

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA CAPA DE SOPORTE/MORTERO ADHESIVO/PRODUCTO CERÁMICO EN LAS PRESTACIONES DEL RECUBRIMIENTO CERÁMICO

Ana Paula Margarido⁽¹⁾, Julio C. Carvalho⁽¹⁾, Mauricio M. Resende⁽¹⁾, Renan P. de Andrade⁽²⁾, Flávio Leal Maranhão⁽²⁾, Anderson Vieira Chaves⁽³⁾

⁽¹⁾Ceramic Center of Brazil – Brasil

⁽²⁾Polytechnic School of the University of São Paulo, Brasil

⁽³⁾ANFACER –Asociación Brasileña de Fabricantes de Baldosas Cerámicas, Sanitarios y Productos Afines – Brasil

Entre las principales patologías verificadas en los sistemas de recubrimientos cerámicos, la aparición de desprendimientos es una de las más preocupantes, ya que pone en peligro la seguridad de los residentes, además de afectar los aspectos estéticos y de comprometer la habitabilidad. El desprendimiento de baldosas cerámicas puede producirse por rotura adhesiva en las interfases baldosa cerámica/mortero adhesivo, mortero adhesivo/revoque, revoque/enfoscado y enfoscado/sustrato o por rotura cohesiva en el interior de cualquiera de estas capas.

En este sentido, es fundamental evaluar las interacciones entre las capas que constituyen el sistema cerámico para comprender los mecanismos de adhesión y las posibilidades de aumentar la resistencia de las interfases. De esta forma, se hace necesario evaluar otras propiedades del mortero adhesivo (resistencia a la cizalladura y flexibilidad), así como su comportamiento en el tiempo en función de las exigencias a las que estará expuesto el recubrimiento a lo largo de su vida útil.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el sistema cerámico en pequeños prototipos mediante el análisis comparativo del comportamiento en función del tipo de baldosa cerámica (grupo de absorción de agua y expansión por humedad), tipo de mortero adhesivo, fallos de adhesión, base de preparación y sustrato. Para ello, se caracterizaron diferentes morteros adhesivos según la norma brasileña, ABNT NBR 14081-1, así como las propiedades de flexibilidad y resistencia a la cizalladura, aún no especificadas en la norma brasileña, pero sí en algunas normativas internacionales.

Tras la caracterización de los morteros adhesivos, se construyeron prototipos de baldosas cerámicas compuestas por diferentes tipos de cerámica colocados con diferentes tipos de morteros adhesivos, utilizando un sustrato estándar. Estos prototipos fueron sometidos a ciclos de calentamiento y enfriamiento y a ciclos de humectación y secado de forma que se les solicitara y promoviera un envejecimiento acelerado. Tras la realización de estos ciclos, se evaluó la pérdida de fuerza de adhesión de cada prototipo con el fin de correlacionar el tipo y propiedades de los morteros adhesivos y las propiedades de las baldosas cerámicas con la pérdida de prestaciones a lo largo del tiempo.

Los fallos en la colocación de las baldosas cerámicas favorecen la pérdida de adhesión y, en consecuencia, la pérdida de prestaciones durante la vida útil del sistema cerámico.

Por ello, tras la realización de este estudio, se recomienda que los diseñadores de baldosas cerámicas comiencen a especificar las propiedades del mortero adhesivo, independientemente de su clasificación, en función de las propiedades de la baldosa cerámica (absorción de agua, expansión por humedad), la deformación de la base y las exigencias a las que estará sometido el recubrimiento (gradientes térmicos). Se recomienda especificar la capacidad de deformación del mortero adhesivo, es decir, su flexibilidad, según los criterios de la norma ISO 13007. Asimismo, se recomienda también adoptar los parámetros de resistencia a la cizalladura de las normas ANSI 118.4 y ANSI 118.15, que tienen criterios de resistencia a las diferentes fuerzas de cizalladura en función de la absorción de agua de la baldosa cerámica. Se recomienda seguir los procedimientos de colocación de acuerdo con las normas ABNT NBR 13753, 13754 y 13755.

1. INTRODUCCIÓN

Una recopilación de datos obtenidos en 44 evaluaciones de patologías de recubrimientos de baldosas cerámicas entre 1998 y 2003 (MANSUR et al., 2006a) mostró que el desprendimiento de baldosas cerámicas ocurrió en el 95% de los edificios e indicó que en el 81% de los casos se observó que el desprendimiento de las baldosas ocurrió en la interfaz baldosa cerámica/mortero adhesivo. Porcentajes de incidencia próximos a estos también han sido presentados por algunos trabajos realizados para analizar tensiones en sistemas de baldosas cerámicas. (ABREU et al., 2004; SARAIVA et al., 2001) identificaron que esta interfaz es la región del sistema de baldosas más sometida a tensiones de cizalladura, cuando se consideran los efectos térmicos y la expansión higroscópica de las baldosas cerámicas, como puede observarse en la Figura 1.

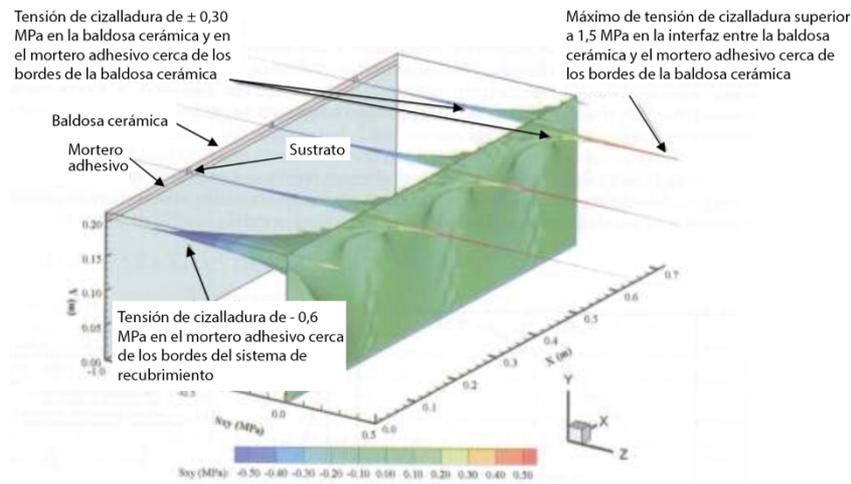


Figura 1 - Tensiones de cizalladura (S_{xy}) en un sistema de baldosas cerámicas debidas a 0,1 mm/m de expansión de la baldosa cerámica (Abreu et al, 2004).

Felixberger (2006) demuestra matemáticamente que las tensiones de cizalladura entre el sustrato y la baldosa cerámica son función del movimiento reactivo entre el soporte y la baldosa cerámica (ϵ_U), del módulo de especificación (E_{FI}), de las dimensiones (l_{FI} ; b_{FI}) de las baldosas cerámicas, del módulo de cizalladura (G_{KI}) y del espesor (d_{KI}) del mortero adhesivo, según la siguiente fórmula:

$$\tau_{KI-max}(l_{FI}, b_{FI}) = \epsilon_U * \sqrt{\frac{E_{FI} * d_{FI} * G_{KI}}{d_{KI}}} * \tanh \sqrt{\frac{(l_{FI}^2 + b_{FI}^2) * G_{KI}}{d_{KI} * d_{FI} * E_{FI}}}$$

Dicho esto, se observa que las baldosas de mayor tamaño provocarán mayores tensiones de cizalladura entre la baldosa cerámica y el soporte (Figura 2), requiriendo un mortero adhesivo con mayor flexibilidad, es decir, un módulo de cizalladura menor (Figura 3). Analizando la Figura 2, Felixberger (2006) destaca que para baldosas con dimensiones superiores a (40x40) cm, las tensiones de cizalladura no tienden a aumentar, alcanzando un valor límite de 0,62 MPa. La Figura 3 indica las dimensiones máximas de las baldosas cerámicas en función del módulo de cizalladura del mortero adhesivo, de forma que se produce una tensión de cizalladura máxima igual a 0,5 MPa. Cabe señalar que para una baldosa con dimensiones iguales a (20x20) cm, se requiere un mortero adhesivo con un módulo de cizalladura dos veces menor que para una baldosa cerámica con dimensiones iguales a (10x10) cm. Por lo tanto, la flexibilidad del mortero adhesivo debe ser mayor para evitar grietas o problemas patológicos de desprendimiento para baldosas de mayor tamaño.

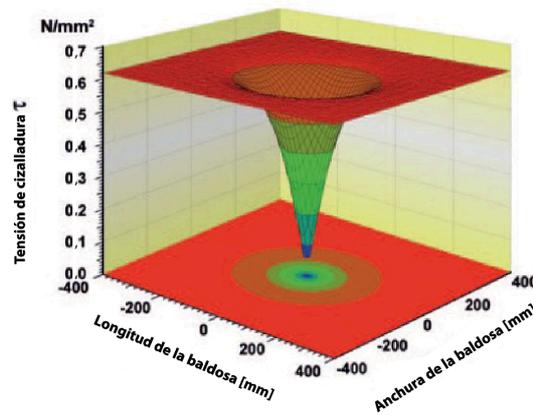


Figura 2 - Tensión máxima de cizalladura en los bordes de las baldosas cerámicas en función de las dimensiones de las baldosas cerámicas (Felixberger, 2006).

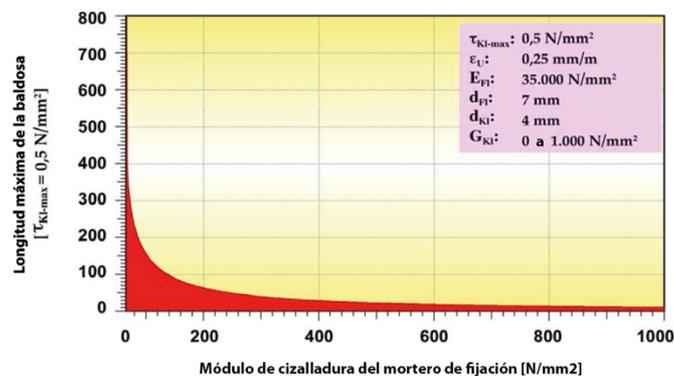


Figura 3 - Valores requeridos para el módulo de cizalladura del mortero adhesivo en función de las dimensiones de las baldosas cerámicas.

En este sentido, es fundamental evaluar las interacciones entre las capas que componen el sistema cerámico para conocer los mecanismos de adhesión y las posibilidades de aumentar la resistencia de las interfases. Por tanto, es necesario evaluar otras propiedades del mortero adhesivo (resistencia a la cizalladura y flexibilidad), así como su comportamiento en el tiempo en función de las tensiones a las que estará expuesta la baldosa a lo largo de su vida útil.

El objetivo de este trabajo ha sido evaluar el sistema de baldosas cerámicas en pequeños prototipos mediante el análisis comparativo de las prestaciones en función del tipo de baldosa cerámica (grupo de absorción de agua y expansión por humedad), tipo de mortero adhesivo, fallos adhesivos, preparación de la base y del sustrato.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Para evaluar la influencia de las características de los morteros adhesivos en las prestaciones de las baldosas cerámicas, se seleccionaron 9 morteros adhesivos nacionales y 5 morteros adhesivos de un fabricante, como se indica en la Tabla 1.

Los morteros adhesivos fueron caracterizados de acuerdo con la norma ABNT NBR 14181, es decir, se determinó la fuerza de adhesión de los morteros en condiciones normales, tras inmersión en agua y tras introducción en estufa con recirculación de aire (esta condición sólo para los morteros adhesivos ACII y ACIII) y con tiempo abierto.

La metodología de ensayo de resistencia adhesiva en condiciones normales, tras inmersión en agua y tras introducción en estufa con recirculación de aire está especificada por la norma ABNT NBR 14081-4. Para ello, los morteros adhesivos se mezclan en el laboratorio en condiciones controladas de temperatura ($23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$), humedad ($60\% \pm 2\%$) y viento ($\leq 0,15\text{m/s}$) con una relación agua/mortero y tiempo de maduración definidos por el fabricante.

Una vez preparado el mortero adhesivo, se aplica sobre un sustrato de hormigón estándar de dimensiones iguales a (500x250) mm utilizando una llana dentada de 6 mm. Una vez abiertos los cordones de mortero adhesivo sobre el soporte estándar, se espera 5 minutos para la aplicación de 10 baldosas cerámicas con dimensiones iguales a (50x50) mm y absorción de agua variable entre 3% y 5%. Las baldosas cerámicas se colocan a una distancia de 5 cm entre sí. Después de 30 segundos de la colocación de la baldosa cerámica sobre los cordones, se aplica una masa de 2 kg sobre estas baldosas cerámicas durante 30 segundos, con el fin de promover el aplastamiento de los caballones. Posteriormente, los sustratos se colocan en condiciones normales de laboratorio (temperatura entre $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad entre $60\% \pm 4\%$). Los sustratos para la determinación de la fuerza de adhesión permanecen en estas condiciones durante 28 días, mientras que los sustratos para la inmersión en agua y para la estufa con recirculación de aire permanecen en estas condiciones durante 7 y 14 días, respectivamente. Después de 7 días de moldeo, los sustratos de curado por inmersión en agua se sumergen en un tanque con agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, permaneciendo en este ambiente hasta que hayan transcurrido 28 días. Después de 14 días de moldeo, los sustratos para la resistencia adhesiva se colocan en una estufa con recirculación de aire a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, permaneciendo en este ambiente hasta que hayan transcurrido 28 días. A los 28 días, se realiza el ensayo de fuerza de adhesión. La Figura 4 muestra estos procedimientos.

Para evaluar la flexibilidad de los morteros adhesivos, se utilizó el procedimiento especificado por la norma ISO 13007, en el que placas delgadas de mortero adhesivo con dimensiones iguales a (300x45x3) mm, doblemente apoyadas, fueron sometidas a un ensayo de flexión, determinando la flecha máxima (desplazamiento vertical) en el centro del hueco. La Figura 5 muestra las etapas del ensayo de flexibilidad.

Fabricante	Tipo de mortero	Nombre en el estudio	Especificación
A	AC I	ACI A	Mortero adhesivo para uso en interiores
A	AC II	ACII A	Mortero adhesivo para uso en interiores y exteriores
A	AC III	ACIII A	Mortero adhesivo para uso en interiores y exteriores
B	AC I	ACI B	Mortero Adhesivo para interiores
B	AC II	ACII B	Mortero Especial - Interiores - Exteriores - Recubrimiento
B	AC III	ACIII B	Mortero Especial Superflexible
C	AC I	ACI C	Mortero gris para uso en interiores
C	AC II	ACII C	Mortero gris para uso en interiores
C	AC III	ACIII C	Mortero flexible gris
E	C 1	ACII E	Gris
F	C 1T	ACII F	Mortero gris (interiores y exteriores)
G	C 2	ACIII G	Mortero gris (interiores y exteriores)
H	C 2 TE	ACIII H	Mortero gris (interiores y exteriores)
I	C 2 TE S1	ACIII I	Maxi mortero gris (interiores y exteriores)

Tabla 1 – Morteros adhesivos ensayados.

Para realizar el ensayo de cizalladura del mortero adhesivo, se adoptó el procedimiento de la norma técnica ASTM C482/14, que consiste en colocar una baldosa cerámica desplazada sobre una de las caras de un sustrato cúbico con la misma dimensión de 50 mm. Tras el curado, se aplica una fuerza de compresión a la baldosa cerámica con el fin de aplicar una tensión de cizalladura a la superficie del mortero adhesivo. La Figura 6 muestra los pasos para realizar el ensayo de cizalladura.

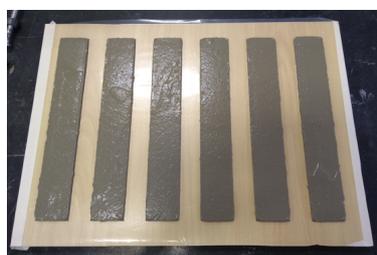


Figura 4 – Procedimiento para la realización del ensayo de adhesión y tiempo abierto.

Tras caracterizar los morteros adhesivos y analizar los resultados obtenidos, se seleccionaron los morteros que se utilizarían en los ensayos de envejecimiento acelerado. Para realizar los ensayos de choque térmico, se seleccionaron 6 morteros adhesivos especificados para uso exterior entre los que mostraron mejores resultados de resistencia adhesiva y diferentes comportamientos en cuanto a la flexibilidad (ACII C, ACIII A, ACIII G, AC III I - ver Tabla 2). Para realizar los ensayos de ciclos de humectación y secado, se seleccionaron 4 morteros adhesivos, uno exclusivamente para uso en interiores y los otros para uso en interiores y exteriores (ACI C, ACII C, ACIII A y ACIII B). Paralelamente a la selección de los morteros adhesivos, fue necesario determinar qué baldosas cerámicas se utilizarían también para fabricar las probetas para los ensayos de choque térmico y de humectación y secado. Para ello, se analizaron las propiedades de las baldosas cerámicas caracterizadas en la fase 1 del estudio, de lo cual se encargó el Laboratorio CRC. A partir del análisis de este informe, se definieron las baldosas cerámicas que se utilizarían en las probetas para el ensayo de choque térmico: gres porcelánico esmaltado (PE01), baldosa cerámica BIIa, placa de gres porcelánico (PP01), baldosa cerámica extrusionada (A101). Para la preparación de las probetas para el ensayo de ciclos de humectación y secado se definieron: una baldosa cerámica porosa extruida (AIII), una baldosa cerámica porosa prensada (BIII) y tres baldosas cerámicas semiporosas (BIIb 12, BIIb 04, BIIb 02 y BIII 2). Los productos evaluados se presentan en la Tabla 2.

Uso en exteriores (Ciclos de calentamiento y Choque Térmico)		Uso en interiores (Ciclos de Humectación y Secado)	
Baldosa cerámica	Mortero adhesivo	Baldosa cerámica	Mortero adhesivo
PE 01	ACII C	A III	ACI C
PP 01	ACIII A	BIIb 12	ACII C
A101	ACIII G	BIIb 04	ACIII A
BIIa	ACIII I Mortero adhesivo dosificado	BIIb 02	ACIII B Mortero 1 dosificado Mortero 2 dosificado Adhesivo

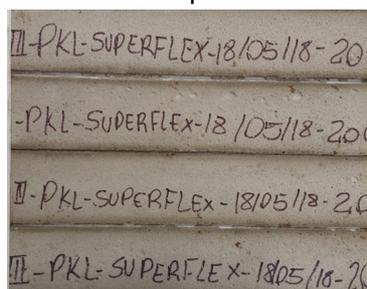
Tabla 2- Baldosas cerámicas y morteros adhesivos seleccionados para el estudio.



Preparación de las probetas a ensayar



Curado de las probetas



Probetas a ensayar antes del ensayo



Ensayo de flexibilidad

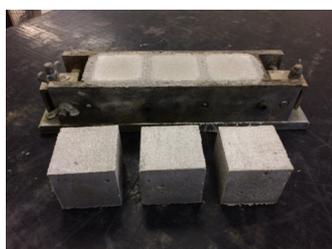
Figura 5 – Pasos del ensayo de flexibilidad.

Para preparar las probetas para los ensayos de choque térmico y los ciclos de humectación y secado, se utilizaron sustratos de hormigón estándar con dimensiones iguales a (50x25) cm. Para la colocación, las baldosas cerámicas, a excepción de las de gres porcelánico, se cortaron a unas medidas de (10x10) cm con juntas de colocación de 1 mm. Tras la colocación, se procedió al rejuntado mediante mortero de rejuntado cementoso o sellador elastomérico (simulando la situación sin rejuntado). Por último, para restringir el movimiento del recubrimiento, se pegaron tiras de baldosas cerámicas con resina epoxi en los bordes de los sustratos. La Figura 7 muestra fotos de la simulación de los fallos de colocación (pegando adhesivos al dorso de las baldosas) y de los prototipos moldeados.

Después de moldear y curar los prototipos, se sometieron a ciclos de choque térmico o de humectación y secado (Figura 8). Los ciclos de choque térmico se realizaron calentando el recubrimiento del prototipo hasta alcanzar una temperatura superficial de 80°C, que se mantuvo durante 1 hora.

Transcurrido este tiempo, se pulverizó agua sobre la superficie del recubrimiento, con el fin de simular la lluvia y promover un rápido enfriamiento de la superficie hasta alcanzar una temperatura de 25°C, que se mantuvo durante 5 minutos. Transcurrido este tiempo, se reiniciaba el ciclo, repitiéndolo 10 y 50 veces. Los ciclos de humectación y secado se llevaron a cabo pulverizando agua sobre la superficie del recubrimiento durante dos horas y, a continuación, interrumpiendo la humectación durante 4 horas. Transcurrido este tiempo, se reiniciaba el ciclo, repitiéndolo 50 veces.

Una vez finalizados los ciclos de choque térmico o de humectación y secado, se realizaron ensayos de fuerza de adhesión en los prototipos sometidos a ciclos de envejecimiento y en los no sometidos, con el fin de comparar la pérdida de resistencia adhesiva promovida por el choque térmico y los ciclos de humectación y secado.



Sustrato (50x50) mm



Colocación de la baldosa cerámica



Aplicación de peso para aplastar los
caballones



Ensayo de cizalladura por compresión

Figura 6 - Etapas del ensayo de cizalladura del mortero adhesivo.



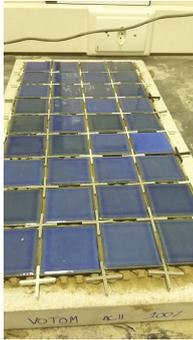
Baldosa sin simulación de fallo de asentamiento – 100% de relleno debajo de la baldosa



Baldosa con simulación de fallo de asiento del 50% – 50% de relleno debajo de la baldosa



Baldosa con simulación de fallo de asiento del 25% – 75% de relleno debajo de la baldosa



Prototipo con recubrimiento de baldosas de gres porcelánico y mortero ACII y sin fallo de asiento – sin restricciones



Prototipo con recubrimiento de baldosas de gres porcelánico y mortero ACIII con un 25% de fallo de asiento y con material de rejuntado elastomérico



Prototipo con recubrimiento de baldosas de gres porcelánico y mortero ACIII con un 25% de fallo de asiento y con material de rejuntado elastomérico – con restricción

Figura 7- Simulación de fallos de asiento y prototipos para choque térmico y ciclos de humectación y secado.



Figura 8- Cámara de choque térmico con los prototipos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 presenta los resultados de resistencia adhesiva de estos morteros adhesivos según la norma ABNT NBR 14081, la deformación transversal (cizalladura) según la norma ISO 13007-2 y los resultados de resistencia a la cizalladura según la metodología de la norma ASTM C482/14.

Mortero	Fuerza de adhesión (MPa)				Flexibilidad (mm)	Cizalladura (MPa)
	Tiempo abierto	Fuerza de adhesión	Fuerza de adhesión/ inmersión en agua	Fuerza de adhesión/ temperatura elevada		
ACI - A	0,89	0,83	0,69	-	1,21	1,44
ACI - B	0,87	1,01	0,63	-	1,14	-
ACI - C	0,67	0,74	0,39	-	0,47	-
ACI - D	0,44	0,53	0,33	-	-	-
ACII - A	0,83	1,18	0,83	0,25	1,34	1,53
ACII - B	0,75	1,22	0,86	0,47	1,47	-
ACII - C	0,81	1,03	0,83	0,39	1,32	0,75
ACII - D	0,91	1,59	0,80	1,04	-	-
ACII - E	0,67	0,75	0,29	0,45	0,42	-
ACII - F	0,42	0,72	0,65	0,02	0,83	-
ACIII - A	0,82	1,61	1,53	0,73	1,59	2,55
ACIII - B	1,41	1,7	1,32	1,33	1,54	-
ACIII - C	0,49	0,74	1,1	0,26	1,15	1,86
ACIII - D	1,11	1,87	1,31	1,22	-	-
ACIII - G	1,03	1,22	1	0,74	1,1	-
ACIII - H	1,41	1,6	1,22	1,29	1,23	-
ACIII - I	1,64	1,79	1	1,37	1,48	2,59

Tabla 3 – Resultados promedio para los morteros adhesivos.

La Tabla 4 presenta los resultados promedios de la caracterización de los morteros adhesivos de acuerdo con las pruebas especificadas por las normas técnicas para mortero de revestimiento, ABNT NBR 13279/05 y ABNT NBR 15630/09. Aunque estos ensayos estén normalizados solamente para morteros de revestimiento, se realizaron para caracterizar los morteros adhesivos con el objetivo de caracterizarlos y verificar la correlación entre estas propiedades y las prestaciones posteriores de los morteros adhesivos.

Mortero	Resistencia a la compresión (MPa)	Carga de tracción (MPa)	Módulo de deformación (GPa)
ACI - A	12,1	4,63	9,19
ACI - B	11,43	4,12	9,51
ACI - C	4,68	2,44	5,96
ACI - D	3,13	1,79	6
ACII - A	13,43	4,51	9,29
ACII - B	14,7	4,86	12,11
ACII - C	13,15	5,31	10,17
ACII - D	12,84	4,88	10,63
ACII - E	4,18	1,83	4,47
ACII - F	8,3	2,51	6,3
ACIII - A	15,89	6,73	11,21
ACIII - B	15,4	6,56	11,11
ACIII - C	11,52	4,85	12,34
ACIII - D	11,61	5,95	9,24
ACIII - G	10,99	4,67	5,64
ACIII - H	12,33	4,8	8,03
ACIII - I	14,78	5,11	6,88

Tabla 4 - Resultados promedio para los morteros adhesivos.

Analizando los datos obtenidos en los ensayos de caracterización de morteros adhesivos, se constató que:

- Morteros con la misma clasificación en la norma brasileña tienen fuerzas de adhesión muy diferentes, incluso cuando cumplen con los parámetros de la norma, lo que indica que los fabricantes pueden utilizar diferentes porcentajes de cemento y polímeros en su composición, lo cual hará que presenten diferentes prestaciones en la práctica.
- Morteros con la misma clasificación en la norma brasileña tienen flexibilidades muy diferentes, incluso los morteros Tipo AC II son más flexibles que los morteros ACIII, indicando que algunos morteros ACIII son más rígidos que algunos morteros adhesivos ACII, pudiendo presentar peores prestaciones a lo largo de la vida útil del recubrimiento.
- La falta de correlación entre la fuerza de adhesión en diferentes tipos de curado con la fuerza de compresión, la resistencia a la compresión, el módulo de deformación y la flexibilidad de los morteros adhesivos.
- La no correlación entre la resistencia a la cizalladura y la flexibilidad del mortero adhesivo.

La Figura 9 muestra la resistencia adhesiva del recubrimiento cerámico compuesto por baldosas cerámicas AIa, BIIa, PE01 y PP en función del tipo de mortero adhesivo, del porcentaje de fallo de asiento (0%, 25% y 50%) y del número de ciclos de choque térmico (0, 10 y 50). Analizando esta figura, se observa que el mortero que presentó el mejor comportamiento, tanto en resistencia adhesiva como tras los ciclos de choque térmico, con y sin presencia de fallos de asiento fue el mortero adhesivo AC III-I. Este mortero fue el que presentó mejor fuerza de adhesión, así como mayor flexibilidad y resistencia a la cizalladura. Además, en este mortero se observó un excelente comportamiento adhesivo, que también mostró una variación pequeña en la fuerza de adhesión en función de los ciclos de choque térmico. También a partir de la Figura 9, se observa que los recubrimientos, con excepción del colocado con mortero AC II - C, independientemente del número de ciclos de choque térmico y del porcentaje de fallos de colocación, presentaron fuerzas de adhesión superiores a 0,3 MPa.

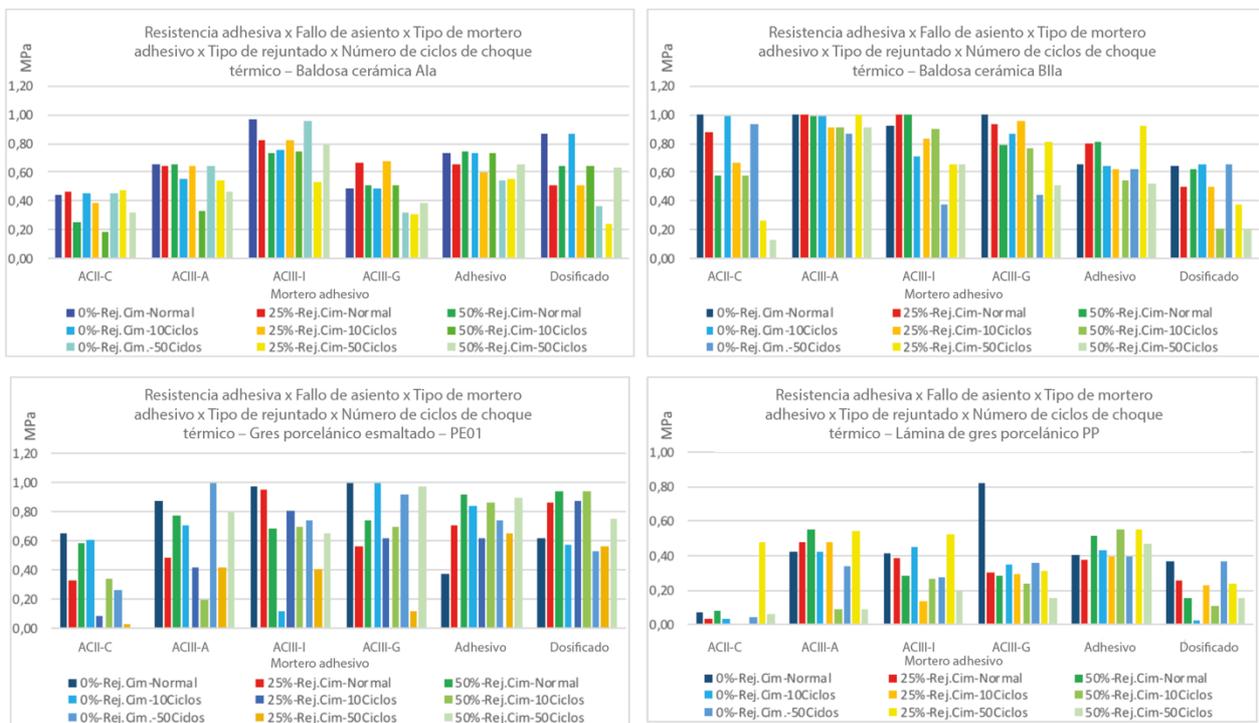


Figura 9 - Fuerza de adhesión en función del tipo de mortero adhesivo, porcentaje de relleno bajo la baldosa y número de ciclos de choque térmico para las baldosas AIa, BIIa, PE01 y PP.

Analizando la Figura 9, se observa que:

- **Producto AIa:** el mortero que presentó el mejor comportamiento, tanto durante el curado del adhesivo como después de ciclos de choque térmico, con y sin presencia de fallos de instalación fue el mortero adhesivo AC III-I. Este mortero fue el que presentó la mayor fuerza de adhesión, así como una mayor flexibilidad y resistencia al cizallamiento. Además, presentó un excelente comportamiento adhesivo, que también mostró una variación pequeña en la fuerza de adhesión en función de los ciclos de choque térmico. Se observa que los recubrimientos, a excepción del colocado con mortero AC II - C, independientemente del número de ciclos de choque térmico y del porcentaje de fallos de colocación, presentaron una fuerza de adhesión superior a 0,3 MPa.
- **Producto PE01:** se observa la influencia negativa del número de ciclos y del porcentaje de fallos de asiento sobre la fuerza de adhesión del recubrimiento. Se observa que la presencia de defectos de asentamiento afectó significativamente a la fuerza de adhesión del mortero adhesivo ACII-C. Para este tipo de baldosas cerámicas, se observa que los morteros adhesivos que mostraron mejor comportamiento fueron los morteros ACIII-I, ACIII-G y el Adhesivo.
- **Producto PP:** se observa la influencia negativa del número de ciclos y del porcentaje de fallos de asiento sobre la fuerza de adhesión del recubrimiento. Se observa que, para este tipo de baldosas cerámicas, el mortero ACII-C no presentó ninguna resistencia adhesiva satisfactoria incluso antes de ser sometido a ciclos de choque térmico. La presencia de un 25% de fallos de adhesión afectó significativamente a la fuerza de adhesión en relación con el recubrimiento sin fallos de adhesión. El recubrimiento con un 50% de fallos de asiento presentó una fuerza de adhesión similar al recubrimiento con un 25% de fallos de asiento. Para este tipo de baldosa cerámica, se observa que los morteros adhesivos que presentaron mejor comportamiento fueron los morteros ACIII-A, ACIII-I, ACIII-G y el Adhesivo.

A continuación, se muestran los gráficos de variación de la resistencia adhesiva en función de los ciclos de humectación y secado, el número de fallos de asiento (0%, 25% y 50%), el tipo de mortero adhesivo (ACI-C, ACII-C, ACII-A, ACIII-B, ACII-Dosificado, ACI-Dosificado) para recubrimientos con baldosas cerámicas BIIb12, BIIb4, BIIb2, BIII2 y AIII (Figura 10).

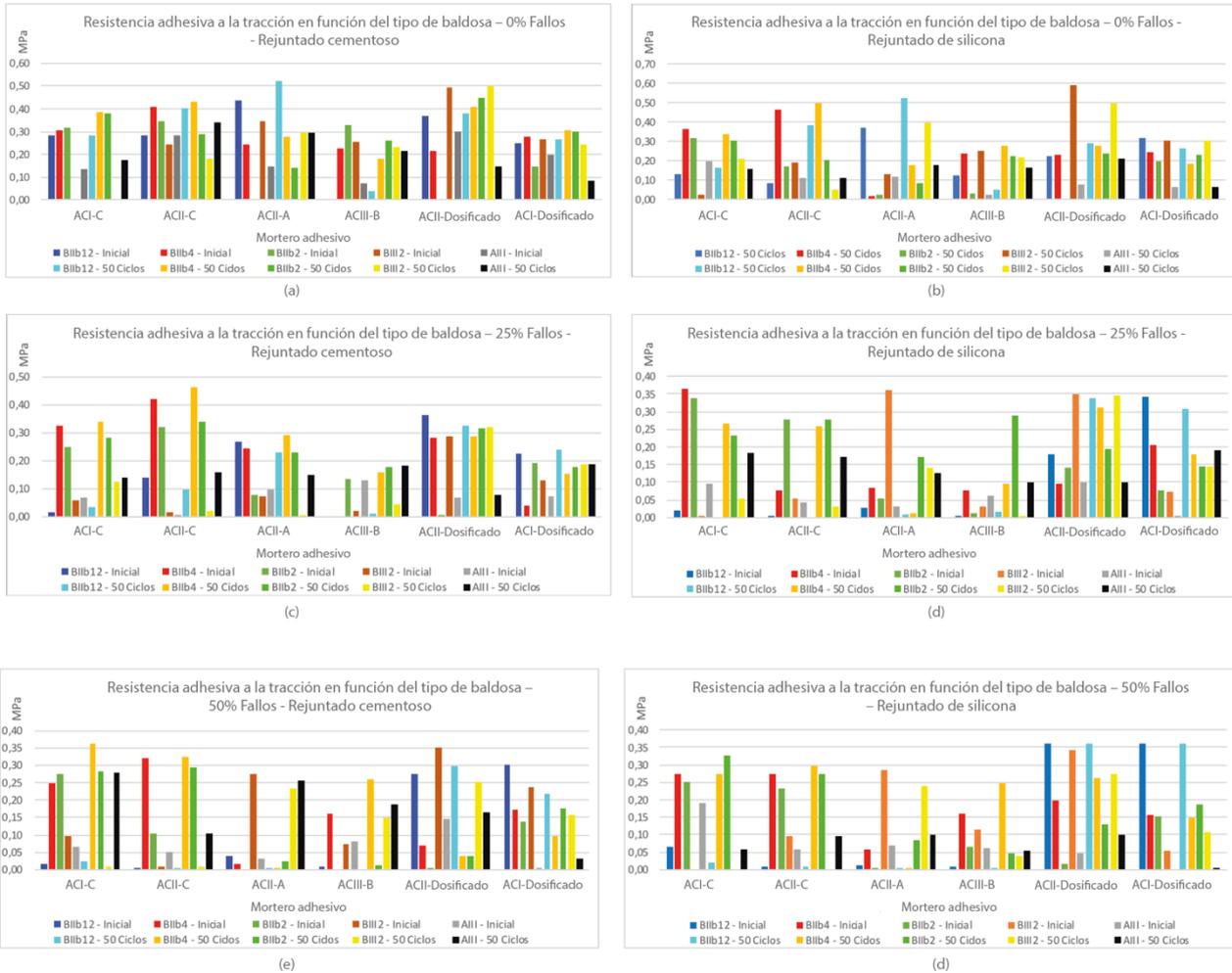


Figura 10: Gráficos de variación de la resistencia adhesiva en función de los ciclos de humectación y secado, del número de fallos de asiento (0%, 25% y 50%), del tipo de mortero adhesivo (ACI-C, ACII- C, ACII-A, ACIII-B, ACII-Dosificado, ACI-Dosificado) para recubrimientos con baldosas cerámicas BIIb12, BIIb4, BIIb2, BIII2 y AIII.

Analizando la Figura 10(a), se observa que el mortero adhesivo ACIII-B fue el que presentó peor resistencia adhesiva tanto en la tracción inicial, como después de 50 ciclos de humectación y secado, para la mayoría de los tipos de baldosas cerámicas colocadas sin presencia de defectos. La baldosa cerámica BIII mostró una resistencia adhesiva inicial nula con el mortero adhesivo ACI-C. Los morteros que mostraron mejor comportamiento en relación con la fuerza de adhesión inicial y final fueron el mortero adhesivo ACII-C y el ACII-Dosificado. Se observa que el comportamiento del mortero adhesivo fue diferente en función de la baldosa cerámica.

Analizando la Figura 10(c), se observa que el mortero adhesivo ACIII-B fue el que presentó, para la mayoría de los tipos de baldosas cerámicas colocadas con un 25% de fallos, la peor resistencia adhesiva tanto en la tracción inicial, como después de 50 ciclos de humectación y secado. Con un 25% de presencia de fallos, sólo los morteros adhesivos ACI-C, ACII-C y ACI-Dosificado consiguieron alcanzar valores de fuerza de adhesión superiores a 0,3 MPa para algunos tipos de baldosas cerámicas. También puede observarse que los ciclos de humectación y secado tuvieron poco efecto sobre la fuerza de adhesión respecto a la tracción inicial.

Analizando la Figura 10(e) se observa que con un 50% de presencia de fallos, sólo el recubrimiento con baldosa cerámica BIIb4 colocado con mortero adhesivo ACII-C y el recubrimiento con la baldosa cerámica AIII colocada con mortero adhesivo ACII-dosificado presentaron una resistencia adhesiva a la tracción inicial mayor o igual a 0,30 MPa. También puede observarse que los ciclos de humectación y secado no favorecieron la pérdida de resistencia adhesiva. Analizando las Figuras 10 (b), (d) y (f) se observa el mismo comportamiento entre el recubrimiento colocado con material de rejuntado cementoso y rejuntado realizado con silicona.

4. CONCLUSIONES

A partir de este estudio, en relación con las prestaciones de los morteros adhesivos, se observó que morteros con la misma clasificación según la norma brasileña presentan fuerzas de adhesión muy diferentes, incluso cuando cumplen los parámetros de la norma, y que morteros adhesivos del mismo tipo, pero de diferentes fabricantes, presentarán prestaciones diferentes en la práctica. También se puede observar que los morteros adhesivos con una clasificación inferior pueden presentar prestaciones superiores en comparación con los morteros adhesivos con una clasificación superior según la norma brasileña. Con relación a la capacidad de deformación transversal (flexibilidad), se puede afirmar que es un requisito importante que debe ser especificado para recubrimientos que estarán sometidos a grandes deformaciones (expansión por humedad de la baldosa cerámica, expansión térmica del recubrimiento, deformación de la base). Para los morteros evaluados, se observó que morteros con la misma clasificación o incluso inferior en relación con la clasificación de la norma brasileña tienen flexibilidades muy diferentes, pudiendo presentar prestaciones inferiores a lo largo de la vida útil del recubrimiento para situaciones que exijan mayor capacidad de absorción o deformación. En cuanto a la resistencia a la cizalladura, se observó que es otro parámetro que es necesario especificar para recubrimientos que estarán sometidos a grandes deformaciones (expansión por humedad de la baldosa cerámica, expansión térmica del recubrimiento, deformación de la base). Este requisito no se aborda en la norma internacional ISO 13007, sino únicamente en las normas ANSI 118.4 y ASTM C482. La norma ANSI comenzó a presentar criterios de resistencia a la cizalladura para morteros adhesivos con polímeros en 2019, y en 2020 para morteros adhesivos con altos aditivos. También será un buen parámetro para diferenciar las prestaciones de los morteros brasileños. En cuanto a las correlaciones entre las propiedades de los morteros adhesivos, no es posible verificar una correlación entre la fuerza de adhesión, la flexibilidad y la fuerza de cizalladura. En los morteros adhesivos comerciales, tampoco hubo correlación entre las propiedades del mortero adhesivo (fuerza de adhesión, flexibilidad y resistencia a la cizalladura) y la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción por flexión y el módulo de deformación. Sin embargo, con morteros adhesivos de formulación conocida fue posible establecer una correlación entre la flexibilidad y el módulo de deformación. La existencia de esta correlación es un dato importante, ya que el método de ensayo del módulo de deformación es más fácil de ejecutar y controlar. Por lo tanto, es necesario profundizar en estos estudios de correlación entre estas dos propiedades con el fin de establecer los criterios para el módulo de deformación para que los morteros adhesivos sean considerados flexibles y superflexibles.

Durante los estudios de evaluación de las prestaciones del recubrimiento tras ciclos de choque térmico, se observó que la propiedad que más influía en la baldosa cerámica en relación con la resistencia adhesiva era la absorción de agua en relación con el tipo de mortero adhesivo. Durante esta evaluación se observó que los morteros adhesivos que presentaban mayor flexibilidad eran los que mostraban menor variación en la resistencia adhesiva tras los ciclos de choque térmico. Sin embargo, no fue posible establecer ninguna correlación entre las prestaciones del recubrimiento en función de la expansión por humedad de las baldosas cerámicas, considerando el mismo tipo de mortero adhesivo. Esto podría quizás estar relacionado con las pequeñas dimensiones de los prototipos. La influencia de la expansión por humedad de las baldosas cerámicas para el mismo tipo de mortero adhesivo debe verificarse en prototipos de mayor tamaño, lo que se llevará a cabo en la otra parte de este estudio.

Los ensayos de ciclos de humectación y secado realizados en prototipos pequeños no resultaron ser un buen método de evaluación del envejecimiento para recubrimientos cerámicos, ya que se observó poca pérdida o incluso ganancia en la resistencia adhesiva tras los ciclos de humectación y secado. En esta prueba, también se observó que algunos morteros adhesivos con una clasificación inferior obtuvieron mejores resultados que algunos morteros adhesivos con una clasificación superior.

Los fallos en la colocación de baldosas cerámicas favorecen la pérdida de adhesión y, en consecuencia, la pérdida de prestaciones durante la vida útil del sistema cerámico.

Por ello, tras la realización de este estudio, se recomienda que los diseñadores de baldosas cerámicas comiencen a especificar las propiedades del mortero adhesivo, independientemente de su clasificación, en función de las propiedades de la baldosa cerámica (absorción de agua, expansión por humedad), de la deformación de la base y de los esfuerzos a los que estará sometido el recubrimiento (gradientes térmicos). Se recomienda especificar la capacidad de deformación del mortero adhesivo, es decir, su flexibilidad, de acuerdo con los criterios de la norma ISO 13007. Asimismo, se recomienda adoptar también los parámetros de resistencia a la cizalladura de las normas ANSI 118.4 y ANSI 118.15, que tienen criterios de resistencia ante diferentes velocidades de cizalladura en función de la absorción de la baldosa cerámica. Se recomienda que los procedimientos de colocación sean seguidos de acuerdo con las normas ABNT NBR 13753, 13754 y 13755.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] MANSUR, A. A. P.; NASCIMENTO, O. L. do N.; VASCONCELOS, W. L.; MANSUR, H. S. "Chemical Functionalization of Ceramic Tile Surfaces by Silane Coupling Agents: Polymer Modified Mortar Adhesion Mechanism Implications". *Materials Research*, v. 11, n. 3, pp. 293-302, julio-sept. 2008.
- [2] ABREU, M et al. Modeling the behavior of Ceramic Tile Coverings. En: VIII Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico – Qualicer, Castellón, España, 2004.
- [3] SARAIVA, A. G. et al. Análise das Tensões entre Argamassa Colante e Placas Cerâmicas Submetidas a Esforços de Natureza Térmica. En: IV Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Brasília, 2001.
- [4] FELIXBERGER, J. K. Stresses in the composite system: tile – fixing mortar base. State University of St Petersburg (IFMO). Castellón (España). 2006.
- [5] ABNT NBR 14081-1:12 – Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 1: Requisitos
- [6] ABNT NBR 14081-2:15 – Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios
- [7] ABNT NBR 14081-3:12 – Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 3: Determinação do tempo em aberto
- [8] ABNT NBR 14081-4:12 – Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração
- [9] ABNT NBR 13279:05 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão
- [10] ABNT NBR 15630:09 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica
- [11] ISO 13007-1/15 - Ceramic Tiles – grouts and adhesives – Part 1: Terms, definitions and specifications for adhesives
- [12] ISO 13007-2/15 – Ceramic Tiles – grouts and adhesives – Part 2: Test methods for adhesives: Determination of transverse deformation
- [13] ASTM C482 - Standard Test Method for Bond Strength of Ceramic Tile to Portland Cement Paste
- [14] ABNT NBR 13753:1996 – Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento
- [15] ABNT NBR 13754:1996 – Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento
- [16] ABNT NBR 13755:2017 - Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante - Projeto, execução, inspeção e aceitação – Procedimento