

UTILIZACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL PARA LA MINIMIZACIÓN DE COSTES EN EL PROCESO VÍA HÚMEDA DE SOPORTES CERÁMICOS TRIAXIALES

Cynthia Morais Gomes⁽¹⁾, Antônio Pedro Novaes de Oliveira^(1,2),
Orestes Estevam Alarcon^(1,2), Dachamir Hotza^(1,3)

⁽¹⁾ Programa de Postgrado en Ciencias e Ingeniería de los Materiales (PGMAT)

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Mecánica (EMC)

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería Química (EQA)

Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC)

Florianópolis, SC, Brasil - hotza@enq.ufsc.br

RESUMEN

Se han utilizado los experimentos de diseño de mezclas y las superficies de respuesta para describir y simular el comportamiento de las suspensiones cerámicas en función de los componentes triaxiales cuarzo, feldespato y mineral arcilloso. Asimismo, la programación lineal se ha utilizada para encontrar una composición que minimiza el coste de los materiales, sometida a las restricciones impuestas por la cantidad óptima de desfloculante y la altura relativa de la sedimentación de las suspensiones.

1. INTRODUCCIÓN

La optimización se ha convertido en un área interesante e importante en los sistemas de ingeniería de proceso^[1,2]. Ha pasado de ser una metodología de interés académico a una tecnología que ha tenido y sigue teniendo un impacto significativo en la industria. Básicamente, los problemas de la optimización se pueden clasificar en función de variables continuas y discretas. Los problemas principales para la optimización continua incluyen la programación lineal (LP) y la programación no-lineal (NLP)^[3]. Desde 1950, los avances en LP son notables. En los últimos años, LP se ha considerado una herramienta fundamental para optimizar el coste en las empresas de negocio en todo el mundo. Algunos trabajos también señalan el uso de la programación lineal para los problemas de la reformulación, particularmente en el campo cerámico^[4,5]. El objetivo del presente trabajo es la minimización de los costes de los soportes cerámicos en función de las materias primas, teniendo en cuenta las propiedades reológicas, como la cantidad óptima de desfloculante y la estabilización de sedimentación, utilizando la programación lineal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se han utilizado el feldespato potásico, la arena de cuarzo, y una mezcla de dos arcillas (77 % en peso de A-39 y 23 % en peso de A-12) como materias primas en las suspensiones con 60 % de sólidos en peso. Como desfloculante, se ha utilizado el polvo de tripolifosfato sódico (Na-TPP, con una relación de masa $P_2O_5/Na_2O=1.5$, Manchester), aditivado antes del proceso de molienda en un molino de bolas. Las fases cristalinas presentes se han identificado por difracción de rayos X (DRX), cuantificándolas por análisis racional^[6]. Las medidas reológicas se han realizado con un viscosímetro (ThermoHaake, VT550), con geometría de cilindros concéntrica, a $25.0 \pm 0.1^\circ C$, y las viscosidades aparentes se han determinado a un gradiente de velocidad de $42 s^{-1}$. La cantidad óptima de desfloculante (ODA)^[7] ha sido utilizada para calcular los coeficientes de las ecuaciones de regresión que representan un modelo relacionado con las fracciones en peso del mineral arcilloso, del feldespato y del cuarzo. Se ha determinado la relación de sedimentación inicial de la suspensión (h_0) con la altura (h_1) medida después de 1 día, llamada la altura relativa de sedimentación (RSH)^[8]. Se ha desarrollado un modelo matemático que relaciona la RSH con las fracciones en peso de la mezcla. Se ha realizado una optimización con la programación lineal.

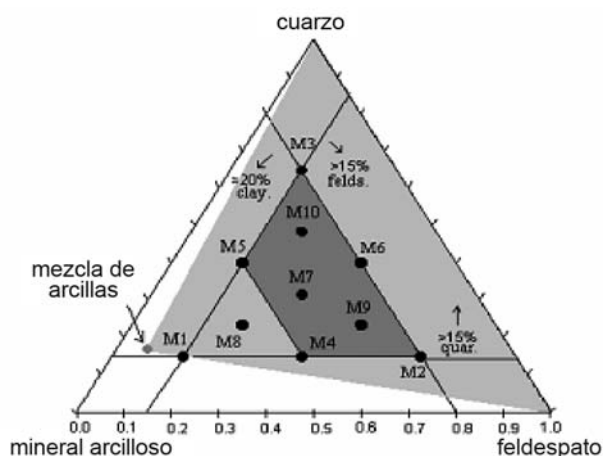


Figura 1. El sistema ternario arcilla-cuarzo-feldespato (componentes independientes) presentando el triángulo de las materias primas y el área de la intersección que contiene solamente las composiciones que satisfacen las restricciones de la viscosidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los límites de contorno utilizados han sido 20 % en peso de mineral arcilloso, 15 % en peso de feldespato potásico y 15 % en peso de cuarzo^[9]. La figura 1 representa un triángulo de composiciones restringidas de los pseudocomponentes en los cuales se ha puesto una {3,2} red simplex (seis puntos). A estos seis puntos originales, se ha añadido un punto central primero (simplex del centroide), seguido de tres más (red simplex {3,2} aumentada). Las composiciones con una fracción de peso más alto del mineral arcilloso (M1 y M8) no podían ensayarse debido a las restricciones en el intervalo de trabajo del viscosímetro.

La tabla 1 presenta solamente 8 composiciones, de esas 10 mezclas (M_i , $i = 1, 2, \dots, 10$), en función de los componentes independientes así como de sus valores correspondientes de ODA y RSH.

Mezclas	Composiciones			ODA (% en peso)	RSH
	Mineral arcilloso	Feldespato	Cuarzo		
M2	0.200	0.650	0.150	0.05	0.08
M3	0.200	0.150	0.650	0.07	0.40
M4	0.450	0.400	0.150	0.30	0.00
M5	0.450	0.150	0.400	0.50	0.00
M6	0.200	0.400	0.400	0.06	0.23
M7	0.367	0.317	0.316	0.20	0.00
M9	0.283	0.483	0.234	0.15	0.00
M10	0.283	0.233	0.484	0.20	0.00

Tabla 1. Composiciones triaxiales de las mezclas creadas por el simplex {los 3,2} aumentado y los valores medidos de ODA y de RSH.

Se han obtenido dos polinomios de regresión lineales:

$$\text{ODA (\% en peso)} = 1.0897X_C - 0.2982X_F - 0.1048X_Q \quad (1)$$

$$\text{RSH} = -0.5538X_C + 0.1538X_F + 0.5846X_Q \quad (2)$$

siendo X_C el mineral arcilloso, X_F el feldespato y X_Q la fracción de cuarzo, respectivamente, en los componentes originales.

La tabla 2 demuestra que las regresiones eran significativas hasta un nivel de confianza de 5%.

Propiedad de respuesta	Modelo ajustado	SS _{Efect}	df _{Efect}	MS _{Efect}	SS _{Error}	df _{Error}	MS _{Error}	F	valor p
ODA (% en peso)	Lineal	0.1402	2	0.0700	0.0207	5	0.0041	4.7853	0.0689
RSH		0.1028	2	0.0514	0.0537	5	0.0107	16.918	0.0059

Tabla 2. Análisis de la varianza para los modelos polinomios lineales para ODA y RSH.

La fracción de mineral arcilloso aumenta el consumo del desfloculante, mientras que las fracciones en peso del feldespato y del cuarzo actúan de una manera antagónica. Según la bibliografía^[10,11], los cristales del mineral arcilloso se caracterizan por la presencia del intercambio catiónico debido a las áreas no saturadas que proceden de las uniones quebradas de las valencias. Estas características influyen directamente en la cantidad de dispersante necesaria para estabilizar una suspensión cerámica. Por otra parte, a partir de la regresión de RSH, las fracciones en peso del feldespato y del cuarzo aumentan la altura de la sedimentación, debido a su densidad más alta, cerca de 2.55 y 2.65 g/cm³, respectivamente^[12].

La figuras 2 (a) y (b) presentan las proyecciones de las superficies constantes calculadas (en pseudocomponentes) sobre el triángulo de la composición, como representaciones del contorno constante de ODA y de RSH.

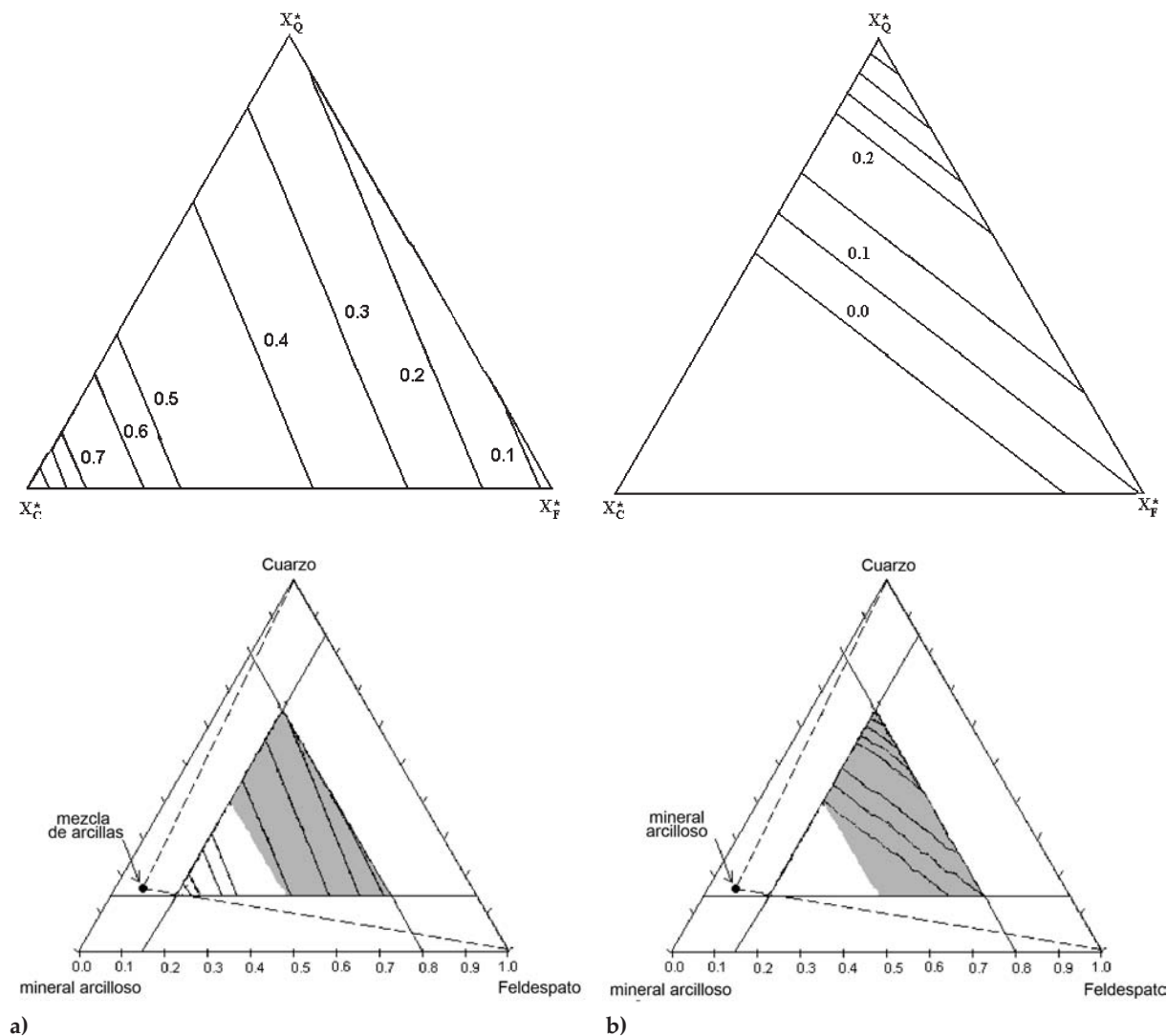


Figura 2. Las representaciones del contenido (a) de ODA y (b) de RSH en función de la composición, expresado en función de lo pseudocomponentes.

Se puede apreciar que es posible alcanzar cantidades más bajas de desfloculante ($ODA < 0.2$ % en peso) con el contenido de mineral arcilloso inferior a 20 % en peso (como materia prima). Sin embargo, no se observa ninguna sedimentación con el contenido de mineral arcilloso por encima de 50 % en peso. Por otra parte, la fracción de cuarzo presenta la mayor influencia en la altura de la sedimentación comparada con el feldespato.

Suponiendo que las materias primas estudiadas en este trabajo se van a utilizarse en un proceso vía húmeda, se puede poner un conjunto de limitaciones en los valores de ODA (≤ 0.2 % en peso) y de RSH (≤ 0.0). Este problema de optimización pretende encontrar un vector de las variables optimización, de X_C , de X_F y X_Q para minimizar la función objetiva, que es el coste:

$$\text{Coste} = 9.74X_C + 77.89X_F + 32.65X_Q \quad (3)$$

Al resolver el problema lineal, el vector encontrado que minimiza la función Coste seguido del sistema de restricciones ha sido:

$$\text{Minimizar (Coste, } X_C, X_F, X_Q) = [0.33, 0.48, 0.19]$$

En términos de los componentes originales, este resultado puede expresarse como 33.3 % en peso de mineral arcilloso, 47.8 % en peso de feldespato y 18.9 % en peso de cuarzo, presentando el coste más bajo de la producción de los soportes cerámicos (\$46.64/tonelada) seguida de las restricciones reológicas.

4. CONCLUSIONES

Los experimentos del diseño de mezclas y el uso de las metodologías de las superficies de respuesta han permitido calcular los modelos de regresión que relacionan las propiedades reológicas con la composición inicial. Por otra parte, el uso de la programación lineal demuestra que, para las materias primas concretas bajo consideración, se puede encontrar una composición optimizada, que permite minimizar el coste de los materiales, sometida a las restricciones impuestas por las normas de especificación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] DEGEN, A., KOSEC, M., ROCAK, D., Ceramic suspension optimization using factorial design of experiments, Journal of the European Ceramic Society, n. 22, p. 391-395, 2001.
- [2] FERNANDEZ, C., VERNÉ, E., VOGEL, J., CARL, G., Optimisation of the synthesis of glass-ceramic matrix bicomposites by the "response surface methodology", Journal of the European Ceramic Society, n. 23, p. 1031-1038, 2002.
- [3] BIEGLER, L.T., GROSSMANN, I.E., Retrospective on optimization, Computers and Chemical Engineering, n. 28, p. 1169-1192, 2004.
- [4] ADAMS, K.V. et al., Reformulation of whiteware bodies using characterization and linear programming methods and techniques, Ceramic Bulletin, n. 8, v. 63, p. 1039-1050, 1984.
- [5] PHELPS, G.W., Reformulation of whiteware bodies, American Ceramic Society Bulletin, n. 5, v. 55, p. 528-532, 1976.
- [6] COELHO, C., ROQUEIRO, N., HOTZA, D., Materials Letters, v. 52, p. 394, 2002.

- [7] GOMES, C.M., DE NONI JR., A., REIS, J.P., OLIVEIRA, A.P.N., HOTZA, D., American Ceramic Society Bulletin, november, p. 9301-9304, 2004.
- [8] PANDOLFELLI et al. Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico, São Paulo: Fazendo Arte, 2000.
- [9] CORREIA, S.L., CURTO, K.A.S., HOTZA, D., SEGADÃES, A.M., Journal of the European Ceramic Society, v. 24, 2813-2818, 2003.
- [10] POZZI, P. et al., La reologia dei materiali ceramici tradizionali, Faenza: Gruppo Editoriale Edritice, 1994.
- [11] YILDIZ, N., EROL, M., BARAN, B., SARIKAYA, Y., CALIMLI, A., Applied Clay Science, v.13, p. 65, 1998.
- [12] STEFANOV, S., BATSCHWAROV, S., Smalti Ceramici, Faenza Editrici, 1991.