DISEÑO ESTADISTICO DE EXPERIMENTO APLICADO A REFRACTARIOS TECNICA TAGUCHI: DOS EJEMPLOS SENCILLOS.

Salazar F., Miriam H.; Perdomo O., Oscar E.; Soto F., Joe A.

Cerámica Carabobo C.A., Valencia , Edo. Carabobo. Venezuela.

Resumen

En el presente trabajo se exponen los resultados de la aplicación de la técnica estadística Taguchi de experimentos a dos problemas en el campo de los Refractarios, uno referido a la optimización de las variables de proceso en una mezcla de composición constante destinada a la producción de ladrillos refractarios aislantes, y el otro en relación a la composición de concretos refractarios. En ambos casos, se obtuvo un alto grado de concordancia entre las predicciones del diseño y los resultados de los experimentos de verificación.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Aplicando las técnicas de diseño estadístico de experimentos del Dr. Taguchi, se efectuaron ensayos para optimizar el proceso de fabricación de un refractario aislante grupo 26 (ASTM C-155) y la composición de moldeables aislantes clases P y Q (ASTM C-401). Las variables dependientes consideradas fueron el peso volumétrico y la resistencia mecánica en el ensayo de compresión. Para los moldeables aislantes también se evaluó el cambio lineal permanente por recalentamiento a 1000°C. En la tabla #1, se resumen los valores esperados para cada variable dependiente. Las tablas # 2, 6 y 7, muestran los factores de control considerados en el estudio como variables independientes a ser optimizadas. Para el caso del refractario aislante grupo 26, además de los factores de control se consideraron algunas interacciones (Tabla #3), las cuales fueron ajustadas a un arreglo ortogonal L16 (2^15); para los moldeables aislantes clase P y Q, sólo se consideraron factores de control y se ajustaron a arreglos ortogonales L9 (3^4). Los experimentos se efectuaron al azar, siguiendo la estructura experimental indicada por los arreglos ortogonales.

ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados experimentales se hizo utilizando la técnica estadística de análisis de varianza (ANOVA) según la modificación introducida por Taguchi, quien asigna un peso relativo (rho %) a los factores significativos estadísticamente y lo expresa como fracción porcentual de la suma pura total de cuadrados de los efectos de todos los factores e interacciones bajo estudio.

Una vez conocidos los factores de mayor peso estadístico, se determinó mediante las tablas de sumas promedio de nivel, el nivel en el cual su efecto es óptimo para las variables dependientes bajo estudio. Para los factores de menor significación estadística se escogieron aquellos niveles que representaban las condiciones más sencillas o el menor costo. Así se seleccionaron las mejores combinaciones, que representan los niveles de los factores que en conjunto producen los mejores resultados.

Tabla #1. Valores Esperados para cada variable dependiente

Variable Dependiente	Ref. Aislante G26(C-155)	Mold. Aislante Clase P(C-401)	Mold. Aislante Clase Q(C-401)
Peso Volumétrico (g/cm^3)	<0.86	<1.08	< 1.40
Resist. Compresión (kg/cm^2)	>25	>20	>80
Cambio Lineal, 1000 °C (%)		<= -0.60	<= -0.30

Tabla #2. Factores de control.
Refractario Aislante Grupo 26 (ASTM C-155)

FACTOR	DESCRIPCION	NIVELES 1	2
A	-Densidad del ligante	Baja	Alta
B	-Cantidad de ligante en la mezcla	Baja	Alta
C	-Tiempo de mezclado de la mezcla total	Normal	Largo
D	-Forma de adición del ligante	Externa	Interna
E	-Finura agregado liviano (relac. +20/-65 mesh)	Baja	Alta
F	-Finura de la arcilla #1	Normal	Superfina
G	-Finura de la arcilla #2	Normal	Superfina
H	-Tiempo de premezclado de las arcillas	Normal	Largo

Tabla #3. Interacciones. Aislante Grupo 26

INTERACCIONES ESTUDIADAS
A x C
B x C
C x D
A x H
C x E
F x H
B x H

Tabla #4. Intervalos de confianza estimados por el ANOVA para la mejor combinación.
Refractario Aislante Grupo 26 (ASTM C-155)

MEJORES COMBINACIONES PROPIEDADES	1-1	1-2
Peso Volumétrico (g/cm^3)	0.85-0.87	0.85-0.90
Resist. Compresión (kg/cm^2)	25-32	35-42

MEJORES COMBINACIONES	NIVEL DE LOS FACTORES	
Aislante Grupo 26	A2, B2, C1, D2, E1, F2, G1, H1	(1-1)
	A2, B2, C1, D2, E1, F2, G2, H1	(1-2)
Moldeable Clase P	A2, B3, C2	(2-1)
	A1, B3, C2	(2-2)
	A3, B2, C1	(2-3)
Moldeable Clase Q	A2, B2, C3,D1	(3-1)
	A3, B2, C3, D1	(3-2)

Finalmente se calculó el promedio esperado y su intervalo de confianza a 95% de probabilidad para las mejores combinaciones, los cuales se comprobaron en las pruebas de verificación. Las tablas # 4 y 5 (Aislante Grupo 26), 8 y 9 (Moldeable P) y 10 y 11 (Moldeable Q) muestran las predicciones y los resultados obtenidos en las pruebas de verificación. La comparación entre los requerimientos establecidos inicialmente (Tabla #1), las predicciones (Tablas # 4, 8 y 10) y los valores obtenidos en las pruebas de verificación (Tablas # 5, 9 y 11) tienen un altísimo grado de concordancia.

Tabla #5. Resultados obtenidos en los experimentos de verificación de las mejores combinaciones.
Refractario Aislante Grupo 26 (ASTM C-155)

MEJORES COMBINACIONES PROPIEDADES	1-1	1-2
Peso Volumétrico (g/cm^3)	0.85	0.86
Resist. Compresión (kg/cm^2)	25	38

Tabla #6. Factores de control. Moldeable Aislante Clase P (ASTM C-401)

FACTOR	DESCRIPCION	NIVELES DE ESTUDIO 1	2	3
A	Aregado Liviano	Bajo	Medio	Alto
B	Cemento Aluminoso	Bajo	Medio	Alto
C	Granulometría de la Chamota	Media	Fina	(M+F)/2

Tabla #7. Factores de control.
Moldeable Aislante Extrafuerte Clase Q (ASTM C-401)

FACTOR	DESCRIPCION	NIVELES DE ESTUDIO 1	2	3
A	Aregado Liviano	Bajo	Medio	Alto
B	Cemento Aluminoso	Bajo	Medio	Alto
C	Granulometría de la Chamota	Media	Fina	(M+F)/2
D	Plastificante	Bajo	Medio	Alto

Tabla #8. Intervalos de Confianza Estimados por el ANOVA para la mejor combinación del Moldeable Aislante Clase P (ASTM C-401)

MEJORES COMBINACIONES PROPIEDADES	(2-1)	(2-2)	(2-3)
Peso Volumétrico (g/cm^3)	1.00 - 1.04	1.11 - 1.14	1.01 - 1.04
Módulo Rotura (kg/cm^2)	12 - 14	13 - 15	6 - 8
Resist. Compresión (kg/cm^2)	40 - 50	43 - 53	19 - 29
C.L.P 1000 °C (%)	-0.72 a -0.93	-0.56 a -0.99	-0.80 a -0.99
C.L.P 1150 °C (%)	-0.88 a -1.5	-0.58 a -1.20	-1.18 a -1.80
Agua Requerida (%)	44.4 - 52.8	38.2 - 46.5	46.8 - 55.1

Tabla #9. Resultados obtenidos en los experimentos de verificación de las mejores combinaciones.
Moldeable Aislante Clase P (ASTM C-401)

MEJORES COMBINACIONES PROPIEDADES	(2-1)	(2-2)
Peso Volumétrico (g/cm^3)	1.01	1.12
Módulo Rotura (kg/cm^2)	13	16
Resist. Compresión (kg/cm^2)	40	45
C.L.P 1000 °C (%)	-0.6	-0.6
C.L.P 1150 °C (%)	-0.8	-0.7
Agua Requerida (%)	48	40.3

Tabla #10. Intervalos de Confianza Estimados por el ANOVA para la mejor combinación del Moldeable Aislante Extrafuerte Clase Q (ASTM C-401)

MEJORES COMBINACIONES PROPIEDADES	(3-1)	(3-2)
Peso Volumétrico (g/cm^3)	1.32 - 1.36	1.28 - 1.25
Módulo Rotura (kg/cm^2)	20 - 26	18 - 21
Resist. Compresión (kg/cm^2)	105 - 122	99 - 116
C.L.P 1000 °C (%)	-0.25 a -0.44	-0.21 a -0.39
C.L.P 1150 °C (%)	-0.30 a -0.50	-0.35 a -0.55
Agua Requerida (%)	30.0- 34.0	32.5 - 36.2

Tabla #11. Resultados obtenidos en los experimentos de verificación de las mejores combinaciones.
Moldeable Aislante Extrafuerte Clase Q (ASTM C-401)

MEJORES COMBINACIONES PROPIEDADES	(3-1)	(3-2)
Peso Volumétrico (g/cm^3)	1.33	1.29
Módulo Rotura (kg/cm^2)	23	24
Resist. Compresión (kg/cm^2)	116	100
C.L.P 1000 °C (%)	-0.3	-0.3
C.L.P 1150 °C (%)	-0.4	-0.4
Agua Requerida (%)	33.3	35.0

CONCLUSIONES

Los estudios realizados demostraron que se pueden optimizar las características de calidad de los productos terminados, bien sea diseñando mezclas de composición óptima o ajustando las variables del proceso de fabricación, de tal forma que manteniendo a las variables independientes consideradas en el estudio en los niveles determinados como óptimos se garantizarían productos de propiedades mejores y más uniformes.

En este trabajo sólo se tomaron en cuenta los efectos de las variables de control y de algunas interacciones establecidas entre ellas, sin considerar la influencia que podrían tener los factores de ruido. Sin embargo, se ha demostrado que la técnica es efectiva y que mediante ella se pueden lograr resultados verdaderamente confiables.

BIBLIOGRAFIA

1. Montgomery, D.C., "Design and Analysis of Experiments", 2da. edición, John Wiley & Sons, New York (1984)

2. Taguchi, G., "Introduction to Quality Engineering", Unipub/Quality Resources, New York (1989)

3. "Technology of Monolithic Refractories", Plibrico Japan Co., Tokio (1984)

4. David Leigh III, H., "Optimization of Refractory Properties Through Statistical Design", Ceram. Eng. Sci. Proc., 9(1-2), pp 105-120, (1988)