# APLICACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE BALDOSAS CERÁMICAS

#### Riccardo Fabris<sup>a</sup>, Giulia Masi<sup>a</sup>, Denia Mazzini<sup>b</sup>, Leonardo Sanseverino<sup>c</sup>, Maria Chiara Bignozzi<sup>a</sup>

 <sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Química, Ambiental y de los Materiales DICAM), Universidad de Bolonia, via Terracini 28, 40131 Bolonia, Italia
 <sup>b</sup> Colorobbia Italia S.P.A., Via Bucciardi, 37, 41042, Fiorano Modenese, Módena, Italia
 <sup>c</sup> Centro Ceramico, Via Valle d'Aosta 1, 41049 Sassuolo, Módena, Italia

#### RESUMEN

Durante la pasada década, la producción y consumo de baldosas cerámicas han experimentado un crecimiento significativo, a pesar de los reguisitos cada vez mayores impuestos por el mercado. Este crecimiento se debe, no solo a avances tecnológicos y la estética del producto, sino también a formatos innovadores de baldosas (por ejemplo, las láminas cerámicas). Además, las mejoras en las propiedades mecánicas, tecnológicas y tribológicas han promovido nuevas aplicaciones. Las baldosas cerámicas, muy presentes en el mercado internacional, deben seguir los criterios de clasificación y los métodos de ensayo descritos en las normas ISO 13006 e ISO 10545 (parte 1-20), respectivamente. Sin embargo, entre los métodos de ensayo todavía falta un ensayo específico para medir la resistencia al desgaste. Este aspecto es de suma importancia, especialmente para las baldosas esmaltadas, en las que el principal papel del esmalte es preservar la decoración subyacente. El objeto de este estudio es investigar las propiedades mecánicas y tribológicas de dos esmaltes diferentes aplicados a baldosas de gres porcelánico. Con el ánimo de obtener una imagen clara de las propiedades mecánicas y tribológicas de la superficie esmaltada, se llevaron a cabo diferentes ensavos analíticos, tales como la microdureza Vickers mediante indentación, medida de rugosidad e investigación microestructural por microscopía electrónica de barrido (FEG-MEB) equipada con espectroscopía de dispersión de rayos X (EDS). La resistencia al desgaste se evaluó mediante dos métodos distintos: el ensayo de resistencia a la abrasión según ISO 10545-7 y el método multi-atributo, un nuevo enfoque que permite determinar el uso futuro de la cerámica basándose en una combinación de ensayos diferentes. Los resultados indican que el ensayo multi-atributo ofrece una evaluación más precisa de la resistencia al desgaste de las baldosas, sin influencia del color de la decoración subyacente.

# 1. INTRODUCCIÓN

En el sector de la fabricación industrial, las normas técnicas juegan un papel primordial en el establecimiento de métodos de ensayo para verificar la calidad del producto y fijar los requisitos para su clasificación. Para baldosas cerámicas, las normas más importantes para los mercados europeos e internacionales se desarrollan en los marcos de CEN/TC 67 e ISO/TC 189 "Baldosas cerámicas", respectivamente. Las baldosas cerámicas se clasifican de acuerdo con ISO 13006 y/o EN 14411 y se ensayan mediante los métodos descritos en EN ISO 10545 Partes 1-20. Estos métodos de ensayo abarcan un amplio número de caracterizaciones físicas, químicas y mecánicas. Sin embargo, deben ser revisados y/o actualizados periódicamente para ser capaces de seguir/recoger todas las mejoras promovidas por los cambios tecnológicos. Actualmente, las baldosas cerámicas se dividen todavía en no esmaltadas (UGL) y esmaltadas (GL). Su resistencia al desgaste se determina solo en base a dos ensayos de abrasión diferentes, descritos en la norma ISO EN 10545-6 para baldosas no esmaltadas y en la norma ISO EN 10545-7 para baldosas esmaltadas. Estos dos ensayos difieren significativamente: ISO EN 10545-6 mide la abrasión profunda de baldosas UGL, cuantificando el volumen de material eliminado después de 150 revoluciones de un disco de acero en presencia de un polvo abrasivo, mientras que ISO EN 10545-7 evalúa la resistencia a la abrasión superficial de baldosas GL mediante la observación visual de la zona desgastada [1-3]

Sin embargo, la resistencia al desgaste se refiere generalmente a la capacidad de una superficie a soportar procesos de degradación, tales como la abrasión superficial resultante del movimiento relativo entre dos superficies en contacto y su capacidad de resistir las fuerzas mecánicas que pueden llevar a deformaciones permanentes, como arañazos o incisiones que alteran o dañan la textura superficial [4]. La resistencia al desgaste también depende de las propiedades mecánicas y morfológicas de la superficie, tales como dureza, rugosidad, tamaño y distribución de poros y microestructura superficial del material (por ejemplo, cantidad de fases cristalina y amorfa y forma, tamaño y tipo de estructuras cristalinas) [5]. Además, el desgaste afecta mucho a la durabilidad de las superficies expuestas, reduciendo la vida útil del producto [4]. La definición de resistencia al desgaste de baldosas cerámicas es actualmente un tema de discusión en el Grupo de Trabajo 1 "Métodos de ensayo" de ISO/TC 189. Los debates en marcha se centran en la identificación de la meior metodología para evaluar la resistencia al desgaste y establecer un método de ensayo adecuado para las baldosas GL y UGL, capaz a su vez de superar las limitaciones de los métodos actuales 10545-6 y 10545-7. Una propuesta en desarrollo es un método multiatributo que incorpora diferentes ensayos para evaluar la resistencia al desgaste. Esta idea se ha descrito en un proyecto de elemento de trabajo WI ISO/CD 10454-22 titulado "Determinación de la resistencia al desgaste con un método multi-atributo", todavía en discusión [6].

El objeto de este trabajo es evaluar la resistencia al desgaste de baldosas esmaltadas usando el método multi-atributo y comparar los resultados con los obtenidos sobre las mismas muestras ensayadas mediante ISO 10545-7. Con este propósito, se ensayaron baldosas de gres porcelánico recubiertas con esmaltes brillante y mate. Además, se llevaron a cabo también varios análisis de caracterización superficial sobre las muestras, incluyendo la medida de dureza Vickers (HV) y la determinación de parámetros de rugosidad, tales como rugosidad media (R<sub>a</sub>) y rugosidad total (R<sub>z</sub>). También se llevó a cabo un análisis microestructural utilizando un microscopio electrónico de barrido (FEG-SEM) equipado con espectroscopía de dispersión de rayos X (EDS) sobre ambas superficies esmaltadas, para caracterizar su microestructura.

# 2. MATERIALES Y MÉTODO

## 2.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Se prepararon dos esmaltes industriales diferentes siguiendo las formulaciones indicadas por Colorobbia. Para producir un esmalte brillante y uno mate (GL-A y GL-B, respectivamente), las mezclas se prepararon mezclando adecuadamente las fritas y el resto de las materias primas. La mezcla GL-A está compuesta de frita de zinc (FR-Zn, 30-40% en peso) y frita de calcio (FR-Ca, 10-20% en peso). Adicionalmente, la composición GL-A contiene varias materias primas: arcilla (5-10% en peso), caolín (10-20% en peso), dolomita (5-10% en peso), feldespato (10-20% en peso), cuarzo (10-20% en peso), BaCO<sub>3</sub> (5-10% en peso), y ZnO (1-5% en peso). La mezcla GL-B se compone de FR-Ca (10-20% en peso), y fritas de bario (FR-Ba, 10-20% en peso). Además, GL-B contiene arcilla (5-10% en peso), dolomita (5-10% en peso), feldespato (10-20% en peso), cuarzo (1-5% en peso), feldespato (10-20% en peso), cuarzo (1-5% en peso), feldespato (10-20% en peso), como materias primas.

También se añadieron pequeñas cantidades de tripolifosfato de sodio (STPP, 0,1% en peso) y carboximetilcelulosa (CMC, 0,3% en peso) junto con un 40% de agua destilada. Estas mezclas se molturaron durante 45 minutos en una jarra cerámica con bolas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Las barbotinas resultantes se tamizaron con un tamiz de 200 mallas para eliminar las partículas gruesas. La densidad de las barbotinas se verificó con un picnómetro de 100 mL y se ajustó a 1450 g/L añadiendo agua destilada. Los esmaltes se aplicaron en la cantidad de 44 mg/cm<sup>2</sup> mediante pulverización sin aire (*airless technique*) sobre soporte crudo con engobe de 30x30 cm. Las muestras esmaltadas se secaron primero en una estufa eléctrica ventilada a 110°C durante 60 minutos y después se enfriaron al aire. A continuación, las muestras esmaltadas se cocieron en un horno industrial de rodillos con un ciclo rápido a una velocidad de calentamiento de 30°C/min y una temperatura máxima de 1205°C, mantenida durante 7 minutos, seguidos de un enfriamiento controlado. Se llevaron a cabo ensayos de abrasión ISO 10545-7 sobre baldosas con decoraciones claras y oscuras impresas digitalmente antes de la aplicación de los esmaltes.

### 2.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

La resistencia a la abrasión se evaluó mediante dos ensayos diferentes: el ensayo de resistencia a la abrasión según ISO 10545-7 y el nuevo ensayo multi-atributo [7]. Los resultados de ISO 10545-7 se clasificaron de acuerdo con el Anexo N descrito en ISO 13006 [8].

El ensayo multi-atributo se compone principalmente de tres ensayos diferentes:

I. Determinación de la pérdida de peso específico ( $\Delta$ WL<sub>S</sub>) después de 6000 ciclos de abrasión realizados con el mismo equipo descrito en ISO 10545-7. La  $\Delta$ WL<sub>S</sub> se calcula aplicando la Ecuación (1), donde W<sub>i</sub> y W<sub>f</sub> indican el peso inicial y final y A representa la zona desgastada.

a. 
$$\Delta W L_S = \frac{W_i - W_f}{A} \left[ g/cm^2 \right]$$
 (1)

II. La evaluación de la variación de brillo ( $\Delta G$ ) después de 600 y/o 6000 ciclos de abrasión se hizo aplicando la ecuación (2), donde G<sub>i</sub> y G<sub>f</sub> indican el brillo inicial y final respectivamente. La evaluación de la resistencia a las manchas se realiza sobre la zona desgastada, aplicando una solución de cromo verde según ISO 10545-14 [9].

b. 
$$\Delta G = G_i - G_f$$
 (2)

III. Las medidas de resistencia al rayado se llevan a cabo según el procedimiento descrito en ASTM C1895-20 [10].

Los resultados de los tres métodos se comparan entonces con los límites descritos en la Tabla 1 para clasificar las baldosas cerámicas

Método de	Clase de resistencia al desgaste			
ensayo	Н	HH	ННН	
Uso previsto	Aplicación residencial	Zona de tránsito Zona de trán ligero intenso		
∆WLs [mg/cm <sup>2</sup> ] (@ 6000)	0.035<∆Wr<0.045	0.028≤∆Wr<0.035	∆Wr<0.028	
ΔG	@ 600 ciclos 36≤∆G≤50	@ 600 ciclos 6<∆G≤35	@ 6000 ciclos $\Delta G \leq 5$	
Resistencia a las manchas	Clase mínima: 3			
Resistencia al rayado	Punto de dureza ≤4	Punto de dureza ≤5	Punto de dureza ≤7	

Tabla 1: Requisitos para la clasificación de la resistencia al desgaste

Las medidas de microdureza Vickers se realizaron a lo largo de la delgada capa de esmalte, usando un indentador de microdureza (microdurómetro Isoscan Galileo) con una fuerza aplicada de 9,81 N y un tiempo de permanencia de 15 segundos, según lo especificado en ASTM C1327-15 [11]. Se hicieron cinco indentaciones sobre cada muestra GL-A y GL-B. El valor de la microdureza se determinaba midiendo las diagonales de la indentación mediante un programa de análisis de imagen (ISOSCAN). La rugosidad media (R<sub>a</sub>) y la total (R<sub>z</sub>) se determinaron de acuerdo con ISO 4287, obteniendo y analizando los perfiles de rugosidad superficial con un perfilómetro óptico (Leica Dual Core Microscope 3D DCM 3D) equipado con un programa de análisis de imagen (Leica Map Premium) [12]. Para cada esmalte se obtuvieron cinco perfiles con una longitud de 50 mm con 20X de aumento. La caracterización superficial se hizo sobre las superficies esmaltadas recubiertas de oro utilizando un microscopio electrónico de barrido (FEG-SEM, Tescan Mira 3) equipado con espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS), para obtener información sobre la distribución de la estructura cristalina inmersa en la matriz amorfa. Las micrografías se obtuvieron por dispersión de electrones con una distancia de trabajo (WD) de 10 mm y un voltaje de aceleración de 20kV. Antes de la observación, las muestras SEM se hacían conductoras, recubriéndolas con oro mediante pulverización catódica (sputtering) (Quorum Q150R ES).



#### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La resistencia a la abrasión de las muestras GL-A y GL-B se determinó y se evaluó de acuerdo con la metodología descrita en ISO 10545-7 [7]. Los resultados de este ensayo se clasificaron según el Anexo N de ISO 13006, en función de cinco clases (de clase 1 a clase 5, indicando destinos finales con resistencia a la acción de abrasión creciente) [8]. Los resultados reflejan una notable diferencia de resistencia a la abrasión entre las muestras con decoración oscura y clara. De hecho, la zona desgastada de las muestras con decoración oscura se distingue después de 600 ciclos, resultando así de clase 2. En cambio, la zona desgastada de las muestras con decoración clara no es visible hasta después de 12000 ciclos, resultando de clase 5, la clase más alta especificada en ISO 10545-7 [7]. Con vistas a validar la clasificación proporcionada para las muestras de decoración clara, la evaluación de la resistencia a las manchas se realizó en la zona desgastada de acuerdo con la norma ISO 10545-7, siguiendo el procedimiento recogido en la ISO 10545-14 [7,9]. Las manchas se eliminaron bien con un agente débil (acetona) y una esponja no abrasiva, como se describe en el procedimiento B de ISO 10545-14. Las zonas desgastadas de GL-A y GL-B, con decoraciones clara y oscura, se muestran en la Figura 1.



*Figura 1*: Zonas desgastadas de las baldosas esmaltadas GL-A y GL-B. a) Zona desgastada visible después de 600 ciclos, b) zona desgastada después de 12000 ciclos

De acuerdo con la clasificación establecida en ISO 13006 Anexo N, GL-A y GL-B con decoraciones oscuras son adecuadas para tránsito peatonal ligero y mínima suciedad abrasiva (por ejemplo, habitaciones residenciales). Por el contrario, GL-A y GL-B con decoraciones claras son adecuadas para zonas de tránsito intenso propensas al rayado, como centros comerciales y aeropuertos [8]. Basándonos en los resultados obtenidos, se observó que la resistencia a la abrasión según ISO 10545-7 se ve estrictamente afectada por el color de la decoración subyacente, llevando a diferentes resultados incluso cuando se trata del mismo esmalte [1,3]. Esto sucede porque es difícil observar un contraste claro entre la decoración clara y la superficie desgastada y puede ser subjetivo [1]. Para superar las limitaciones de ISO 10545-7, la resistencia al desgaste se ensayó utilizando el método multi-atributo, que consiste en tres ensayos diferentes. Los resultados de estos tres ensayos se muestran en la Tabla 2.

Muestra	∆WL <sub>s</sub> [g/cm²]	∆G (600 ciclos)	∆G (6000 ciclos)	Resistencia al rayado	Clase Método
GL-A	0,025±0,001	38,7±0,9	-	6	Н
GL-B	0,017±0,001	-	2,5±1,3	7	ННН

 Tabla 2: Resultados obtenidos mediante el ensayo multi-atributo

Sobre la base de los valores de  $\Delta WL_S$  medidos después de 6000 ciclos de abrasión, tanto GL-A como GL-B se clasificarían en la clase HHH, la más alta del método, mientras que, después del ensayo de rayado, GL-A resultaría de clase HH y para GL-B se confirmaría la clase HHH. Sin embargo, la variación absoluta de brillo ( $\Delta G$ ) resultó ser el parámetro más crítico. De hecho, considerando el valor de  $\Delta G$ , se observó que GL-A registraba el valor más alto, llevando su clasificación a la clase H. Por el contrario, GL-B registró los valores más bajos de  $\Delta G$ , situándose en la clase HHH. Además, la mancha de cromo verde en la zona desgastada se eliminó según ISO 10545-14 usando el procedimiento A, dando como resultado una clasificación de resistencia a las manchas de clase 1.

De acuerdo con la clasificación proporcionada por el método multi-atributo, GL-A resultó ser de clase H y por tanto adecuada para aplicaciones residenciales, mientras que GL-B se clasificó como HHH, adecuada para zonas de tránsito intenso. Comparando estos resultados con los obtenidos aplicando el método ISO 10545-7, está claro que este nuevo enfoque es más sensible a la discriminación de las diferencias entre esmaltes, sin tener en cuenta el color de la decoración subyacente.

Para verificar los resultados del método multi-atributo y demostrar su efectividad, se llevaron a cabo algunas caracterizaciones analíticas. En concreto, se determinaron características mecánicas y tribológicas, tales como la microdureza Vickers (HV), los parámetros de rugosidad ( $R_a$  y  $R_z$ ) y el análisis microestructural. Los resultados de la microdureza Vickers y los parámetros de rugosidad se presentan en la Tabla 3.

Mucctro	HV	Ra	Rz
Muestia	[GPa]	[mm]	[mm]
GL-A	6,2±0,5	0,43±0,02	1,96±0,11
GL-B	7,5±0,6	0,67±0,02	3,05±0,11

Tabla 3: Valor de HV y parámetros de rugosidad Ra and Rz de los esmaltes analizados

GL-A presentó los menores valores de HV, así como los parámetros de rugosidad R<sub>a</sub> y R<sub>z</sub> más bajos, indicando una superficie más lisa y blanda que GL-B. Los datos de la bibliografía sugieren que el valor de dureza de GL-A se alinea con los de un esmalte tradicional (HV $\approx$ 5.9 GPa) [13-15]. Por el contrario, GL-B tenía valores de HV comparables a los medidos para esmaltes vitrocerámicos bien cristalizados [13,14,16]. Con el objeto de obtener información sobre su microestructura, los esmaltes GL-A y GL-B se observaron con un microscopio electrónico de barrido (Figura 2).



Figura 2: Investigaciones microestructurales sobre los esmaltes GL-A y GL-B

Tanto GL-A como GL-B presentaban una microestructura caracterizada por partículas en forma de escamas y fases cristalinas cuadradas. Según los datos de EDS (no incluidos por motivos de brevedad) y la bibliografía disponible, los cristales cuadrados brillantes corresponden a la fase cristalina  $BaAl_2Si_2O_8$ , mientras que las escamas corresponden a la fase cristalina  $CaAl_2Si_2O_8$  [13,16-18]. Por otra parte, la microestructura de GL-A se caracterizaba principalmente por una pequeña cantidad de grupos de cristales dispersos de forma heterogénea en la matriz amorfa, mientras que la microestructura de GL-B se componía de una estructura cristalina distribuida uniformemente en la matriz amorfa. Comparando la caracterización microestructural con los valores de HV y los parámetros  $R_a$  y  $R_z$ , es posible observar una relación entre la cantidad de fase cristalina contenida en la matriz amorfa y los parámetros mencionados: cuanto mayor es la cantidad de fases cristalinas, más alto es el valor de HV y más rugosa es la superficie [13,16,19]. De acuerdo con los resultados obtenidos, GL-A es menos duro y rugoso que GL-B debido a una menor cantidad de fases cristalinas.

Las caracterizaciones analíticas permiten diferenciar los dos esmaltes de acuerdo con los resultados obtenidos por el método multi-atributo, siendo GL-A y GL-B clasificados como H y HHH respectivamente.

## 4. CONCLUSIÓN

En conclusión, este estudio pretendía evaluar la resistencia al desgaste de baldosas esmaltadas mediante dos metodologías: la resistencia a la abrasión descrita en ISO 10545-7 y un nuevo enfoque multi-atributo en desarrollo (ISO CD 10545-22). Para validar los datos obtenidos del método multi-atributo y demostrar su efectividad, se llevaron a cabo varios ensayos analíticos que incluían medidas de microdureza Vickers (HV), evaluación de parámetros de rugosidad  $R_a$  y  $R_z$  e investigaciones microestructurales.

La evaluación de la resistencia a la abrasión, realizada según ISO 10545-7, ampliamente adoptada en la industria cerámica, fue capaz de distinguir entre los dos esmaltes investigados solo basándose en el color de la decoración subyacente.

La resistencia al desgaste llevada a cabo usando el método multi-atributo fue capaz de proporcionar los datos cuantitativos necesarios para distinguir los dos esmaltes. Las conclusiones del enfoque multi-atributo también estuvieron claramente respaldadas por los ensayos analíticos.

#### AGRADECIMIENTOS

Riccardo Fabris expresa su agradecimiento a la Fundación Vittoriano Bitossi que subvencionó su proyecto de tesis doctoral. Además, se extiende un especial agradecimiento al Centro Ceramico y a Colorobbia Industries por facilitar el acceso a su experiencia e instalaciones industriales. Los autores también agradecen al Departamento de Ingeniería Industrial (Universidad de Bolonia), especialmente al Laboratorio de Metalurgia, su amable permiso para utilizar sus instalaciones.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. Yu, H. Su, J. Xiao, F. Yuan, X. Gu, C. Peng, J. Wu, Study of a quantitative method to evaluate the wear resistance of glazed tiles, Int J Appl Ceram Technol. 17 (2020) 1063–1070. https://doi.org/10.1111/ijac.13354.
- [2] C.M. Belfiore, C. Amato, A. Pezzino, M. Viccaro, An end of waste alternative for volcanic ash: A resource in the manufacture of ceramic tiles, Constr Build Mater. 263 (2020). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120118.
- [3] L. Esposito, E. Serra, A. Tucci, E. Rastelli, Surface abrasion of glazed ceramic tiles: A new investigation technique, en: Key Eng Mater, Trans Tech Publications Ltd, 2004: pp. 1515–1518. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.264-268.1515.
- [4] A. V. Antsupov, A. V. Antsupov, M.G. Slobodianskii, Analytical evaluation of materials wear resistance and tribotechnical coupling resource, en: IOP Conf Ser Mater Sci Eng, Institute of Physics Publishing, 2020. https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033047.
- [5] H. He, C. Ma, B. Song, R. Zhao, P. Zhao, H. Wang, D. Han, H. Lu, H. Xu, R. Zhang, L. An, G. Shao, A novel sintering method of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC<sub>w</sub> ceramic composites with improved wear resistance: Oscillatory pressure-assisted sinter forging, Ceram Int. (2023). https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.136.
- [6] WI ISO/CD 10545-22 "Determination of resistance to wear with a multi-attribute method", ISO International Organization for Standardization, https://www.iso.org/standard/85454.html.
- [7] British Standards Institution, ISO Standards ISO 10545-7 Ceramic tiles. Part 7. Determination of resistance to surface abrasion for glazed tiles, British Standards Institution, 1999.
- [8] British Standards Institution, ISO Standards ISO EN 13006 Ceramic tiles Definitions, classification, characteristics and marking, (2018).
- [9] British Standards Institution, ISO Standards ISO EN 10545-14 Ceramic tiles. Part 14: Determination of resistance to stains., 2015.
- [10] ASTM, ASTM standard ASTM C1895-20 Standard Test Method for Determination of Mohs Scratch Hardness 1. https://doi.org/10.1520/C1895-20.
- [11] ASTM, ASTM Standard ASTM C1327-15 (Reapproved 2019) Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics, 2019. https://doi.org/10.1520/C1327-15R19.
- [12] British Standards Institution, ISO Standards ISO EN 4287 Geometric Product Specifications (GPS): surface textures: profile method: Terms, definitions and surface texture parameters, 1998.
- [13] S. Wang, X. Li, C. Wang, M. Bai, X. Zhou, X. Zhang, Y. Wang, Anorthite-based transparent glass-ceramic glaze for ceramic tiles: Preparation and crystallization mechanism, J Eur Ceram Soc. 42 (2022) 1132–1140. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.11.036.
- [14] B.E. Yekta, P. Alizadeh, L. Rezazadeh, Floor tile glass-ceramic glaze for improvement of glaze surface properties, J Eur Ceram Soc. 26 (2006) 3809–3812. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.12.016.
- [15] S. Ghosh, K.S. Kalyan Sundar Pal, D. Nandadulal, J. Ghosh, S. Datta, Glass-ceramic glazes for future generation floor tiles, J Eur Ceram Soc. 33 (2013) 935–942. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.11.008.
- [16] M. Gajek, A. Rapacz-Kmita, E. Stodolak-Zych, M. Zarzecka-Napierała, M. Wilk, A. Magdziarz, M. Dudek, Microstructure and mechanical properties of diopside and anorthite glazes with high abrasion resistance, Ceram Int. 48 (2022) 6792–6798. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.230.
- [17] J. Partyka, K. Gasek, K. Pasiut, M. Gajek, Effect of addition of BaO on sintering of glass-ceramic materials from SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-CaO/MgO system, J Therm Anal Calorim. 125 (2016) 1095–1103. https://doi.org/10.1007/s10973-016-5462-2.
- [18] R. Casasola, J.M. Rincón, M. Romero, Glass-ceramic glazes for ceramic tiles: A review, J Mater Sci. 47 (2012) 553–582. https://doi.org/10.1007/s10853-011-5981-y.
- [19] K. Kaczmarczyk, J. Partyka, K. Pasiut, J. Michałek, Strontium carbonate in glazes from the SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O system, sintering and surface properties, Open Ceramics. 9 (2022). https://doi.org/10.1016/j.oceram.2022.100233.
- [20] V. Cannillo, L. Esposito, E. Rambaldi, A. Sola, A. Tucci, Microstructural and mechanical changes by chemical ageing of glazed ceramic surfaces, J Eur Ceram Soc. 29 (2009) 1561–1569. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.10.018.