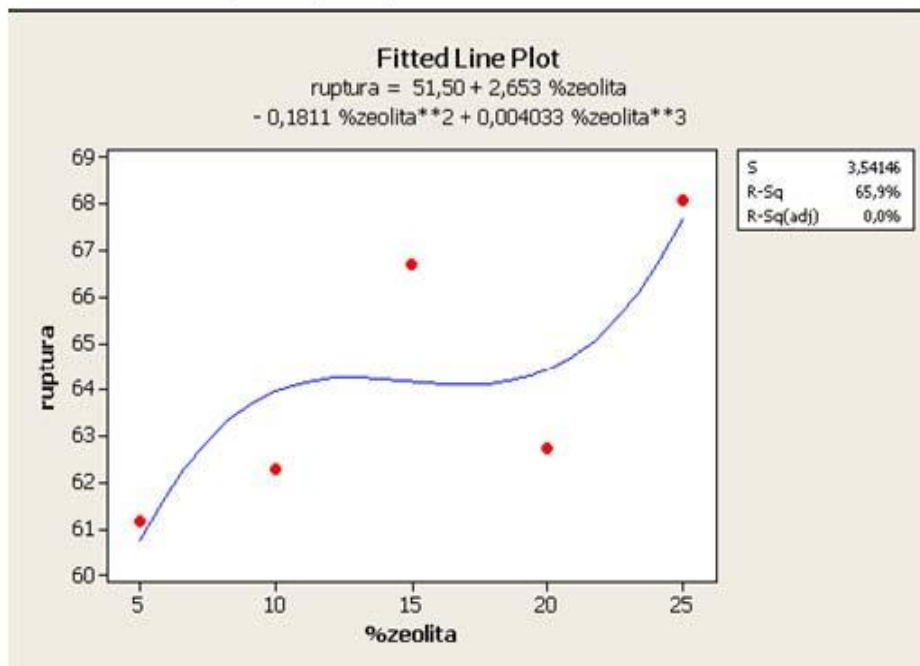


TABLA 11. RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA CUBICA PARA LOS 14 DIAS.

TABLADEROS RESULTADOS

PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,685	NOCUMPLE	
F	0,29	F>F(DFR,DFRS)	NOSERECHAZA
DF	3;1		
F(1,3)	10,128	NOCUMPLE	NOSERECHAZA
R-SQ	65,90%		

De donde se observa que el polinomio obtenido responde en un 64.9% de los datos. Para los 21

días de curado se tiene: TABLA 14. GRUPO DE DATOS PARA LOS 21 DIAS.

DIAS	Ruptura(Mpa)	PORCENTAJE
21	78,4	5
	65,24	10
	67,31	15
	90,74	20
	53,58	25

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is
 ruptura = 78,3 - 0,483 %zeolita

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	78,29	15,43	4,76	0,018
%zeolita	-0,4827	0,9909	-0,49	0,660

S = 15,6678 R-Sq = 7,3% R-Sq(adj) = 0,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	58,3	58,3	0,24	0,660
Residual Error	3	736,4	245,5		
Total	4	794,7			

FIGURA 1.15 REGRESION MULTIPLE PARA LOS 21 DIAS.

Para estos datos se observa que la ecuación es:

$$\text{ESFUERZO} = 78.3 - 0.483 \cdot \% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 15. RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 21 DIAS.

TABLADERE RESULTADOS

PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,66	NOCUMPLE	
F	0,24	F>F(DFR,DFRS)	NOSERECHAZA
DF	1;3		
F(1,3)	215,71	NOCUMPLE	NOSERECHAZA
R-SQ	7,30%		

Se observa que la ecuación responde en un 6.3% de los valores y que la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial cúbica obteniéndose lo siguiente:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 171,1 - 28,02 \% \text{zeolita} + 2,199 \% \text{zeolita}^2 - 0,05055 \% \text{zeolita}^3$$

S = 10,5260 R-Sq = 86,1% R-Sq(adj) = 44,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	683,906	227,969	2,05	0,464
Error	1	110,796	110,796		
Total	4	794,702			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	58,258	0,24	0,660
Quadratic	1	50,679	0,15	0,738
Cubic	1	574,968	5,19	0,263

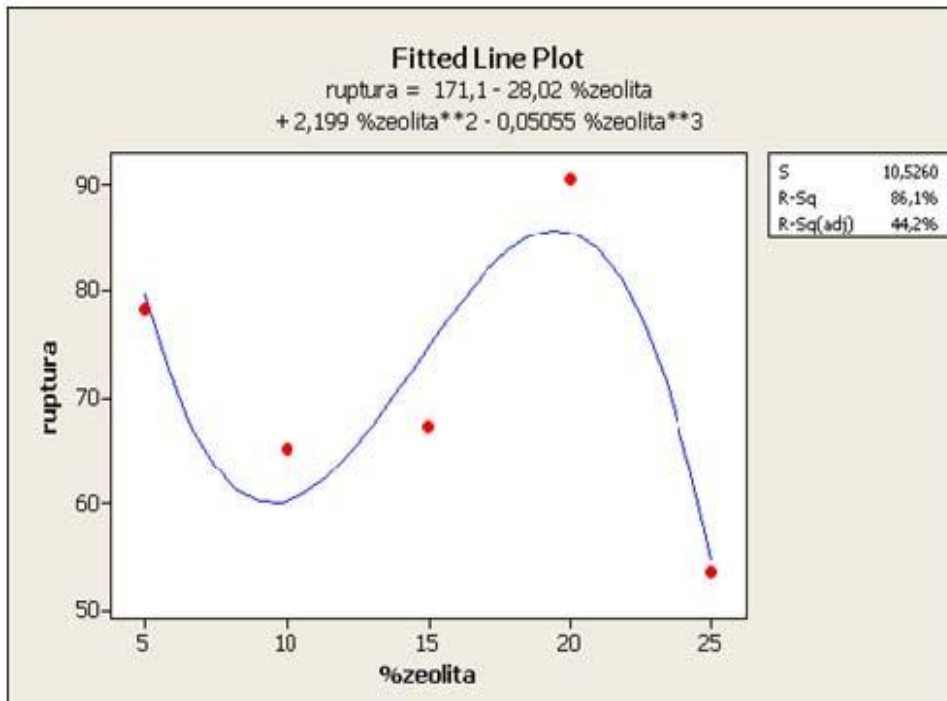


TABLA 16. RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA CUBICA PARA LOS 21 DIAS.

TABLA DE RESULTADOS

PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,263	NOCUMPLE	
F	5,19	F>F(DFR,DFRS)	NOSERECHAZA
DF	3;1		
F(1,3)	10,128	NOCUMPLE	NOSERECHAZA

R-SQ	86,10%
------	--------

De donde se observa que el polinomio obtenido responde en un 85.1% de los datos.

Para los 28 días de curado se tiene:

TABLA 18. GRUPO DE DATOS PARA LOS 28 DIAS.

DIAS	Ruptura(Mpa)	PORCENTAJE
28	84,04	5
	61,38	10
	72,13	15
	77,1	20
	48,1	25

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 85,4 - 1,12 \% \text{zeolita}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	85,40	13,27	6,44	0,008
%zeolita	-1,1232	0,8001	-1,40	0,255

$$S = 12,6501 \quad R\text{-Sq} = 39,6\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 19,5\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	315,4	315,4	1,97	0,255
Residual Error	3	480,1	160,0		
Total	4	795,5			

Para estos datos se observa que la ecuación es:

$$\text{ESFUERZO} = 84.4 - 1.12\% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la siguiente tabla

TABLA 19. RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 28 DIAS.

TABLA DE RESULTADOS

PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,255	NOCUMPLE	
F	1,97	F>F(DFR,DFRS)	NOSERECHAZA
DF	1;3		
F(1,3)	215,71	NOCUMPLE	NOSERECHAZA
R-SQ	39,60%		

Se observa que la ecuación responde en un 39.6% de los valores y que la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial Cúbica obteniéndose lo siguiente:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 170,5 - 26,04 \% \text{zeolita} + 1,969 \% \text{zeolita}^2 - 0,04492 \% \text{zeolita}^3$$

S = 1,31475 R-Sq = 99,8% R-Sq(adj) = 99,1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	793,742	264,581	153,06	0,059
Error	1	1,729	1,729		
Total	4	795,470			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	315,395	1,97	0,255
Quadratic	1	24,341	0,11	0,775
Cubic	1	454,006	262,65	0,039

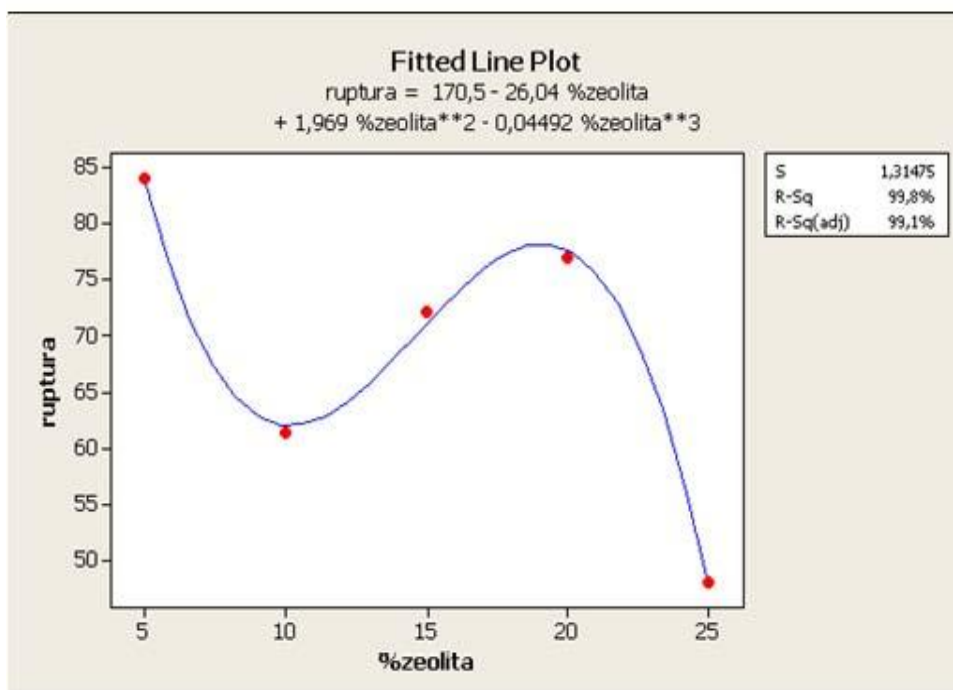


TABLA 20. RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA CUBICA PARA LOS 28 DIAS.

TABLADEROS RESULTADOS

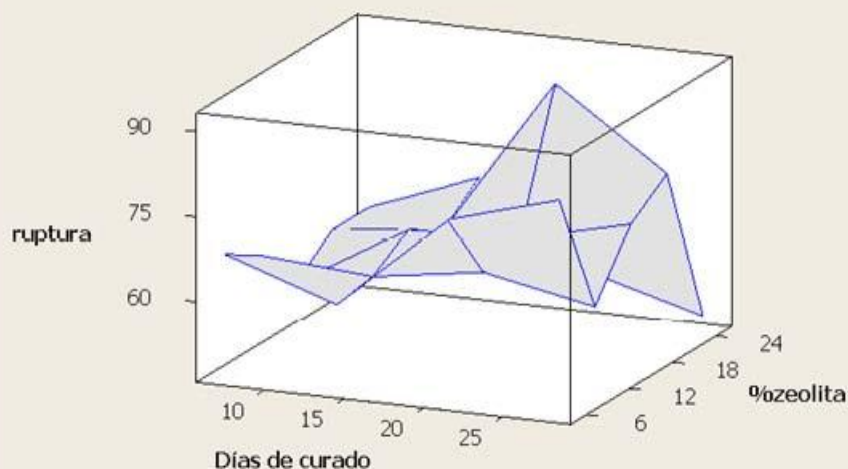
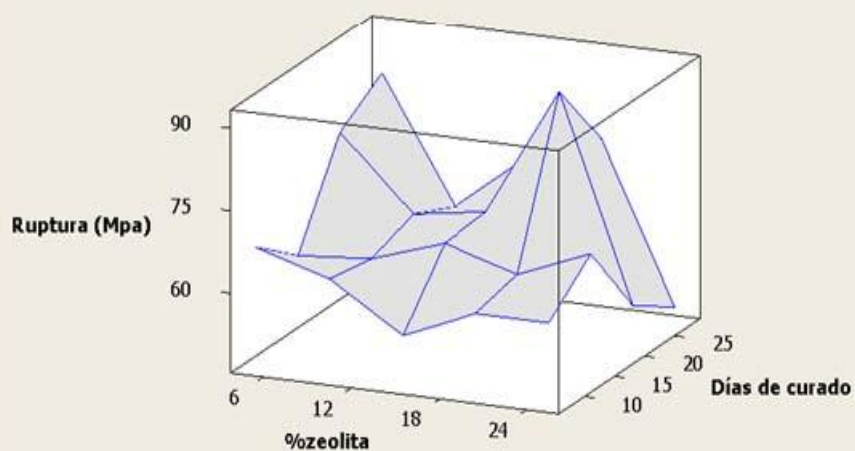
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,039	CUMPLE	SERECHAZA
F	262,65	F>F(DFR,DFRS)	
DF	3;1		

F(1,3)	10,128	CUMPLE	SERECHAZA
R-SQ	99,80%		

De donde se observa que el polinomio obtenido responde en un 99.8% de los datos y se cumplen los criterios para rechazar H_0 .

Con estos resultados previos se puede entender de mejor forma la superficie de respuesta en 3-D que presenta el modelo general de regresión múltiple general que se estableció al inicio.

Surface Plot of Ruptura (Mpa) vs Días de curado; %zeolita



Claramente se observa en la superficie de respuesta que la relación entre el esfuerzo de ruptura y el porcentaje de zeolita no presentó un aumento constante, de hecho, se observa en la superficie de respuesta inferior que para ciertos porcentajes de zeolita se dio un aumento en la resistencia a la compresión hasta un aproximado del 15%, de ahí en adelante la resistencia a la compresión disminuyó.

Por otra parte la relación entre el esfuerzo de ruptura y los días de curado fue ascendente, a mayor cantidad de días de curado se obtendrá una mejor resistencia a la compresión; sin embargo, hay que tener en consideración que tanto el porcentaje de zeolita como los días de curado se restringen uno a otro, por lo tanto se debe tener en cuenta la combinación de estos factores, además del error que pueda ser producido ya sea por variación de temperatura, preparación de muestras, toma de datos o incluso la máquina de ensayos.

A continuación se muestra una tabla con los valores de resistencia a la compresión para el cemento TIPO IV, TIPO I, 5%, 10%, 15%, 20% y 25%; para establecer las diferencias respectivas.

TABLA 21. PORCENTAJE DE VARIACION RESPECTO CEMENTO TIPO I

PORCENTAJE	TIPO IV	0%	5%	10%	15%	20%	25%	%variación
7	47,76	77,81	67,81	63,75	55,13	60,76	60,71	14,75
14	49,96	84,37	61,17	62,27	66,72	62,72	68,12	23,85
21	42,73	64,60	78,4	65,24	67,31	90,74	53,58	-28,81
28	16,30	74,11	84,04	61,38	72,13	77,1	48,1	-11,82
								-3,88

Los valores señalados en color amarillo son los correspondientes al cemento TIPO I, aquellos resaltados en color rosa son los valores de ruptura más altos para cada día de curado para cada porcentaje.

A los 7 días de curado se obtuvieron 76.81 MPa y 66.81 MPa, por tanto el valor correspondiente al cemento TIPO I fue mayor en un 11.75%; a los 14 días de curado se tuvo que el cemento TIPO I fue mayor en un 21.85% al mayor valor de resistencia obtenido entre los cinco porcentajes a comparar; para los 21 días de curado el valor obtenido en la mezcla de 20% fue mayor en un 28.81% y finalmente a los 28 días se tuvieron dos valores de resistencia a la compresión correspondientes al 5% y 20% respectivamente, estos valores se muestran ya que si se escoge la mezcla al 5% se tiene que es mayor en un 11.82% sin embargo desde el punto de vista empresarial no involucra un mayor ahorro debido a la poca cantidad de zeolita, en contraste la mezcla con 20% de zeolita fue mayor en un 1.88% al final del proceso de curado y representaría un ahorro de un 20% menos de cemento.

En conclusión comparando con el cemento TIPO I el mejor tratamiento es la mezcla con 20% de zeolita.

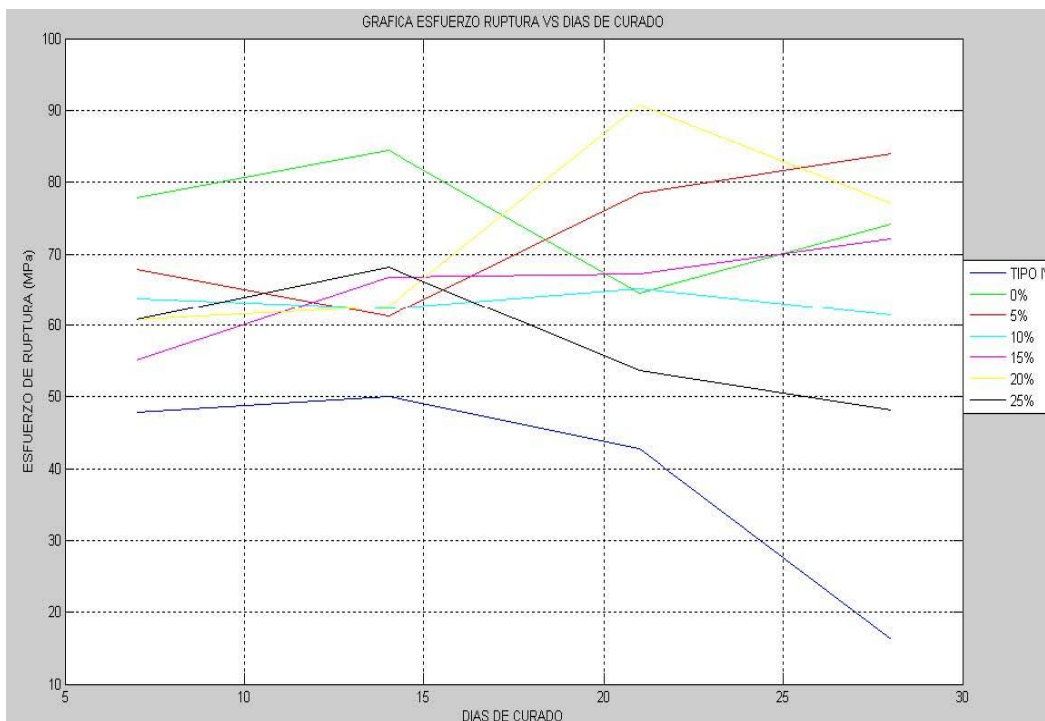
A continuación se muestra el porcentaje de variación respecto al cemento TIPO IV en la siguiente tabla:

TABLA 21. PORCENTAJE DE VARIACION RESPECTO CEMENTO TIPO IV

PORCENTAJE	TIPO IV	0%	5%	10%	15%	20%	25%	%variación
7	47,76	77,81	67,81	63,75	55,13	60,76	60,71	-29,57
14	49,96	84,37	61,17	62,27	66,72	62,72	68,12	-26,66
21	42,73	64,60	78,4	65,24	67,31	90,74	53,58	-52,91
28	16,30	74,11	84,04	61,38	72,13	77,1	48,1	-80,60
								-78,86

A los 7 días de curado se tuvo que la resistencia a la compresión de la mezcla con 5% fue mayor en un 29.57% respecto al TIPO IV; a los 14 días la mezcla con 25% fue mayor en un 25.66%, de igual forma a los 21 y 28 días de curado, sin embargo, cabe resaltar que en el mismo caso anterior del cemento TIPO I al observar de un punto de vista económico se llega a la conclusión que a los 28 días con la mezcla de 20% de zeolita se obtuvo la mejor resistencia a la compresión.

Se muestra la gráfica Esfuerzo vs Días de curado para todos los porcentajes:



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

• De los errores promedios obtenidos entre los datos experimentales y el modelo matemático de la mezcla al 10 y 12,5% de Zeolita obtuve un error promedio del 36 y 51.38% respectivamente. Estos valores me indican que el Modelo matemático posee en promedio un 41.7% de error con respecto a los datos experimentales. Lo que quiere decir que el modelo matemático captura en un 55.3% los datos experimentales.

• Al comparar los datos de ruptura obtenidos los días 7 ,14 ,21 y 28 para el 10% de Zeolita y el Testigo(0% Zeolita), pude notar que existe un único incremento el día 21 del ensayo como lo muestra la tabla. Esto indica que la adición de 10% de Zeolita a la mezcla de cemento no produce un aumento favorable de la Resistencia a la compresión los otros días de curado. Manteniéndose entre los datos obtenidos una diferencia promedio del 11.38 MPa.

• Para el análisis general por medio de regresión múltiple, debido a la gran variación entre valores la mejor aproximación fue analizar por grupos tomando constante los días , de tal manera por medio de una regresión polinómica cúbica se obtuvieron ecuaciones para cada grupo de días, las cuales responden en un 74.20% para los 7 días, 64.90% para los 14 días, 85.10% para los 21 días y en un 99.8% para los 28 días, teniendo muy en cuenta que solo a los 28 días se encontró una relación entre variables independientes que permitió rechazar H_0 .

• La relación entre la resistencia a la compresión y los días de curado fue ascendente , mientras que respecto al porcentaje de zeolita presente en la mezcla mostró que hasta el 15% aproximadamente presentó un incremento en la resistencia a la compresión , por tanto del hecho que la zeolita posea menor calor de hidratación no

necesariamente a mayor cantidad de zeolita existirá una mayor resistencia a la compresión, referido a un curado al aire.

• En general el mejor tratamiento en comparación con el cemento TIPO I y TIPO IV fue la mezcla con un 20% de Zeolita.

TABLA 21. DATOS TIPO I VS 10%

Ruptura	0%	10%
---------	----	-----

7	77,81	63,75
14	84,36	62,27
21	64,59	65,24
28	74,1	61,38

4.2 RECOMENDACIONES

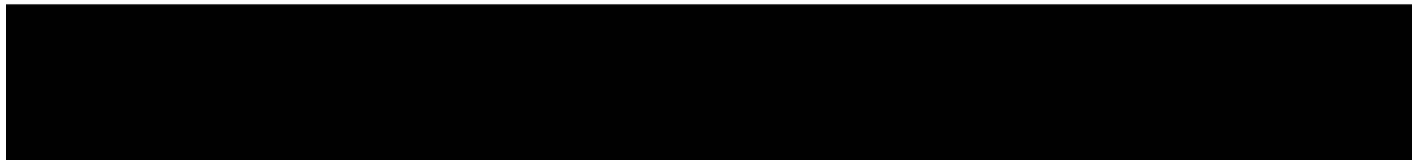
- . • La mayoría de los errores en este proyecto de investigación fue el proceso de adquisición de datos, debido a que en algunas ocasiones mientras se realizaban los ensayos de compresión se cambió de una máquina que aplicaba una velocidad de carga constante a una velocidad de carga variable; dando así valores aberrantes.
- . • Tener especial cuidado en el apisonamiento de los especímenes de prueba, ya que un mal apisonamiento llevará a la permanencia de aire dentro del cubo las cuales debilitarán su estructura y por ende su resistencia a la compresión.
- . • Tener cuidado con la variación de temperatura y humedad relativa, pues afectarán directamente al proceso de curado y con esto al posible deterioro de la resistencia a la compresión.
- . • En el momento de colocar los bloques ya desmoldados, hacerlo en un recipiente que permita que todas las caras del cubo se sequen de forma uniforme, caso contrario se tendrán caras húmedas y eso puede producir fallas en el ensayo.
- . • En la toma de datos ser muy cauteloso en la lectura, ya que en este experimento la toma de datos fue al criterio de quién marcaba en el dial de la máquina, y eso acarrea errores en las mediciones, conveniente sería realizar los ensayos en una máquina con display digital.
- . • Una vez que se realiza el desmolde, tomar en cuenta la hora a la que es realizado, pues a esa misma hora deberá ser realizado el ensayo el correspondiente día de curado.

ANEXOS.

La fuerza de compresión obtenida de los ensayos se la convirtió en Newton para trabajar este estudio con el Sistema Internacional de unidades. A lo largo de las pruebas se trabajó con una temperatura promedio de 23 °C y una humedad relativa de 70 cumpliendo de esta el requerimiento de Temperatura y Humedad relativa especificado por la norma ASTM C109. La longitud de arista del cubo de 5 cm, lo que quiere decir que el área de cada cara del cubo es 2500 mm².

TABLA 24
la cemento y 10% de Zeolita día 7

σ Experimental(MPa)			Modulo de Elasticidad	
M1	M2	M3	M1	M2
5,16	2,16	2,16	20341,47	849,96
22,06	5,10	6,86	4343,15	1003,83
34,52	10,40	12,16	4539,55	1364,14
49,11	16,48	16,87	4539,55	1661,53
67,53	23,14	23,14	4539,55	1899,44
87,88	30,30	30,30	4539,55	1989,66
107,17	40,17	41,16	---	2070,03
127,17	48,05	49,09	---	2104,09
147,17	52,96	50,09	---	2108,82
167,17	58,4	50,09	---	2108,94
187,17	64,7	---	---	2109,14
207,17	70	---	---	2109,54



Esfuerzo de ruptura promedio	62,78 MPa
Error relativo M1	26,75 %
Error relativo M2	27,93 %
Error relativo M3	19,72 %
Error relativo promedio	24,80 %

TABLA 25
la cemento y 10% de Zeolita día 14

σ Experimental(MPa)			Modulo de Elasticidad	
M1	M2	M3	M1	M2
5,16	2,16	2,16	20341,47	849,96
22,06	5,10	6,86	4343,15	1003,83
34,52	10,40	12,16	4539,55	1364,14
49,11	16,48	16,87	4539,55	1661,53
67,53	23,14	23,14	4539,55	1899,44
87,88	30,30	30,30	4539,55	1989,66
107,17	40,17	41,16	---	2070,03
127,17	48,05	49,09	---	2104,09
147,17	52,96	50,09	---	2108,82
167,17	58,4	50,09	---	2108,94
187,17	64,7	---	---	2109,14
207,17	70	---	---	2109,54



Esfuerzo de ruptura promedio	62,28 MPa
Error relativo M1	41,75 %
Error relativo M2	41,14 %
Error relativo M3	6,10 %

Error relativo promedio	29,66 %
-------------------------	---------

TABLA 26 Mezcla cemento y 10% de Zeolita día 21

MARCA(10^-3cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{Experimental}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad (MPa)		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,70	0,00254	3559	35586	26689	1,42	14,23	10,68	560,40	5604,03	5604,03
25,40	0,00508	40034	75175	60496	16,01	30,07	24,20	3152,27	5919,26	5919,26
38,10	0,00762	84516	124550	102309	33,81	49,82	40,92	4436,52	6538,04	6538,04
50,80	0,01016	122326	166808	144567	48,93	66,72	57,83	4815,96	6567,22	6567,22
63,50	0,0127	166808	-	155687	66,72	-	62,27	5253,78	-	4903,78
Esfuerzo de ruptura promedio		65,24 MPa								
Error relativo M1		116,20 %								
Error relativo M2		7,30 %								
Error relativo M3		9,04 %								
Error relativo promedio		44,18 %								

MARCA(10^-3cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{Experimental}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad (MPa)		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,70	0,00254	3559	35586	26689	1,42	14,23	10,68	560,40	5604,03	5604,03
25,40	0,00508	40034	75175	60496	16,01	30,07	24,20	3152,27	5919,26	5919,26
38,10	0,00762	84516	124550	102309	33,81	49,82	40,92	4436,52	6538,04	6538,04
50,80	0,01016	122326	166808	144567	48,93	66,72	57,83	4815,96	6567,22	6567,22
63,50	0,0127	166808	-	155687	66,72	-	62,27	5253,78	-	4903,78
Esfuerzo de ruptura promedio		61,39 MPa								
Error relativo M1		51,61 %								
Error relativo M2		53,93 %								
Error relativo M3		32,67 %								
Error relativo promedio		46,07 %								

Esfuerzo de ruptura promedio	61,39 MPa
Error relativo M1	51,61 %
Error relativo M2	53,93 %
Error relativo M3	32,67 %
Error relativo promedio	46,07 %

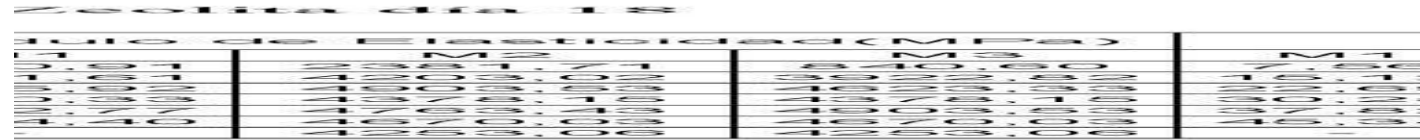
Modulo de Elasticidad (MPa)			σ_{Tesis} (MPa)	
M1	M2	M3	M1	M2
540,52	540,52	664,07	3,17	3,13
926,61	810,71	810,79	6,39	6,28
1106,79	1081,05	978,09	9,51	9,42
1208,46	1312,70	1177,57	12,69	12,57
1297,26	1482,58	1352,85	15,87	15,72
1402,79	1673,05	1480,01	19,04	18,85
1544,35	1764,98	1599,51	22,21	22,00
1592,62	1785,66	1689,14	25,39	25,15
1630,15	-	1715,95	28,57	-
1644,35	-	1799,17	31,74	-
-	-	1790,05	-	-
-	-	1833,92	-	-
-	-	1841,35	-	-

Esfuerzo de ruptura promedio	45,44 MPa
Error relativo M1	28,03 %
Error relativo M2	37,97 %
Error relativo M3	30,25 %
Error relativo promedio	32,08 %

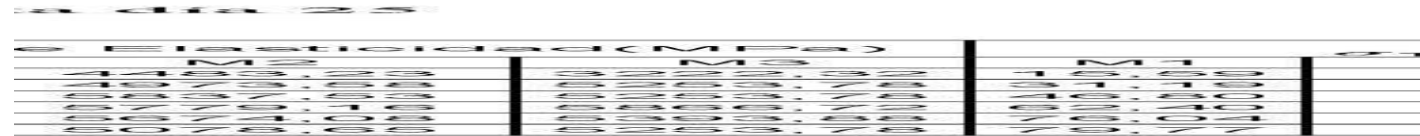
Tabla 11

Modulo de Elasticidad (MPa)		σ_{Tesis} (MPa)	
M2	M3	M1	M2
540,52	540,71	3,17	7,25
926,61	810,71	6,39	14,51
1106,79	1081,05	9,51	21,76
1208,46	1312,70	12,69	29,01
1297,26	1482,58	15,87	36,26
1402,79	1673,05	19,04	43,51
1544,35	1764,98	22,21	50,76
1592,62	1785,66	25,39	58,01
1630,15	-	28,57	65,26
1644,35	-	31,74	72,51
-	-	34,91	79,76
-	-	38,09	87,01
-	-	41,26	94,26
-	-	44,43	101,51
-	-	47,60	108,76
-	-	50,77	116,01
-	-	53,94	123,26
-	-	57,11	130,51
-	-	60,28	137,76
-	-	63,45	145,01
-	-	66,62	152,26
-	-	69,79	159,51
-	-	72,96	166,76
-	-	76,13	174,01
-	-	79,30	181,26
-	-	82,47	188,51
-	-	85,64	195,76
-	-	88,81	203,01
-	-	91,98	210,26
-	-	95,15	217,51
-	-	98,32	224,76
-	-	101,49	232,01
-	-	104,66	239,26
-	-	107,83	246,51
-	-	111,00	253,76
-	-	114,17	261,01
-	-	117,34	268,26
-	-	120,51	275,51
-	-	123,68	282,76
-	-	126,85	290,01
-	-	130,02	297,26
-	-	133,19	304,51
-	-	136,36	311,76
-	-	139,53	319,01
-	-	142,70	326,26
-	-	145,87	333,51
-	-	149,04	340,76
-	-	152,21	348,01
-	-	155,38	355,26
-	-	158,55	362,51
-	-	161,72	369,76
-	-	164,89	377,01
-	-	168,06	384,26
-	-	171,23	391,51
-	-	174,40	398,76
-	-	177,57	406,01
-	-	180,74	413,26
-	-	183,91	420,51
-	-	187,08	427,76
-	-	190,25	435,01
-	-	193,42	442,26
-	-	196,59	449,51
-	-	199,76	456,76
-	-	202,93	464,01
-	-	206,10	471,26
-	-	209,27	478,51
-	-	212,44	485,76
-	-	215,61	493,01
-	-	218,78	500,26
-	-	221,95	507,51
-	-	225,12	514,76
-	-	228,29	522,01
-	-	231,46	529,26
-	-	234,63	536,51
-	-	237,80	543,76
-	-	240,97	551,01
-	-	244,14	558,26
-	-	247,31	565,51
-	-	250,48	572,76
-	-	253,65	580,01
-	-	256,82	587,26
-	-	260,00	594,51
-	-	263,17	601,76
-	-	266,34	609,01
-	-	269,51	616,26
-	-	272,68	623,51
-	-	275,85	630,76
-	-	279,02	638,01
-	-	282,19	645,26
-	-	285,36	652,51
-	-	288,53	659,76
-	-	291,70	667,01
-	-	294,87	674,26
-	-	298,04	681,51
-	-	301,21	688,76
-	-	304,38	696,01
-	-	307,55	703,26
-	-	310,72	710,51
-	-	313,89	717,76
-	-	317,06	725,01
-	-	320,23	732,26
-	-	323,40	739,51
-	-	326,57	746,76
-	-	329,74	754,01
-	-	332,91	761,26
-	-	336,08	768,51
-	-	339,25	775,76
-	-	342,42	783,01
-	-	345,59	790,26
-	-	348,76	797,51
-	-	351,93	804,76
-	-	355,10	812,01
-	-	358,27	819,26
-	-	361,44	826,51
-	-	364,61	833,76
-	-	367,78	841,01
-	-	370,95	848,26
-	-	374,12	855,51
-	-	377,29	862,76
-	-	380,46	870,01
-	-	383,63	877,26
-	-	386,80	884,51
-	-	390,00	891,76
-	-	393,17	899,01
-	-	396,34	906,26
-	-	399,51	913,51
-	-	402,68	920,76
-	-	405,85	928,01
-	-	409,02	935,26
-	-	412,19	942,51
-	-	415,36	949,76
-	-	418,53	957,01
-	-	421,70	964,26
-	-	424,87	971,51
-	-	428,04	978,76
-	-	431,21	986,01
-	-	434,38	993,26
-	-	437,55	1000,51
-	-	440,72	1007,76
-	-	443,89	1015,01
-	-	447,06	1022,26
-	-	450,23	1029,51
-	-	453,40	1036,76
-	-	456,57	1044,01
-	-	459,74	1051,26
-	-	462,91	1058,51
-	-	466,08	1065,76
-	-	469,25	1073,01
-	-	472,42	1080,26
-	-	475,59	1087,51
-	-	478,76	1094,76
-	-	481,93	1102,01
-	-	485,10	1109,26
-	-	488,27	1116,51
-	-	491,44	1123,76
-	-	494,61	1131,01
-	-	497,78	1138,26
-	-	500,95	1145,51
-	-	504,12	1152,76
-	-	507,29	1160,01
-	-	510,46	1167,26
-	-	513,63	1174,51
-	-	516,80	1181,76
-	-	520,00	1189,01
-	-	523,17	1196,26
-	-	526,34	1203,51
-	-	529,51	1210,76
-	-	532,68	1218,01
-	-	535,85	1225,26
-	-	539,02	1232,51
-	-	542,19	1239,76
-	-	545,36	1247,01
-	-	548,53	1254,26
-	-	551,70	1261,51
-	-	554,87	1268,76
-	-	558,04	1276,01
-	-	561,21	1283,26
-	-	564,38	1290,51
-	-	567,55	1297,76
-	-	570,72	1305,01
-	-	573,89	1312,26
-	-	577,06	1319,51
-	-	580,23	1326,76
-	-	583,40	1334,01
-	-	586,57	1341,26
-	-	589,74	1348,51
-	-	592,91	1355,76
-	-	596,08	1363,01
-	-	599,25	1370,26
-	-	602,42	1377,51
-	-	605,59	1384,76
-	-	608,76	1392,01
-	-	611,93	1399,26
-	-	615,10	1406,51
-	-	618,27	1413,76
-	-	621,44	1421,01
-	-	624,61	1428,26
-	-	627,78	1435,51
-	-	630,95	1442,76
-	-	634,12	1450,01
-	-	637,29	1457,26
-	-	640,46	1464,51
-	-	643,63	1471,76
-	-	646,80	1479,01
-	-	650,00	1486,26
-	-	653,17	1493,51
-	-	656,34	1500,76
-	-	659,51	1508,01
-	-	662,68	1515,26
-	-	665,85	1522,51
-	-	669,02	1529,76
-	-	672,19	1537,01
-	-	675,36	1544,26
-	-	678,53	1551,51
-	-	681,70	1558,76
-	-	684,87	1566,01
-	-	688,04	1573,26
-	-	691,21	1580,51
-	-	694,38	1587,76
-	-	697,55	1595,01
-	-	700,72	1602,26
-	-	703,89	1609,51
-	-	707,06	1616,76
-	-	710,23	1624,01
-	-	713,40	1631,26
-	-	716,57	1638,51
-	-	719,74	1645,76
-	-	722,91	1653,01
-	-	726,08	1660,26
-	-	729,25	1667,51
-	-	732,42	1674,76
-	-	735,59	1682,01
-	-	738,76	1689,26
-	-	741,93	1696,51
-	-	745,10	1703,76
-	-	748,27	1711,01
-	-	751,44	1718,26
-	-	754,61	1725,51
-	-	757,78	1732,76
-	-	760,95	1740,01
-	-	764,12	1747,26
-	-	767,29	1754,51
-	-	770,46	1761,76
-	-	773,63	1769,01
-	-	776,80	1776,26
-	-	780,00	1783,51
-	-	783,17	1790,76
-	-	786,34	1798,01
-	-	789,51	1805,26
-	-	792,68	1812,51
-	-	795,85	1819,76
-	-	799,02	1827,01
-	-	802,19	1834,26
-	-	805,36	1841,51
-	-	808,53	1848,76
-	-	811,70	1856,01
-	-	814,87	1863,26
-	-	818,04	1870,51
-	-	821,21	1877,76
-	-	824,38	1885,01
-	-	827,55	1892,26
-	-	830,72	1900,51
-	-	833,89	1907,76
-	-	837,06	1915,01
-	-	840,23	1922,26
-	-	843,40	1929,51
-	-	846,57	1936,76
-	-	849,74	1944,01
-	-	852,91	1951,26
-	-	856,08	1958,51
-	-	859,25	1965,76
-	-	862,42	1973,01
-	-	865,59	1980,26
-	-	868,76	1987,51
-	-	871,93	1994,76
-	-	875,10	2002,01
-	-	878,27	2009,26
-	-	881,44	2016,51
-	-	884,61	2023,76
-	-	887,78	2031,01
-	-	890,95	2038,26
-	-	894,12	2045,51
-	-	897,29	2052,76
-	-	900,46	2060,01
-	-	903,63	2067,26
-	-	906,80	2074,51
-	-	910,00	2081,76

Error relativo M2	97,65	%
Error relativo M3	104,65	%
Error relativo promedio	120,77	%



Esfuerzo de ruptura promedio	69,69	MPa
Error relativo M1	42,45	%
Error relativo M2	16,90	%
Error relativo M3	60,60	%
Error relativo promedio	39,98	%



Esfuerzo de ruptura promedio	79,18	MPa
Error relativo M1	11,47	%
Error relativo M2	8,15	%
Error relativo M3	15,50	%
Error relativo promedio	11,71	%

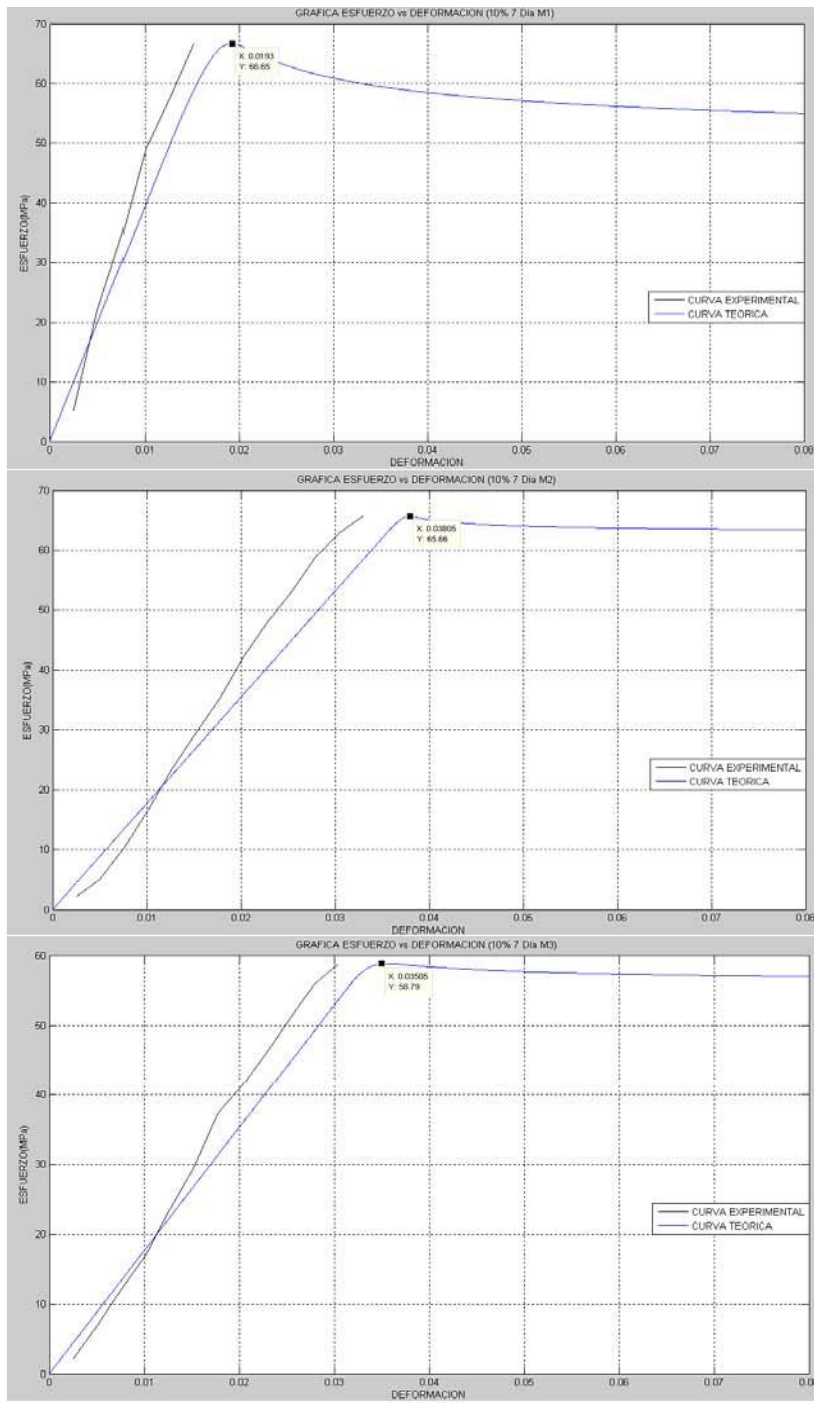


FIGURA 4.21 GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 10% A
LOS 7 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

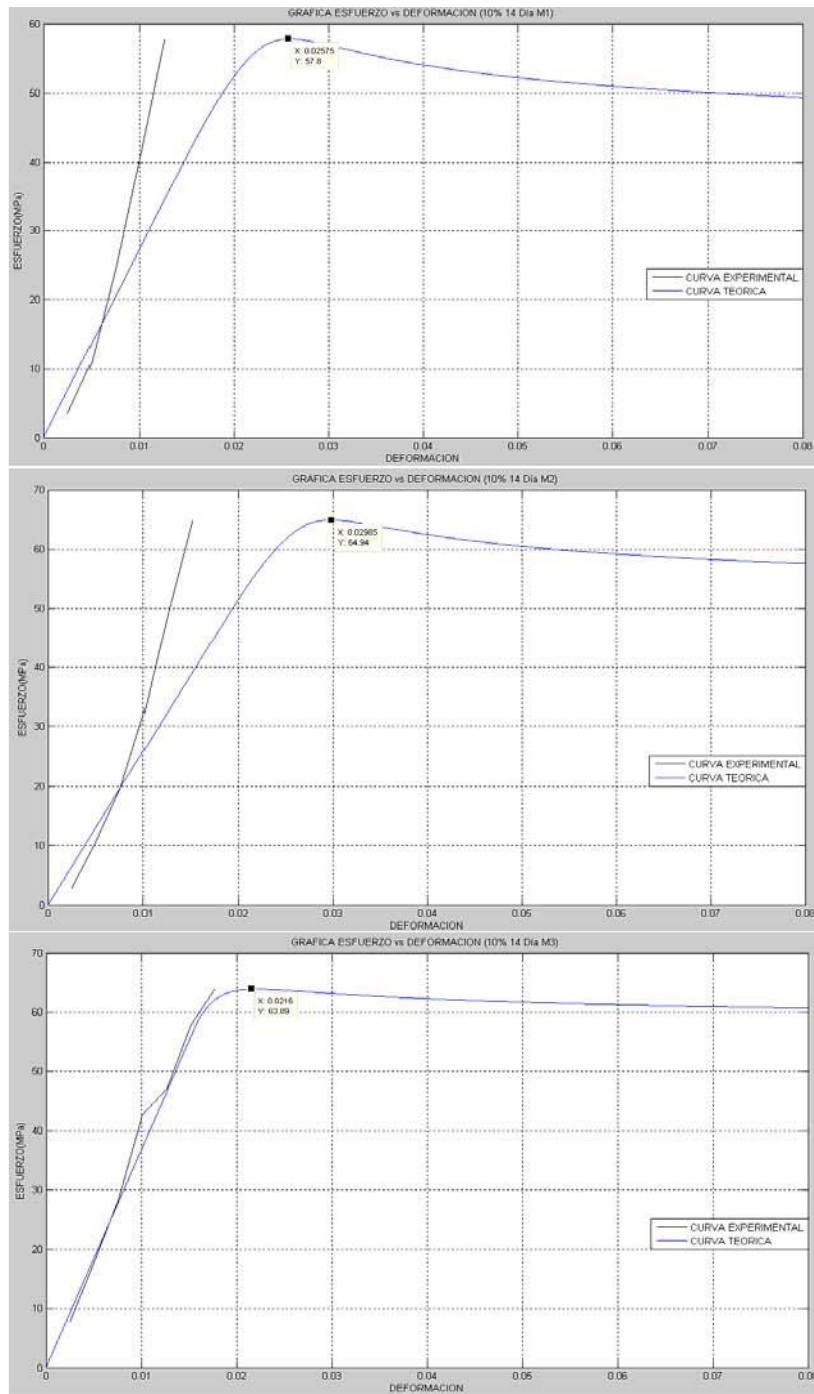


FIGURA 4.22 GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 10% A LOS 14 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

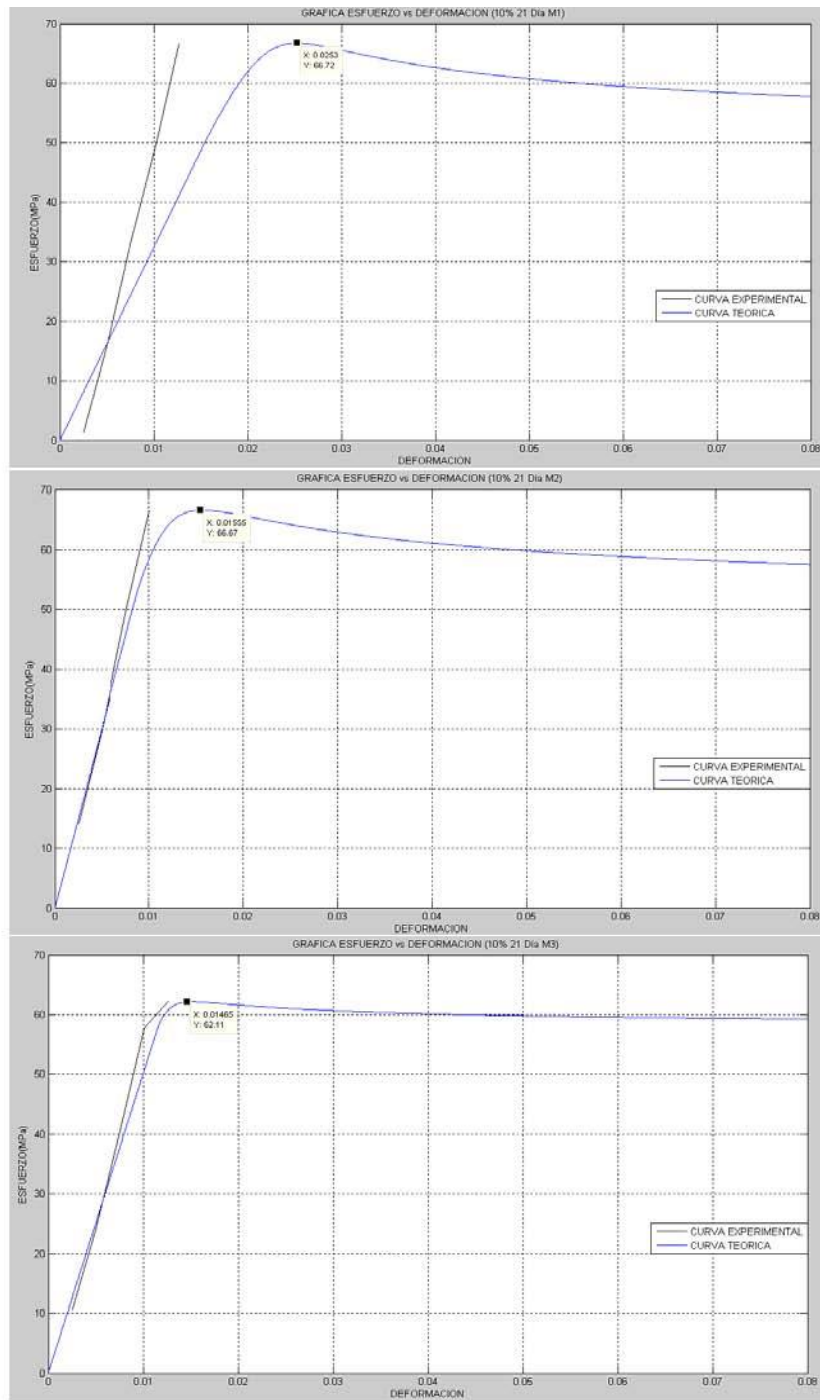


FIGURA 4.23 GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 10% A LOS 21 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

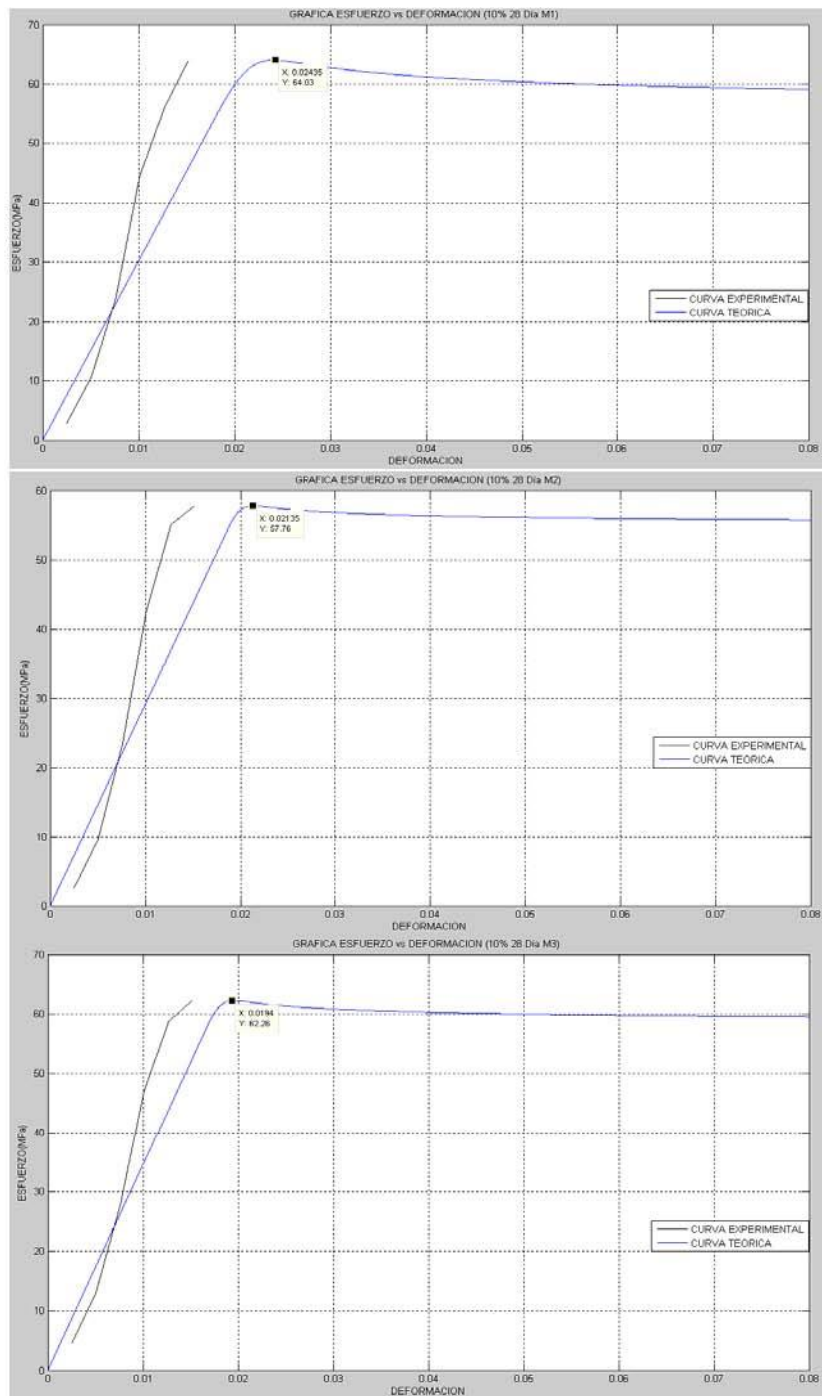


FIGURA 4.24 GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 10% A LOS 28 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

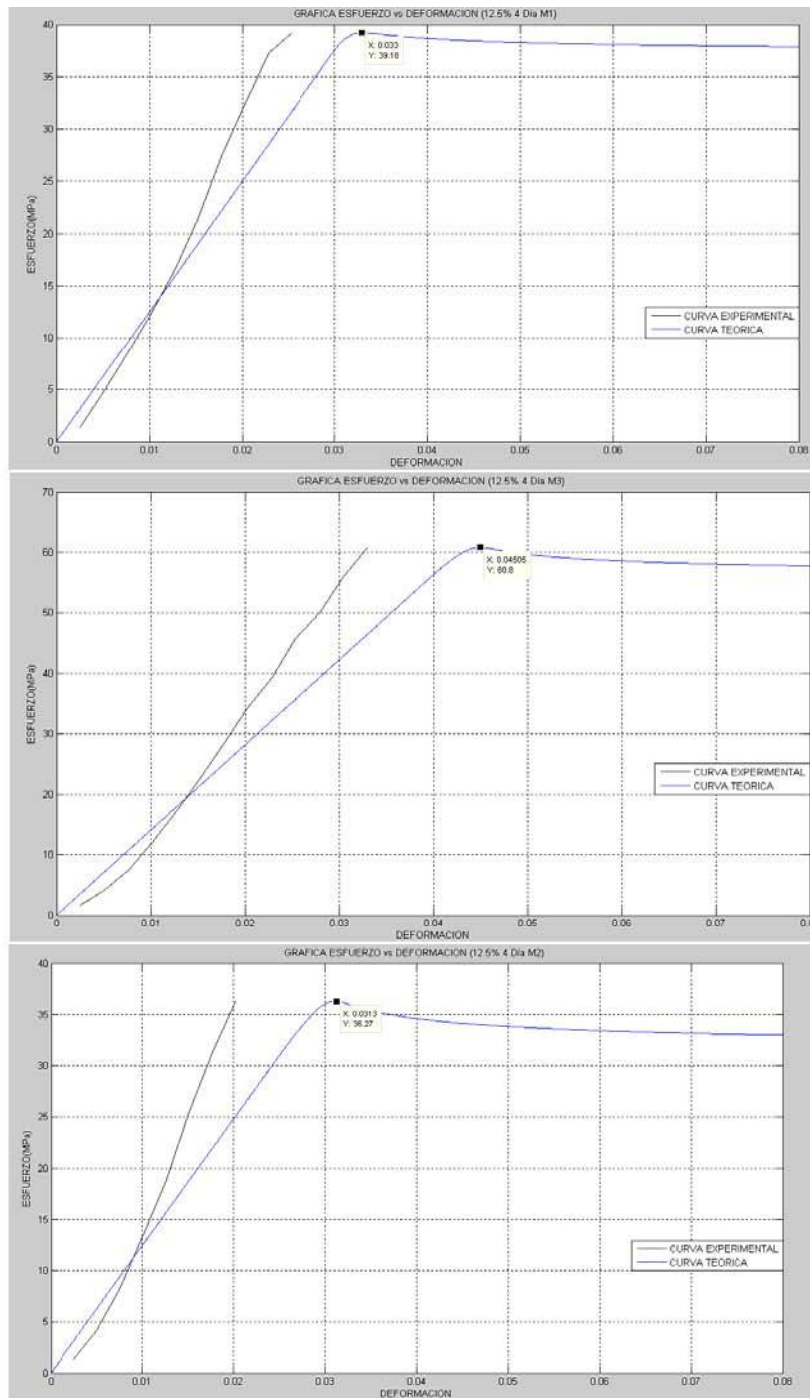


FIGURA 4.25 GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 12.5% A LOS 4 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

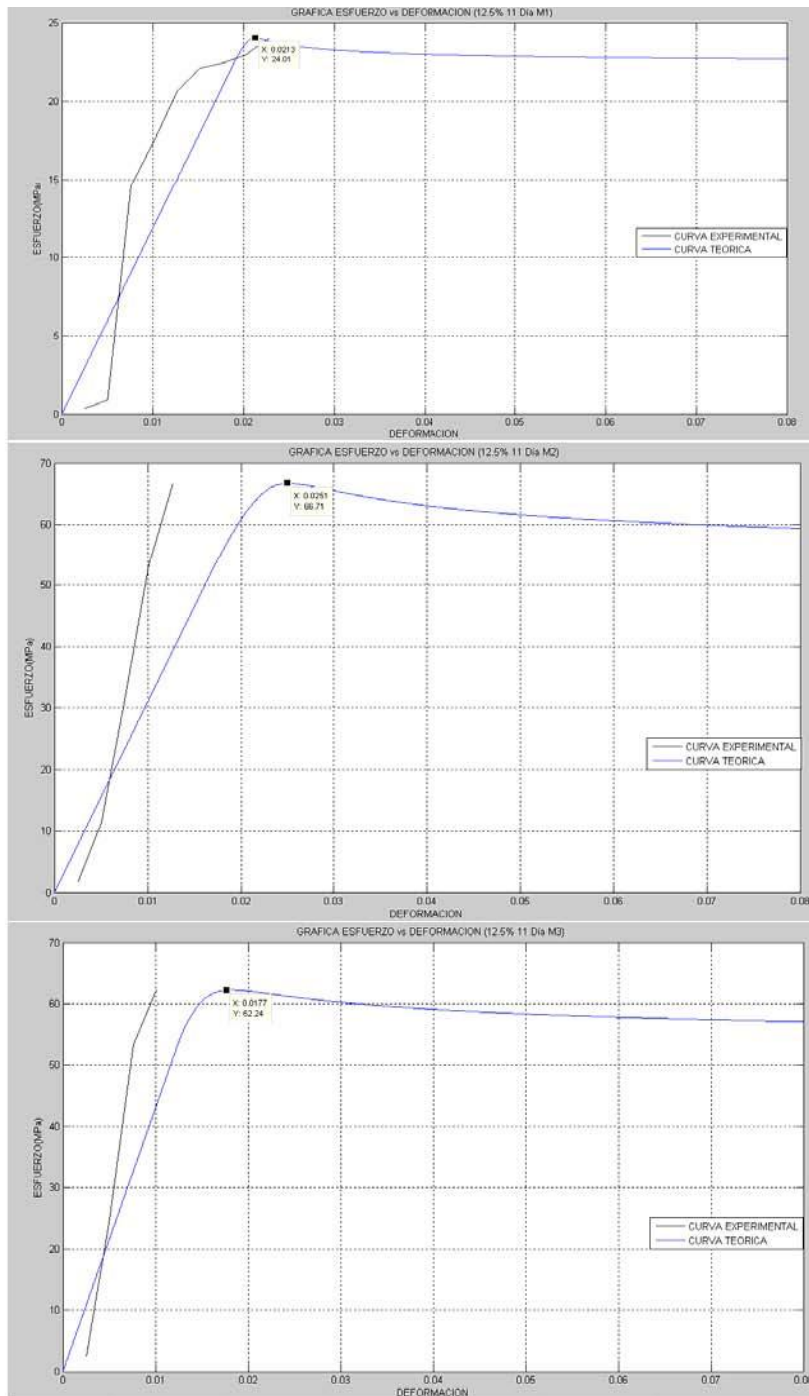


FIGURA 4.26 GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 12.5% A LOS 11 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

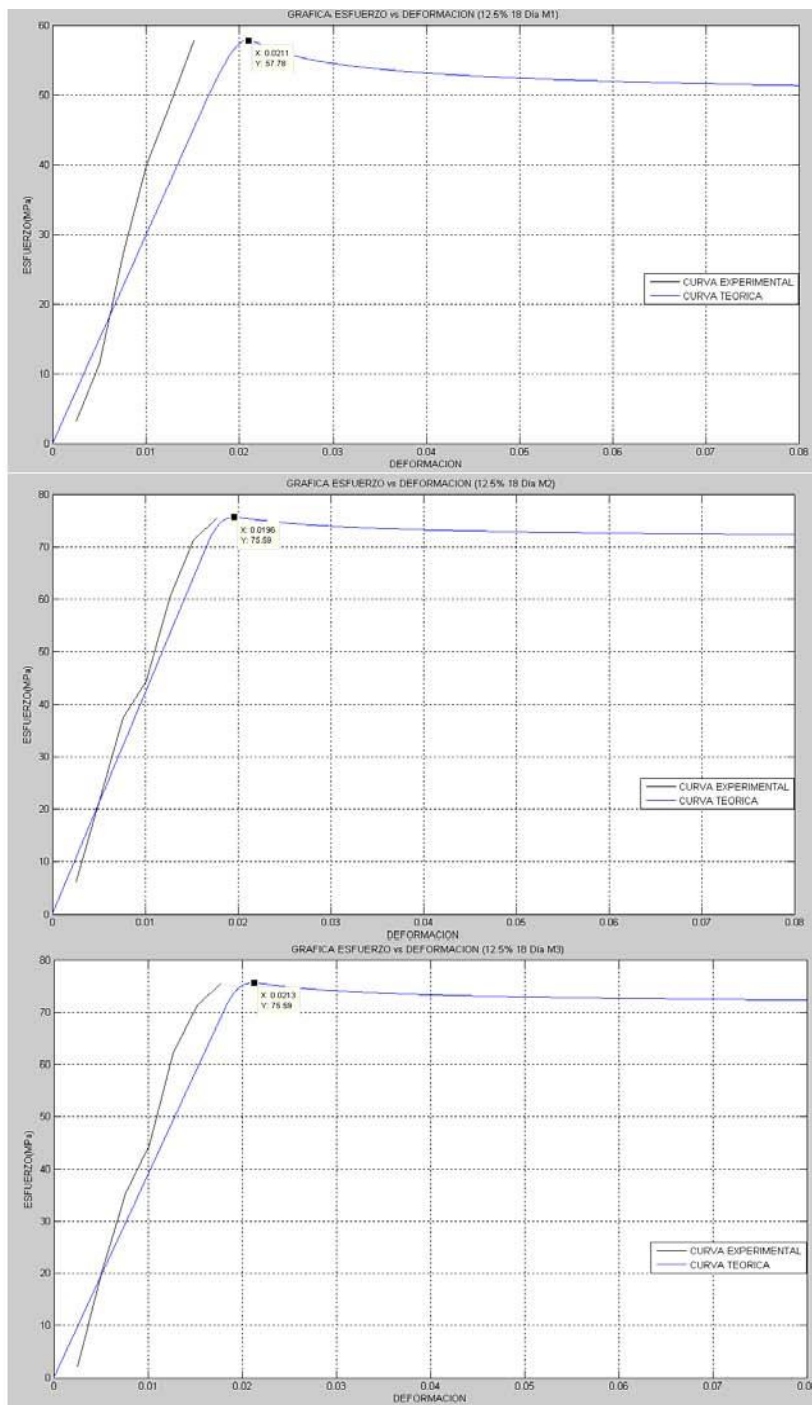


FIGURA 4.27 GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 12.5% A
LOS 18 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

alfa =	grados de libertad del num erador											
0,05	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	60
1	161,45	199,5	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	248,02	252,2
2	18,513	19	19,164	19,247	19,296	19,329	19,353	19,371	19,385	19,396	19,446	19,479
3	10,128	9,5521	9,2766	9,1172	9,0134	8,9407	8,8867	8,8452	8,8123	8,7855	8,6602	8,572
4	7,7086	6,9443	6,5914	6,3882	6,2561	6,1631	6,0942	6,041	5,9988	5,9644	5,8025	5,6878

5	6,6079	5,7861	5,4094	5,1922	5,0503	4,9503	4,8759	4,8183	4,7725	4,7351	4,5581	4,4314
6	5,9874	5,1432	4,7571	4,5337	4,3874	4,2839	4,2067	4,1468	4,099	4,06	3,8742	3,7398
7	5,5915	4,7374	4,3468	4,1203	3,9715	3,866	3,7871	3,7257	3,6767	3,6365	3,4445	3,3043
8	5,3176	4,459	4,0662	3,8379	3,6875	3,5806	3,5005	3,4381	3,3881	3,3472	3,1503	3,0053
9	5,1174	4,2565	3,8625	3,6331	3,4817	3,3738	3,2927	3,2296	3,1789	3,1373	2,9365	2,7872
10	4,9646	4,1028	3,7083	3,478	3,3258	3,2172	3,1355	3,0717	3,0204	2,9782	2,774	2,6211
11	4,8443	3,9823	3,5874	3,3567	3,2039	3,0946	3,0123	2,948	2,8962	2,8536	2,6464	2,4901
12	4,7472	3,8853	3,4903	3,2592	3,1059	2,9961	2,9134	2,8486	2,7964	2,7534	2,5436	2,3842
13	4,6672	3,8056	3,4105	3,1791	3,0254	2,9153	2,8321	2,7669	2,7144	2,671	2,4589	2,2966
14	4,6001	3,7389	3,3439	3,1122	2,9582	2,8477	2,7642	2,6987	2,6458	2,6022	2,3879	2,2229
15	4,5431	3,6823	3,2874	3,0556	2,9013	2,7905	2,7066	2,6408	2,5876	2,5437	2,3275	2,1601
16	4,494	3,6337	3,2389	3,0069	2,8524	2,7413	2,6572	2,5911	2,5377	2,4935	2,2756	2,1058
17	4,4513	3,5915	3,1968	2,9647	2,81	2,6987	2,6143	2,548	2,4943	2,4499	2,2304	2,0584
18	4,4139	3,5546	3,1599	2,9277	2,7729	2,6613	2,5767	2,5102	2,4563	2,4117	2,1906	2,0166
19	4,3808	3,5219	3,1274	2,8951	2,7401	2,6283	2,5435	2,4768	2,4227	2,3779	2,1555	1,9795
20	4,3513	3,4928	3,0984	2,8661	2,7109	2,599	2,514	2,4471	2,3928	2,3479	2,1242	1,9464
21	4,3248	3,4668	3,0725	2,8401	2,6848	2,5727	2,4876	2,4205	2,3661	2,321	2,096	1,9165
22	4,3009	3,4434	3,0491	2,8167	2,6613	2,5491	2,4638	2,3965	2,3419	2,2967	2,0707	1,8894
23	4,2793	3,4221	3,028	2,7955	2,64	2,5277	2,4422	2,3748	2,3201	2,2747	2,0476	1,8648
24	4,2597	3,4028	3,0088	2,7763	2,6207	2,5082	2,4226	2,3551	2,3002	2,2547	2,0267	1,8424
25	4,2417	3,3852	2,9912	2,7587	2,603	2,4904	2,4047	2,3371	2,2821	2,2365	2,0075	1,8217
26	4,2252	3,369	2,9752	2,7426	2,5868	2,4741	2,3883	2,3205	2,2655	2,2197	1,9898	1,8027
27	4,21	3,3541	2,9603	2,7278	2,5719	2,4591	2,3732	2,3053	2,2501	2,2043	1,9736	1,7851
28	4,196	3,3404	2,9467	2,7141	2,5581	2,4453	2,3593	2,2913	2,236	2,19	1,9586	1,7689
29	4,183	3,3277	2,934	2,7014	2,5454	2,4324	2,3463	2,2782	2,2229	2,1768	1,9446	1,7537
30	4,1709	3,3158	2,9223	2,6896	2,5336	2,4205	2,3343	2,2662	2,2107	2,1646	1,9317	1,7396
40	4,0847	3,2317	2,8387	2,606	2,4495	2,3359	2,249	2,1802	2,124	2,0773	1,8389	1,6373
50	4,0343	3,1826	2,79	2,5572	2,4004	2,2864	2,1992	2,1299	2,0733	2,0261	1,7841	1,5757
60	4,0012	3,1504	2,7581	2,5252	2,3683	2,2541	2,1665	2,097	2,0401	1,9926	1,748	1,5343
70	3,9778	3,1277	2,7355	2,5027	2,3456	2,2312	2,1435	2,0737	2,0166	1,9689	1,7223	1,5046
80	3,9604	3,1108	2,7188	2,4859	2,3287	2,2142	2,1263	2,0564	1,9991	1,9512	1,7032	1,4821
90	3,9469	3,0977	2,7058	2,4729	2,3157	2,2011	2,1131	2,043	1,9856	1,9376	1,6883	1,4645
100	3,9362	3,0873	2,6955	2,4626	2,3053	2,1906	2,1025	2,0323	1,9748	1,9267	1,6764	1,4504
200	3,8884	3,0411	2,6498	2,4168	2,2592	2,1441	2,0556	1,9849	1,9269	1,8783	1,6233	1,3856
300	3,8726	3,0258	2,6347	2,4017	2,2441	2,1288	2,0402	1,9693	1,9112	1,8623	1,6057	1,3634
400	3,8648	3,0183	2,6272	2,3943	2,2366	2,1212	2,0325	1,9616	1,9033	1,8544	1,5969	1,3522
500	3,8601	3,0138	2,6227	2,3898	2,232	2,1167	2,0279	1,9569	1,8986	1,8496	1,5916	1,3455
600	3,857	3,0107	2,6198	2,3868	2,229	2,1137	2,0248	1,9538	1,8955	1,8465	1,5881	1,341
700	3,8548	3,0086	2,6176	2,3847	2,2269	2,1115	2,0226	1,9516	1,8932	1,8442	1,5856	1,3377
800	3,8531	3,007	2,616	2,3831	2,2253	2,1099	2,021	1,95	1,8916	1,8425	1,5837	1,3353
900	3,8518	3,0057	2,6148	2,3818	2,224	2,1086	2,0197	1,9487	1,8903	1,8412	1,5822	1,3334
1000	3,8508	3,0047	2,6138	2,3808	2,2231	2,1076	2,0187	1,9476	1,8892	1,8402	1,5811	1,3318
1500	3,8477	3,0017	2,6108	2,3779	2,2201	2,1046	2,0157	1,9446	1,8861	1,837	1,5775	1,3273
2000	3,8461	3,0002	2,6094	2,3764	2,2186	2,1031	2,0142	1,943	1,8846	1,8354	1,5758	1,325
10000	3,8424	2,9966	2,6058	2,3728	2,215	2,0995	2,0105	1,9393	1,8808	1,8316	1,5716	1,3194

DESCRIPCION ALGORITMO EN MATLAB.

Este código trata de representar de la mejor manera posible el comportamiento del endurecimiento no lineal de un material.

```
clc;
clear all;
```

```

E=2000;(Módulo de YOUNG)
m=0.03;
a=1;
de=0.00005;(delta épsilon)

epsilon=0:de:1;---(matriz de épsilon)
ntotal=1/de; ---(numero de pasos totales)
sigma=zeros(ntotal,1);---(matriz de sigma)
sigma(1,1)=0;---(sigma inicial)
sigmay=zeros(ntotal,1);---(matriz del esfuerzo de fluencia)
sigmay(1,1)=100;---(esfuerzo de fluencia inicial)
tol=1e-15;---(tolerancia)
L(1,1)=0;---(valor de Lambda inicial para el paso n=1)
for n=1:ntotal

    st(n,1)=sigma(n,1)+E*de;---(sigma trial) Ft(n,1)=abs(st(n,1))-sigmay(n,1);---(fuerza trial)
    if Ft(n,1)>0; %DEFORMACION PLASTICA%
        kdl(1,1)=tol;---(delta lambda de la iteración "k")
        for k=1:20

            KL(k,1)=kdl(k,1)+L(n,1);---(lambda de la iteración "k") H(n,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/KL(k,1))*((m-
            KL(k,1))/(m+KL(k,1))^2); r(k,1)=Ft(n,1)-kdl(k,1)*(E+H(n,1));---(residuo de la iteración "k")
            nr(k,1)=norm(r(k,1));---(norma del residuo en "k")
            if nr(k,1)<tol*nr(1,1)
                break
            end

            A=-1/2*(2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^2*kdl(k,1)+6*E*(m*
            KL(k,1))^(3/2)*m^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)^2+12*E*(m*KL(k
            ,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1)
            )^(3/2)*kdl(k,1)^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(
            3/2)*kdl(k,1)*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*L(n,1)^3+kdl(k,1)*m^4*a*sigmay
            (1,1)+2*m^4*a*sigmay(1,1)*L(n,1)-3*kdl(k,1)*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^2-
            2*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^3-6*kdl(k,1)^2*m^3*a*sigmay(1,1)-
            6*kdl(k,1)*m^3*a*sigmay(1,1)*L(n,1)+kdl(k,1)^3*m^2*a*sigmay(1,1))/(m+kdl(k,
            1)+L(n,1))^3/(m*KL(k,1))^(3/2);
            rdl(k+1,1)=-(r(k,1)/A);
            kdl(k+1,1)=kdl(k,1)+rdl(k+1,1);---(jacobiano en función del lambda y delta lambda en "k", del
            esfuerzo de fluencia inicial y del lambda inicial)
        end
        dl(n+1,1)=kdl(k,1);---(delta lambda de "n")
        L(n+1,1)=KL(k,1);---(lambda de "n")
        sigma(n+1,1)=st(n,1)-E*dl(n+1,1)*sign(st(n,1)); sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1)+H(n)*dl(n+1,1);
    else
        L(n+1,1)=0;
        sigma(n+1,1)=st(n,1);
        sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1);
    end end
a=size(sigma) b=size(epsilon) plot(epsilon',sigma)

```

TABLA 31. Valores de "a" y "m"

PORCENTAJE	Días	MUESTRA1		MUESTRA2		MUEST
		a	m	a	m	a
10%	7	0.369	0.0027	0.0504	0.0009	0.0562
	14	0.424	0.0047	0.312	0.0047	0.112

	21	0.374	0.0047	0.354	0.0047	0.0828
	28	0.15	0.0029	0.0527	0.0016	0.0669
12,5%	7	0.055	0.0018	0.163	0.0018	0.092
	14	0.078	0.001	0.259	0.0038	0.176
	21	0.19	0.0016	0.068	0.0018	0.068
	28	0.21	0.0018	0.081	0.0018	0.18

DETRMINACION DEL MEJOR TRATAMIENTO (METODO DE TUKEY)

Para determinar el mejor tratamiento en comparación con el control, se usó el Método de Tukey. Los resultaos obtenidos del análisis son mostrados a continuación y explicados brevemente.

El Método de Tukey compara las medias de todos los porcentajes de Zeolita obtenidos para determinar cual es el valor que posee más variación.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals Response Variable Ruptura All Pairwise Comparisons among Levels of %

% = 0 subtracted from:

%	Lower	Center	Upper	
5	-24,40	-2,37	19,667	+-----+-----+-----+-----
10	-34,10	-12,06	9,971	(-----*-----)
15	-31,93	-9,90	12,134	(-----*-----)
20	-24,43	-2,39	19,642	(-----*-----)

25 -39,63 -17,59 4,439 (-----*-----) +-----+-----+-----+----- -40 -20 0 20

En este caso compara el 0% con 5, 10,15,20 y 25% de Zeolita, se observa en la columna "CENTER" que la diferencia de medias es mayor para los porcentajes con 5 y 20% , esto ocurre porque estos valores poseen una mejor Resistencia a la compresión en comparación con el 0%, este mismo análisis se repite variando el porcentaje que se desee evaluar. Debemos seguir comparando para obtener el mejor tratamiento.

% = 5 subtracted from:

%	Lower	Center	Upper	
10	-31,73	-9,70	12,338	(-----*-----)
15	-29,57	-7,53	14,502	(-----*-----)
20	-22,06	-0,03	22,009	(-----*-----)
25	-37,26	-15,23	6,807	(-----*-----)

+-----+-----+-----+----- -40 -20 0 20

Ahora se compara el 5% con el resto y se aprecia como el 20% posee mejor resistencia a la compresión que el 5%.

% = 10 subtracted from:

%	Lower	Center	Upper	
15	-19,87	2,163	24,20	(-----*-----)
20	-12,36	9,671	31,71	(-----*-----)
25	-27,57	-5,532	16,50	(-----*-----)

+-----+-----+-----+-----40 -20 0 20

Ahora se compara el 10% con el resto y se aprecia como el 25% posee mejor resistencia a la compresión que al 10%.

% = 15 subtracted from:

%	Lower	Center	Upper	
20	-14,53	7,507	29,54	(-----*-----)
25	-29,73	-7,695	14,34	(-----*-----)

+-----+-----+-----+-----

-40 -20 0 20

Ahora se compara el 15% con el resto y se aprecia como el 25% posee mejor resistencia a la

compresión que el 15%%.

% = 20 subtracted from:

% Lower Center Upper +-----+-----+-----+-----25 -37,24 -15,20 6,832 (-----*-----)
+-----+-----+-----+-----40 -20 0 20

Ahora se compara el 20% con el resto y se aprecia como el 20% posee mejor resistencia a la compresión que el 25%.

Al mantener los días constantes y al realizar el análisis podemos establecer que el mejor tratamiento en comparación con el resto es la adición de 20% de Zeolita.

Ahora realizare el análisis manteniendo los porcentajes de zeolita constantes.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals Response Variable Ruptura All Pairwise Comparisons among Levels of Dias de curado Dias de curado = 7 subtracted from:

Dias De curado Lower Center Upper ----+-----+-----+-----+-----+
14 -12,76 3,232 19,22 (-----*-----)
21 -10,34 5,649 21,64 (-----*-----)
28 -10,84 5,148 21,14 (-----*-----)
-----+-----+-----+-----+
-12 0 12 24

Notamos que la diferencia de medias para los días 14 , 21 y 28 es mayor que para 7 días.

Dias de curado = 14 subtracted from:

Dias de curado Lower Center Upper ----+-----+-----+-----+-----+21 -13,58 2,417 18,41 (-----
-*-----) 28 -14,08 1,916 17,91 (-----*-----)
-----+-----+-----+-----+-----+12 0 12 24

Al comparar el día 14 con el 21 y el 28, podemos notar que existe una diferencia menor para el día 28 , esto quiere decir que el día 28 se observa mayor resistencia a la compresión que lo0s días 14 y 21.

Dias de curado = 21 subtracted from:

Dias De curado Lower Center Upper ----+-----+-----+-----+-----+28 -16,49 -0,5011 15,49 (-----
-*-----) ----+-----+-----+-----+-----+
-12 0 12 24

Se puede apreciar como el día 28 ofrece mejor resistencia a la compresión que el día 21 en promedio.

Entonces puedo establecer que a los 28 días es cuando se dan los mayores resultados de resistencia a la compresión.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jimenez, H."TECNOLOGIA DEL CONCRETO".UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA DEL PERU". www.fic.uni.edu.pe. Febrero, 2008.
- [2] Reyes,G."MANUFACTURA DEL CEMENTO PORTLAND". www.monografias.com. Marzo, 2008.
- [3] Anton, A."EL EXPERIMENTO FACTORIAL", www.uned.es.Marzo, 2008
- [4] Servin , J. "METALURGIA DE MINERALES NO METÁLICOS" ,www.monografias.com. Marzo, 2008.
- [5] Gutiérrez, M. "ZEOLITAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES", Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares , Marzo, 2008.
- [6] _____,"QUE ES UNA ZEOLITA", www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx, Febrero, 2008.
- [8] ASTM,"Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, Mayo 2008.
- [9] Galbiati, J. "REGRESION LINEAL SIMPLE", http://www.jorgegalbiati.cl/enero_07/Regresion.pdf, Mayo,2008

Autor:

Xavier Enrique Fuentes Bayne

Enviado por:

Ing. Lic. Yunior Andrés Castillo S.

“NO A LA CULTURA DEL SECRETO, SI A LA LIBERTAD DE INFORMACION”®

Santiago de los Caballeros,

República Dominicana,

2014.

“DIOS, JUAN PABLO DUARTE Y JUAN BOSCH – POR SIEMPRE”®