



PT3. Caracterización de materiales y procesos

Entregable 3.1

Propiedades de materiales y relación con variables de proceso
Resumen de soluciones y procedimientos de control

Financiado por:



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE+i

INSTITUTO VALENCIANO
DE COMPETITIVIDAD
E INNOVACIÓN



Funded by
the European Union

1. Objetivo

El presente entregable tiene por objetivo reflejar el trabajo realizado en el PT3: Caracterización de materiales y procesos.

En este paquete de trabajo se contemplaba la caracterización de los materiales involucrados en los procesos de fabricación de placas cerámicas de grandes dimensiones para entender su comportamiento y alimentar los modelos de simulación planteados, así como del proceso en sí.

Por tanto, no solo sería necesaria la caracterización de las materias primas, sino también del producto compactado y del propio proceso de fabricación. En este sentido, sería necesario identificar las principales variables involucradas en la etapa de compactación de cara a obtener la información necesaria de los medios industriales para la parametrización y calibración de los modelos de simulación.

Paralelamente, este paquete de trabajo planteaba la posibilidad de implementar nuevos sistemas de medida y control que permitieran de algún modo mejorar el proceso de fabricación de grandes placas.

2. Introducción

El prensado de soportes para baldosas cerámicas se ha realizado tradicionalmente en prensas hidráulicas de gran capacidad, utilizando moldes metálicos y un polvo granulado semiseco obtenido por secado por atomización a partir de una mezcla de materias primas. Este polvo se introduce en los alveolos de los moldes metálicos, donde se compacta mediante presión, permitiendo la producción de piezas que pueden alcanzar hasta 900 mm x 1800 mm, aunque las dimensiones más comunes son 1200 mm x 1200 mm, 1000 mm x 1000 mm y 1200 mm x 600 mm.

Para poder fabricar piezas de tales dimensiones, la tecnología de conformado convencional ha evolucionado sustancialmente en los últimos 30 años, especialmente en lo referido a la estructura mecánica de las prensas y al diseño de los moldes empleados, pasando de prensas de estructura de columnas a estructuras de láminas o de anillo cerrado. Esto se debe a la necesidad de soportar las fuerzas de prensado requeridas para las grandes dimensiones de los nuevos formatos de los soportes cerámicos, minimizando la deformación estructural.

Desde el año 2000, se han desarrollado tecnologías alternativas para la fabricación de placas cerámicas de gran formato, como LAMINAM y CONTINUA. LAMINAM permite producir placas delgadas (3-5 mm) de dimensiones de 1000 mm x 3000 mm, aunque su aceptación en el mercado fue limitada debido a la reticencia a utilizar productos de bajo espesor. Por otro lado, CONTINUA, introducido en 2004, utiliza un sistema de doble compactación de polvo atomizado y ha evolucionado hacia una tecnología que elimina la segunda fase de prensado, optimizando así el proceso. A partir de 2010, el crecimiento del mercado de encimeras de cocina fabricadas con placas cerámicas de grandes dimensiones (10-30 mm de espesor) impulsó la adopción de estas técnicas de conformado. Actualmente, las tecnologías más utilizadas son LAMGEA, que realiza la compactación uniaxial sobre una banda polimérica, y CONTINUA+, que se basa en la laminación continua del lecho de polvo entre rodillos.

En ambos métodos, las placas se elaboran a partir de mezclas de materias primas que se utilizan convencionalmente en la producción de baldosas cerámicas con base de gres porcelánico, y el proceso comúnmente empleado para su preparación incluye la molienda en vía húmeda de la mezcla de materias y el posterior secado por atomización de la suspensión resultante.

Los productos conformados se cortan a las dimensiones deseadas, se secan en secaderos horizontales de rodillos y se someten a un tratamiento térmico a temperaturas cercanas a 1200°C. Para asegurar un acabado uniforme en los bordes laterales del producto, es imprescindible realizar un rectificado de los bordes en ambas técnicas.

Dado que estas técnicas de conformado no logran una consolidación perfecta en los bordes de las placas, es necesario realizar un recorte en crudo del material para garantizar la obtención de placas con densidad homogénea. Esto genera una cantidad de material residual que, tras los cortes, se reintroduce en el proceso después de un acondicionamiento. Comúnmente, se recoge este material para, a través de una adecuada molturación, obtener una distribución de tamaños de partícula que permita mezclarlo con polvo atomizado virgen, utilizándolo como capa base, la cual será posteriormente recubierta con una capa más fina de solo polvo atomizado, que quedará visible en el producto final.

Gracias a la optimización de los sistemas de recuperación y acondicionamiento del material residual, las técnicas de conformado de placas se han orientado en los últimos años hacia la fabricación de baldosas de formatos medianos a partir del corte en crudo de las placas. Inicialmente, durante los primeros años de implementación de estas tecnologías, esta práctica no era viable, ya que si el tamaño de las piezas no aprovechaba completamente la superficie de la placa, se generaba una gran cantidad de material desechado que debía recuperarse y reintroducirse en el proceso en la etapa de atomización, lo que disminuía la rentabilidad y complicaba la operatividad del proceso.

Conformado por prensado uniaxial sobre banda

La línea de conformado de placas, basada en la tecnología LAMGEA, inicia el proceso depositando polvo granulado sobre una banda inferior. Este polvo proviene de dos tolvas: una que mezcla polvo atomizado con material reciclado y otra que añade únicamente polvo atomizado en la capa superior. El espesor del lecho se controla mediante la velocidad de la cinta y la abertura de la válvula de la tolva.

El lecho se transfiere a una segunda cinta que lo lleva a la prensa, donde un punzón inferior, accionado hidráulicamente, comprime el conjunto contra la estructura de la prensa. Se aplica un ciclo de prensado que comienza con una baja presión para eliminar aire, seguido de una compresión máxima que otorga las propiedades deseadas al producto.

Aunque no se utilizan moldes, hay retenes plásticos en los laterales que evitan que el polvo se escape lateralmente durante la aplicación de presión sobre el mismo. Dada la gran deformación experimentada por estos retenes, el procedimiento no garantiza una elevada densidad aparente justo en el borde de las placas, debido al fenómeno de fluencia que experimenta el polvo en esas zonas que obliga a realizar un corte en crudo de la placa recién prensada para garantizar la homogeneidad del producto fabricado.

El control de las propiedades de las placas conformadas se realiza modificando la presión específica máxima aplicada sobre el polvo a lo largo del ciclo de prensado y regulando el espesor del lecho de polvo previamente a su compactado.

Conformado por laminado entre rodillos

En la técnica de laminación por lecho de polvo entre rodillos compresores, el proceso comienza con la deposición de uno o más estratos de polvo sobre una cinta de transporte metálica. El lecho se compacta gradualmente al pasar entre esta cinta y otra superior que se va aproximando, eliminando el aire y reduciendo su espesor.

Como en el prensado uniaxial sobre banda, es necesario recortar los laterales de las placas, ya que la presión aplicada en los bordes no es suficiente para lograr la densidad deseada, a pesar del confinamiento lateral del polvo. Luego, se realiza el corte transversal para definir la longitud del producto. Este corte, al ser continuo, requiere un sistema de corte al vuelo, en lugar de detener la placa como en el prensado sobre banda.

Las variables de control son similares a las del prensado convencional, aunque en la laminación no se controla la presión máxima, sino la relación de compactación entre el espesor inicial del lecho y el espesor final de la pieza. El control se ajusta mediante la cantidad de polvo depositado y la separación entre rodillos.

Para un mismo espesor de entrada del lecho, aumentar el espesor de salida del compacto se logra reduciendo la separación entre rodillos, y disminuirlo requiere aumentar dicha separación. El problema de este control es que mantener constante la relación de compresión del polvo no asegura una densidad aparente constante en la placa compactada, que es la variable más crítica para definir las propiedades del producto final. Por ello, es necesario ajustar simultáneamente la separación entre rodillos y el espesor inicial del lecho (cantidad de polvo depositada) para mantener la densidad aparente constante.

Los mecanismos de compactación en esta técnica son similares a los del prensado de baldosas cerámicas, aunque hay pocas publicaciones que estudien en profundidad las implicaciones de las variables del proceso en la fabricación de grandes placas.

A modo de resumen y como comparativa entre las diferentes tecnologías de prensado mencionadas, se muestra a continuación una pequeña infografía que recoge las principales variables de producto y proceso y la dependencia entre ellas para los procesos de prensado sobre banda y entre rodillos, respecto al prensado uniaxial convencional con molde.

Las variables representadas en la misma son las siguientes:

H : Humedad del lecho de polvo granulado (%)

h_0 : espesor del lecho de polvo granulado (mm)

P : presión de prensado (kg/cm^2)

h_r : separación entre rodillos (mm)

D_{ap} : Densidad aparente de las piezas conformadas (kg/m^3)

EPP : Expansión post-prensado de las piezas conformadas (%)

h_f : espesor de la pieza compactada (mm)

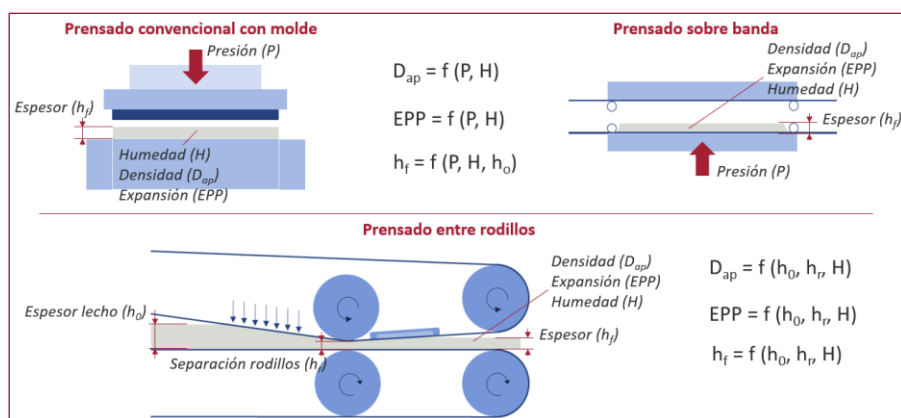


Figura 1. Comparativa entre las principales variables de proceso del prensado sobre banda y prensado entre rodillos, respecto al prensado uniaxial convencional con molde.

3. Caracterización de materias primas, producto y proceso

En esta tarea se aborda la caracterización de materias primas y productos semielaborados. Esto incluye ensayos para determinar propiedades físicas, como la distribución del tamaño de las partículas, morfología, densidad aparente, grado de humedad y deformabilidad, así como experimentos diseñados específicamente para calibrar y validar los modelos del paquete de trabajo 2. Además, se han realizado controles de fabricación para evaluar el comportamiento de los materiales en condiciones reales de operación, con el apoyo de las empresas colaboradoras que han aportado datos y facilitado el acceso a sus procesos, esenciales para el avance de la investigación.

3.1 Caracterización de materias primas

3.1.1 Diagramas de compactación

El diagrama de compactación consiste en la obtención de la correlación entre la presión de prensado y la densidad aparente en húmedo o en seco de las piezas conformadas, a una o varias humedades de prensado determinadas. La densidad aparente depende de forma lineal del logaritmo de la presión de prensado. El objetivo principal de este ensayo es poder determinar la presión de prensado necesaria para alcanzar una densidad aparente en húmedo o en seco determinada, que estará directamente relacionada con las propiedades de la pieza sinterizada tras la etapa de cocción.

Para ello se acondiciona una muestra de la composición de trabajo habitual a cuatro humedades diferentes, y haciendo uso de una prensa automática de laboratorio, se prensan probetas cilíndricas de 4 cm de diámetro a 4 presiones diferentes. Una vez prensadas, y tras un proceso de secado en estufa de laboratorio a 110°C, durante al menos 2 horas, se procede a la medida de la densidad aparente de cada una de las probetas, utilizando el método de inmersión en mercurio.

A continuación, se muestran los datos de los diagramas de compactación de las composiciones denominadas como B05 y ESM73A por la empresa Lvg Ceramics. Las tabla 1, tabla 2 recogen los datos de densidad aparente en función de la humedad del material y la presión de prensado para las composiciones B05 y ESM73A, respectivamente. Estos datos se representan gráficamente en la figura 2 y la figura 3.

- Composició de porcelànic "B05"

Tabla 1. Datos experimentales del diagrama de compactación de la composición de porcelánico denominada B05 por la empresa Lvg Ceramics.

	Humedad bs (%)			
P (Kg/cm ²)	4,3	5,1	6,1	7,3
200	1802	1814	1828	1846
300	1863	1874	1888	1904
400	1907	1917	1930	1945
500	1941	1950	1963	1977

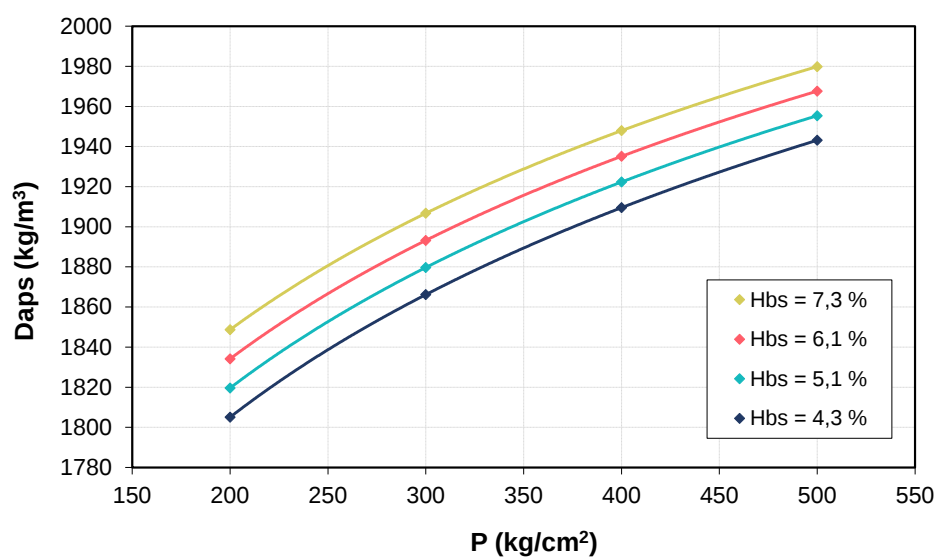


Figura 2. Gráfico que representa el diagrama de compactación de la composición de porcelánico denominada B05 por la empresa Lvg Ceramics.

- Composició de porcelànic "ESM73A"

Tabla 2. Datos experimentales del diagrama de compactación de la composición de porcelánico denominada ESM73A por la empresa Lvg Ceramics.

	Humedad bs (%)			
P (Kg/cm ²)	4,9	5,6	6,5	7,4
200	1808	1820	1836	1851
300	1875	1885	1899	1913
400	1922	1932	1944	1957
500	1958	1968	1979	1991

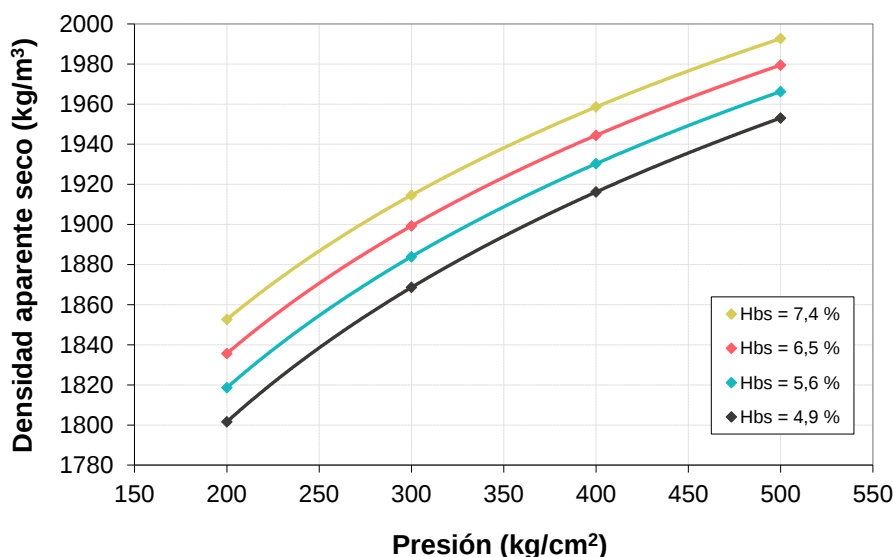


Figura 3. Gráfico que representa el diagrama de compactación de la composición de porcelánico denominada ESM73A por la empresa Lvg Ceramics.

A continuación, se muestra una comparativa entre las dos composiciones de gres porcelánico industriales con las que se ha trabajado en el proyecto. De esta, se puede deducir la importancia de un buen control de las variables de proceso, ya que, como se puede observar en el gráfico de la figura 4, para un mismo valor de humedad del polvo granulado, la composición ESM73A tiene una mayor capacidad de compactación a partir de presiones superiores a 210 kg/cm², o lo que es lo mismo, para obtener una densidad aparente concreta de la pieza compactada, la presión de prensado siempre será mayor cuando se esté trabajando con la composición B05. Este hecho influirá también en otras variables como son, la razón de compresión o la expansión post-prensado, las cuales se mencionan en los siguientes apartados.

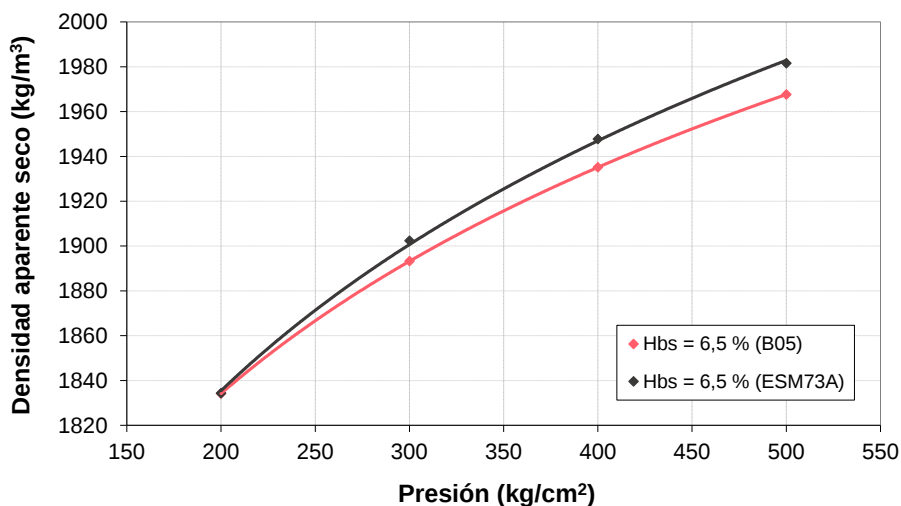


Figura 4. Comparativa del comportamiento durante la compactación de las dos principales composiciones de trabajo de la empresa Lvg Ceramics: B05 vs ESM73A.

3.1.2 Razón de compresión

La razón de compresión de un material pulverulento es una medida que describe cómo se comporta un polvo o material granulado cuando se somete a compresión. Específicamente, se refiere a la relación entre el volumen inicial del material en polvo (no compactado) y su volumen después de haber sido comprimido o sometido a presión.

En el caso que ocupa este proyecto, el polvo cerámico, compuesto por partículas finas, es sometido a una presión que reduce su volumen y lo compacta para formar una estructura densa y sólida, como es la placa cerámica. La razón de compresión describe así, cuán eficiente es el proceso de compactación y cuánto se reduce el volumen del material durante el prensado, es decir, cuál es el grado de compactabilidad del material. De este modo, cuanto mayor sea el valor de la razón de compresión, mayor será la reducción de volumen generado durante el prensado, lo cual se busca en la fabricación de materiales cerámicos de base porcelánica, ya que de esta forma se consigue una alta densidad aparente de la pieza compactada con una mínima porosidad. Esto es clave en la calidad del producto final, ya que afecta de manera positiva a su resistencia mecánica, durabilidad y otras propiedades físicas esenciales de las placas cerámicas.

Dada la complejidad de medir el volumen, tanto del lecho de polvo granulado, como de la pieza conformada a nivel industrial, dadas las elevadas dimensiones de las placas cerámicas, se optó por obtener la razón de compresión como la relación entre la altura o espesor del lecho de polvo granulado y el espesor de la pieza compactada. Por lo tanto, para caracterizar el material a escala de laboratorio, este valor se obtuvo a partir de los espesores de una batería de probetas prismáticas de dimensiones (8 x 2 x 0.6) cm, prensadas a cuatro presiones diferentes, a partir de muestras de polvo granulado acondicionadas a cuatro humedades diferentes, y su relación con la altura de lecho de polvo en el molde de la prensa de laboratorio.

A continuación, se muestra la razón compresión en función de la presión de prensado y la humedad del material, para ambas composiciones de trabajo.

- Composición de porcelánico "B05"

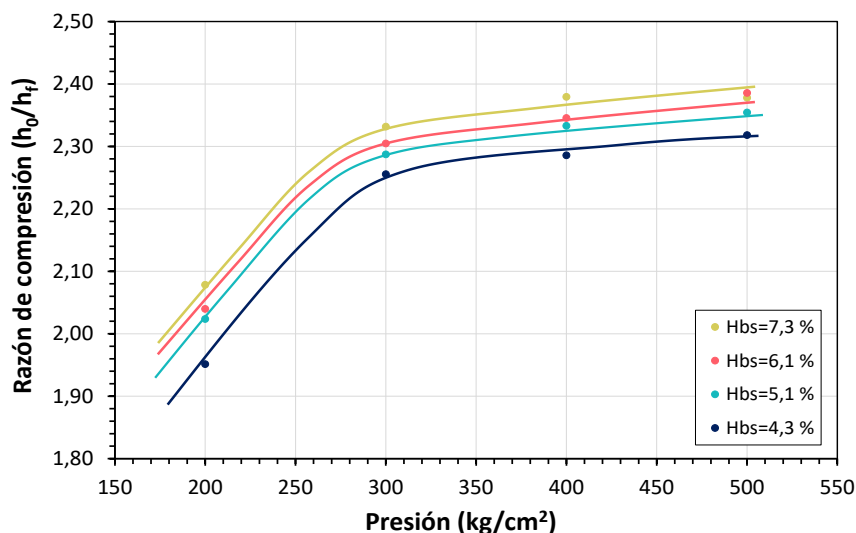


Figura 5. Razón de compresión en función de la presión de prensado para la composición B05 de Lvg Ceramics.

- Composición de porcelánico “ESM73A”

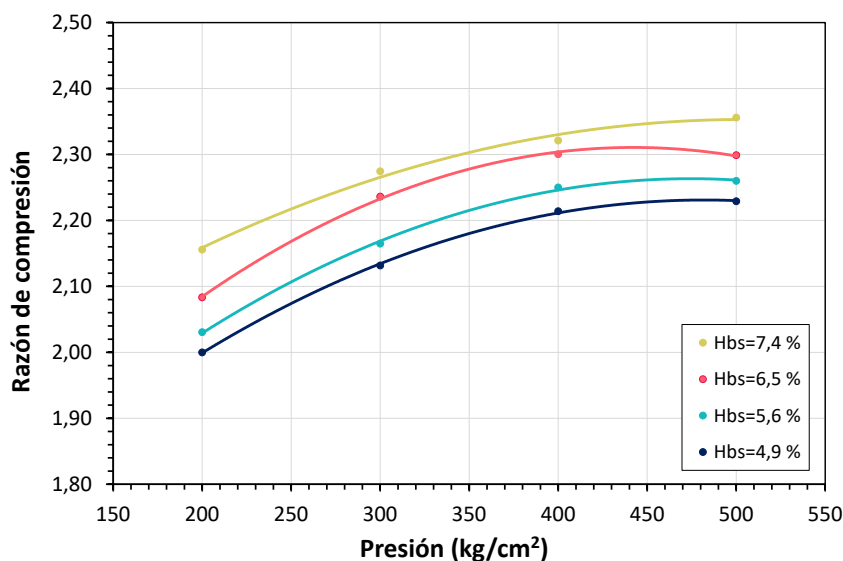


Figura 6. Razón de compresión en función de la presión de prensado para la composición ESM73A de Lvg Ceramics.

De estos diagramas, junto con el diagrama de compactación, se puede deducir la manera más adecuada de actuar en el proceso de compactación para mantener constante la densidad aparente ante los habituales cambios en la humedad del polvo granulado a partir del cual se conforman las placas cerámicas.

A continuación, se muestra un ejemplo, utilizando los diagramas de compactación y de la razón de compresión de la composición B05.

Suponiendo que se parte de un polvo granulado a una humedad en base seca del 6,5% y un altura del lecho de polvo de unos 15 mm, para una densidad aparente en seco habitual para un gres porcelánico en torno a los 1900 kg/m³, conforme indican ambos diagramas (Figura 7), sería necesaria una presión de 315 kg/cm² para alcanzar dicha densidad y el material tendría una compactabilidad de 2,32. Esto quiere decir que a esa presión, se obtendrán piezas de un espesor en torno a los 6,5 mm ($R = \frac{h_0}{h_f}$ Ecuación 1).

$$R = \frac{h_0}{h_f} \quad \text{Ecuación 1}$$

Sin embargo, si en un momento dado durante la fabricación de placas, se utilizara polvo granulado de una humedad superior, por ejemplo 7,5 %, sin cambiar la presión de prensado, aumentaría tanto la razón de compresión, como la densidad aparente de la pieza compacta, y en consecuencia, se estarían obteniendo piezas de un espesor menor al deseado, 6,4 en lugar de 6,5mm. Es de esperar que, estas diferencias sean mayores cuando mayores sean los espesores de lecho y pieza.

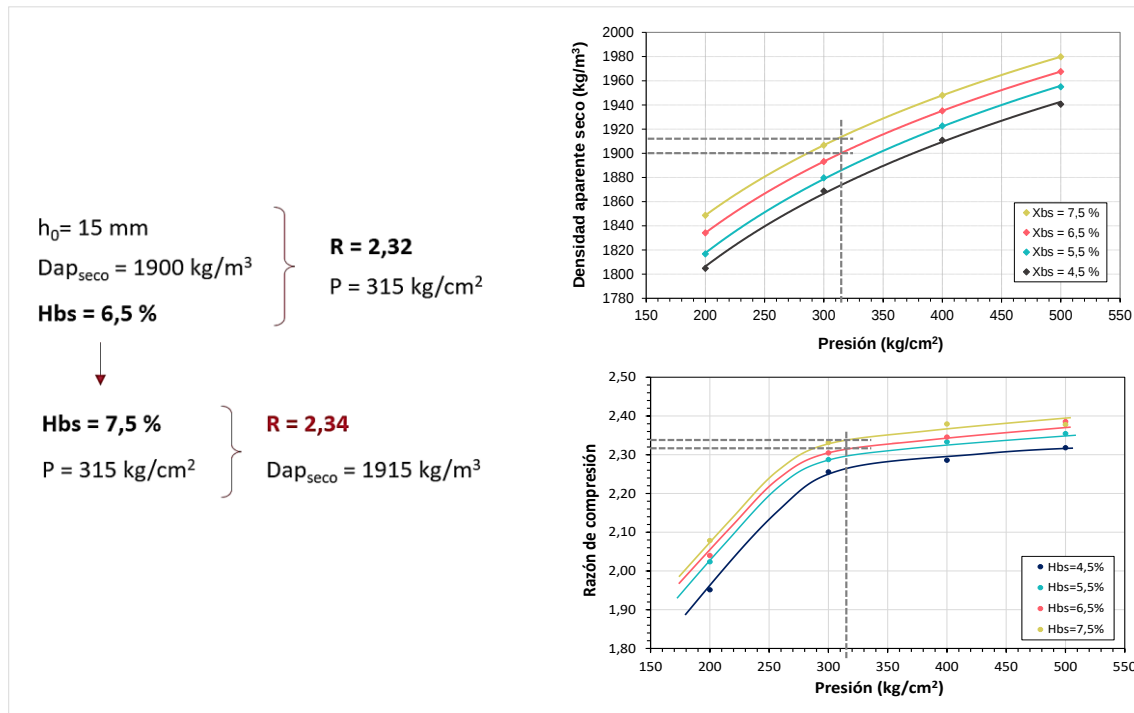


Figura 7. Relación entre la densidad del producto final y la razón de compresión del material, para la composición B05 de Lvg Ceramics.

Si se suponen cambios en la humedad del polvo granulado de $\pm 1\%$, conforme se desarrolla en el siguiente ejemplo, se puede predecir el cambio que sería necesario hacer en el lecho de polvo (siendo esta una variable manipulada en el proceso de compactación industrial), para mantener constante el espesor de la pieza final.

$$\Delta R = R_1 - R_2 = \frac{(h_0)_1}{h_f} - \frac{(h_0)_2}{h_f}$$

$$\Delta h_0 = \Delta R \cdot h_f$$

$$\left. \begin{array}{l} H_{bs} = 7,5\% \rightarrow R = 2,34 \\ H_{bs} = 6,5\% \rightarrow R = 2,32 \\ H_{bs} = 5,5\% \rightarrow R = 2,30 \end{array} \right\} \Delta R = 0,02$$

$$\Delta h_0 = -0,02 \cdot 6,5 = -0,130 \text{ mm}$$

$$\Delta h_0 = 0,02 \cdot 6,5 = 0,130 \text{ mm}$$

1.1.1 Expansión post prensado

Como se ha explicado en apartados anteriores, durante el prensado, el polvo granulado se compacta para darle una forma específica, eliminando la porosidad generada por el contacto entre partículas y aumentando su densidad aparente hasta llegar a una placa cerámica sólida compactada. Sin embargo, este proceso no es completamente perfecto, sino que cuando el material deja de ser presionado, ya sea por un molde, una banda o entre rodillos, puede ocurrir el fenómeno conocido como expansión post-prensado. Este fenómeno está asociado a la liberación de tensiones internas desarrolladas durante la compactación, el reordenamiento de las partículas en el material cerámico (a nivel microscópico) una vez que se retira la presión

aplicada, o incluso la reacción de los componentes del material con el entorno (humedad ambiente).

La expansión post-prensado es una variable a tener en cuenta ya que puede afectar a la densidad aparente del producto final, y en consecuencia, a las propiedades mecánicas del material cerámico una vez sinterizado e incluso su estabilidad dimensional. En algunos casos, la expansión post-prensado puede generar problemas de calidad, como grietas o deformaciones que en ocasiones se hacen visibles desde la propia etapa de prensado, por lo que es un aspecto que se controla cuidadosamente en la producción de cerámicas técnicas y otros materiales avanzados.

Para evaluar la expansión post-prensado de una composición cerámica a escala laboratorio, se hace uso de una prensa uniaxial que permite prensar probetas de 80 mm de largo, 20 mm de ancho y 6 mm de espesor.

Utilizando como referencia la humedad habitual de trabajo en planta industrial, se conforman probetas a cuatro presiones diferentes (2 probetas a cada una de las presiones), teniendo en cuenta que la presión de trabajo utilizada a nivel industrial ha de hallarse dentro del intervalo de presiones escogido para el ensayo.

Mediante el empleo de un reloj comparador y un bloque patrón como los mostrados en la figura 8, se procede a la medida de la variación que ha tenido lugar en la longitud de cada probeta transcurridos 30 segundos desde su prensado.

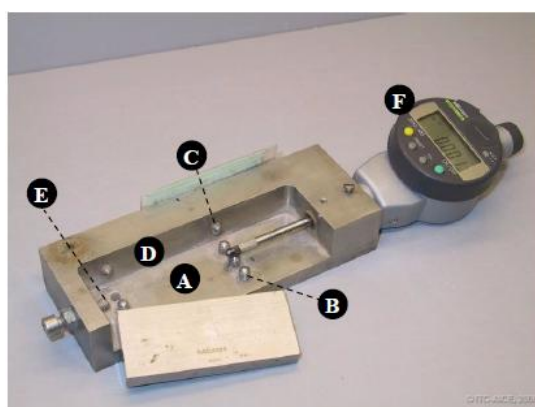


Figura 8. Reloj comparador y bloque patrón para medida dimensional de probetas de 80x20x6 mm.

La expansión post-prensado se calcula como el aumento de longitud experimentado por la probeta transcurridos 30 segundos, respecto a la longitud del bloque patrón (80mm).

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de medida de expansión post-prensado para cada una de las composiciones de trabajo escogidas. Las tabla 3 y tabla 4, recogen los datos de expansión post-prensado en función de la humedad del material y la presión de prensado para las composiciones B05 y ESM73A, respectivamente. Datos que se representan gráficamente en la figura 9 y figura 10.

- Composició de porcelánico "B05"

Tabla 3. Datos experimentales obtenidos para la EPP(%) de la composición B05 en función de la humedad del material y la presión de prensado.

P (Kg/cm ²)	Humedad bs (%)			
	4,3	5,1	6,1	7,3
200	1,31	1,29	1,19	1,15
300	1,39	1,37	1,30	1,22
400	1,40	1,37	1,33	1,25
500	1,42	1,37	1,33	1,25

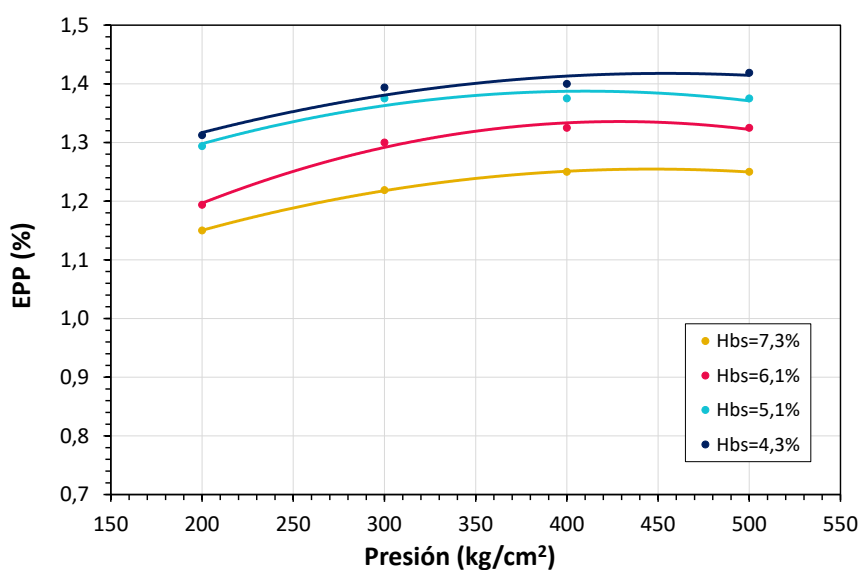


Figura 9. Expansión post-prensado en función de la presión de prensado y la humedad del material para la composición B05 de Lvg Ceramics.

- Composició de porcelánico "ESM73A"

Tabla 4. Datos experimentales obtenidos para la EPP(%) de la composición ESM73A en función de la humedad del material y la presión de prensado.

P (Kg/cm ²)	Humedad bs (%)			
	4,9	5,6	6,5	7,4
200	1,08	1,03	1,02	0,96
300	1,13	1,10	1,07	1,02
400	1,16	1,14	1,09	1,04
500	1,20	1,15	1,10	1,06

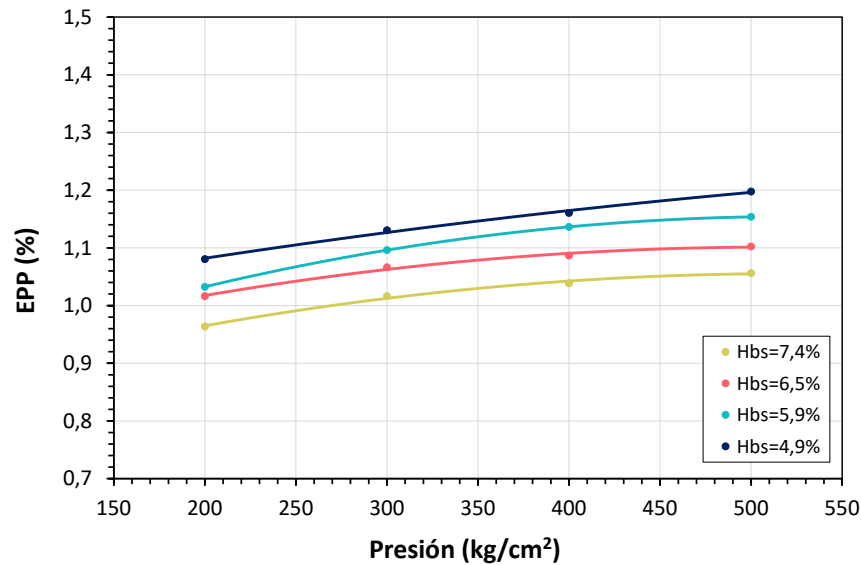


Figura 10. Expansión post-prensado en función de la presión de prensado y la humedad del material para la composición ESM73A de Lvg Ceramics.

Como se puede observar en ambos gráficos, la expansión post-prensado depende más de la humedad del material que de la presión ejercida sobre este durante el prensado. Esto es debido a que una mayor cantidad de agua en el material facilita el contacto entre las partículas de polvo, mejorando así la plasticidad del mismo. En consecuencia, a mayor humedad del polvo granulado, mayor plasticidad, mejor compactabilidad y por tanto, menor liberación de tensiones tras el prensado, es decir, menor expansión post-prensado.

3.2 Caracterización del producto

Con el fin de poder correlacionar las propiedades de placas cerámicas conformadas con las variables de procesado y los resultados propuestos por los modelos de predicción planteados en el paquete de trabajo 2, se determinaron la densidad aparente y el espesor de la pieza prensada utilizando tecnología avanzada basada en la absorción de rayos X, que permite medir con elevada precisión la distribución de ambas variables en el 100% del volumen de las placas.

Para ello, se recogieron placas cerámicas de diferentes formatos a la salida de una prensa Continua+ (prensado entre rodillos), en las instalaciones de la empresa Living Ceramics (empresa colaboradora en el proyecto), y a la salida de una prensa Superfast (prensado sobre banda), en este caso por gentileza de la empresa Porcelanosa, ya que por motivos desconocidos y ajenos al proyecto, la disponibilidad de la empresa System, a priori colaboradora del proyecto, se vio comprometida y no fue posible realizar las tareas y gestiones diseñadas al inicio del mismo.

Estas placas fueron trasladadas hasta el Instituto de Tecnología Cerámica, el cual dispone de un equipo para la medida de la densidad aparente y el espesor de piezas cerámicas de gran formato basado en tecnología de rayos X (Figura 11).



Figura 11. Tekinn. Equipo de inspección de densidad aparente y espesor de piezas cerámicas de gran formato por absorción de rayos X.

La medida de la densidad aparente por absorción de rayos X está basada en la conocida como ley de absorción de Lambert-Beer, según la cual, cuando una radiación ionizante atraviesa un medio material dado, la fracción de radiación incidente que es absorbida por el material depende exclusivamente de su naturaleza química, de su espesor y de su densidad aparente. La ecuación 2 representa la ley de Lambert-Beer aplicada a una radiación monocromática y a un medio material perfectamente homogéneo en todo su espesor:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu h \rho} \quad \text{Ecuación 2}$$

siendo I_0 la intensidad de la radiación incidente, I la intensidad de la radiación transmitida, h el espesor del material, ρ la densidad aparente y μ el coeficiente de absorción másico para la longitud de onda de la radiación. Es decir, si la naturaleza del material no se modifica y se conoce su espesor, es posible determinar la densidad aparente del mismo, a partir de la cantidad de energía absorbida. Ahora bien, en la práctica, la ecuación 2 es sólo aproximada, ya que los tubos de rayos X utilizados habitualmente para realizar este tipo de ensayos emiten radiación policromática y los materiales analizados no suelen ser homogéneos. Este hecho complica significativamente las relaciones entre la intensidad de radiación transmitida y el coeficiente de absorción de rayos X, el cual depende de la longitud de onda de la radiación incidente.

Si se asume que la región de análisis es lo suficientemente pequeña como para considerarse homogénea, la medida de la densidad aparente no se vería limitada por las heterogeneidades del material. En cambio, la dependencia del coeficiente de absorción con la energía de la radiación incidente dificulta enormemente la resolución analítica de la ecuación 2 en vistas a calcular la densidad del material. Por esta razón, aunque es posible calcular el coeficiente de absorción del material a partir de su composición química y del espectro de la radiación, en la práctica, lo más sencillo es obtener una relación empírica entre la densidad

aparente del material analizado, su espesor y la atenuación que experimenta la radiación al atravesarlo. Teóricamente se puede comprobar que, para alcanzar las precisiones de medida requeridas (10 kg/m^3), es necesario realizar un calibrado del instrumento para cada material que se desee estudiar.

En la figura 12 se muestra el esquema de funcionamiento del instrumento desarrollado para llevar a cabo la medida de la densidad aparente. La pieza (1) se sitúa en posición vertical sobre un bastidor metálico sobre el cual se desplaza una placa metálica a bordo de la cual está instalado el sistema de telemetría (2), encargado de medir el espesor de la pieza, el tubo emisor de rayos X (3) y el sensor de radiación (4). El conjunto de elementos de medida se desplaza en la dirección horizontal gracias a la acción de un motor lineal situado en la parte inferior del dispositivo, mientras que el movimiento vertical es asegurado por una serie de husillos de precisión, que son accionados por un engranaje gobernado por un motor rotativo.

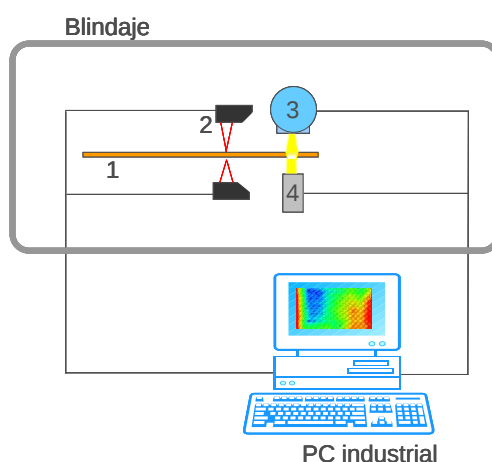


Figura 12. Esquema de funcionamiento del equipo de medida de densidad por absorción de rayos X.

Todo el sistema de movimiento y medida se encuentra confinado dentro de un blindaje de plomo que impide las fugas de la radiación emitida por el tubo de rayos X. Las señales procedentes de los diferentes sensores de medida y del sistema de movimientos son introducidas en un PC en el cual reside un programa informático, especialmente desarrollado para esta aplicación, que se encarga de gestionar el funcionamiento del instrumento, tanto desde el punto de vista de la gestión de movimientos, como del tratamiento de datos y de la representación gráfica.

El tubo de rayos X instalado tiene una potencia de 160 W y el sensor de radiación empleado es un fotodiodo con centellador cerámico cuya señal es amplificada antes de ser adquirida por el ordenador. El instrumento ha sido diseñado para poder ensayar piezas industriales crudas o cocidas de formato nominal máximo 1300 mm de ancho, infinito en longitud y espesor máximo de 30 mm. Para una velocidad de 20 mm/s, el análisis de una pieza de formato 1200 x 1200 mm tiene lugar en un tiempo menor a 6 minutos.

A continuación, se muestran en falso color, los mapas de distribución de densidad aparente y espesor obtenidos para placas cerámicas de diferentes formatos y espesores y fabricadas con ambas tecnologías. En las escalas que acompañan las imágenes registradas, los colores fríos (azules a morados) indican las zonas de las piezas de menor compactación o menor espesor, y los colores cálidos (amarillo a rojos) hacen referencia a las zonas de la pieza de mayor compactación o mayor espesor. Por último, los tonos verdes indican las zonas de la pieza con valores intermedios de ambas variables.

- *Prensado sobre banda*

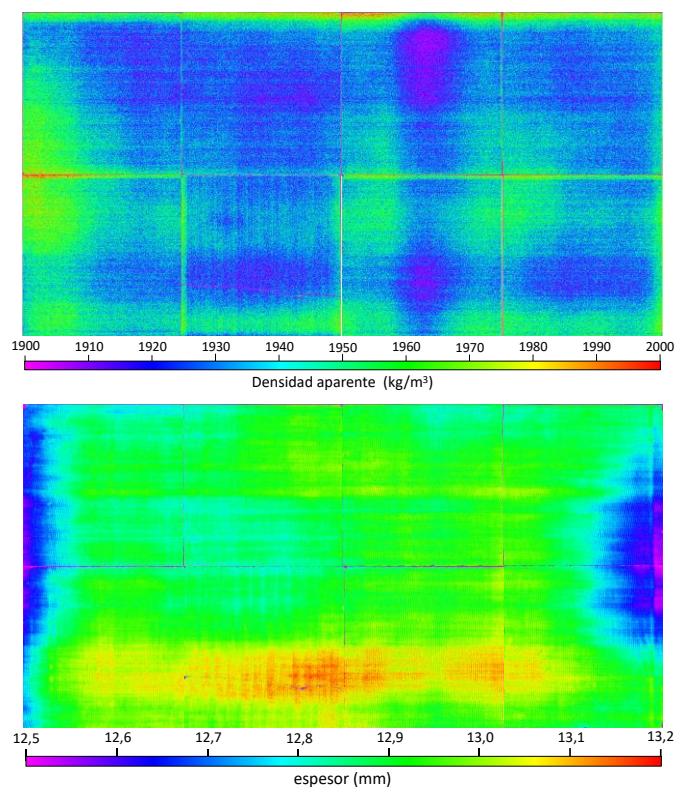


Figura 13. Distribución de densidad aparente (arriba) y de espesor (abajo), de un placa cerámica de porcelánico de gran formato (1200 x 3200 x 12)mm, fabricada con la tecnología de prensado sobre banda. Cortesía de la empresa Porcelanosa.

- *Prensado entre rodillos*

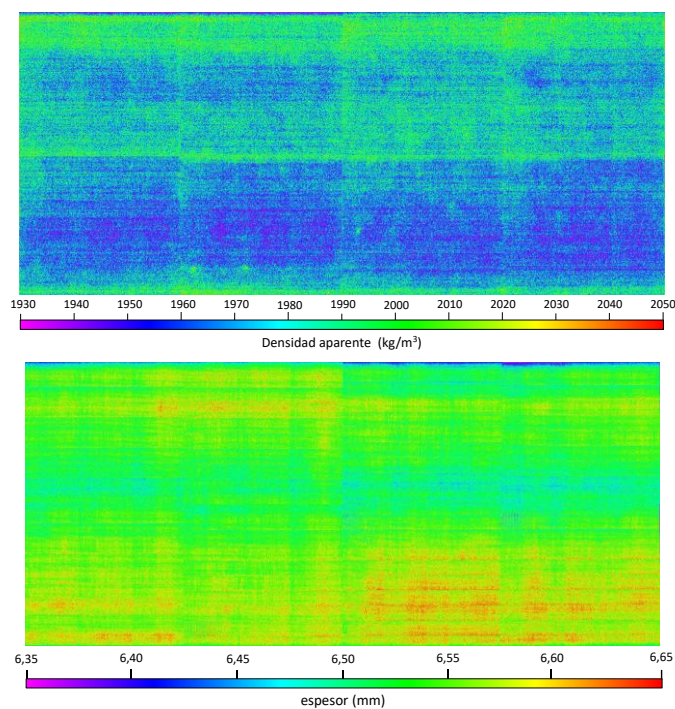


Figura 14. Distribución de densidad aparente (arriba) y de espesor (abajo), de un placa cerámica de porcelánico de gran formato (1800 x 3600 x 6)mm, fabricada con la tecnología de prensado entre rodillos. Living Ceramics.

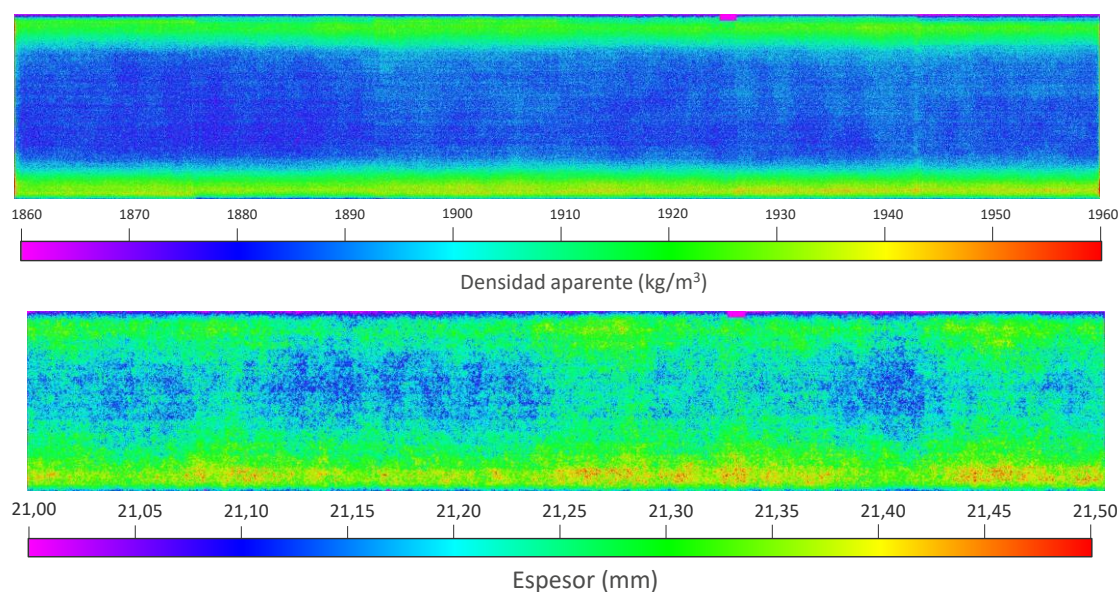


Figura 15. Distribución de densidad aparente (arriba) y de espesor (abajo) de una placa cerámica, fabricada con la tecnología de prensado entre rodillos y cortada a continuación para dar lugar a baldosas cerámicas de gran formato (90 x 90 x 20)mm. En la imagen se representa una serie de 5 piezas.

A simple vista, comparando las imágenes obtenidas del análisis con rayos X de todas las placas cerámicas ensayadas, se observa como las distribuciones de densidad aparente y espesor que proporciona la tecnología de prensado sobre banda son diferentes a las que se pueden observar en las placas prensadas entre rodillos.

Mientras que en la primera de la tecnologías (Superfast – System), se obtienen distribuciones más heterogéneas, observando zonas muy concretas donde se ha depositado más o menos tierra (zonas moradas : bajo espesor; zonas rojas: alto espesor), encontrando en consecuencia variaciones de densidad aparente de hasta 50 kg/m³ y variaciones de espesor de hasta 0,5 mm, en las placas prensadas entre rodillos (Continua+ - Sacmi), se obtienen distribuciones más homogéneas.

En el primero de los ejemplos de la segunda tecnología mostrados anteriormente (Figura 14), placa de porcelánico de (1800 x 3600 x 6)mm, se observa cómo la zona inferior de la placa (que en realidad correspondería con la zona izquierda, según el sentido de avance de la pieza a la salida de la prensa) está en general menos prensada que la zona superior, habiendo unas diferencias de alrededor de 20-30 kgm³ entre ambas. El motivo de este gradiente se debe a una incorrecta nivelación de la tolva que deposita el polvo granulado sobre la banda metálica que lo transporta hasta el tren de rodillos. De ahí que se observen tonos rojizos en esa zona, indicando una mayor deposición de polvo.

El segundo ejemplo (Figura 15) corresponde a un placa cerámica de 910 mm de ancho y 9 mm de espesor que se prensa de manera continua con un tren de rodillos. Tras la etapa de prensado, la placa se somete a una etapa de corte que la subdivide en piezas de (910 x 910 x 9) mm, por tanto la imagen representada corresponde a una serie de 5 piezas. Tal y como indica el mapa en falso color, las distribuciones de densidad y espesor son bastante homogéneas en prácticamente toda la superficie de la pieza. Aunque, en este caso cabe destacar el gradiente observado, en ambas variables, entre la zona central y los bordes de la placa.

Esto es debido a la presencia de unas guías metálicas, colocadas a ambos lados de la banda metálica por la que circula el polvo granulado, que se instalan bajo los rodillos con el objetivo de contener y guiar el polvo hasta la zona de prensado. Cuando el polvo es sometido a la presión del rodillo tiene lugar un desplazamiento de las partículas el mismo desde el centro del lecho hacia los bordes, la acumulación producida junto a las guías metálicas provoca ese aumento de la compactación en los laterales de la placa.

4. Análisis del proceso

Este apartado engloba las actividades destinadas a caracterizar los propios procesos de fabricación. Por una parte, con la finalidad de alimentar las simulaciones desarrolladas en el paquete de trabajo 2 y, por otra parte, para identificar los elementos críticos de proceso que puedan tener mayor influencia sobre las propiedades y/o la calidad de los productos fabricados.

Para el correcto análisis del proceso, es necesario recopilar información de cuántas variables sea posible. La realidad, en la mayoría de las plantas de fabricación de grandes placas cerámicas, es que, hoy en día, este análisis se basa en una recopilación manual y discontinua de las que se consideran las variables de proceso más relevantes, como es el caso de la densidad aparente de las placas, su espesor o la humedad del polvo granulado.

Pero estos datos solo se pueden encontrar en registros en papel, y en el mejor de los casos, tabulados en alguna aplicación desarrollada para hacer las funciones de histórico de datos.

Por este motivo, y a fin de entender y mejorar el proceso y la calidad del producto a tiempo real, se llevó a cabo un despliegue instrumental en la planta de fabricación de Living Ceramics para recopilar la evolución de variables de proceso que aún no estaban siendo recogidas en el proceso productivo.

Conforme se describió al comienzo de este entregable (Figura 16), las variables de proceso más importantes en el prensado entre rodillos son la humedad, el espesor del lecho de polvo granulado y la separación entre rodillos, ya que el conjunto de éstas determinará el valor de la densidad aparente de la placa conformada y su espesor. Además, en este tipo de proceso, a diferencia de en el prensado uniaxial convencional o el prensado sobre banda, la expansión post-prensado que sufre el material a la salida de los rodillos, también va a depender de estas mismas variables.

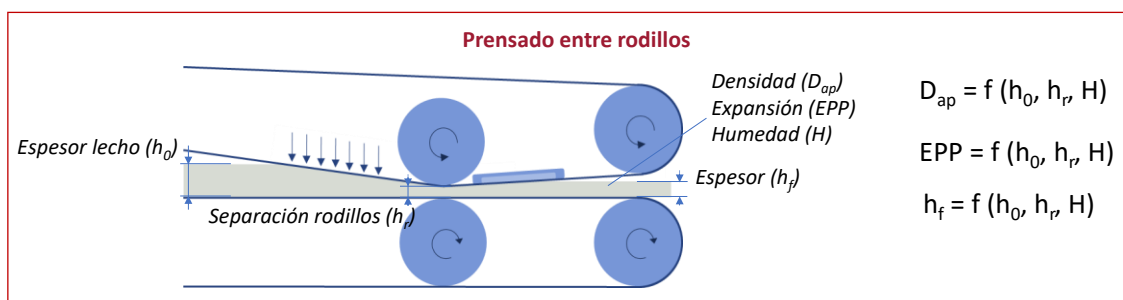


Figura 16. Esquema de las variables de proceso en el prensado entre rodillos.

Por ello, y conforme se observa en la figura 17 (izquierda), se instaló a la entrada de la prensa Continua+, sobre el lecho de polvo granulado, un sensor de medida de humedad basado en tecnología de infrarrojos de NDC Technologies, capaz de registrar la humedad del material en continuo y un telémetro marca Omron para medir la altura de lecho en tiempo real. Del mismo modo, se hizo uso de un sistema de telemetría marca Keyence a la salida de la prensa para registrar el espesor de las placas recién prensadas.



Figura 17. Sensor de humedad y sistemas de telemetría instalados sobre el lecho de polvo granulado y sobre la pieza recién prensada.

Esta instrumentación supuso un avance significativo en cuanto a registro de datos se refiere y una gran ventaja para los operarios, ya que les permite identificar de forma instantánea los cambios producidos en el producto tras cualquiera de las maniobras realizadas en la prensa.

Además, de los datos recopilados por los instrumentos mencionados, se disponía de datos de proceso recopilados por los operarios de planta tras los rutinarios controles de calidad a lo largo de los diferentes turnos de trabajo ().

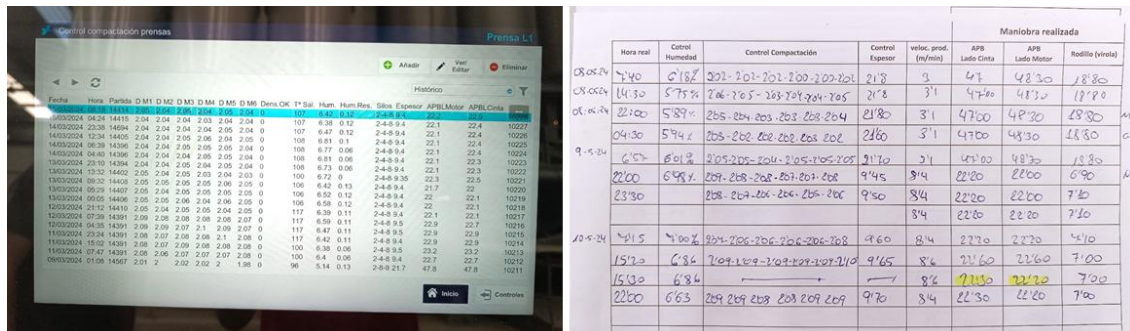


Figura 18. Control de variables realizado por los operarios en planta. A la derecha, tabla de registro de variables de proceso en papel. A la izquierda, histórico de datos indexados por el operario en una app diseñada para tal fin.

De la combinación de todas las fuentes de información disponibles, se fueron generando reportes gráficos semanales (Figura 19) con los datos de todas las variables de proceso, para análisis y conocimiento tanto del equipo que estaba llevando a cabo el proyecto como de los propios técnicos y operarios de la empresa.

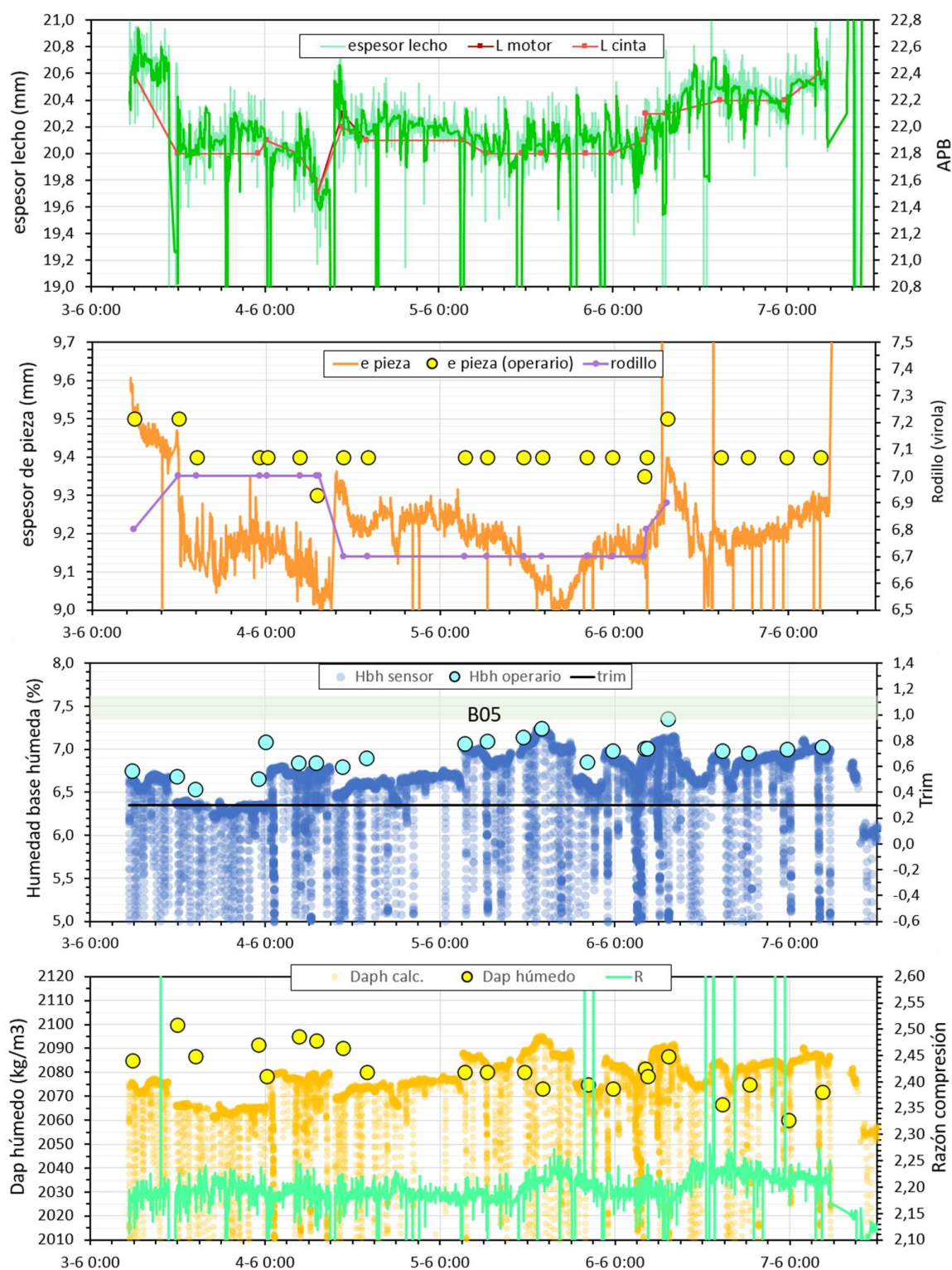


Figura 19. Registro de variables de proceso en continuo y tiempo real (H , espesor lecho (h_0), espesor pieza (h_f), $Dap_{calc.}$, R) y datos recopilados por los operarios (H , $Dap_{húmedo}$, e_{pieza} , posición rodillo, apertura tova de polvo (L_{cinta} , L_{motor})).

5. Experimentación industrial

La última etapa de este paquete de trabajo técnico consistió en llevar a cabo un conjunto de maniobras operativas en la prensa Continua+. El objetivo de esta experimentación industrial era observar la respuesta de las variables de producto, densidad aparente, espesor, e incluso la posible aparición de defectos, ante unas modificaciones concretas en el espesor del lecho de polvo y la separación entre rodillos, lo que a todos los efectos se correspondería con la presión de prensado.

A continuación, en la figura 20 se muestra un esquema de las maniobras que se llevaron a cabo en la prensa de Living Ceramics. En primer lugar, y con el objetivo de observar cómo afecta la separación entre el rodillo prensor y la cinta metálica a la densidad aparente y el espesor de las placas conformadas, se realizaron dos maniobras en las cuales se modificó dicha separación a través de un parámetro que los operarios de prensa conocen como “altura de virola” en $\pm 0,4$ mm, manteniendo constante la altura de lecho en el valor de referencia. En segundo lugar, para relacionar las variables de producto con la altura del lecho de polvo granulado, se realizaron dos maniobras más, en las cuales se modificó dicha altura de lecho en $\pm 0,5$ mm, manteniendo constante la separación entre rodillos en el valor de referencia.

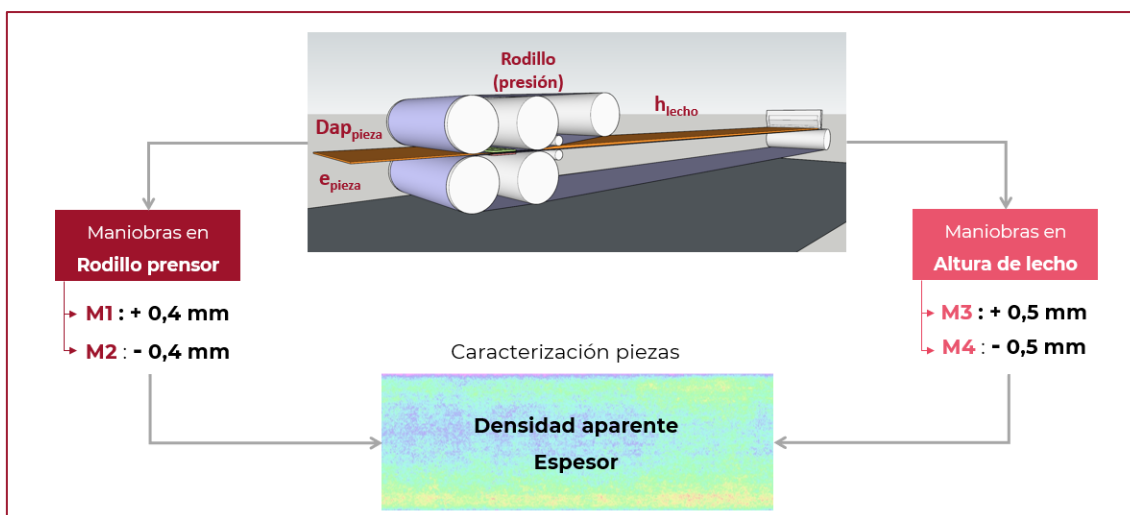


Figura 20. Esquema de la maniobras realizadas a nivel industrial en la prensa Continua+ de Sacmi instalada en la empresa Living Ceramics.

Estas maniobras se llevaron a cabo con una de las composiciones habituales de trabajo en la empresa, la denominada como B05, la cual tenía un contenido en humedad en base seca alrededor del 6,7 %. El formato que se estaba fabricando en ese momento era 90x90 mm y 9 mm de espesor medio y la velocidad de producción estaba en torno a 8,3 m/min.

Previo al inicio de las maniobras, se recogió una pieza a la salida de la prensa como referencia de producción. Además de las condiciones mencionadas en el párrafo anterior, la altura de virola (rodillo prensor) para esta pieza fue de 6,9 mm y el espesor o altura de lecho fue de 22,2 mm.

Esta pieza, junto con las correspondientes a cada una de las maniobras realizadas, se escanearon con rayos X y se obtuvieron las distribuciones de densidad aparente y espesor correspondientes.

A continuación, se muestra una comparativa entre las placas cerámicas obtenidas tras cada una de las maniobras y la placa de referencia, pudiendo así observar a golpe de vista el efecto directo causado en cada uno de los experimentos.

4.1 Maniobras con rodillo prensor

En este apartado se muestran las distribuciones de densidad aparente y espesor de las placas resultantes de las maniobras con el rodillo prensor.

La primera de las maniobras, M1, corresponde al aumento de la altura de la virola en 0,4 mm respecto a la posición de referencia, es decir, de 6,9 mm inicial a 7,3 mm.

La segunda maniobra, M2, corresponde a la maniobra opuesta, es decir, disminución de la altura de rodillo en 0,4 mm, pasando de los 6,9 mm de referencia de la virola a 6,5 mm.

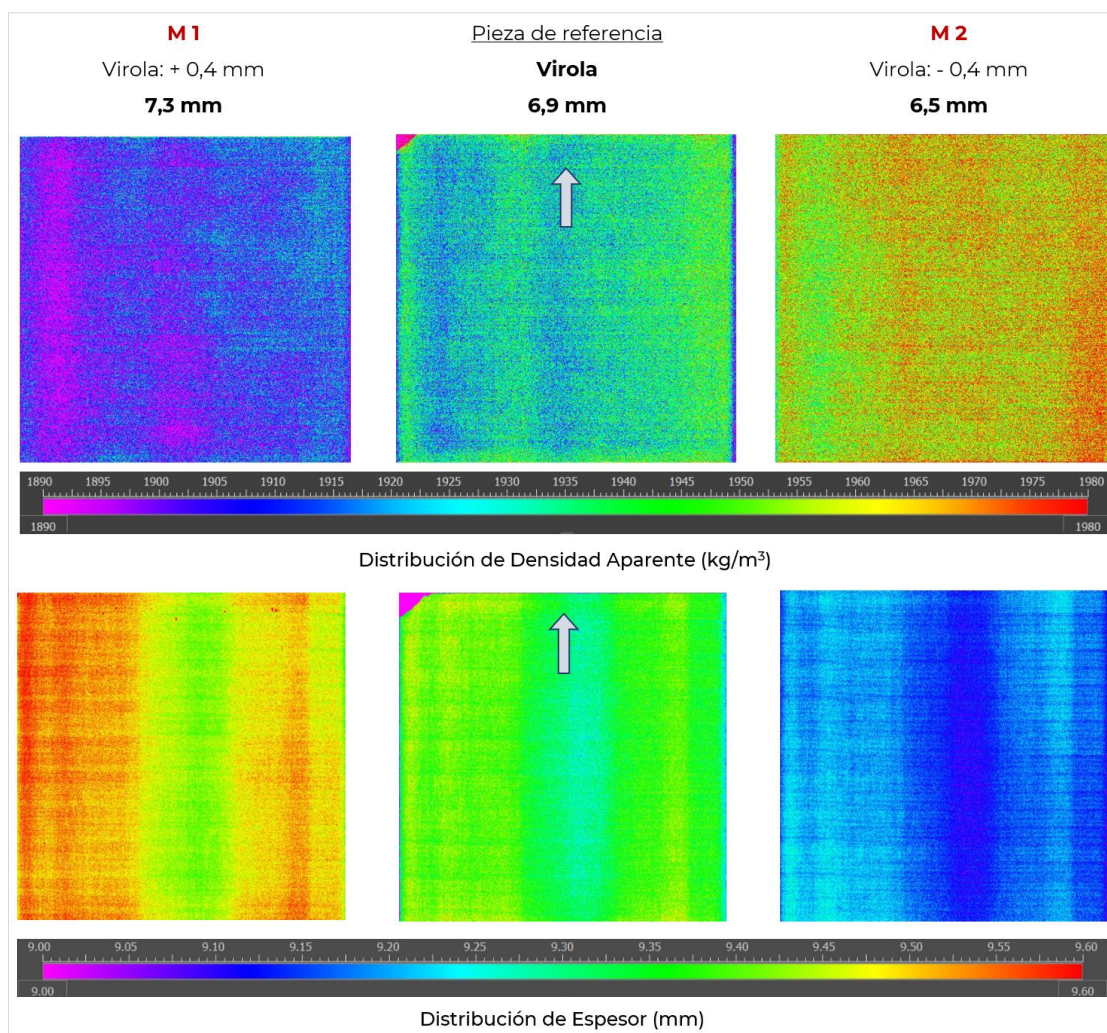


Figura 21. Mapas de distribución de densidad aparente (arriba) y espesor (abajo) de las piezas recogidas en Living Ceramics durante la realización de maniobras en el rodillo prensor. La flecha indica el sentido de avance de la pieza a la salida de la prensa.

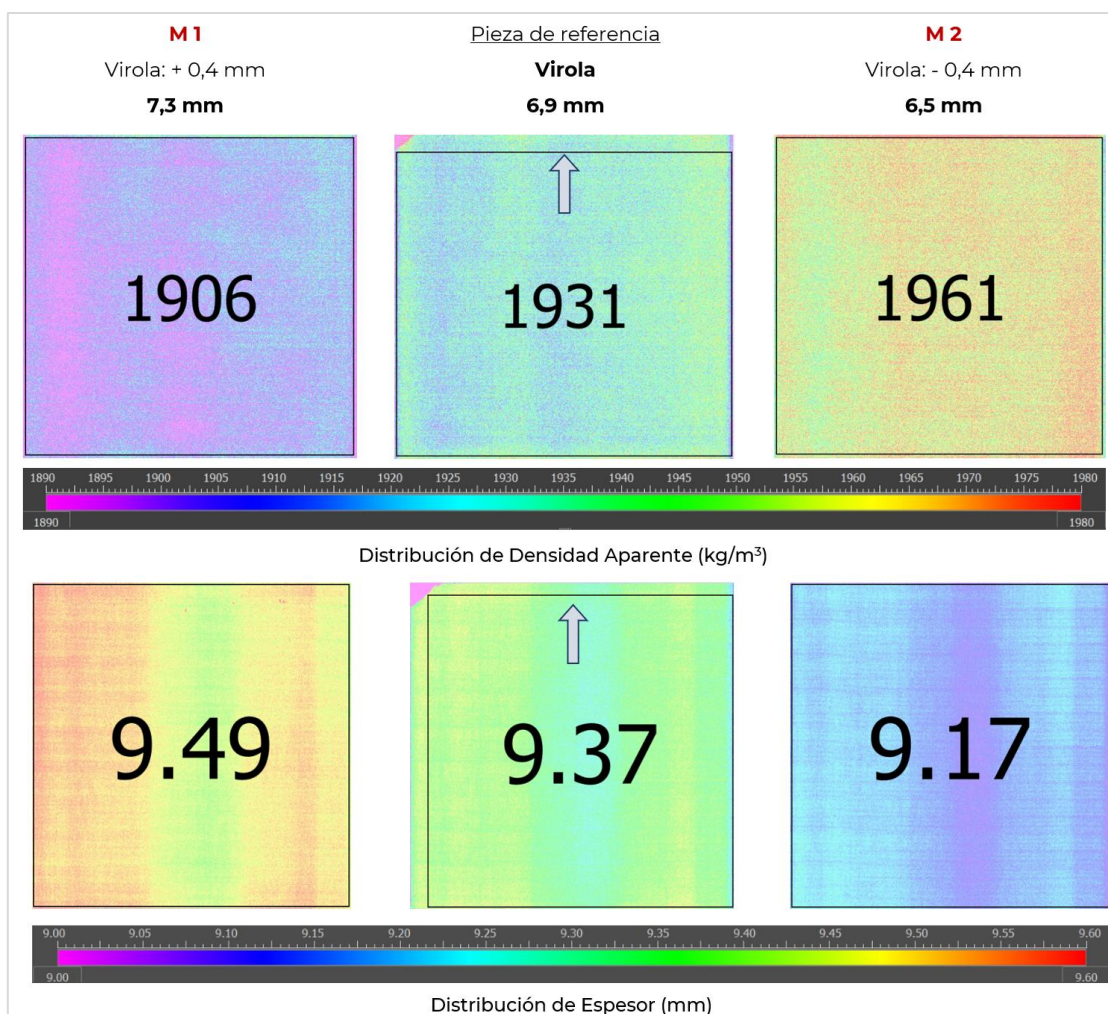


Figura 22. Valores promedio de la densidad aparente (arriba) y espesor (abajo) de las piezas recogidas en Living Ceramics durante la realización de maniobras en el rodillo prensor. La flecha indica el sentido de avance de la pieza a la salida de la prensa.

Como se puede observar en los mapas en falso color, ante una maniobra de elevación del rodillo prensor, incrementando la altura de la virola en 0,4 mm (M1), la consecuencia directa es una reducción de la densidad aparente de la pieza en unos 25 kg/m³, pasando de una densidad aparente promedio de 1931 kg/m³ a tan solo 1906 kg/m³. Esto tiene sentido porque al levantar el rodillo se está ejerciendo menos presión sobre el lecho de polvo, por lo tanto, no se va a alcanzar la misma compactación que en el caso de referencia. Por el mismo motivo, el espesor final de la pieza compactada, al estar menos compactada, será superior. En este caso concreto, un aumento de 0,4 mm en la altura de la virola equivale a un incremento de 0,12 mm en el espesor de la pieza.

Como era de esperar, de la maniobra contraria, -0,4mm de altura de virola (M2), se obtienen resultados opuestos a los anteriores. Cuando se reduce la altura del rodillo prensor, se está aumentando la presión ejercida sobre el material, como no se ha modificado la altura de lecho de polvo para compensar ese exceso de presión, el resultado es un aumento en la compactación de las piezas conformadas, pasando de los 1931 kg/m³ de la pieza de referencia hasta los 1961 kg/m³. Ese exceso de presión afecta también sobre el espesor final de la pieza haciendo que esta sea más delgada de lo habitual, reduciendo los 9,37 mm iniciales a 9,17mm.

3.2 Maniobras con altura de lecho de polvo granulado

En este apartado se muestran las distribuciones de densidad aparente y espesor de las placas resultantes de las maniobras con la altura de lecho de polvo granulado.

La tercera maniobra, M3, corresponde al aumento del espesor del lecho de polvo granulado en 0,5 mm respecto al espesor de referencia, es decir, de 22,2 mm de espesor de lecho inicial a 22,7 mm.

La última de las maniobras, M4, corresponde a la disminución del espesor del lecho de polvo granulado en 0,5 mm respecto al espesor de referencia, es decir, de 22,2 mm de espesor de lecho inicial a 21,7 mm.

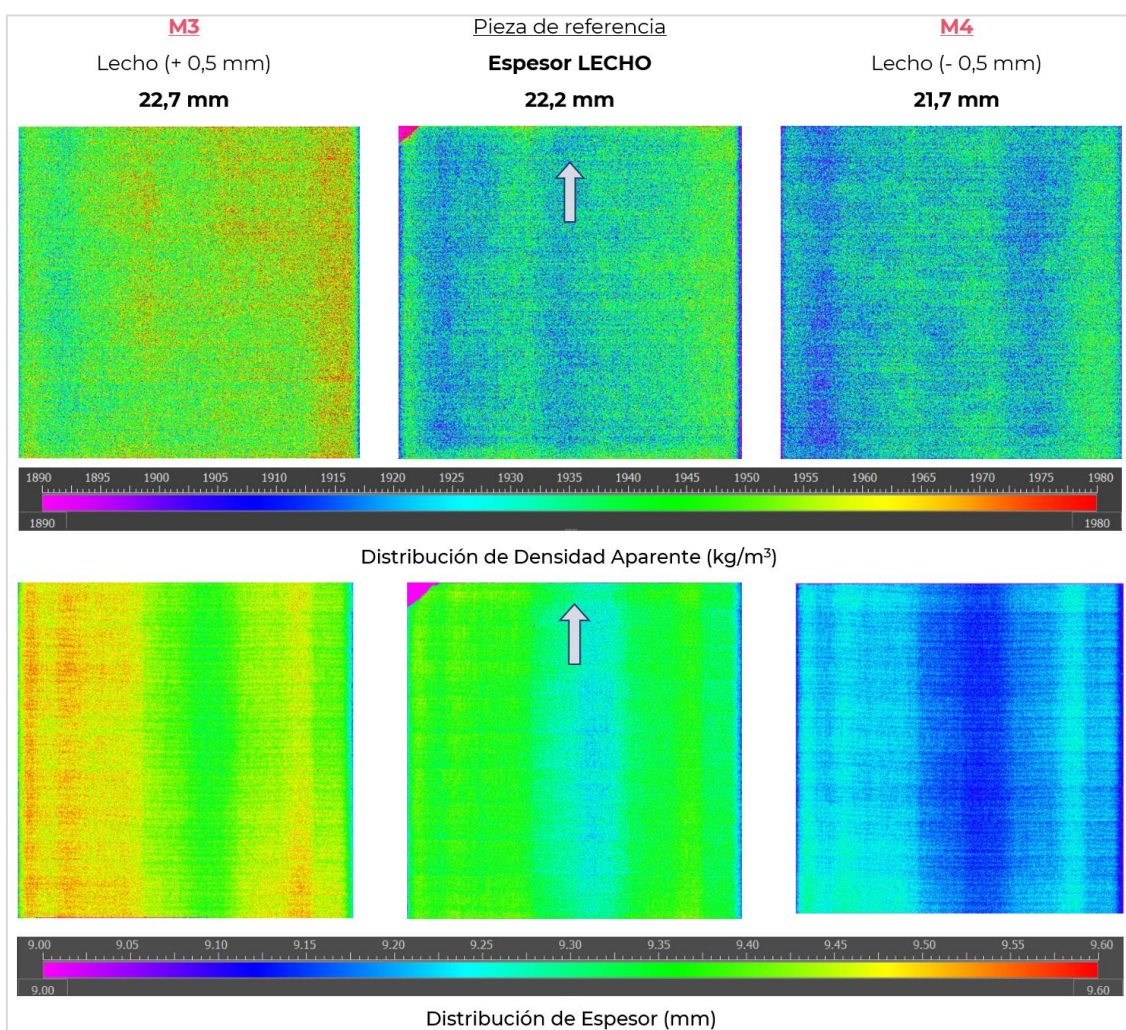


Figura 23. Mapas de distribución de densidad aparente (arriba) y espesor (abajo) de las piezas recogidas en Living Ceramics durante la realización de maniobras en el lecho de polvo granulado. La flecha indica el sentido de avance de la pieza a la salida de la prensa.

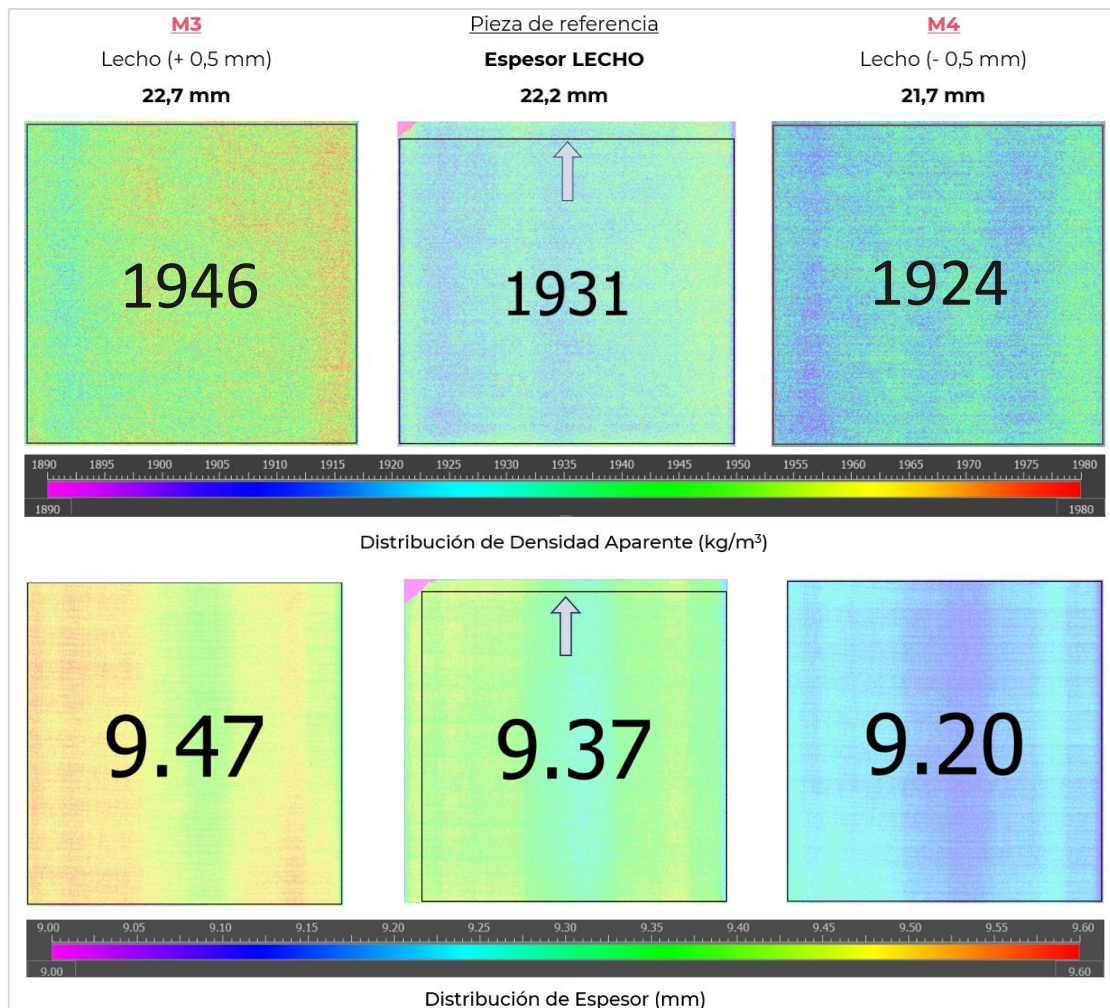


Figura 24. Valores promedio de la densidad aparente (arriba) y espesor (abajo) de las piezas recogidas en Living Ceramics durante la realización de maniobras en el lecho de polvo granulado. La flecha indica el sentido de avance de la pieza a la salida de la prensa.

Al igual que en el apartado anterior, se muestran en falso color los mapas de distribución de densidad aparente y espesor, así como los valores promedio de ambas variables para cada una de las piezas resultantes de las maniobras referentes a la altura de lecho de polvo.

Conforme se observa en ambas figuras, el efecto directo de un aumento en la altura del lecho de polvo de 0,5 mm es un aumento tanto en la densidad aparente como en el espesor de la pieza compactada, incrementando la compactación de la pieza en 15 kg/m^3 y el espesor en 0,10 mm.

Este hecho se justifica porque al aumentar la altura del lecho de polvo, se está aumentando la cantidad de material que tendrá que pasar entre los rodillos de la prensa, de ahí el aumento en el espesor de la pieza.

En cuanto a la densidad aparente, si se hubiera pretendido obtener piezas con una densidad aparente similar a la de referencia, se debería haber compensado ese exceso de material con una ligera subida del rodillo prensor. Pero al mantener la posición del rodillo en su valor de referencia, ese exceso de material se traduce en un aumento de la presión de prensado, y con ello de la compactación.

Para el caso de la maniobra contraria, reducción de la altura del lecho de polvo en 0,5 mm, el resultado inmediato que se observa tras el prensado es una reducción tanto en la compactación de la pieza como en su espesor. La explicación a este efecto se basa en que al disminuir la cantidad de material que pasa entre los rodillos de prensado, dado que la posición del rodillo ha permanecido en la de referencia, el espacio disponible entre el material y el rodillo es mayor, o dicho de otro modo, la presión que se está ejerciendo sobre el material es menor, de ahí que tanto el espesor como la compactación de la placa prensada sean inferiores que los de la pieza de referencia.

→ Resumen de resultados obtenidos en las maniobras

A continuación, se presenta la tabla 5, que recopila los resultados obtenidos en cada una de las maniobras.

Tabla 5. Resumen de los resultados obtenidos en las maniobras industriales realizadas en la prensa Continua+ de Sacmi.

		Pieza compactada					
		Altura virola (rodillo) (mm)	Altura lecho (mm)	Dap (kg/m ³)	Δ Dap _{exp.} (kg/m ³)	e (mm)	Δ e _{exp.} (mm)
Ref.		6,9	22,2	1931		9,37	
Maniobras	M1	7,3 (↑ 0,4)	22,2	1906	-25	9,49	+0,12
	M2	6,5 (↓ 0,4)	22,2	1961	+30	9,17	-0,20
	M3	6,9	22,7 (↑ 0,5)	1946	+15	9,47	+0,10
	M4	6,9	21,7 (↓ 0,5)	1924	-7	9,20	-0,17