

APLICACIONES DE LOS NUTRIENTES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA

Jorge Sánchez Molina
Francisco Antonio Corpas
Diana Carolina Álvarez Rozo



Universidad
Francisco de Paula Santander

**APLICACIONES
DE LOS NUTRIENTES
TECNOLÓGICOS EN LA
INDUSTRIA CERÁMICA
DEL ÁREA METROPOLITANA
DE CÚCUTA**

JORGE SÁNCHEZ MOLINA
FRANCISCO ANTONIO CORPAS IGLESIAS
DIANA CAROLINA ÁLVAREZ ROZO

Aplicaciones de los nutrientes tecnológicos en la industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta / Jorge Sánchez Molina, Francisco Antonio Corpas, Diana Carolina Álvarez Rozo.
-- 1a. ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones : Universidad Francisco de Paula Santander, 2019.
184 p. -- (Ingeniería y salud en el trabajo. Ingeniería)


"Incluye: Avances en el uso de residuos orgánicos e inorgánicos en materiales cerámicos de construcción. Interesantes propiedades tecnológicas de los materiales cerámicos obtenidos. Incidencia ambiental de los materiales de construcción sostenible" -- Contiene: complemento virtual SIL (Sistema de Información en Línea) www.ecoedediciones.com. -- Incluye datos biográficos de los autores. -- Contiene bibliografía.

ISBN 978-958-771-704-4

1. Industria cerámica – Cúcuta 2. Industria de la arcilla – Cúcuta 3. Aprovechamiento de residuos industriales I. Corpas, Francisco Antonio II. Álvarez Rozo, Diana Carolina III. Título IV. Serie

CDD: 691.4 ed. 23

CO-BoBN- a1038583

 **Colección:** Ingeniería y salud en el trabajo
Área: Ingeniería

ECOE
EDICIONES

UF
PS
Universidad
Francisco de Paula Santander

- ▶ Jorge Sánchez Molina
- ▶ Francisco Antonio Corpas
- ▶ Diana Carolina Álvarez Rozo

© Ecoe Ediciones Limitada.
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 248 14 49
Bogotá, Colombia

© Universidad Francisco
de Paula Santander
Avenida Gran Colombia
No. 12E-96 Barrio Colsag
San José de Cúcuta - Colombia
Teléfono (057)(7) 5776655

Primera edición: Bogotá, diciembre de 2018

ISBN: 978-958-771-704-4

Coordinación editorial: Angélica García Reyes
Corrección de estilo: Juan Mikan
Diagramación: Alfonso Álvarez
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz
Impresión: DGP Editores
Calle 63 # 70 D -34

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

A mi madre Rosa Mery Molina por su comprensión y voz de aliento en cada momento de mi vida.

A mi esposa Yaneth Zúñiga, y mi hija, Jessica Viviana Sánchez Zúñiga, por su amor y apoyo en mis labores diarias y por ser la motivación para alcanzar los objetivos propuestos.

Jorge Sánchez Molina

A mi esposa Magdalena, inspiración de mis labores diarias.

Francisco A. Corpas Iglesias

A mi madre, mi maestra de vida, por formarme en valores y con principios éticos, por su amor incondicional, por acompañarme en cada etapa de mi vida.

Diana C. Álvarez Rozo

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Jaén, en especial a la Escuela Politécnica Superior de Linares, por la orientación hacia el empleo de los nutrientes tecnológicos en la industria cerámica. Al Grupo TEP-222 por su apoyo en la realización de esta investigación y por permitir la realización de ensayos en sus laboratorios.

A la Universidad Francisco de Paula Santander, en especial al Centro de Investigación de Materiales Cerámicos (CIMAC), el cual cuenta con la infraestructura y equipos necesarios para la realización de ensayos de esta investigación. Al Grupo de Investigación en Tecnología Cerámica (GITEC), en donde se han realizado numerosas investigaciones dirigidas a mejorar el sector cerámico de la región, logrando articular la relación universidad-empresa-Estado.

CONTENIDO

PREFACIO	XXIII
RESUMEN	XXVII
ABSTRACT	XXIX
INTRODUCCIÓN	XXXI
CAPITULO I. INCORPORACIÓN DE LOS NUTRIENTES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA DEL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA DE CÚCUTA	1
1. La industria cerámica del área metropolitana de Cúcuta	1
1.1 Distribución geográfica de las industrias cerámicas	2
2. Economía circular	4
2.1 Generación de residuos industriales y el rol de la economía circular	4
2.2 Principios y aplicación de la economía circular	5
2.3 La economía circular en la industria manufacturera	6
2.4 Nutrientes tecnológicos en la industria cerámica	7

3. Procesos industriales de donde se generan los nutrientes tecnológicos empleados	8
3.1 Proceso productivo del arroz	8
3.2 Proceso productivo del café	10
3.3 Proceso productivo de la central termoeléctrica	11
3.4 Proceso de fabricación de productos cerámicos	13
4. Nutrientes tecnológicos producidos en la región	17
4.1 Residuos orgánicos	17
4.2 Residuos inorgánicos	22
4.3 Importancia del uso de residuos como nutrientes tecnológicos en la industria cerámica	28
4.3.1 Residuos orgánicos	28
4.3.2 Residuos inorgánicos	28
5. Investigaciones realizadas en el entorno internacional y nacional	30
CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS DE LAS MATERIAS PRIMAS EMPLEADAS	37
6. Material arcilloso	37
7. Cascarilla de arroz	38
8. Cisco de café	39
9. Cenizas volantes de central termoeléctrica	39
10. Inquemados del proceso de cocción en horno colmena en la industria cerámica regional	40
11. Proceso cerámico realizado	40
11.2 Formulación de pastas	40
11.3 Secado de las piezas cerámicas	42
11.4 Cocción	43
12. Técnicas de caracterización de materiales	43

13. Normas usadas para el establecimiento de las propiedades tecnológicas	45
14. Metodología para la selección de la pasta de mejor comportamiento	45
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	47
15. Arcilla La Alejandra	47
15.1 Localización del material arcilloso	47
15.2 Caracterización estructural	48
15.3 Caracterización química.....	50
15.4 Aspectos morfológicos y microquímica	51
15.5 Análisis termogravimétrico/calorimetría diferencial de barrido	53
16. Cascarilla de arroz	55
16.1 Caracterización estructural	55
16.2 Caracterización química	56
16.3 Caracterización morfológica	57
16.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica	57
17. Cisco de café	58
17.1 Caracterización estructural	58
17.2 Caracterización química	59
17.3 Caracterización morfológica	60
17.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica	60
18. Cenizas volantes	62
18.1 Caracterización estructural	62
18.2 Composición química	63
18.3 Caracterización morfológica y microquímica	64
18.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica	65
19. Inquemados de carbón66
19.1 Caracterización estructural	66
19.2 Composición química	67
19.3 Caracterización microestructural.....	68
19.4 Caracterización termogravimétrica/calorimétrica	69

CAPÍTULO IV. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES TECNOLÓGICOS SOBRE LAS PRINCIPALES VARIABLES TECNOLÓGICAS DE UN MATERIAL CERÁMICO		71
20. Aspectos macroscópicos		72
21. Resultados de las propiedades tecnológicas evaluadas		78
22. Posibilidades de aplicación de los materiales cerámicos obtenidos		90
23. Selección de la pasta con mejor comportamiento en el proceso cerámico		92
 CAPÍTULO V. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO SOBRE LA MICROESTRUCTURA DEL MATERIAL CERÁMICO SELECCIONADO (CT10=)		93
 CAPÍTULO VI. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO TÉRMICO DEL MATERIAL		99
24. Simulación del comportamiento de un bloque hueco de arcilla con adición de cascarilla de arroz, cenizas volantes y cisco de café		102
24.1 Datos calculados		102
24.2 Procedimiento		104
24.3 Resultados.....		105
 CAPÍTULO VII. EFECTOS ENERGÉTICOS/AMBIENTALES DE LA PRESENCIA DEL NUTRIENTE TECNOLÓGICO EN EL MATERIAL CERÁMICO DE MEJOR COMPORTAMIENTO		109
25. La huella de carbono en el ámbito de la economía circular		109
26. La huella de carbono		111
26.1 Métodos de cálculo.....		113
26.1.1 Energía embebida		114
26.1.2 Metodología de cálculo de HdC y Ee de la aplicación de los nutrientes tecnológicos		115
27. Metodología para el cálculo de la huella de carbono		117

28. Reglas de Categoría de Producto	119
28.1 Establecimiento de límites y alcance	120
28.2 Definición de la unidad funcional/unidad declarada	120
28.3 Límites del sistema	121
28.3.1 Módulos incluidos dentro del estudio	122
28.3.2 Recogida de datos. Análisis de inventario	123
28.4 Datos de planta de extracción de arcillas	123
28.5 Datos de planta generadora de cenizas volantes	125
28.6 Datos de transporte de materias primas a planta de producción	126
28.7 Datos de planta de producción	128
28.8 Datos bibliográficos	133
28.9 Los factores de emisión.....	134
28.9.1 Combustible para elementos de transporte y extracción	134
28.9.2 Carbón térmico	135
28.9.3 El sector eléctrico en Colombia. <i>Mix</i> eléctrico	137
29. Análisis de los datos obtenidos.....	139
30.Efectos energéticos asociados al proceso de fabricación	140
30.1 Características de materias primas	141
30.2 Efecto sobre la energía embebida en el material cerámico	143
31. Evaluación de impactos. Proceso convencional	143
31.1 Clasificación y organización de datos	144
31.1.1 Extracción (A1)	145
31.1.2 Transporte a planta (A2)	145
31.1.3 Fabricación de productos (A3)	146
31.2 Resultados globales.....	149
31.3 Asignación a unidad declarada.....	150
32. Evaluación de impactos. Proceso innovador	151
32.1 Clasificación y ordenación	152
32.1.1 Extracción (A1)	152

32.1.2 Transporte a planta (A2)	152
32.1.3 Fabricación de productos (A3)	153
32.2 Resultados globales.....	155
32.3 Asignación a unidad declarada.....	156
32.4 Consideraciones finales	156
32.5 Análisis comparativo.....	156
CAPÍTULO VIII. EFECTO ECONÓMICO DEL USO DE NUTRIENTES TECNOLÓGICOS.....	159
33.Huella de carbono	160
33.1 Ejemplo con una empresa de la región	160
33.2 Aporte de inquemados.....	161
33.3 Efectos energéticos asociados al proceso de fabricación	161
33.4 Resumen de ahorro usando el nutriente tecnológico	162
CONCLUSIONES	163
FUTURAS INVESTIGACIONES.....	169
REFERENCIAS	171

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Diagrama de procesos de una arrocera (Burgos, 2011).....	8
FIGURA 2. Proceso productivo del café (Greenberg, 2014).....	10
FIGURA 3. Diagrama funcional del generador de vapor de la central termoeléctrica (López, Tarantino & Aranguren, 2010).....	12
FIGURA 4. Frente de explotación de la materia prima.....	14
FIGURA 5. Trituración y molienda de la materia prima (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	15
FIGURA 6. Humectación y moldeo (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	15
FIGURA 7. Secado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	16
FIGURA 8. Cocción en el horno colmena.....	17
FIGURA 9. Material arcilloso proveniente de la mina y molido pasante malla 18.....	38
FIGURA 10. Aspecto macroscópico de la cascarilla de arroz.....	38
FIGURA 11. Aspecto macroscópico del cisco de café.....	39
FIGURA 12. Aspecto macroscópico de la ceniza proveniente de termoeléctrica.....	39
FIGURA 13. Aspecto macroscópico de los inquemados del horno colmena.....	40
FIGURA 14. Registro fotográfico de la extrusora usada para el conformado de las probetas.....	42
FIGURA 15. Estufa de secado.....	42
FIGURA 16. Horno empleado para la cocción de las probetas.....	43
FIGURA 17. Mina donde se realizó la explotación del mineral arcilloso.....	47
FIGURA 18. Patrón de difracción de rayos X de la muestra arcillosa.....	49
FIGURA 19. Microfotografía (MEB) del material arcilloso.....	51
FIGURA 20. Perfiles TG y DTG del material arcilloso (atmósfera de aire).....	53
FIGURA 21. Perfil DSC del material arcilloso (atmósfera de aire).....	54
FIGURA 22. Patrón de difracción de rayos X de la cascarilla de arroz.....	55
FIGURA 23. Microfotografías (MEB) de la cascarilla de arroz.....	57

FIGURA 24. Perfiles TG y DTG de la cascarilla de arroz (atmósfera de aire).....	57
FIGURA 25. Perfil DSC de la cascarilla de arroz (atmósfera de aire).....	58
FIGURA 26. Patrón de difracción del cisco de café.....	59
FIGURA 27. Microfotografías (MEB) del cisco de café.....	60
FIGURA 28. Perfiles TG y DTG del cisco de café (atmósfera de aire).....	61
FIGURA 29. Perfil DSC del cisco de café (atmósfera de aire).....	61
FIGURA 30. Patrón de difracción de la ceniza volante.....	62
FIGURA 31. Microfotografías (MEB) de la ceniza volante.....	64
FIGURA 32. Perfiles TG y DTG de la ceniza volante (atmósfera de aire).....	65
FIGURA 33. Perfil DSC de la ceniza volante (atmósfera de aire).....	66
FIGURA 34. Patrón de difracción de rayos X de los inquemados de carbón.....	67
FIGURA 35. Microfotografías (MEB) de los inquemados procedentes del horno colmena.....	68
FIGURA 36. Perfiles TG y DTG de los inquemados del carbón (atmósfera de aire).....	70
FIGURA 37. Perfil DSC de los inquemados del carbón (atmósfera de aire).....	70
FIGURA 38. Aspecto de los cerámicos elaborados con solo material arcilloso (MA).....	72
FIGURA 39. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y ceniza volante como material sustituto.....	72
FIGURA 40. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso e inquemados de carbón como material sustituto.....	73
FIGURA 41. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cisco de café como material sustituto.....	74
FIGURA 42. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cascarilla de arroz pasante malla 16 como material sustituto.....	75
FIGURA 43. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto.....	76
FIGURA 44. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAc) como material sustituto.....	77

FIGURA 45. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con ceniza volante (CT) como material sustituto	86
FIGURA 46. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con inquemados de carbón de horno colmena (IC) como material sustituto	86
FIGURA 47. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cisco de café (CC) como material sustituto	87
FIGURA 48. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 16 (CAa) como material sustituto.....	88
FIGURA 49. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto	88
FIGURA 50. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAc) como material sustituto.....	89
FIGURA 51. Patrón de difracción de rayos X del material arcilloso	94
FIGURA 52. Patrón de difracción de rayos X con la adición del 10% de cenizas volantes	94
FIGURA 53. Microscopia Electrónica de barrido para MA100 and MA90 a diferentes temperaturas (2000X).....	97
FIGURA 54. Distribución de temperatura a lo largo de los puentes térmicos...	106
FIGURA 55. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café	106
FIGURA 56. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café.....	107
FIGURA 57. Vista isométrica: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café	107
FIGURA 58. Vista lateral: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café.....	108
FIGURA 59. Vista superior: a) arcilla; b) cenizas volantes; c) cascarilla de arroz; d) cisco de café	108
FIGURA 60. Reparto de las emisiones de GEI en países industrializados (Gelves et al., 2013).....	112

FIGURA 61. Pasos para el cálculo de la HdC (PAS 2050:2011)	115
FIGURA 17. Etapa de definición de alcance y límites en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011)	120
FIGURA 18. Esquema de proceso de fabricación y entradas en el sistema	122
FIGURA 19. Etapa de análisis de inventario en el proceso de cálculo (PAS 2050:2011)	123
FIGURA 20. Localización del área de extracción de arcillas	124
FIGURA 21. Área de extracción de arcillas (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)	125
FIGURA 22. Carga de arcillas para transporte a planta (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)	125
FIGURA 23. Vista de la central termoeléctrica (Termotasajero S.A. E.S.P., 2008)	126
FIGURA 24. Modelo de volqueta utilizado en el estudio	127
FIGURA 25. Distancia desde la central termoeléctrica a la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap)	128
FIGURA 26. Ubicación de la ladrillera del sector cerámico (ArcGIS webmap)	129
FIGURA 27. Carga de arcillas en tolva (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	130
FIGURA 28. Entrada de productos en el secadero de cámaras (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)	131
FIGURA 29. Hornos colmena y carga de carbón en hornos (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016).....	131
FIGURA 30. Empacado de producto acabado (Ladrillera Casablanca S.A.S., 2016)	132
FIGURA 31. Carga de carbón (inferior) para transporte a planta (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2003)	136
FIGURA 32. Distribución de sistemas de generación de electricidad en Colombia (UPME, 2010)	137
FIGURA 33. Matriz eléctrica por capacidad instalada (UPME, 2017)	138
FIGURA 34. Perfil TG de la pasta CT10 (atmósfera de aire).....	142

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Empresas productoras de arroz de Cúcuta.....	18
TABLA 2. Parámetros de los diferentes tipos de arroz.....	18
TABLA 3. Caracterización física de la cascarilla de arroz	19
TABLA 4. Caracterización química de la cascarilla de arroz	19
TABLA 5. Residuos obtenidos en el proceso de beneficio e industrialización del café.....	21
TABLA 6. Composición química del cisco de café.....	21
TABLA 7. Composición química de diferentes cenizas volantes.....	24
TABLA 8. Rangos normales de la composición química de las cenizas volantes producidas por diferentes tipos de carbón	25
TABLA 9. Especificaciones para las cenizas según norma ASTM C618.....	26
TABLA 10. Características de los inquemados	27
TABLA 11. Comportamiento físico mecánico de bloques de arcilla con adición de inquemados.....	30
TABLA 12. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno internacional.....	32
TABLA 13. Principales investigaciones evidenciadas en el entorno nacional ...	34
TABLA 14. Formulación de las pastas cerámicas usando nutrientes tecnológicos.....	41
TABLA 15. Composición estructural del material arcilloso	49
TABLA 16. Composición química del material arcilloso (FRX).....	50
TABLA 17. Microquímica de algunos granos presentes en el material arcilloso (% atómico)	52
TABLA 18. Composición estructural de la cascarilla de arroz (% peso).....	56
TABLA 19. Composición química de la cascarilla de arroz.....	56
TABLA 20. Composición estructural del cisco de café.....	59
TABLA 21. Composición química del cisco de café.....	59
TABLA 22. Composición estructural de la ceniza volante de termoeléctrica....	62
TABLA 23. Composición química de la ceniza volante de termoeléctrica	63

TABLA 24. Microquímica de algunas partículas presentes en la ceniza volante (% atómico).....	64
TABLA 25. Composición estructural de los inquemados de carbón en horno colmena.....	67
TABLA 26. Composición química de los inquemados del carbón.....	67
TABLA 27. Microquímica de algunas partículas presentes en los inquemados del carbón (% atómico)	69
TABLA 28. Consolidado de los resultados de contracción de secado para los materiales conformados con los diferentes tipos y concentraciones de nutriente	78
TABLA 29. Consolidado de los resultados de contracción lineal de cocción....	80
TABLA 30. Consolidado de la prueba de porcentaje de absorción de agua.....	81
TABLA 31. Consolidado de los resultados de resistencia mecánica a la flexión.....	82
TABLA 32. Consolidado de pruebas de resistencia a la abrasión profunda	84
TABLA 33. Valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos obtenidos con las pastas de mejor comportamiento.....	90
TABLA 34. Requisitos de baldosas cerámicas.....	91
TABLA 35. Composición microestructural de los materiales cerámicos MA100 y CT10 a diferentes temperaturas (% peso)	94
TABLA 36. Variación de la conductividad térmica de MA100 and MA90 con incremento de temperatura.....	99
TABLA 37. Variación de la conductividad térmica (en probetas cilíndricas) de los cerámicos elaborados con el material CC5 al incrementar la temperatura de cocción.....	101
TABLA 38. Temperatura exterior e interior	105
TABLA 39. Potencial de calentamiento global de los GEI.....	112
TABLA 40. Mercados a nivel nacional e internacional.....	133
TABLA 41. Análisis comparativo de emisiones CO ₂ en Colombia por generación eléctrica (Sistema de Información Eléctrico Colombiano)	139
TABLA 42. Valores de HdC y Ee (módulos A1, A2 y A3).....	149
TABLA 43. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3).....	151

TABLA 44. Valores de HdC y Ee del proceso de fabricación innovador (módulos A1, A2 y A3).....	155
TABLA 45. Valores de HdC y Ee asignados a unidad declarada (módulos A1, A2 y A3).....	156
TABLA 46. Comparativa de valores de HdC y Ee obtenidos	157
TABLA 47. Ubicación de las empresas cerámicas del área metropolitana de Cúcuta	159
TABLA 48. Producto terminado (t/mes) y consumo de carbón (t/mes).....	159
TABLA 49. Productos fabricados (t/mes) y consumo de carbón (t/mes)	160
TABLA 50. Resumen de ahorro usando el nutriente tecnológico	162



PREFACIO

Quiero empezar el preámbulo de este libro, al que agradezco la invitación de prologar al Dr. Jorge Sánchez Molina, con esta reflexión de Primo Levi en *La ricerca delle radici*:

“¿Cuánto les deben nuestras raíces a los libros que hemos leído? Todo, mucho o nada: según el ambiente en el que hayamos nacido, la temperatura de nuestra sangre, el laberinto que la muerte nos ha asignado”.

Una de las principales características que nos caracteriza como especie humana es la de tener capacidad de aprendizaje permanente, un aprendizaje que nos ha servido para evolucionar en todos los aspectos de nuestra sociedad. En este sentido, los estudiosos de la ciencia y el saber han considerado que el instrumento por excelencia para conocer mejor cómo será el futuro tiene como su base el estudio de los fenómenos naturales, de comportamiento y de los elementos del universo. Entre los grandes pensadores, Aristóteles marca un hito en la historia de la ciencia griega por ser el último de su época que formuló un sistema del mundo en su conjunto, siendo a la vez el primero en embarcarse en investigaciones empíricas extensas.

La historia nos demuestra que se necesitan personas con esta filosofía de trabajo, comprometidas con su tierra, creadoras de redes de cooperación entre los distintos actores de la sociedad, empresas, universidad, administraciones públicas y entidades sociales para que se generen ideas y proyectos que tengan como

objetivo mejorar el presente y crear un mejor futuro para su ciudadanía. Dentro de este tipo de personas se puede encuadrar al profesor Jorge Sánchez Molina, que siempre se consideró “aristotélico” al creer que el nuevo aprendizaje debe basarse en la investigación, pero que esa investigación tenga como base filosófica la que nos dejó el gran Aristóteles, que promulgaba que el conocimiento debe de tener aplicación en la sociedad para procurar que esta sea lo más sostenible y cohesionadora posible.

En este sentido, desde hace más de 30 años ha dedicado su esfuerzo personal, profesional y académico al sector de la cerámica, consiguiendo hitos importantes que han contribuido de forma significativa a incrementar la generación de riqueza y valor compartido de este ámbito productivo en su querida Cúcuta y, por supuesto, en Colombia. Además, este trabajo cuenta con importantes aportaciones dentro del nuevo paradigma de lo que se denomina economía circular, un cambio de modelo productivo que conlleva a que los procesos de producción se hagan de distinta forma a la del modelo de economía lineal y que implica significativos cambios en todos los sectores productivos. Estoy seguro de que los lectores agradecerán entender los conceptos de nutrientes tecnológicos y utilizarán las referencias de este libro para plantear futuras investigaciones.

En este proceso permanente de aprendizaje e innovación, el profesor Sánchez decidió hacer la tesis doctoral en la Escuela Politécnica de Linares de España, un importante centro de docencia e investigación en materiales donde el Dr. Francisco Corpas Iglesias dirige el prestigioso grupo de investigación TEP-222 y el programa de doctorado en materiales que ha sido fundamental para generar el conocimiento de su tesis doctoral, lo que demuestra la importancia de creación de redes internacionales de investigación y cooperación universitaria y fortalecer la transmisión de los resultados de esta al sector productivo. A su vez, resalto el aporte de la ingeniera Diana Álvarez Rozo en la presente investigación, en quien confío germine la semilla del estudio de los nutrientes tecnológicos.

Quiero terminar con algunas reflexiones para el Dr. Jorge y, si me permiten, para todos los lectores. La primera es que nunca pierda su interés en la generación del conocimiento. Creo que la mejor forma de querer a su tierra y a su pueblo es innovar y transmitir el conocimiento para solucionar los retos que nos exige la sociedad a la que nos debemos. La segunda es que transmita a sus alumnos y colegas de la comunidad universitaria que, cuando se tienen convicciones y sueños, estos deben llevarse a cabo, como él ha demostrado, no solo para cumplir el destino vital personal sino lo más importante para mí, y como diría el emperador Marco Aurelio: devolver a la sociedad lo que ella nos ha dado a los que tenemos la suerte y el privilegio de enseñar e investigar para cambiar los paradigmas y seguir construyendo el futuro de nuestra especie.

La historia de la civilización la han construido personas que han creído en la investigación. Siempre se ha querido conocer, tener la certeza de lo que pasará en el futuro: cómo será este, cómo se adaptará la humanidad a este, qué retos tendremos que superar, qué actuaciones deberemos de llevar a cabo para ello, etc.

En Granada a 25 de agosto de 2018.

Valentín Molina Moreno

Docente del Departamento de Organización Empresarial

Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

Universidad de Granada

RESUMEN

El trabajo de investigación desarrollado está enmarcado dentro de la estrategia de la economía circular, es decir, la reducción tanto de la entrada de materiales como de la generación de desechos de un proceso antrópico. En este caso particular, la estrategia se ha querido aplicar al sector cerámico que converge en la zona metropolitana de Cúcuta, Colombia.

El proceso experimental fue propuesto a fin de establecer la viabilidad de sustituir parte de la fracción mineral usada en la actualidad (material arcilloso) por residuos provenientes de otros sectores económicos de la región: específicamente, residuos agroindustriales como el cisco de café y la cascarilla de arroz y residuos de procesos de combustión (cenizas) de carbón mineral en termoeléctrica y de los mismos hornos empleados para la cocción de los productos cerámicos en la región (horno colmena). Todas las materias primas fueron caracterizadas mediante el uso de técnicas como la difracción de rayos X (DRX), la fluorescencia de rayos X (FRX), la microscopía electrónica de barrido (MEB), el análisis termogravimétrico (TG) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Los cerámicos elaborados fueron producidos a escala de laboratorio utilizando el conformado por extrusión como técnica de moldeo. Varias pastas cerámicas fueron usadas a partir de la modificación del contenido de residuo en la pasta, y la concentración másica del residuo estuvo entre el 5% y el 20%. En el caso de las cascarilla de arroz se incluyó una variable adicional, que fue el tamaño de grano

del residuo (pasante malla —Tyler— 16, 80 y 200). El proceso de cocción fue realizado en atmósfera oxidante haciendo uso de un horno con calentamiento por resistencia eléctrica. Se emplearon diferentes temperaturas de cocción (entre 900 °C y 1.200 °C) a fin de evidenciar la influencia de esta variable en las propiedades tecnológicas (contracciones de cocción, porcentaje de absorción de agua, resistencia mecánica a la flexión y resistencia a la abrasión profunda de probetas no esmaltadas) de los cerámicos obtenidos.

Los análisis físico-cerámicos dejaron en evidencia que concentraciones superiores al 10% no favorecen la obtención de cerámicos que cumplan los requisitos mínimos reportados en la literatura en cuanto a resistencia mecánica del material, incluso en altas temperaturas. Los mejores resultados fueron obtenidos con la ceniza de la central termoeléctrica y con el cisco de café. Se realizó una caracterización de los cerámicos mediante DRX y MEB, así como mediciones de conductividad térmica, a fin de explicar el comportamiento obtenido en las propiedades tecnológicas evaluadas, permitiendo así tener una correlación con la microestructura del material a medida que se incrementa la temperatura de cocción.

Por otra parte, análisis de flujo de calor (DSC) demuestran que el proceso de sustitución de arcilla por los residuos propuestos permite un aporte energético al sistema debido a la oxidación de la materia orgánica presente en todos los materiales sustitutos. Además, la modificación del agua físicamente absorbida en la pasta cerámica conformada y la reducción del contenido de caolinita (específicamente en la deshidroxilación de esta fase cerca de los 500 °C) conllevan a reducir el requerimiento de energía en el horno. De igual forma, efectos de disminución de la conductividad térmica del cerámico y otras variables analizadas permiten inferir el potencial de estos cerámicos para disminuir el consumo energético una vez puestos en obra.



ABSTRACT

The research work developed is framed within the strategy of the circular economy, this is the reduction of both the entry of materials and the generation of waste from an anthropic process. In this particular case, the strategy has been applied to the ceramic sector that converges in the metropolitan area of Cúcuta, Colombia.

The experimental process was proposed in order to establish the feasibility of replacing part of the mineral fraction currently used (clay material) with waste coming from other economic sectors of the region, specifically agro-industrial waste such as coffee and rice husk, and residues of combustion processes (ashes) of coal in thermoelectric power plant and of the same kilns used for the firing of ceramic products in the region (Colmena kiln). All the raw materials were characterized by the use of techniques such as X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric analysis (TG) and differential scanning calorimetry (DSC).

The elaborated ceramics were produced on a laboratory scale, using extrusion forming as molding technique. Several ceramic pastes were obtained from the modification of the residue content in the paste, the mass concentration of the residue was between 5% and 20%. In the case of rice husks, an additional variable was included, it was the grain size of the residue (material that crosses the mesh (Tyler) 16, 80 and 200). The firing process was carried out in an oxidizing atmosphere using a kiln with heating by electrical resistance. Different firing

temperatures were used (between 900 ° C and 1200 ° C) in order to demonstrate the influence of this variable on the technological properties (firing shrinkage, percentage of water absorption, mechanical resistance to bending and resistance to abrasion deep of unglazed specimens) of the ceramics obtained.

The physical-ceramic analysis showed that concentrations higher than 10% do not favor the obtaining of ceramics that meet the minimum requirements reported in the literature in terms of mechanical strength of the material, even at high temperatures. The best results were obtained with the ash from the thermoelectric power plant and with the coffee husk. Characterization of the ceramics by means of XRD and SEM as well as measurements of thermal conductivity were carried out in order to explain the behavior obtained in the evaluated technological properties, thus allowing to have a correlation with the microstructure of the material as the firing temperature increases.

Analysis of heat flow (DSC), show that the process of substitution of clay by the proposed waste allows an energy contribution to the system, due to the oxidation of the organic matter present in all substitute materials, it also allows the modification of physically absorbed water in the shaped ceramic paste and the reduction of the kaolinite content (specifically in the dehydroxylation of this phase close to 500 ° C) lead to reduce the energy requirement in the kiln. In the same way, effects of decrease of the thermal conductivity of the ceramic and other analyzed variables allow to infer the potential of these ceramics to reduce the energy consumption once installed in the building.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se viene tomando conciencia sobre la importancia de la protección del medio ambiente. Así, el calentamiento global y la alta generación de desperdicios de la actividad industrial/comercial son motivo de comentarios en el día a día de las personas (Panwar, Kaushik & Kothari, 2011; Zhang & Wen, 2008; Segerson & Miceli, 1998; O'Neill & Oppenheimer, 2002).

A nivel industrial, temas como el desarrollo sostenible y la economía circular han venido ganando interés, no solo por el hecho de realizar una producción más limpia, sino por las ventajas comerciales que pueden surgir a partir de su implementación, como en el caso de las etiquetas verdes, que son vistas con buenos ojos por los consumidores (Castells & Cadavid, 2011; Andersen, 2007; Tukker, 2015).

La industria cerámica es un sector que consume gran cantidad de energía para la elaboración de los productos cerámicos de construcción. Por ende, es también un gran generador de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono, el cual se origina debido a la oxidación de combustibles en los hornos durante el proceso de cocción (Tikul & Srichandr, 2010; Bovea et al., 2010).

El sector cerámico tradicional no ha sido ajeno a la tendencia de la economía circular y el desarrollo sostenible. La utilización de residuos orgánicos e inorgánicos en sustitución de arcillas en la pasta cerámica y el uso de biomasa como fuente de

energía para los hornos cerámicos son algunas de las posibilidades que se han evidenciado en la literatura, especialmente en territorio español, país considerado uno de los mayores productores de materiales cerámicos de construcción (Zhang, 2013; Madurwar, Ralegaonkar & Mandavgne, 2013; Boltakova et al., 2016).

Estos residuos utilizados como materia prima en sustitución de los componentes tradicionales son reconocidos dentro del campo de la economía circular como “nutrientes tecnológicos” (Castells & Cadavid, 2011). Residuos de minería y metalúrgicos, vidrio doméstico, lodos, cenizas y residuos agroindustriales han sido usados como nutrientes tecnológicos para la fabricación de materiales cerámicos de construcción, con propiedades tecnológicas similares a las obtenidas con las materias primas tradicionales (Zhang, 2013; Madurwar, Ralegaonkar & Mandavgne, 2013; Boltakova et al., 2016).

Aunque se han obtenido buenos resultados desde el punto de vista práctico (en relación con las propiedades físico-cerámicas del material cocido) (Zhang, 2013; Madurwar, Ralegaonkar & Mandavgne, 2013; Boltakova et al., 2016), se ha podido evidenciar en la literatura deficiencia de conocimiento que permita explicar el porqué del comportamiento de las propiedades obtenidas en el cerámico cuando se adicionan nutrientes tecnológicos a la pasta o si se utilizan diferentes tipos de conformado (extrusión o prensado).

En el presente trabajo de investigación se ha querido profundizar en este aspecto expuesto mediante la utilización de materias primas y nutrientes tecnológicos abundantes en el área metropolitana de Cúcuta (cascarilla de arroz, cisco de café, cenizas volantes de termoeléctrica e inquemados de carbón de los hornos colmena de la industria cerámica regional), empleando la extrusión como técnica para el conformado de las piezas cerámicas.

Inicialmente, se presentan los objetivos propuestos para el desarrollo de la investigación. Seguidamente, se presenta el marco de referencia de la investigación, el cual permite al lector poder reconocer con mayor claridad el entorno en que se ha desarrollado la investigación. Aspectos como el reconocimiento del estado del arte del tema de investigación, la problemática establecida, la hipótesis de la investigación y la metodología usada para dar cumplimiento a los objetivos son presentados en este apartado.

Los resultados se han presentado de manera secuencial. Inicialmente, se hace una descripción y caracterización de las materias primas usadas en el presente trabajo, mediante las técnicas de Difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), análisis termogravimétrico (ATG), calorimetría diferencial de barrido (DSC) y microscopia electrónica de barrido (MEB).

Posteriormente, se presentan los resultados de caracterización físico-cerámica para todas las pastas formuladas en la descripción metodológica. La influencia de

la concentración y el tamaño de grano del nutriente son evaluados en relación con su efecto sobre las propiedades de resistencia mecánica a la flexión, el porcentaje de absorción de agua y la contracción lineal de secado y de cocción. La temperatura de cocción se ha realizado entre 950 °C y 1.200 °C.

El nutriente que presentó el mejor comportamiento en el apartado anterior ha sido usado para establecer correlaciones entre las propiedades físico-cerámicas obtenidas (adicionando la conductividad térmica a las propiedades anteriormente estudiadas) y su composición estructural, así como con los principales aspectos morfológicos del material cocido mediante el uso de microscopía electrónica de barrido.

Para finalizar los resultados, se presenta un análisis de los aportes de tipo energético/ambiental del nutriente tecnológico sobre el proceso de fabricación de materiales cerámicos de construcción en el área metropolitana de Cúcuta, usando para ello la técnica ATG/DSC.

