



ESTUDIO DEL INCREMENTO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE CUERPOS CERÁMICOS PARA LOSETAS CERÁMICAS

STUDY OF THE INCREASE OF THE MECHANICAL RESISTANCE OF CERAMIC BODIES FOR CERAMIC TILES

A.S. González Fajardo^{1,*}, G. Vargas Gutiérrez²

¹ Universidad Nacional de Ingeniería. FIQ. Managua, Nicaragua.

*asdridgonzalez@hotmail.com

² Centro de Investigación y De Estudios Avanzados, Unidad Saltillo, Instituto Politécnico Nacional, Ramos Arizpe, Coah. México.

gregorio.vargas540726@gmail.com

(recibido/received:30-Enero-2019; aceptado/accepted: 13-Abril-2019)

RESUMEN

En el presente estudio se realiza una evaluación del efecto de cuatro aditivos sobre el cuerpo cerámico: ceniza volante, talco, caolín y feldespato; con el objetivo de determinar las mejores formulaciones que permitan desarrollar, después del ciclo térmico y sin modificaciones al proceso de producción actual de cierta empresa cerámica, microestructuras que incrementen la resistencia mecánica de losetas cerámicas de semigres. La obtención de las probetas cerámicas se llevó a cabo utilizando el procedimiento y la formulación propuesta por la empresa productora. Las propiedades estudiadas fueron porcentaje de contracción lineal, porcentaje de absorción de agua y resistencia mecánica a la flexión. Los ensayos correspondientes se realizaron de acuerdo con las normas correspondientes. El valor más alto de resistencia mecánica a la flexión resultó de 57,91 N/mm² correspondiente a probetas cerámicas con la formulación optimizada: cuerpo estándar más 2 % de talco y 2 % de caolín.

Palabras claves: Resistencia mecánica a la flexión; Semigres; Ceniza volante; Talco; Caolín; Feldespato.

ABSTRACT

In the present study an evaluation of the effect of four additives on the ceramic body is made: fly ash, talc, kaolin and feldspar; with the objective of determining the best formulations that allow to develop, after the thermal cycle and without modifications to the current production process of a certain ceramic company, microstructures that increase the mechanical resistance of semigres ceramic tiles. The obtaining of the ceramic test pieces was carried out using the procedure and the formulation proposed by the production company. The properties studied were linear contraction percentage, water absorption and mechanical resistance to bending. The corresponding tests were carried out in accordance with the corresponding standards. The highest value of mechanical resistance to bending was 57.91 N / mm² corresponding to ceramic specimens with the optimized formulation: standard body plus 2% talc and 2% kaolin.

Keywords: Mechanical resistance to bending; Semigres; Flying ash; Talc; Kaolin; Feldspar.

1. INTRODUCCIÓN

Las cualidades estéticas y funcionales de la cerámica han hecho de su uso un suceso universal. Su utilización en arquitectura, con diferentes fines, es muy antigua; uno de los más populares, y que tiene larga y extensa tradición, es el empleo de losetas cerámicas para revestir suelos y paredes, por lo tanto, el mercado relacionado con el mantenimiento y la renovación es especialmente relevante para estos productos.

Las losetas cerámicas están compuestas por variados materiales cerámicos, esencialmente arcillas y otras materias primas inorgánicas tales como cuarzo, feldspatos y carbonatos, siendo los aluminosilicatos hidratados (arcillas) las materias primas más importantes (Celik, 2010). Al estar compuestas por materias primas abundantes y de gran acceso en diferentes regiones, ya son varios los países que las producen en una amplia gama. Por tal razón, este sector industrial se está desarrollando en todo el mundo a un ritmo creciente; según Stock (2012) la producción de losetas cerámicas alcanzó los 300 millones de m²/ año y de acuerdo con Machinery Economics Studies por ACIMAC (2017) la producción ha superado los 10 mil millones de m² en 2012, llegando a alcanzar los 13 mil millones de m² en 2016. Su progresiva demanda es producto de las economías crecientes, la urbanización, la expansión poblacional, mayores ingresos y gasto per cápita, entre otros.

La ciencia y tecnología de losetas cerámicas está en constante evolución, con el fin de crear mejoras en los productos y satisfacer las necesidades del público. En la actualidad, la empresa cerámica está llevando a cabo una intensa labor para desarrollar revestimientos cerámicos con altas propiedades mecánicas. Esto se puede lograr mediante el control de la composición de la mezcla inicial, el ciclo de tratamiento térmico, reducción de defectos, entre otros.

La resistencia mecánica a la flexión es una de las propiedades de gran importancia en losetas cerámicas. La inclusión de ciertos aditivos, desde la preparación de las materias primas, podría presentar efectos significativos sobre esta propiedad, dando lugar a pavimentos cerámicos con resistencias mecánicas mejores a las existentes en las normas. Para conocer el efecto (positivo o negativo) que producen los aditivos en esta propiedad se debe recurrir en la práctica a la formulación de pastas cerámicas que los contengan y que cumplan con las propiedades funcionales de los revestimientos cerámicos.

El propósito de este trabajo investigativo pretendía estudiar diferentes formulaciones del cuerpo cerámico base con ciertos aditivos, las cuales permitan desarrollar, después del ciclo térmico y sin modificaciones a las instalaciones actuales del proceso de producción, microestructuras que permitan incrementar la resistencia mecánica a la flexión de las losetas cerámicas. Los aditivos incorporados en las formulaciones de las pastas fueron: ceniza volante, talco, caolín y feldespato. Se seleccionó estos aditivos debido a que aportan componentes para la formación de fases líquidas durante la etapa de cocción, por lo cual contribuyen a la formación de menor porosidad. Sin embargo, definir las proporciones adecuadas de estos aditivos es de gran interés por los costos que estos representan.

La incorporación de aditivos a la composición de la mezcla inicial que contribuyan a la reducción de la porosidad y a una buena densificación de la pieza podría brindar no solo mejores propiedades mecánicas e incluso menores temperaturas de sinterización, sino además un menor impacto ambiental al utilizar materiales de desecho, como la ceniza volante.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Una loseta cerámica es una placa fina hecha de arcillas y/u otros materiales inorgánicos calcinados a temperatura suficiente como para desarrollar las propiedades requeridas (ISO 13006, 2012).

La formulación del cuerpo cerámico base (protegida bajo secreto industrial), las materias primas (A, B, C, D, E, F) y los aditivos (Ceniza Volante, Talco, Caolín y Feldespato) fueron suministrados por la empresa beneficiaria y se utilizaron sin más tratamientos previos que los efectuados en su planta de producción, a excepción de la ceniza volante la cual tuvo un previo tratamiento térmico a 900 °C.

2.2 Métodos

El procedimiento de obtención de las probetas cerámicas de semigres se presenta en la Figura 1. Las losetas cerámicas fueron prensadas en seco, y posteriormente fueron sinterizadas a una velocidad de 5 °C /min hasta alcanzar una temperatura de 1150 °C (tiempo de residencia a la temperatura máxima igual a 15 minutos).

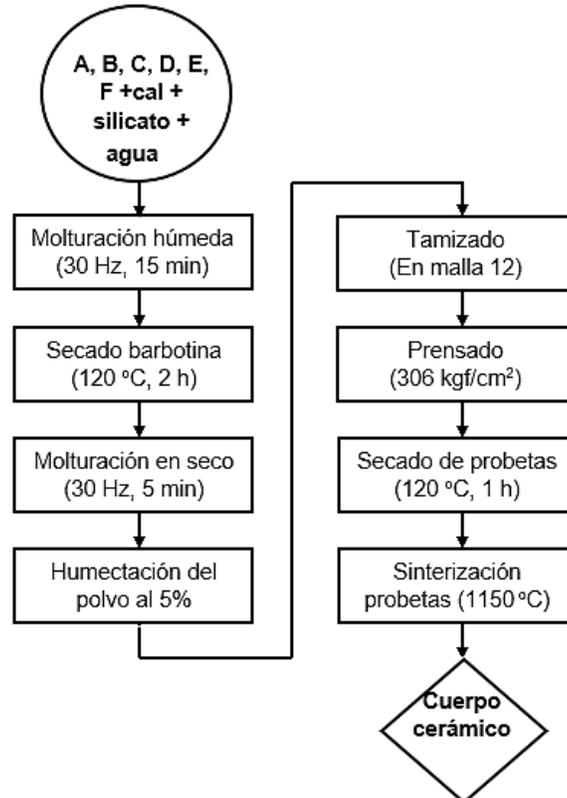


Figura 1. Obtención de probetas de cuerpo cerámico estándar.

- Determinación de las propiedades físicas y mecánicas:

El *porcentaje de absorción de agua* (%A.A) de las probetas cerámicas se determinó de acuerdo con la norma ISO 10545-3. Se aplicó la Ecuación (1), donde: m_m , masa de la probeta húmeda a las condiciones de saturación; m_s , masa de la probeta seca.

$$\%A.A = \frac{m_m - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

La *resistencia mecánica a la flexión* (RMF) se determinó de acuerdo con la norma ISO 10545-4. Se utilizó una máquina de ensayo universal para realizar las pruebas de flexión en 3 puntos en un tramo de 70 mm con una velocidad transversal de 0.5 mm/min. La resistencia (σ) se obtuvo con la Ecuación (2), donde: F, carga (N); L, longitud entre varillas (mm); b, ancho de probeta (mm); y h, espesor mínimo de la loseta (mm).

$$\sigma = \frac{3FL}{2b^2} \quad (2)$$

La contracción lineal (%C.L) de las muestras sinterizadas, se determinó con la Ecuación (3) de acuerdo con la norma ASTM C326-03, donde: L_p y L_q son las longitudes laterales (mm) de las muestras verde y sinterizada, respectivamente, según lo medido con un calibrador Vernier digital.

$$\%C.L = \frac{L_p - L_q}{L_p} \times 100 \quad (3)$$

Todas las pruebas se realizaron por triplicado e incluyeron probetas de cuerpo cerámico estándar (ST) como muestra testigo o de referencia. Para los resultados se presentan los valores medios.

- Diseño experimental:

Para lograr probetas con altos valores de resistencia mecánica a la flexión primero se realizaron pruebas exploratorias con los aditivos en un intervalo de porcentajes determinado. La segunda etapa consistió en desarrollar, con ayuda del software Minitab17, un diseño experimental Taguchi con los cuatro aditivos: cuatro factores de dos niveles cada uno, en ocho corridas (Tabla 1). El nivel 1 corresponde al porcentaje al que se presentaron los mejores resultados de resistencia mecánica a la flexión en las pruebas exploratorias. Por su parte el nivel 2 corresponde a no añadir aditivo. Finalmente, con base en resultados del diseño Taguchi se utilizó el programa Minitab17 para obtener la formulación optimizada (RO) con la cual se obtendría la resistencia mecánica a la flexión más alta.

Tabla 1. Factores y niveles para el diseño Taguchi.

Factores	Nivel 1 (%)	Nivel 2 (%)
Ceniza	2	0
Talco	2	0
Caolín	2	0
Feldespató	2	0

- Caracterización microestructural y química:

El uso de técnicas de análisis instrumental como análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB), análisis por difracción de rayos X (DRX) y análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) permitió: observar la morfología superficial de las probetas cerámicas con mejores resultados de resistencia mecánica, conocer cualitativamente las fases cristalinas generadas durante el proceso de sinterización y determinar la presencia cualitativa de los elementos presentes en el cuerpo cerámico, respectivamente, de las probetas con mejores resultados de resistencia mecánica a la flexión.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas exploratorias se realizaron en proporciones de 2, 4, 6 y 8 % para ceniza volante y 1, 2, 3 y 4 % para talco y caolín. Se determinó que al 2% de los tres aditivos se obtuvieron resultados de resistencia mecánica a la flexión (RMF) y porcentaje de absorción de agua (%A.A) que cumplen con los valores establecidos por las normas para tales parámetros (22 N/mm² y 3% < E < 6%, respectivamente); aunque para el talco la absorción de agua (%A.A) resultó un poco por debajo del valor normado. Con base en esto y considerando los costos adicionales que representa la inclusión de estos aditivos, se seleccionó también el 2% para las pruebas con feldespató. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas exploratorias al añadir 2% de los cuatro aditivos.

Tabla 2. Resultados de las pruebas exploratorias al añadir 2% de los aditivos.

Aditivo al 2%	Contracción Lineal (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia Mecánica a la Flexión (N/mm ²)
ST	7,22	3,95	48,43
Ceniza	6,61	4,12	42,84
Talco	7,46	2,44	45,15
Caolín	6,41	5,22	48,65
Feldespatos	6,62	5,43	48,80

Posteriormente se realizó el diseño Taguchi con los cuatro aditivos al 2 %, para determinar el grado de influencia de cada factor y así encontrar las mejores formulaciones que proporcionen un aumento en la RMF. En la Tabla 3 se muestra el arreglo ortogonal L8 el cual fue la matriz del diseño experimental utilizado.

Tabla 3. Arreglo ortogonal L8 del diseño Taguchi.

Muestra	Ceniza (%)	Talco (%)	Caolín (%)	Feldespatos (%)
T1	2	2	2	2
T2	2	2	2	0
T3	2	0	0	2
T4	2	0	0	0
T5	0	2	0	2
T6	0	2	0	0
T7	0	0	2	2
T8	0	0	2	0

Fuente: Minitab17

A partir de estas pruebas, y por recomendación de la empresa beneficiaria, se redujo la cantidad de material empleado para conformar cada probeta cerámica de 40 g a 30 g. Esto tenía como objetivo reducir el espesor de las probetas, pues en planta las losetas de producción tienen un espesor de 7 mm ya esmaltadas. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las propiedades físicas y mecánicas de los experimentos realizados de acuerdo con el diseño Taguchi.

Tabla 4. Resultados de los experimentos realizados de acuerdo con el diseño Taguchi.

Muestra	Contracción Lineal (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia Mecánica a la Flexión (N/mm ²)
ST	7,22	3,87	51,06
T1	8,78	5,94	56,99
T2	8,28	2,86	61,37
T3	8,26	4,55	51,99
T4	6,37	5,48	43,34
T5	8,16	1,51	67,84
T6	8,81	0,55	59,00
T7	7,60	3,97	53,18
T8	5,57	7,20	45,31

Se observó que los mejores resultados de RMF, que cumplen con el %A.A según la norma ISO 10545-3, corresponden a las muestras T4, T3, T7 y T1 con valores de 43,34, 51,99, 53,18 y 56,99 N/mm² respectivamente. El menor %C.L fue de 5,57 % perteneciente a la muestra T8, lo cual coincide con su alto valor de absorción de agua (7,20%). El %A.A de las muestras T2, T5 y T6 resultó inferior al mínimo normado (3%). Sin embargo, al presentar estas probetas los valores más altos de resistencia mecánica a la flexión (Figura 2) se repitió dichas pruebas para verificar los datos.

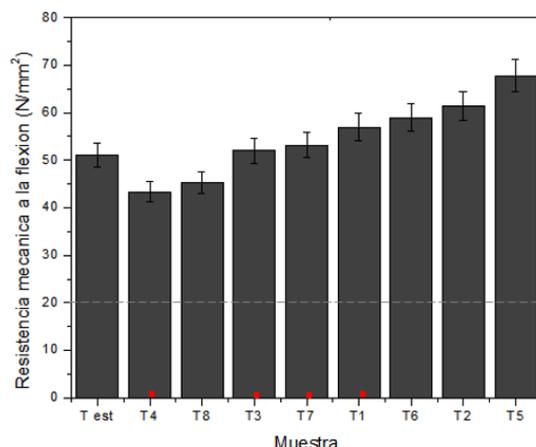


Figura 2. Resultados experimentales de resistencia mecánica a la flexión (RMF).

La formulación optimizada (RO) propuesta por Minitab17 corresponde a cuerpo cerámico estándar + 2% talco + 2% caolín. Tal formulación presentó la resistencia mecánica a la flexión más alta. Los datos obtenidos de la repetición de los tres resultados Taguchi y la formulación optimizada (RO) se muestran en la Tabla 5. Se reasignaron los nombres a las muestras: “T1”, “T2” y “T3” para los resultados Taguchi T2, T5 y T6 respectivamente; T4 para la formulación optimizada.

Tabla 5. Tres mejores resultados de RMF según Taguchi y RO.

Muestra	Contracción Lineal (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia Mecánica a la Flexión (N/mm ²)
ST	6,76	4,24	52,04
T1	7,36	4,42	56,06
T2	5,95	4,54	56,67
T3	7,55	3,02	57,73
T4	6,70	4,21	57,91

Se registraron valores de contracción lineal entre 5 y 8 % y se observó que los valores de absorción de agua (%A.A) de todas las muestras se encuentran dentro de los valores establecidos por la norma ISO 10545-3 (3% < E < 6%). En cuanto a la resistencia mecánica a la flexión (RMF), se obtuvieron valores superiores al mínimo normado en ISO 10545-4 (22 N/mm²). Se comprobó que la formulación optimizada “T4” brindó la resistencia mecánica a la flexión más alta, con un valor de 57,91 N/mm².

En la Tabla 6 se presenta el análisis por FRX de las muestras. La interpretación de datos se realizó utilizando el software SPECTRA plus. Se identificó para las cinco muestras altas concentraciones de sílice, con aproximadamente 65% en peso, seguido de alúmina en una menor proporción (aprox. 15% e.p.) y en tercer lugar Fe₂O₃, con 7% e.p., el cual es el responsable del color rojizo del cuerpo cerámico.

Tabla 6. Composición química en porcentaje en peso.

Muestra	ST	T1	T2	T3	T4
Óxido					
SiO ₂	65,38	64,99	64,99	65,01	65,34
Al ₂ O ₃	14,48	15,05	15,05	14,31	14,62
Fe ₂ O ₃	7,61	7,50	7,50	7,74	7,39

Fuente: Laboratorio de análisis químico CINVESTAV. Unidad Saltillo

Las principales fases cristalinas presentes en las cinco muestras se identificaron mediante DRX con el software X'pert (Figura 3). Las fases corresponden a cuarzo (SiO_2); alúmina presente como albita baja en calcio ($\text{Na}_{0.84}\text{Ca}_{0.16}(\text{Al}_{1.16}\text{Si}_{2.84}\text{O}_8)$); y hematita (Fe_2O_3). Los resultados concuerdan con el análisis por FRX. No se presentó diferencia notable entre el difractograma del cuerpo estándar y las cuatro muestras. Esto podría atribuirse a que, a pesar de la diferente formulación de las muestras, el porcentaje de aditivos no fue tan significativo para generar cambios en la estructura cristalina del cuerpo cerámico.

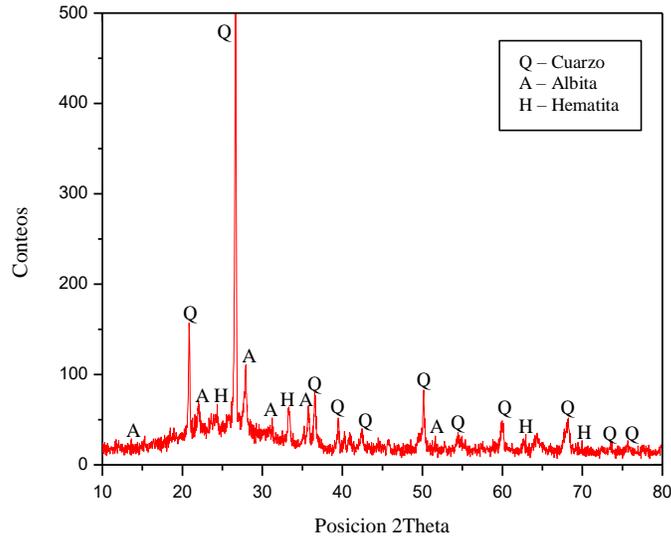


Figura 3. Difractograma de las fases cristalinas presentes en las cinco muestras indicadas en las Tablas 5 y 6.

En las micrografías de las cinco muestras (Figura 4) se aprecia la morfología superficial, la cual indica que se trata de cuerpos cerámicos completamente heterogéneos, al distinguirse zonas con tonalidades muy marcadas y diferenciadas. El análisis por MEB permitió observar que la porosidad disminuía en las diferentes muestras. En la muestra T4 se presentan poros más pequeños que los existentes en las demás muestras. Las áreas que rodean estos poros están bien densificadas, lo cual justifica que hayan sido las probetas con el mejor resultado de resistencia mecánica a la flexión.

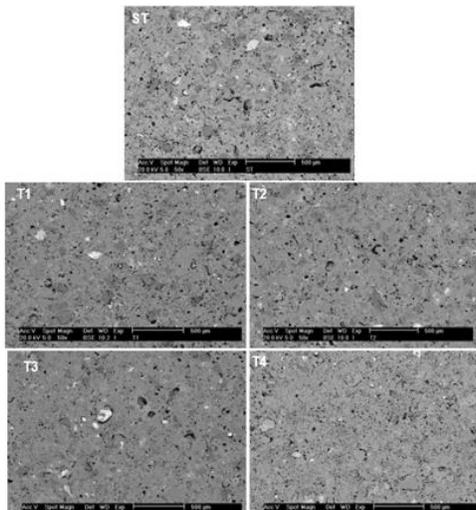


Figura 4. Micrografías del cuerpo cerámico estándar y de las cuatro muestras con mejores resistencias mecánicas.
Fuente: Laboratorio de Microscopía electrónica de barrido. CINVESTAV. Unidad Saltillo

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han presentado contribuciones relacionadas al mejoramiento de la resistencia mecánica a la flexión (RMF) de cuerpos para losetas cerámicas mediante el desarrollo de formulaciones con 4 diferentes aditivos (ceniza volante, talco, caolín y feldespato), los cuales aportan a la formación de fase líquida, la cual reduce la porosidad y provoca una buena densificación de la pieza. Con base en los resultados experimentales se concluye que:

- A un 2% los 4 aditivos presentaron resultados satisfactorios para la realización de un diseño experimental tipo Taguchi.
- Los 3 mejores valores de resistencia mecánica a la flexión (RMF) del diseño Taguchi resultaron superiores al valor mínimo establecido por la norma ISO 10545-4 para losetas del grupo BII_a (22 N/mm²) y fueron de 56,06, 56,67 y 57,73 N/mm², dichas muestras también cumplen con el porcentaje de absorción de agua requerido para losetas de semigres (3 % < E < 6 %).
- Las 3 muestras correspondientes a los mejores resultados de resistencia mecánica a la flexión del diseño Taguchi y la muestra de la formulación optimizada revelaron gran similitud entre sí, tanto para composición química, como para fases cristalinas y morfología superficial, esto de acuerdo con los análisis realizados por MEB, DRX y FRX.
- El incremento de la resistencia mecánica a la flexión de cuerpos cerámicos de semigres se logró gracias a la formulación optimizada, correspondiente a cuerpo cerámico estándar + 2 % talco + 2 % caolín, con la cual se alcanzó un valor de resistencia de 57,91 N/mm² el cual superó en un 163% al valor mínimo establecido por la norma ISO 10545-4 para losetas de semigres (22 N/mm²), aún cumpliendo con las normas establecidas para esta tipología de losetas cerámicas.

REFERENCIAS

- Celik, H. (2010). Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry. *Applied Clay Science*, 50(2), 245-254.
- Stock, D. (2012). World production and consumption of ceramic tile. *Tile Today*, 77, 30-37.
- Machinery Economics Studies. (2017). World production and consumption of ceramic tiles. ACIMAC, 1-8.
- Norma ASTM C326-03 (2003). Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays.
- Norma ISO 13006 (2012). Ceramic tiles -- Definitions, classification, characteristics and marking.
- Norma ISO 10545-3 (1995). Ceramic tiles -- Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density.
- Norma ISO 10545-4 (2014). Ceramic tiles -- Part 4: Determination of modulus of rupture and breaking strength.

SEMBLANZA DE LOS AUTORES



Asdril S. González Fajardo: Obtuvo el grado de Ingeniero Químico en la Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua en el año 2018. Realizó una estancia de investigación en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Saltillo donde desarrolló su tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Químico, esto gracias al convenio de cooperación entre UNI y CINVESTAV-IPN.



Gregorio Vargas Gutiérrez: Obtuvo el grado de Doctor en Ciencia de Materiales en el año 1981 en el Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, Francia. Ejerció como director en CINVESTAV - Unidad Saltillo y CIMAV - Monterrey. Actualmente es investigador Titular Cinvestav 3C con nivel II del sistema nacional de investigadores (SNI-CONACYT) de México. Amplia experiencia en Recubrimientos y materiales funcionales, almacenamiento térmico de energía y colectores solares.