

CAPÍTULO IV

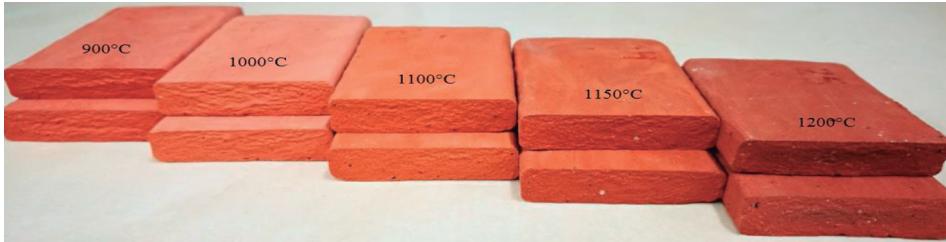
EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES TECNOLÓGICOS SOBRE LAS PRINCIPALES VARIABLES TECNOLÓGICAS DE UN MATERIAL CERÁMICO

El desarrollo de esta sección se soporta en las formulaciones de las pastas cerámicas presentado en la Tabla 14. Inicialmente, se presenta el registro fotográfico de los cerámicos obtenidos con los diferentes nutrientes propuestos, concentración y temperatura de cocción. Esta información permite identificar algunos aspectos que son de interés a la hora de evaluar la calidad del cerámico de construcción obtenido. Aspectos como la tonalidad obtenida, la homogeneidad de la superficie del cerámico, la presencia de eflorescencias, el efecto de corazón negro y las fisuras son algunas de las variables que se pueden observar en las figuras 38 a 44.

Posteriormente, se presentan los resultados asociados al efecto de la concentración del nutriente en la pasta cerámica en función de la temperatura de cocción. Inicialmente se presenta el consolidado de cada variable analizada para todos los materiales cerámicos obtenidos (tablas 28 a 32). Luego se presenta para cada nutriente un análisis comparativo respecto a los resultados del material de referencia elaborado con solo arcilla (MA) (figura 38). Finalmente, se hace un comparativo de las propiedades de los cerámicos con mejor comportamiento frente a algunos criterios de clasificación y uso establecidos internacionalmente.

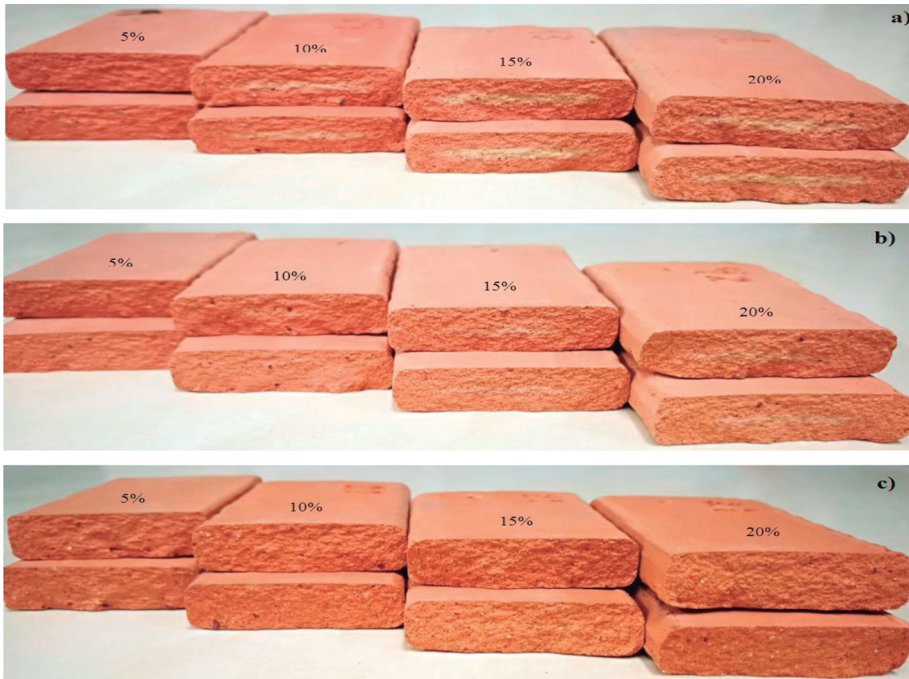
20. Aspectos macroscópicos

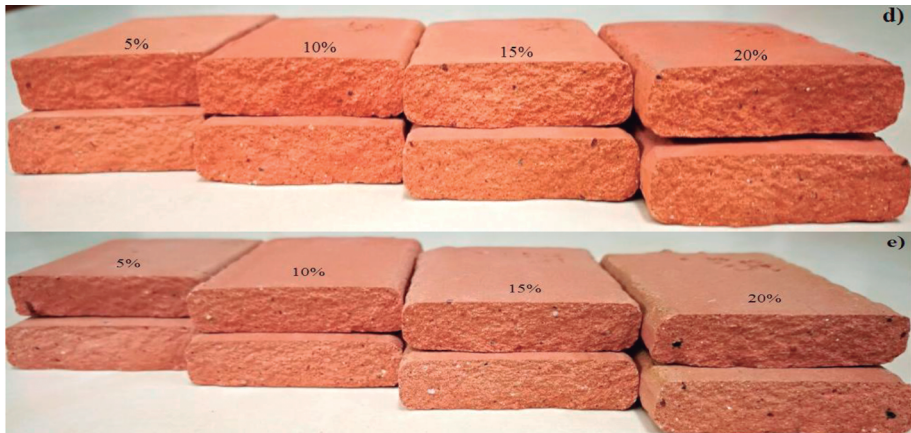
Figura 38. Aspecto de los cerámicos elaborados con solo material arcilloso (MA)



Del registro fotográfico de la figura 38 es posible conocer los principales aspectos de los cerámicos elaborados con solo material arcilloso. Se evidencia una tonalidad rojiza producto de la presencia de hierro en el material, tal como se observó en el apartado de caracterización. También se aprecian diferentes tonalidades a medida que se incrementa la temperatura de cocción, y superficialmente el material no presenta variabilidad de tonos.

Figura 39. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y ceniza volante como material sustituto



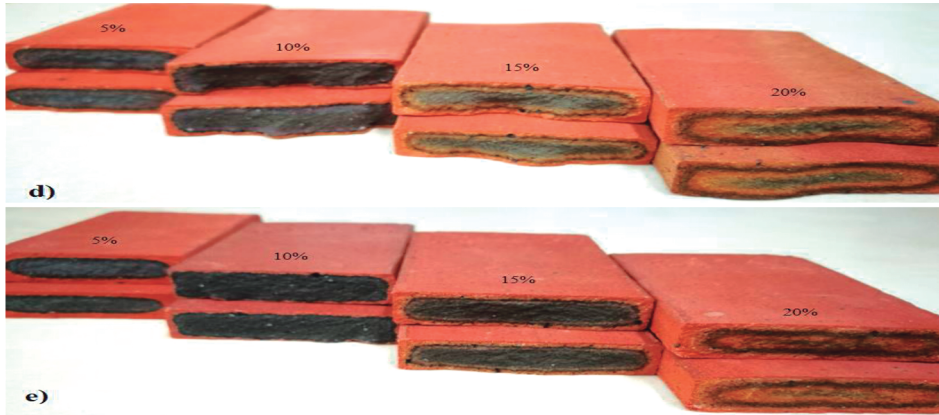


a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

Los cerámicos elaborados con ceniza volante presentados en la figura 39 manifiestan ligeras variaciones en la tonalidad rojiza respecto al estándar. Superficialmente, muestran homogeneidad. Se evidencian algunos poros a simple vista y la posible presencia del efecto de corazón negro en bajas temperaturas, producto del carbón residual en el material identificado en la etapa de caracterización.

Figura 40. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso e inquemados de carbón como material sustituto

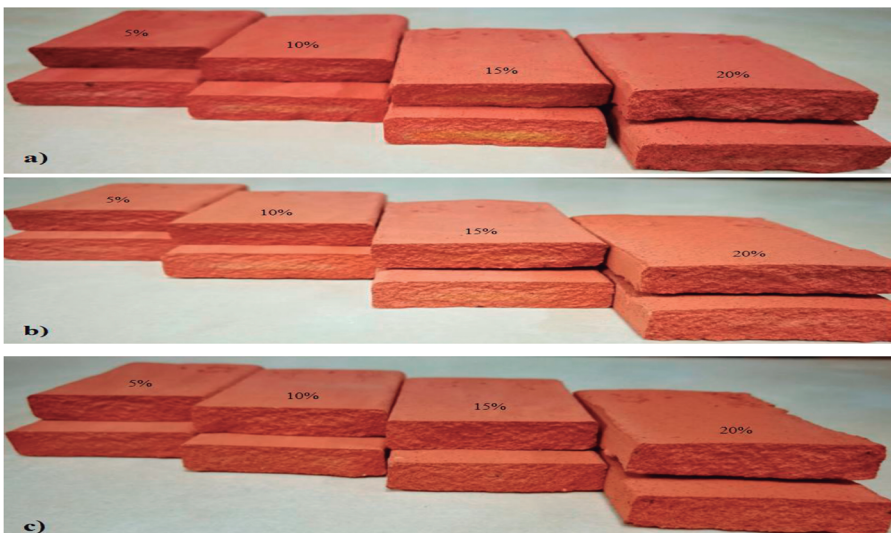


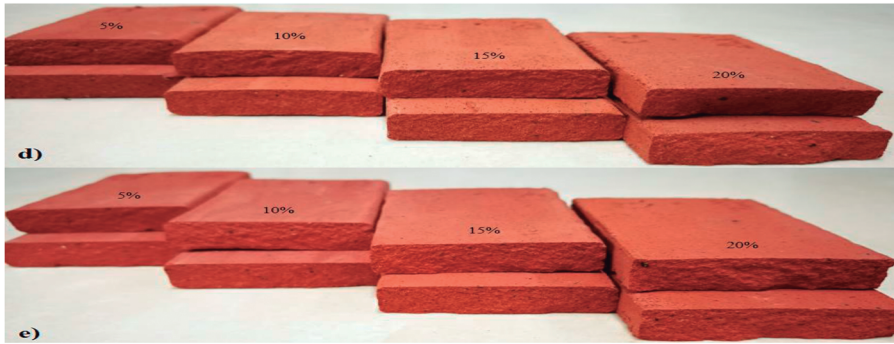


a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

Los cerámicos elaborados con inquemados de carbón dejan ver homogeneidad a nivel superficial, sin cambios en la tonalidad rojiza aportada por el hierro. Sin embargo, sí se evidencia que en el interior del material el hierro presente ha sido reducido (tonalidad oscura ocasionada por un cambio de Fe^{3+} a Fe^{2+} o incluso se podría pensar en Fe^0), producto del alto contenido de carbono presente en este nutriente. Estos cambios de oxidación podrían llegar a afectar las propiedades tecnológicas del cerámico.

Figura 41. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cisco de café como material sustituto

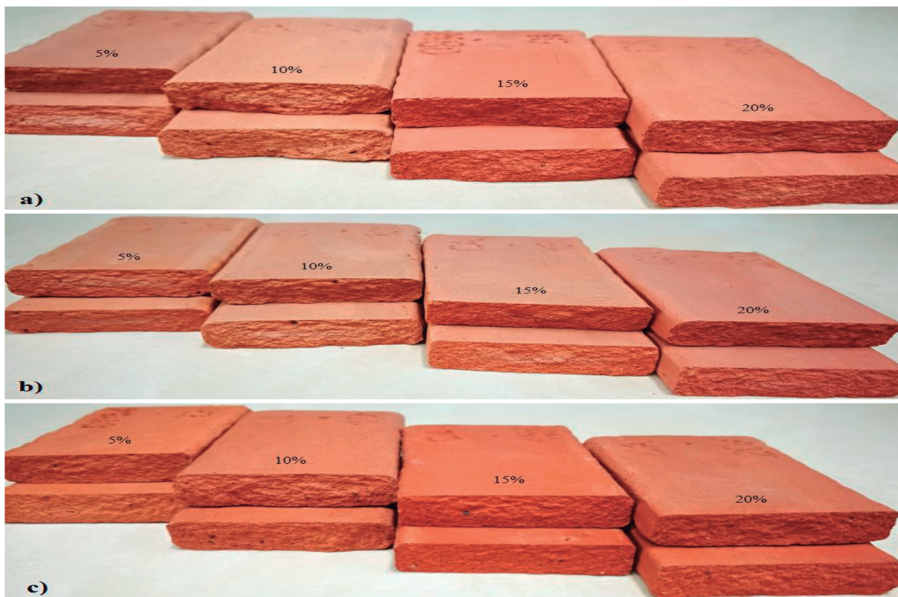


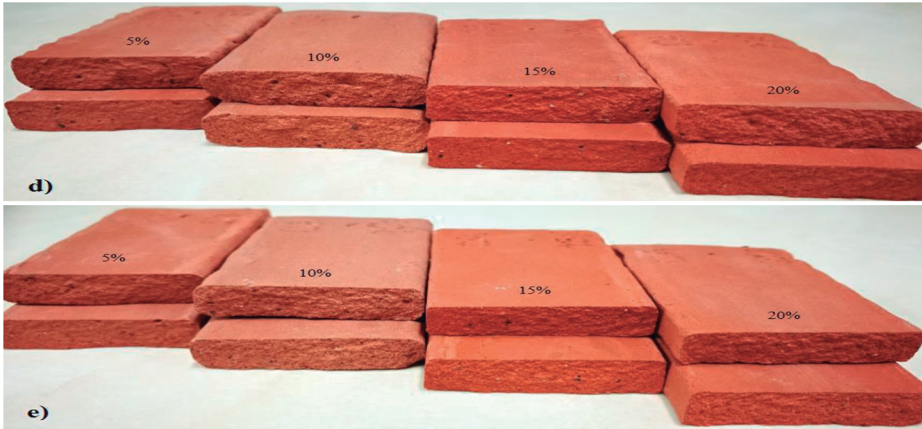


a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

El registro fotográfico de la figura 41 muestra que los cerámicos obtenidos usando cisco de café como material sustituto presentan una tonalidad uniforme. En bajas concentraciones no se evidencian cambios notorios en el cerámico; sin embargo, en concentraciones arriba del 10% la porosidad ya es evidente a nivel superficial. En algunas muestras se observaron pequeños abultamientos producto de la acumulación de gas durante el proceso de cocción. En bajas temperaturas y concentraciones intermedias se evidenció la presencia de procesos reducción, posiblemente causados por el carbono presente en este nutriente, que consume parte del oxígeno presente naturalmente en el material arcilloso.

Figura 42. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso y cascarilla de arroz pasante malla 16 como material sustituto



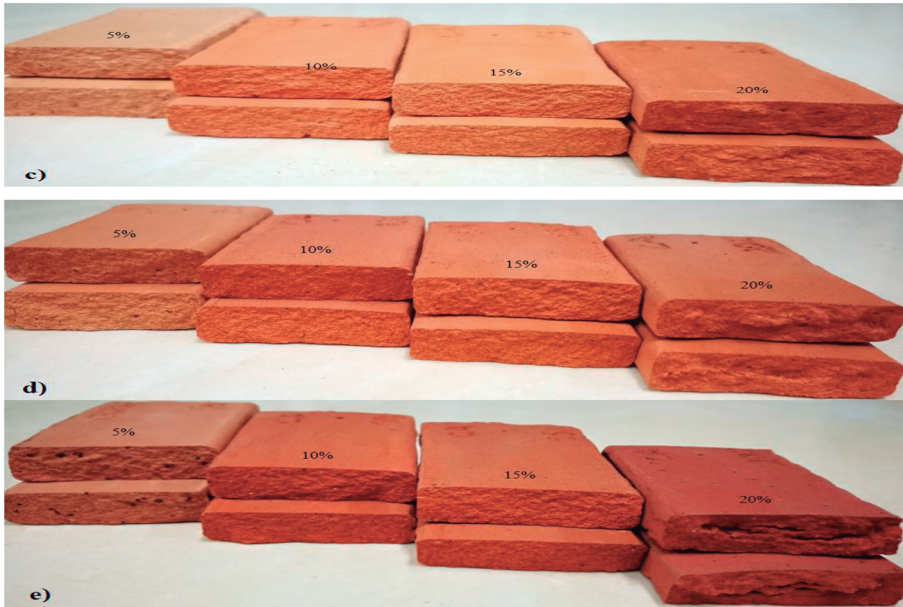


a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

La figura 42 muestra el registro fotográfico de los cerámicos elaborados con cascarilla de arroz como material sustituto, en una granulometría menor o igual a la malla 16 Tyler. Se evidencia porosidad a simple vista en los materiales con más de 10% de cascarilla. A bajas temperaturas se observa variación en la tonalidad del cerámico, hecho que afecta la calidad estética del material y por tanto el uso que se le pueda dar en la industria de la construcción. A 900 y 1.000 °C se evidencia la formación del efecto de corazón negro debido a materia orgánica que aún no se ha oxidado totalmente.

Figura 43. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto

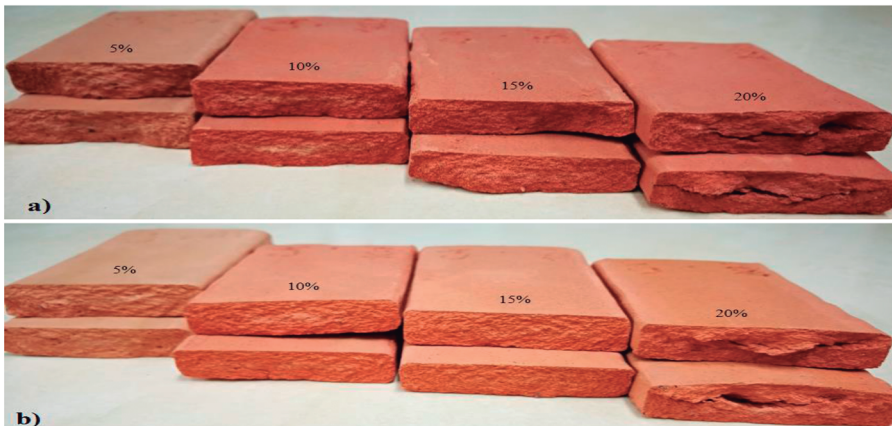




a) 900 °C; b) 1.000 °C; c) 1.100 °C; d) 1.150 °C; e) 1.200 °C

El registro fotográfico de la figura 45 deja ver un cerámico más homogéneo superficialmente. El uso de las cascarilla de arroz pasante malla 80 hace que la porosidad no sea tan notoria a simple vista, la tonalidad no se vea tan afectada y se ve mejor estéticamente. Se evidencia el efecto de corazón negro debajo de los 1000°C.

Figura 44. Aspecto de los cerámicos elaborados con material arcilloso (MA) y cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAC) como material sustituto





a) 900°C; b) 1000°C; c) 1100 °C; d) 1150 °C; e) 1200 °C

El registro fotográfico de la figura 44 deja ver cerámicos superficialmente uniformes. Es claro que el uso de la cascarilla de arroz en un tamaño de partícula más fino favorece tener una superficie más homogénea. Sin embargo, se evidenció que sustituciones superiores al 15% conllevan a la formación de hinchamientos en el interior del material. Este hecho podría asociarse a una mayor dificultad de salida de los gases de carbono formado por la combustión de la cascarilla, conllevando a posibles acumulaciones de gas en el centro de la probeta, como se observa en la figura 44 para el cerámico con el 20% de concentración. A bajas temperaturas se observa el efecto de corazón negro en el material.

21. Resultados de las propiedades tecnológicas evaluadas

Tabla 28. Consolidado de los resultados de contracción de secado para los materiales conformados con los diferentes tipos y concentraciones de nutriente

Código de la pasta cerámica	% contracción de secado
MA	8,21
CT5	5,71
CT10	4,67
CT15	5,78

Código de la pasta cerámica	% contracción de secado
CT20	5,48
IC 5	6,91
IC10	7,05
IC15	7,02
IC20	6,95
CC5	6,61
CC10	6,44
CC15	6,57
CC20	7,02
CAa5	4,84
CAa10	4,33
CAa15	3,75
CAa20	3,12
CAb5	5,39
CAb10	5,05
CAb15	5,89
CAb20	4,58
CAC5	5,36
CAC10	7,48
CAC15	7,31
CAC20	7,45

Varios aspectos importantes se pueden resaltar de la información de la tabla 28. Al hacer referencia a la ceniza volante como material sustituto en la pasta cerámica, se evidencia que este material tiene un efecto significativo para disminuir la contracción lineal de secado en cualquiera de las concentraciones usadas, siendo la sustitución con 10% la que permite obtener los mejores resultados (reducción de hasta 43%). En relación con el uso de residuo de la combustión del carbón en hornos colmena, también se evidencia una reducción de la contracción de secado; sin embargo, no se aprecia diferencia estadísticamente significativa entre todas las concentraciones de nutriente usado.

La reducción alcanzada es cercana al 16%. Para el cisco de café como material sustituto tampoco se evidencia una diferencia significativa en la contracción de secado para las diferentes concentraciones de nutriente. Aun así, parece que la pasta con 10% de sustitución es la que muestra el mejor comportamiento alcanzando una reducción de la contracción de 21%. Finalmente, para la cascarilla de arroz se evidencia que el tamaño de grano del nutriente y la concentración de este tienen influencia sobre la contracción. Es claro que un tamaño más grueso y

una mayor sustitución contribuyen a disminuir la contracción de secado hasta un 62%. El orden de mejora es entonces CAa20> CT10>CC10>IC5.

Tabla 29. Consolidado de los resultados de contracción lineal de cocción

Código cerámico	% Contracción de cocción				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
MA	0,08	0,72	3,07	3,73	3,71
CT5	0,58	0,26	1,85	2,20	3,05
CT10	0,26	0,34	2,20	2,49	3,21
CT15	0,39	0,27	2,15	2,86	3,15
CT20	0,37	0,44	2,46	2,96	3,41
IC 5	0,27	0,20	2,25	2,50	2,42
IC10	0,10	0,71	2,13	2,15	2,20
IC15	0,18	0,80	2,19	2,14	2,23
IC20	0,25	0,76	2,11	2,18	2,21
CC5	0,25	0,97	2,98	4,14	4,69
CC10	0,21	0,94	3,19	4,60	5,34
CC15	0,38	1,13	3,85	5,20	5,86
CC20	0,44	0,92	3,84	5,50	5,87
CAa5	0,32	0,65	2,14	2,55	2,74
CAa10	0,62	1,63	4,51	4,34	4,69
CAa15	0,30	1,57	4,43	4,92	4,76
CAa20	0,50	1,93	4,90	5,58	5,64
CAb5	0,42	0,30	3,64	4,18	4,20
CAb10	0,52	0,12	3,26	3,98	3,97
CAb15	0,72	0,38	4,76	5,18	5,08
CAb20	0,55	0,55	5,04	5,43	5,31
CAc5	0,35	0,18	1,08	1,78	2,47
CAc10	0,22	0,21	1,96	3,07	3,46
CAc15	0,18	0,42	2,05	3,46	4,18
CAc20	0,23	0,58	2,82	4,41	5,46

Varios aspectos importantes se pueden resaltar de la información de la tabla 29. Al hacer referencia a la ceniza volante como material sustituto en la pasta cerámica, se evidencia que este material tiene un efecto significativo para disminuir la contracción lineal de cocción en prácticamente todas las temperaturas de cocción (excepto 900 °C) y concentraciones evaluadas. Con 5 y 10% de sustitución se logran

las reducciones más significativas (17,8% a 1.200 °C). Se observa una relación inversamente proporcional entre la contracción de cocción y la concentración de ceniza volante en el cerámico. Al usar inquemados del horno colmena se presenta algo similar al resultado de contracción de secado, es decir, no hay una diferencia significativa que permita proponer a una de las mezclas como mejor que la otra; lo que sí es claro es que logra reducir la contracción de cocción hasta en un 40,7% en 1.200 °C.

En cuanto al uso de cisco de café, se evidencia que este material, en cualquiera de las concentraciones usadas, no contribuye a reducir la contracción de cocción. Se observa una relación directa entre la cantidad de nutriente usado y la contracción de cocción. Este hecho podría estar asociado al alto contenido de pérdidas de calcinación de este nutriente acorde con los resultados de caracterización.

Para la cascarilla de arroz, la información de la tabla 30 deja ver que el tamaño de grano y la concentración del nutriente tienen influencia sobre la contracción de cocción. A mayor concentración del nutriente, mayor contracción de cocción, similar al efecto evidenciado cuando se usa cisco de café. La cascarilla en su forma más fina y en baja concentración es la que ofrece los menores cambios en cuanto a la contracción lineal del cerámico (hasta 34% de reducción en 1.200 °C). El orden de mejora es entonces IC10>CAc5> CT5>CC5.

Tabla 30. Consolidado de la prueba de porcentaje de absorción de agua

Código cerámico	% absorción de agua				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
MA	11,96	11,15	6,83	4,17	1,86
CT5	11,03	11,19	7,55	6,16	5,89
CT10	13,99	12,43	9,81	8,24	7,90
CT15	13,41	13,38	10,99	9,53	9,26
CT20	15,17	15,08	12,6	11,13	10,76
IC 5	12,57	12,08	8,26	7,1	5,19
IC10	14,03	13,11	9,98	8,59	8,32
IC15	16,39	16,7	14,99	14,05	13,34
IC20	22,23	23,34	21,55	19,22	17,93
CC5	14,87	14,21	11,67	8,01	7,54
CC10	18,30	17,99	15,36	11,27	11,77
CC15	29,00	28,01	22,67	18,94	19,30
CC20	42,94	41,34	32,29	28,20	28,14
CAa5	18,72	18,66	16,29	14,97	14,06

Código cerámico	% absorción de agua				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
CAa10	25,45	23,72	17,12	15,71	14,90
CAa15	33,76	32,85	25,20	23,55	22,81
CAa20	41,81	39,65	31,15	28,75	27,70
CAb5	14,79	14,00	9,69	8,72	9,48
CAb10	24,42	23,99	19,21	16,96	16,64
CAb15	29,10	28,55	20,63	19,00	18,85
CAb20	39,74	40,51	29,12	26,84	26,73
CAc5	18,06	18,78	19,79	16,63	14,50
CAc10	21,29	21,85	19,60	16,69	14,10
CAc15	28,48	28,43	25,92	23,40	19,96
CAc20	41,71	40,47	35,20	30,71	24,27

De la información de la tabla 30 se evidencian los siguientes aspectos: en términos generales se aprecia que un aumento de la concentración de todos los nutrientes conlleva a un aumento del porcentaje de absorción de agua, es decir, mayor porosidad en el material; por tanto, se podría pensar que si lo que se busca es obtener un material con poca absorción de agua, solo se debería usar el 5% de nutriente. En este caso el mejor resultado fue obtenido usando los inquemados de carbón y la ceniza volante. Con este último material (5%) no se observan diferencias significativas con respecto al patrón hasta los 1.100 °C. Para los nutrientes de tipo orgánico (cascarilla y cisco) es lógico el mayor grado de porosidad debido al alto nivel de pérdidas por calcinación identificado en la etapa de caracterización; sin embargo, es importante resaltar que, a pesar de que el cisco tiene mayores pérdidas de calcinación (98,2%) respecto a la cascarilla (83,5%), los cerámicos con cisco presentaron menor porcentaje de absorción hasta en concentraciones del 15% respecto a los cerámicos elaborados con cascarilla.

Tabla 31. Consolidado de los resultados de resistencia mecánica a la flexión

Código cerámico	Resistencia a la flexión (N/mm ²)				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
MA	12,01	16,93	24,09	30,09	25,97
CT5	11,78	10,58	20,43	20,19	20,89
CT10	9,68	10,89	17,05	18,03	18,73
CT15	8,61	9,50	15,78	16,18	17,77
CT20	6,89	8,17	14,20	15,28	16,25
IC 5	18,15	7,96	12,9	15,28	24,01

Código cerámico	Resistencia a la flexión (N/mm ²)				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
IC10	15,96	21,41	14,34	11,33	12,43
IC15	16,12	19,57	10,57	13,11	16,8
IC20	12,72	16,02	13,19	6,43	16,91
CC5	8,67	13,35	18,59	25,86	23,90
CC10	8,43	11,91	16,98	25,46	22,74
CC15	6,94	10,50	15,09	22,75	21,09
CC20	4,56	6,19	10,63	17,13	15,24
CAa5	6,32	7,78	11,74	12,5	13,84
CAa10	8,77	11,29	18,08	19,13	18,93
CAa15	5,54	6,95	10,60	12,00	12,63
CAa20	4,22	5,67	9,71	10,74	11,82
CAb5	8,51	9,77	18,26	20,24	18,76
CAb10	5,50	6,32	11,00	12,42	12,48
CAb15	7,08	7,33	14,32	15,46	14,97
CAb20	5,69	5,57	11,76	13,36	12,76
CAc5	4,78	6,55	7,88	10,16	12,00
CAc10	5,63	8,14	10,93	13,18	16,40
CAc15	4,20	6,45	8,48	11,16	13,21
CAc20	3,50	4,93	7,85	10,25	12,42

Una de las propiedades tecnológicas más importantes de un material cerámico de construcción es su resistencia mecánica a la flexión, especialmente en el caso de productos para pisos, revestimientos y cubiertas para techo. La información de la tabla 31 muestra el consolidado de esta prueba para todos los cerámicos elaborados. El primer aspecto por destacar es la existencia de un punto de inflexión en estos materiales, donde se alcanza la mayor resistencia. Este punto parece estar entre 1.150 y 1.200°C. En relación con el efecto de los nutrientes usados sobre esta propiedad tecnológica, varios aspectos pueden ser destacados. Lo primero es que ninguno de los materiales usados como sustituto logró igualar o superar los valores de resistencia mecánica a la flexión del estándar en temperaturas superiores a los 1.100 °C; los cerámicos elaborados con el cisco de café en concentraciones del 5 y 10% fueron los que mostraron los valores de resistencia más elevados.

Por otro lado, es importante resaltar el efecto ocasionado por los inquemados del carbón para mejorar la resistencia mecánica del cerámico en 900 y 1.000 °C. El uso de 10% de este nutriente permite obtener un valor de resistencia mecánica a

la flexión superior a la del propio estándar elaborado con solo material arcilloso. La explicación a este comportamiento no es muy clara, aunque se podría pensar que la presencia de residuos de carbón y el efecto reductor ocasionado (ver Figura 40) tienen alguna influencia en este resultado.

Sobre el papel de los otros dos nutrientes se observa, para la ceniza volante, que los mejores resultados se logran con el 5 y 10% de sustitución, evidenciando poco crecimiento en el módulo de rotura en temperaturas superiores a los 1.100 °C. Para el caso de la cascarilla de arroz, se aprecia que fue el nutriente con menos potencial. Un aspecto importante por resaltar es el hecho de que el tamaño de grano sí logra generar cambios en esta variable. A su vez, se ha resaltado en la tabla 31 que la presencia de solo 5% de cascarilla pasante malla 80 Tyler logra un efecto similar al del material con 10% de cascarilla pero pasante malla 16 Tyler.

Tabla 32. Consolidado de pruebas de resistencia a la abrasión profunda

Código cerámico	Resistencia a la abrasión profunda (volumen removido (mm ³))				
	900 °C	1.000 °C	1.100 °C	1.150 °C	1.200 °C
MA	109	116	104	95	89
CT5	116	95	77	95	139
CT10	95	95	83	95	109
CT15	89	83	83	89	83
CT20	83	95	72	77	89
IC 5	67	109	89	116	95
IC10	83	95	83	116	123
IC15	95	83	72	95	89
IC20	95	83	116	131	83
CC5	89	72	77	123	95
CC10	95	95	95	109	102
CC15	89	83	95	139	123
CC20	67	77	116	116	116
CAa5	131	116	102	65	109
CAa10	102	116	123	139	123
CAa15	131	131	147	109	116
CAa20	131	147	147	131	116
CAb5	95	156	139	131	165
CAb10	139	123	72	83	131
CAb15	116	116	83	83	95
CAb20	131	116	83	116	77
CAC5	123	67	85	89	109
CAC10	102	67	83	123	72
CAC15	89	83	116	77	72
CAC20	77	72	83	67	77

Sobre la información de la tabla 32, varios aspectos se pueden resaltar. El primero de ellos es que solamente el cerámico elaborado con solo arcilla mostró un comportamiento descendente en la cantidad de volumen removido. El uso de cada nutriente parece tener un efecto particular sobre el resultado de resistencia mecánica a la abrasión profunda. Para el caso de la ceniza volante, se evidencia que el volumen de material removido tiende a reducir hasta los 1.100 °C, y de ahí en adelante se observa un retroceso en esta variable, posiblemente por cambios estructurales en el material (este aspecto será discutido en el siguiente apartado).

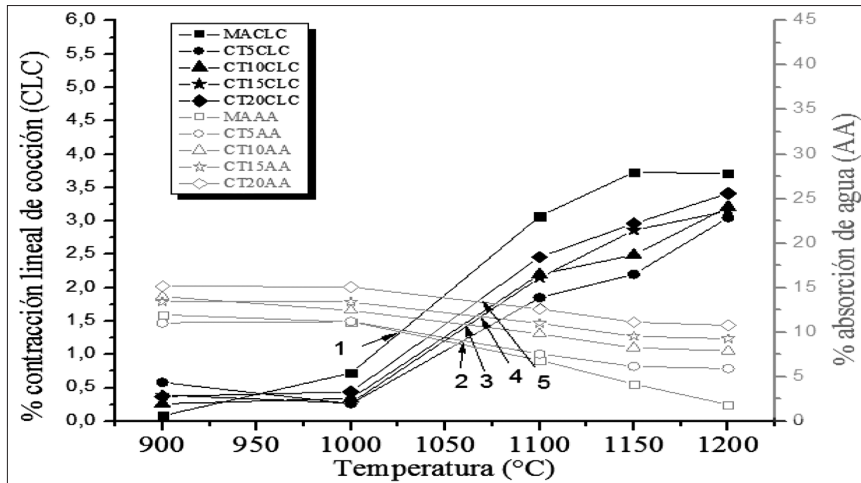
En términos generales, se puede establecer que hay una relación inversa entre el volumen removido (resistencia) y la concentración de ceniza volante. La alta concentración de fase amorfa, el pequeño tamaño de grano de este material e incluso la misma morfología de la ceniza podrían estar afectando este resultado.

En cuanto a los inquemados de carbón del horno colmena, los resultados no muestran una tendencia clara. Aparentemente, se observa que hay una mayor resistencia mecánica a bajas temperaturas de cocción. Este hecho nuevamente podría estar asociado al carbono residual y los efectos del proceso de reducción sobre la pasta cerámica.

En el caso del cisco de café también se observa un comportamiento diferente de la tendencia obtenida con solo materiales arcillosos (reducción de la cantidad del volumen removido con el incremento de la temperatura). En este caso, a bajas temperaturas es donde se evidencian los menores volúmenes de remoción de material; arriba de 1.100 °C el material pierde resistencia a la abrasión profunda y no hay una tendencia clara sobre la concentración de cisco en esta propiedad tecnológica. Finalmente, en el caso de la cascarilla de arroz tampoco se evidencia una tendencia clara en cuanto a la concentración y tamaño de grano del material. Aun así, se observa que los volúmenes más bajos de remoción se dan en torno a los 1.100 °C, siendo el cerámico CAC al 20% el de menor variabilidad en cuanto al volumen de remoción.

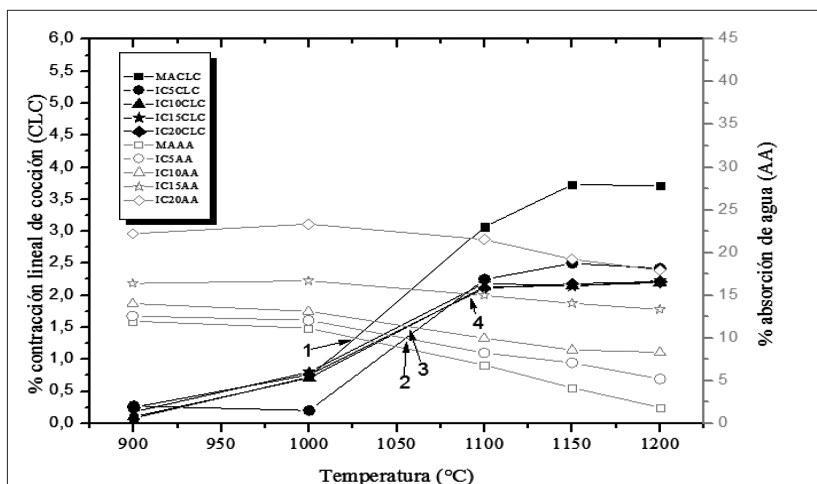
A continuación, en las figuras 45 a 50 se presentan las curvas de gresificación para todas las pastas utilizadas. Se presenta una figura para cada nutriente comparada con el patrón de solo arcilla.

Figura 45. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con ceniza volante (CT) como material sustituto



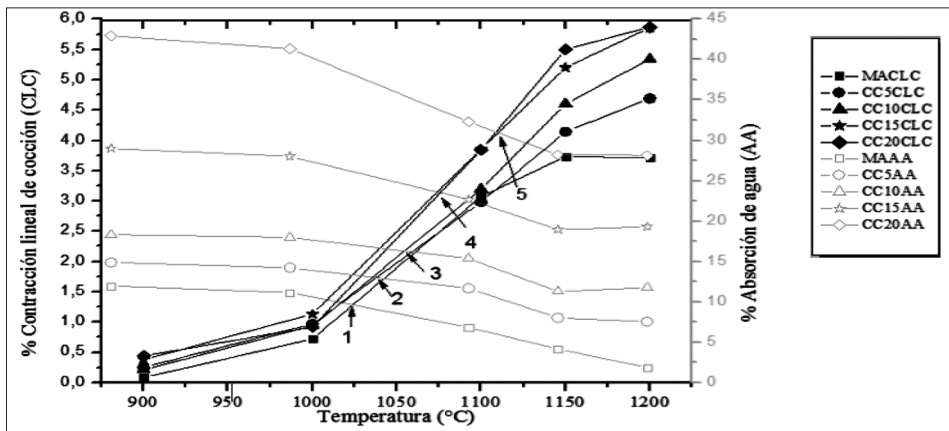
Al graficar los datos de contracción de cocción y porcentaje de absorción de los diferentes pastas (figura 45), se evidencia que el material patrón (MA) es el que presenta la menor temperatura (1.026 °C). El orden de gresificación es el siguiente: MA (1.026 °C) > CT5 (1.059 °C) > CT10 (1.063 °C) > CT15 (1.069 °C) > CT20 (1.071 °C). Acorde con este resultado, se puede inferir que una mayor concentración de ceniza volante aumenta el punto de vitrificación, aunque las diferencias no son significativas.

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



Un caso similar se da al usar inquemados de carbón del horno colmena. En este caso se observa también que el punto de gresificación incrementa con el contenido de nutriente adicionado a la pasta. El orden obtenido es el siguiente: MA (1.026 °C) > IC5 (1.055 °C) > IC10 (1.057 °C) > IC15 (1.092 °C) > CT20 (no se evidenció punto de corte). No se advierten diferencias significativas entre el uso de la ceniza volante y los inquemados del horno colmena. En bajas concentraciones de nutriente, una aparente mejora es obtenida usando IC, y en altas concentraciones un mejor resultado es obtenido con CT. Este hecho podría estar asociado a la mayor cantidad de carbono residual en el nutriente IC.

Figura 47. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cisco de café (CC) como material sustituto



Con el cisco de café sucede algo similar a lo observado con los inquemados del horno colmena. El alto contenido de pérdidas de calcinación producto de la oxidación de la materia orgánica podría ser responsable de este hecho. El incremento del punto de vitrificación está en función de la cantidad de cisco

adicionado. El orden de crecimiento es el siguiente: MA (1.026 °C) > CC5 (1.049 °C) > CC10 (1.065 °C) > CC15 (1.084 °C) > CC20 (1.116 °C).

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

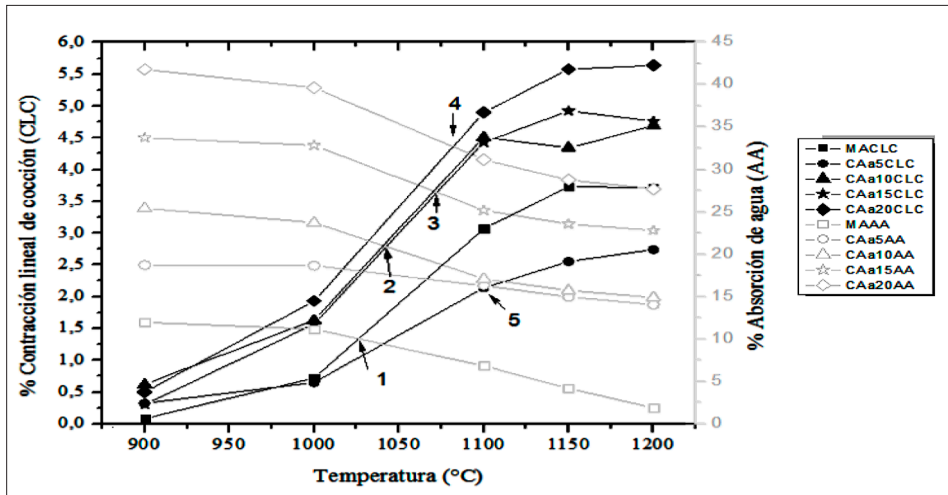


Figura 49. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 80 (CAb) como material sustituto

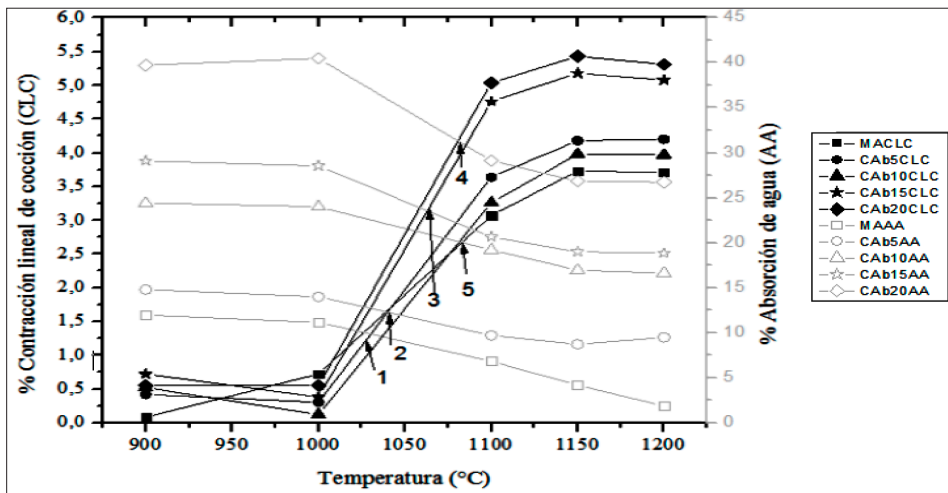
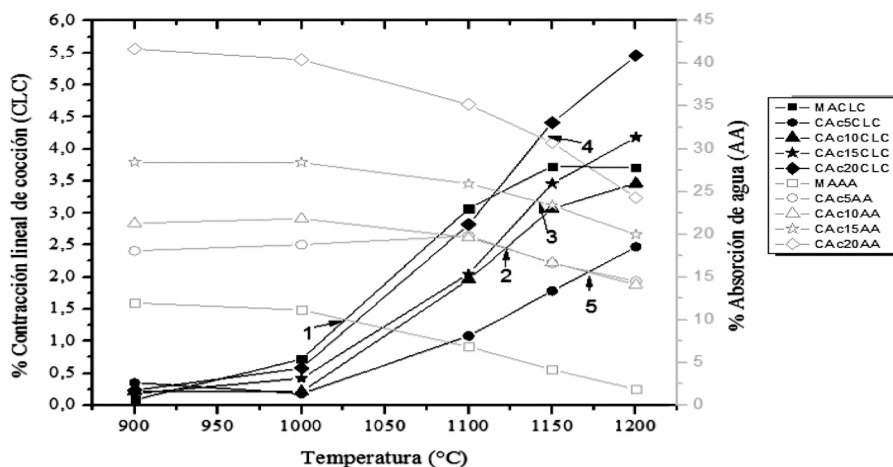


Figura 50. Contracción de cocción versus porcentaje de absorción de agua de los materiales cerámicos elaborados con cascarilla de arroz pasante malla 200 (CAc) como material sustituto



Respecto al uso de cascarilla de arroz, los resultados presentados en las figuras 48, 49 y 50 dejan ver que efectivamente el tamaño de grano del nutriente tiene influencia sobre el punto de gresificación. Diferencias significativas son evidenciadas cuando la cascarilla de arroz se encuentra en el menor tamaño de grano (pasante malla 200). En este caso particular, todas las pastas presentan un punto de gresificación por arriba de 1.100 °C, superior a las pastas con cascarilla de arroz pasante malla 16 y malla 80. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

MA (1.026 °C) > CAa10 (1.042 °C) > CAa15 (1.072 °C) > CAa20 (1.083 °C) > CAa5 (1.102 °C).

MA (1.026 °C) > CAB5 (1.041 °C) > CAB15 (1.064 °C) > Cab20 (1.081 °C) > Cab10 (1.083 °C).

MA (1.026 °C) > CAc10 (1.122 °C) > CAc15 (1.141 °C) > CAc20 (1.144 °C) > CAc5 (1.172 °C).

No es posible establecer una tendencia en función del contenido de cascarilla de arroz pues los datos son contradictorios. Este aspecto es especialmente notorio con 5 y 10% de concentración de nutriente en la pasta. En términos generales, el mejor comportamiento en cuanto a la curva de gresificación se obtiene usando el tamaño de grano intermedio (pasante malla 80) y un 5% respecto a la concentración de la cascarilla. Aunque el punto de vitrificación es muy similar al obtenido con CAa10, los datos de las propiedades tecnológicas ligeramente favorecen a la pasta CAB5.

22. Posibilidades de aplicación de los materiales cerámicos obtenidos

Para esta parte del proceso se tomarán como referencia las siguientes pastas, las cuales fueron las que mostraron el mejor comportamiento en las propiedades físico-cerámicas evaluadas:

- MA: Como material de referencia, es importante aclarar que ninguna de las pastas con presencia de nutriente igualó o superó los valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos obtenidos con este material.
- CT10: Los valores de las propiedades tecnológicas son muy similares con CT5. Sin embargo, se toma como punto a favor la mayor cantidad de nutriente que puede adicionarse a la pasta y, por ende, la mayor cantidad de carbono residual que puede aportar calor exotérmico al sistema.
- IC5: Presenta un comportamiento más predecible respecto a IC10, que es la pasta con valores favorables más cercano.
- CC5: En esta concentración se obtienen los mejores valores en las propiedades tecnológicas del cerámico elaborado con cisco de café.
- CAb5: Junto con CAa10, muestra los mejores valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos elaborados con cascarilla de arroz. Se ha seleccionado Cab5 ya que permite obtener un mejor aspecto estético del cerámico.

El consolidado de sus propiedades tecnológicas se presenta en la tabla 33. Estos resultados se comparan con algunos referentes internacionales presentados en la tabla 34.

Tabla 33. Valores de las propiedades tecnológicas de los cerámicos obtenidos con las pastas de mejor comportamiento

Pasta	Temperatura (°C)	Contracción de secado (%)	Contracción de cocción (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la flexión (fuerza de rotura (N))	Resistencia a la abrasión profunda (mm ³)
MA	900	8,21	0,08	11,96	669	109
	1.000		0,72	11,15	927	116
	1.100		3,07	6,83	1265	104
	1.150		3,73	4,17	1539	95
	1.200		3,71	1,86	1338	89
CT10	900	4,67	0,26	13,99	599	95
	1.000		0,34	12,43	670	95
	1.100		2,20	9,81	1017	83
	1.150		2,49	8,24	1055	95
	1.200		3,21	7,90	1080	109

Pasta	Temperatura (°C)	Contracción de secado (%)	Contracción de cocción (%)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la flexión (fuerza de rotura (N))	Resistencia a la abrasión profunda (mm ³)
IC5	900	6,91	0,27	12,57	869	67
	1.000		0,20	12,08	448	109
	1.100		2,25	8,26	680	89
	1.150		2,50	7,10	806	116
	1.200		2,42	5,19	1250	95
CC5	900	6,61	0,25	14,87	463	89
	1.000		0,97	14,21	711	72
	1.100		2,98	11,67	933	77
	1.150		4,14	8,01	1083	123
	1.200		4,69	7,54	1179	95
CAb5	900	5,39	0,42	14,79	495	95
	1.000		0,30	14,00	564	156
	1.100		3,64	9,69	987	139
	1.150		4,18	8,72	1080	131
	1.200		4,20	9,48	998	165

Tabla 34. Requisitos de baldosas cerámicas

Uso	Carga de rotura mínima (N)	Abrasión profunda máxima (mm ³)
Revestimiento interior/exterior	450	---
Suelos interiores de locales residenciales	900	2.365
Suelos exteriores de locales residenciales	900	2.365
Suelo de locales comerciales o colectivos	900	649
Suelos de locales industriales	2.000	393

Fuente: (Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos, s.f.; Enrique, s.f.; Colegio Territorial de Arquitectos de Castellón, s.f.).

Al comparar los requisitos mínimos de resistencia mecánica a la flexión presentados en la tabla 33 con los datos obtenidos para los cerámicos elaborados con los nutrientes tecnológicos propuestos, se evidencia que todos superan la barrera mínima para su uso como revestimientos en exteriores e interiores, incluso en la temperatura más baja de cocción. La aplicación en exteriores debería ponerse a consideración debido al alto porcentaje absorción de algunos de los materiales.

El material de referencia puede alcanzar a 1.000 °C el valor mínimo de carga de rotura que se requiere para que el cerámico pueda ser usado en suelos interiores residenciales, suelos exteriores residenciales y suelos locativos comerciales. Sin embargo, para los cerámicos elaborados con nutrientes esta barrera solo se supera a temperaturas superiores; en 1.100 °C solo el cerámico elaborado con inquemados de carbón de horno colmena no ha alcanzado este requisito mínimo. Al igual que con las baldosas para revestimiento, se debe poner en consideración su uso en exteriores debido a que los valores de absorción de agua aún son altos para algunos de los materiales.

Ninguno de los materiales cumple el requisito mínimo para poder ser usado como pavimento de locales industriales.

Los valores de resistencia a la abrasión profunda obtenidos para los cerámicos producidos resultan bastantes satisfactorios y cumplen a cabalidad los requisitos propuestos en la tabla 34.

23. Selección de la pasta con mejor comportamiento en el proceso cerámico

En la tabla 33 se evidencia que los cerámicos elaborados con las pastas CT10 y CC5 son los que presentan un mejor comportamiento. En particular, se considera para los análisis posteriores seguir trabajando con la pasta CT10 debido a que esta presentó los menores valores de contracción de secado y porque con este nutriente no es necesario realizar la operación de molienda para ajustar el tamaño de grano en la pasta.