

ASPECTOS PRÁCTICOS PARA AUTOMATIZAR EL CONTROL POR RESONANCIA ACÚSTICA DE TEJAS CERÁMICAS CON GEOMETRÍA COMPLEJA: HACIA LA SUSTITUCIÓN DEL CONTROL MANUAL

Thierry Poirier, Olivier Burnet

Thierry Poirier (Francia), Grindosonic (Bélgica)

RESUMEN

En muchas fábricas de tejas cerámicas, el control de calidad sigue basándose en la auscultación manual por parte de operarios, lo que genera fatiga, variabilidad humana y una proporción nada despreciable de falsos positivos y falsos negativos en la detección de fisuras y grietas internas. En este trabajo se evalúa la capacidad de un sistema automatizado de ensayo por excitación impulsional (Grindosonic) para discriminar tejas industriales conformes y no conformes, tanto en configuración estática como sobre línea de producción, considerando geometrías complejas con valles, tacos y ranuras. También se discute la influencia del engobe, de la masa, del espesor y de la temperatura de las piezas. A partir de una campaña de ensayos en planta con tejas conformes y tejas con fisuras leves y con grietas severas, se propone un protocolo intuitivo de aprendizaje y de implementación que combina la selección de modos vibratorios adecuados, el ajuste de la estrategia experimental (puntos de apoyo, punto de impacto repetible) y la construcción de criterios robustos de decisión OK/NOK compatibles con la automatización. Los resultados muestran que la huella acústica de las tejas permite distinguir de forma fiable los estados de integridad, reduciendo la dependencia del control humano tradicional y abriendo la vía a un control de calidad no destructivo más repetible y trazable para líneas de alta cadencia.

PALABRAS CLAVE

Resonancia acústica, Tejas cerámicas, Ensayo no destructivo (IET), Control de calidad automatizado

1. INTRODUCCIÓN

El control de calidad de tejas cerámicas en fábrica sigue dependiendo con frecuencia de operadores que realizan una evaluación acústica manual para separar piezas sanas de piezas con defectos como fisuras, grietas u otros defectos internos. Este enfoque presenta limitaciones conocidas: fatiga del operario, riesgo ergonómico por movimientos repetitivos, variabilidad interindividual y presencia inevitable de falsos positivos y falsos negativos cuando la decisión depende del oído humano y de la experiencia acumulada. En ese contexto, un sistema automatizado de control no destructivo basado en resonancia acústica resulta especialmente atractivo para líneas de alta cadencia y para defectos cuya huella acústica no siempre es perceptible por los operarios de control (“sonadores”) en planta.

Sistemas automatizados basados en este principio han sido implementados en línea y acoplados a sistemas ópticos capaces de detectar defectos visuales. Sin embargo, la capacidad para evitar falsos positivos y falsos negativos sigue siendo un punto de vigilancia en varias plantas de tejas que han invertido en detección acústica en los últimos 10 años. De hecho, la mayoría de las plantas sigue usando personal operario por falta de solución práctica. La calidad de un equipo y su capacidad a realizar un análisis multimodal, adaptándose

a una cadencia elevada y al ruido ambiente, son factores claves para responder a la necesidad de un control de calidad confiable. Sin embargo, la comprensión por el usuario de la huella acústica de sus tejas sobre las bandas de transporte donde tiene lugar el control, así como de las posibles causas de artefactos, son igualmente elementos a integrar. El presente estudio propone, sobre la base de casos de estudio, un protocolo de aprendizaje intuitivo y de implementación del control en línea para el usuario, empleando un equipo de última generación (Grindosonic MK7), con el fin de superar los obstáculos prácticos.

La técnica de excitación impulsional (IET) se basa en aplicar un impacto ligero al cuerpo ensayado y analizar sus frecuencias naturales de resonancia y, cuando procede, el amortiguamiento asociado. La norma ASTM E2534 ⁽¹⁾ utiliza estos fenómenos para caracterizar piezas rígidas y detectar desviaciones ligadas a cambios de rigidez, porosidad, masa o integridad estructural. La técnica también se utiliza ampliamente para determinar módulos elásticos dinámicos (E, G, Poisson: ASTM E-1876 ⁽²⁾: Fig.1) y, particularmente en el caso de los materiales cerámicos, seguir la evolución de fisuras hacia grietas más abiertas. El efecto de los desgastes y ataques fisicoquímicos, los choques térmicos y otras sollicitaciones cíclicas ⁽³⁾ puede ser analizado por esta misma técnica con el fin de identificar umbrales de degradación, aprovechando que la respuesta resonante de estos materiales suele ser nítida y repetible.

Es posible, pues, realizar el mismo trabajo que los operarios sonadores en línea, analizando el sonido debido a la respuesta en resonancia producida por el impacto de un martillo automatizado sobre la superficie de las tejas, y distinguir piezas buenas o con defectos moderados o severos ⁽⁴⁾, cuando la excitación y el modo vibratorio se seleccionan adecuadamente. La interpretación de los resultados debe considerar que la respuesta resonante depende simultáneamente de la geometría, la masa y los modos activados, por lo que la estrategia experimental (punto de apoyo, posición del impacto y punto de captación) es tan importante como el algoritmo de clasificación. Cabe destacar que las piezas solicitadas por un impacto pueden resonar según diversos modos (flexión, torsión, compresión) según las 3 dimensiones de la pieza (Fig. 2).

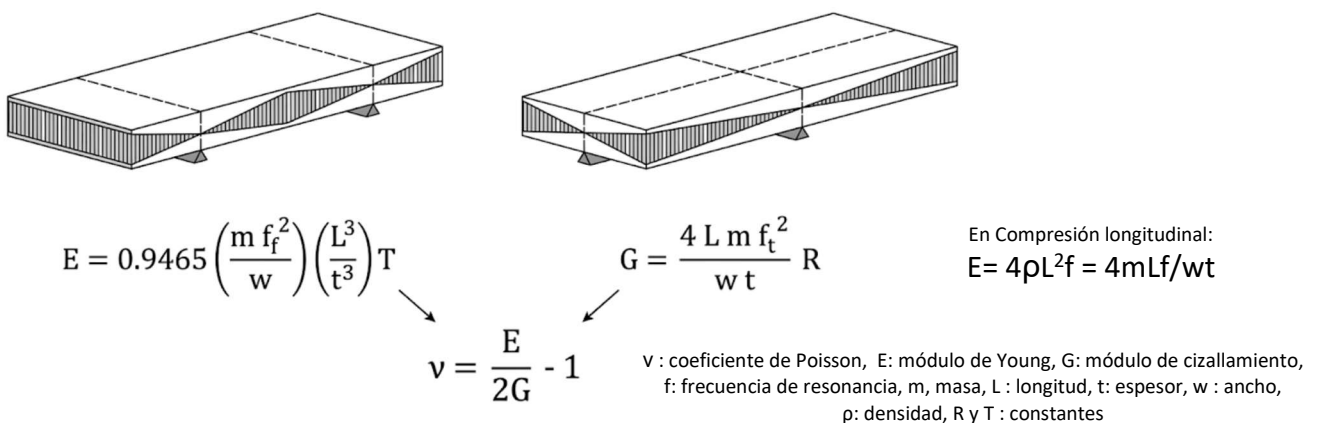


Fig. 1 medición de constantes elásticas dinámicas (E, G, Poisson) por método ASTM E1876

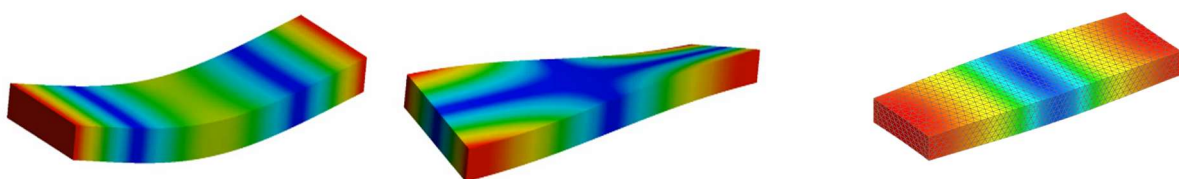


Fig. 2: Modos de resonancia (a) en flexión longitudinal (generada mediante un impacto en el centro), (b) en torsión (impacto en una esquina) y (c) en compresión longitudinal (impacto en la punta)

Una pieza sencilla (ej: baldosa, ladrillo, cilindro) puede resonar según un número reducido de modos distintos, con pocas frecuencias fundamentales típicas y sus frecuencias armónicas. Mientras más rígido el material, más altas serán sus frecuencias. Ahora bien, cuando la geometría de la pieza se enriquece (tejas con codos, tacos y ranuras, o piezas 3D, sanitarios, placas de freno, otros: Fig.3), la firma acústica de las piezas incluirá nuevos picos y resultará más compleja. La norma ASTM E2534 plantea que un daño en una pieza suele dar lugar a la disminución de ciertas frecuencias típicas, a la desaparición o la aparición de ciertos picos, o al ensanchamiento de dichos picos en el espacio de frecuencias. Este ensanchamiento (ancho de pico a mitad de altura) corresponde al amortiguamiento (“atenuación”) y aumenta desde el inicio de creación de microfisuras hasta estabilizarse cuando las mismas se convierten en fisuras más abiertas ⁽⁶⁾. Por ello, en la caracterización de tejas industriales, las piezas conformes (“OK”) y no conformes (“NOK”) suelen diferenciarse fácilmente por las solas variaciones de sus frecuencias (Fig. 4).



Fig. 3: Anverso y reverso del modelo estudiado (véanse valles, tacos, ranuras). Defecto “grieta”

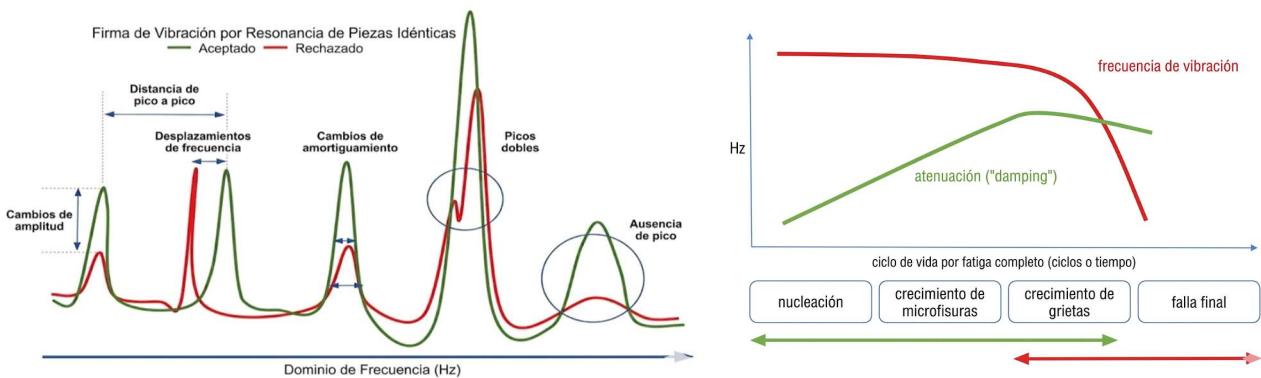


Fig. 4: (a) Modos de detección de piezas NOK según la norma ASTM E2534-2020 ⁽¹⁾ y (b) evolución de la atenuación (“damping”) con el crecimiento de fisuras ⁽⁶⁾

En el presente trabajo se estudia la capacidad del sistema GrindoSonic MK7 (Leuven, Bélgica) para discriminar tejas industriales OK y NOK, tanto en configuración estática como en configuración dinámica sobre línea, y se discute su potencial para sustituir el control humano tradicional. El enfoque principal corresponde a la detección de “fisuras” o “grietas” (Fig. 3) y a la construcción de criterios robustos de decisión OK/NOK compatibles con la automatización.

Dicho estudio toma en cuenta el efecto del uso o no de engobe y de la configuración de la línea de control en planta. También evalúa el impacto de factores adicionales tales como variaciones de masa, espesor y temperatura.

2. MARCO METODOLÓGICO: APRENDIZAJE E IMPLEMENTACION DEL CONTROL EN LINEA

Se realizó una campaña de ensayos en una planta de tejas francesa, ensayando un mismo modelo con y sin engobe, de longitud 46 cm, ancho 30 cm, peso 4.3-4.4 kg según el caso. Las mediciones de frecuencias abarcaron tejas consideradas conformes y tejas con defectos leves (“fisuras”) o severos (“grietas”).

El protocolo aplicado para optimizar el control en línea incluye las fases siguientes:

(A) Aprender a conocer la pieza “en libertad”: Se colocan las tejas de un mismo modelo, OK y NOK, sobre un soporte de goma espuma suficientemente blando como para dejar libertad de movimiento para identificar todos sus modos de resonancia. Al emplear diferentes puntos de impacto y de colocación del micrófono, se identifican todas las frecuencias típicas y se escogen las frecuencias que permiten distinguir mejor las piezas OK y NOK, para el control de calidad. Esta fase (A), al igual que la (B), toma 10 a 20 minutos. (fig. 5,6).

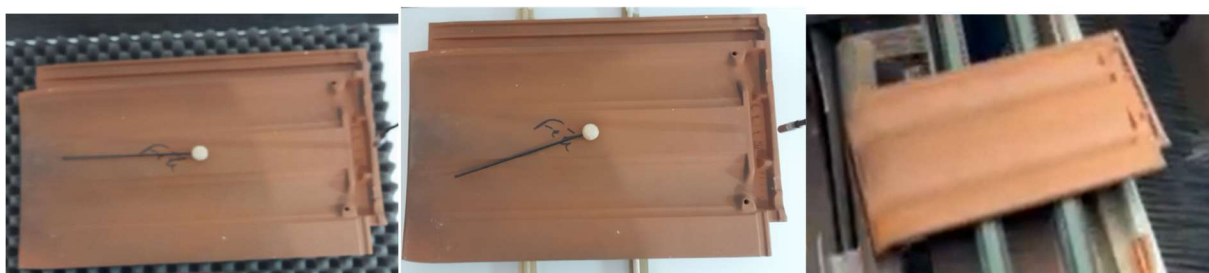


Fig. 5: Protocolo de aprendizaje de la teja: (A) “en libertad”, (B) “cautivo sobre barras, (C) en línea industrial

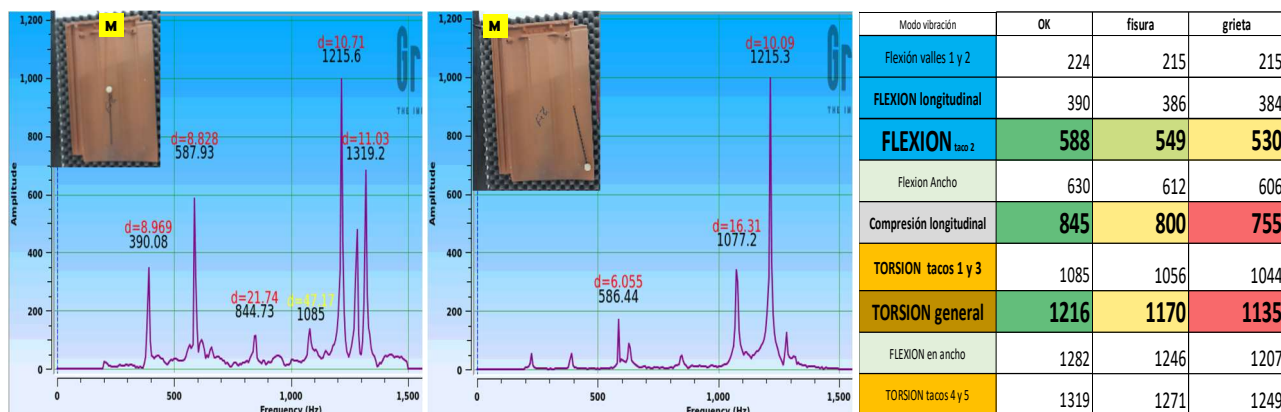


Fig. 6: Aprendizaje “en libertad”: identificación de los modos de resonancia: (a) flexión (b) torsión según la posición del martillo y del micrófono (“M”), (c) identificación de picos que diferencian las tejas OK y NOK.

(B) Aprender a conocer la pieza “cautiva” sobre bandas de transporte: se colocan las mismas tejas sobre dos barras paralelas separadas de (a) 14 cm y (b) 25 cm, a modo de simulación simplificada de las bandas transportadoras de 2 diferentes líneas de producción industrial en la planta. En estas condiciones, ciertos modos de resonancia (torsión, flexión en anchura, compresión longitudinal) pueden ser menos activados que el modo “flexión longitudinal” cuando se aplica un golpe de martillo al centro de la teja. Este modo “cautivo” es útil para confirmar las frecuencias de interés para el control de calidad. También permitió, en este estudio, identificar el efecto de un eventual cambio de lectura si la localización del punto de impacto no es exacta (2 cm del centro de la teja, o más). Se fija entonces unos rangos de tolerancia sobre los picos de mayor interés. Las piezas cuyos valores saldrán de rango serán declaradas NOK (fig. 7).

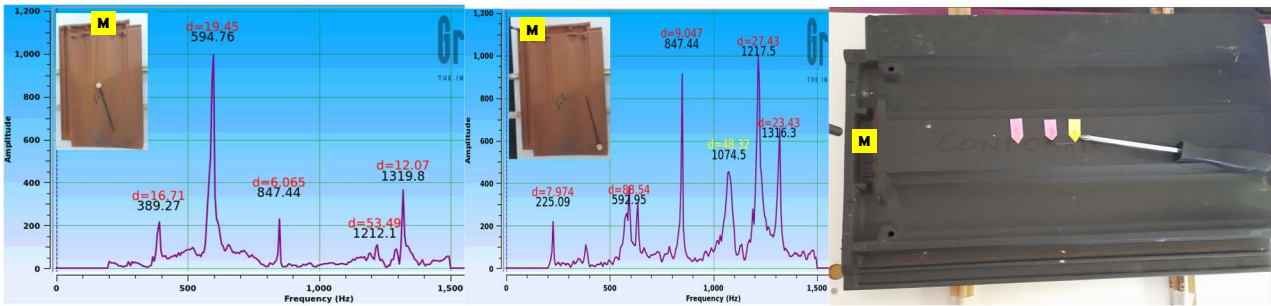


Fig. 7: Aprendizaje “cautivo” sobre bandas paralelas: (a) flexión y (b) torsión. (c) Test de impacto en flexión, en 3 puntos (ver flechas) sobre teja con engobe para visualizar el efecto de un impacto lejos del centro.

(C) **Controlar las piezas en situación real:** se miden las frecuencias de interés en la línea industrial “a” (14 cm), con martillo automático y lectura en tiempo real, para valorar la compatibilidad entre las mediciones del aparato y la percepción del operario sonador (Fig.8).



Fig. 8: Test en línea industrial con el martillo, espectro FFT o cribado por software QC (Verde/Rojo)

Los parámetros empleados para las mediciones son indicados en la tabla 1. Cabe acotar que el propósito del aprendizaje en modo estático en laboratorio (A) sobre goma espuma y (B) sobre barras paralelas, consiste en identificar todos los modos de vibración asociados a las tejas, por lo que se escoge aumentar la sensibilidad del aparato (pre y postamplificación), para identificar mejor cada frecuencia típica.

| | |
|--|---------|
| Frecuencia de muestreo | 200 kHz |
| Número de puntos por medición | 32768 |
| Resolución | 6 Hz |
| Tiempo de adquisición por impacto | 0.163 s |
| Pre amplificación para medición: | |
| - En laboratorio | X 6 |
| - En línea de producción | X 2 |
| Post amplificación para medición: | |
| - En laboratorio | X10 |
| - En línea de producción | X6 |
| Otras disposiciones: En laboratorio, ignorar los picos de amplitud inferior al 10% del pico máximo, contra 20% en planta | |

Tabla 1: parámetros de medición del Grindsonic MK7

En cambio, en planta, es preciso reducir esta sensibilidad para obviar los sonidos parásitos del ambiente de la planta (dispositivos neumáticos cercanos, impactos lejanos no vinculados con el control de calidad), y “escuchar” solo a los impactos del martillo neumático sobre las tejas en la línea de control automatizada, tal como lo hace un operario sonador. El tiempo de adquisición (0.163 s) es escogido de tal manera que la velocidad de medición y tratamiento supere la cadencia de producción industrial (aprox. 3000 piezas/hora). La resolución asociada (6 Hz) es considerada suficiente para distinguir las piezas buenas y defectuosas, cuyas

diferencias en frecuencia son superiores a 20 Hz en los picos seleccionados para su cribado. Una resolución mayor (hasta 0.02 Hz) es permitida por el aparato, pero hubiese conllevado a tiempos de adquisición de varios segundos. Por otra parte, se ha observado, en línea industrial, que la posición del martillo es un parámetro a seguir con cuidado: se entiende que un impacto cerca del mismo punto debería generar un mismo espectro. Sin embargo, la forma compleja de las tejas (tacos, ranuras) podría generar un sonido distinto si se desplaza demasiado el martillo. De hecho, se ha observado artefactos de sonido en producción, capaces de confundir al operario sonador de turno, en una línea alimentada por robots donde se sospecha que el martillo automático no golpeaba siempre las tejas en el mismo punto. Cabe identificar, pues, cuan repetible es la señal y con cual margen. Por ello, se compara los espectros en modo “cautivo” (piezas sobre barras paralelas), al golpear unas tejas OK y NOK en su centro, así como a 2 cm y 6.5 cm del mismo (fig. 7).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ensayo con las tejas sin engobe sobre soporte de goma espuma (“en libertad”) permite poner en evidencia cada uno de los diversos modos de resonancia (flexión longitudinal, transversal, otros) al colocar el par micrófono-martillo en diversas direcciones (Fig. 6). Se discrimina con claridad piezas sanas, con fisura y con grietas, especialmente en picos de flexión hacia 588 Hz, de compresión longitudinal hacia 845 Hz y de torsión hacia 1216 Hz. La complejidad geométrica se pone en evidencia al visualizar picos específicos cuando se impacta los tacos de las tejas. Las fisuras y grietas generan reducciones significativas de las frecuencias típicas (respectivamente 20-47 Hz y 33-92 Hz). También se observa que ciertos picos son poco afectados por estos defectos (390 Hz). El mismo modelo de teja es cubierto a veces con un engobe rico en óxido de manganeso antes de su cocción, para conferirle un color gris negro. La figura 9 refleja espectros comparables a los de la teja sin engobe (fig.6) aunque sus frecuencias para las piezas OK son desplazadas de 3.5%. Este desplazamiento podría ser ligado a variaciones en producción de la masa m (+/- 1.3%) o del espesor t (engobe: +/- 0.04%) y/o en nivel de sinterización. Para saberlo, se calculan las variaciones relativas y absolutas de frecuencia a módulo de Young (E) constante o a módulo de cizallamiento constante (G), las cuales se deducen de las ecuaciones de la figura 1:

$$\text{En Flexión: } \frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2} \times \left(3 \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta m}{m} \right) = \pm 0.71\% \text{ es decir, aquí } 588 \text{ Hz } \pm 4 \text{ Hz}$$

$$\text{En Compresión: } \frac{\Delta f}{f} = \left(\frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta m}{m} \right) = \pm 1.34\% \text{ es decir, aquí } 845 \text{ Hz } \pm 11 \text{ Hz}$$

$$\text{En Torsión: } \frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta m}{m} \right) = \pm 0.67\% \text{ es decir, aquí } 1216 \text{ Hz } \pm 8 \text{ Hz}$$

En este marco, las variaciones de masa o dimensión generan variaciones de frecuencia que son cercanas a la resolución escogida para el aparato, y son muy inferiores a los desplazamientos experimentales de los picos. Las grandes diferencias de frecuencia medidas entre piezas (engobadas o no) son entonces esencialmente debidas a un nivel distinto de sinterización y rigidificación. Una mayor sinterización del producto, asociada a una baja de la porosidad, conlleva a un aumento del módulo de Young y de la frecuencia típica en flexión⁽⁵⁾. Por ello, la diferencia entre piezas OK y NOK de un mismo lote (3.8-6.6% para fisuras y 6.7-10.7% para grietas) es meramente atribuible a la aparición de los defectos. Los 3 picos considerados son retenidos, pues, como principales criterios de selección OK/NOK. Si la teja cambia de módulo de Young de un lote a otro (cocción diferente), el conjunto de frecuencias OK/NOK se verá desplazado, pero podrá fácilmente ser identificado con la secuencia de aprendizaje aquí descrita. Por otra parte, se observa que la frecuencia de compresión longitudinal baja significativamente al aparecer fisuras y grietas, pero regresa al valor de una pieza OK cuando la grieta se abre de manera excepcional (aquí: 65% de la longitud de la pieza).

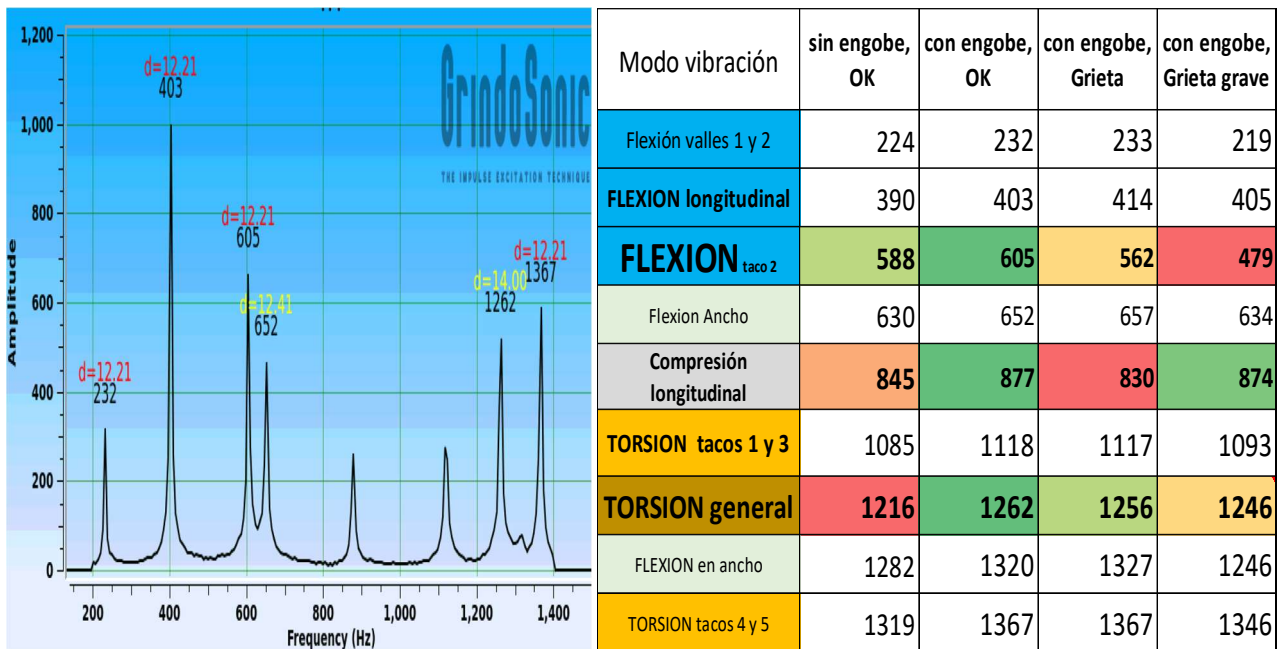


Fig. 9: mediciones “en libertad” sobre tejas con engobe, comparando con el mismo modelo sin engobe

Cabe acotar que un estudio realizado para la misma planta sobre otro modelo de teja ⁽⁷⁾, que se calentó entre 30 y 80°C, arroja un descenso lineal de las frecuencias típicas de resonancia, con una variación de 0.08% (0.7-1.3 Hz) por cada 10°C de cambio de temperatura de las tejas. Este factor se considera, pues, igualmente negligible frente al comportamiento del material mismo.

La segunda parte del protocolo de test (modo “cautivo”: soporte con barras paralelas) permitió evidenciar que dichas barras, necesarias para el transporte de tejas en la línea de control, alteran un poco los valores de los picos de flexión, aumentándolos de 10 Hz (tabla 3). Al impactar al centro de la teja, el modo “compresión longitudinal” deja prácticamente de ser activado: a 877 Hz se nota tan solo un pico residual (Fig. 10a). El modo “torsión” (1262 Hz) sigue claramente audible y sin alteración de valor.

En ambos casos de figura (distancias 14 o 25 cm entre bandas paralelas de transporte), la señal es preservada y bastante similar mientras el impacto tiene lugar en el centro de la teja o en un área cercana (+/- 2 cm). Al alejar excesivamente el punto de impacto del centro de la teja OK (aquí: 6.5 cm), un pico residual hacia 560 Hz se agrega a la lectura del pico principal de 615 Hz (Fig. 10b). Un espectro semejante (Fig. 10c) se presenta cuando la teja es NOK (grieta). Ello evidencia que la distancia entre bandas paralelas (y, por ello, el tipo de línea de producción) no afecta el criterio de selección, pero que la repetibilidad del punto de impacto es clave.

A este efecto de falso positivo (520-560 Hz) generado por el impacto “excentrado” (6.5 cm del centro) es aunado el hecho que el pico de compresión longitudinal (877 Hz) se encuentra fuertemente activado en tejas OK, cuando este era casi inaudible en la misma teja OK golpeada exactamente en su centro. De hecho, se nota que las tejas NOK (con grieta), cualquier sea la distancia entre bandas, también activan el modo “compresión longitudinal”, aunque con un valor reducido de su frecuencia (ej: 830 Hz en lugar de 877 Hz: Fig.10c). En conclusión, se escogen los picos de flexión (615 Hz) y de torsión (1260 Hz) para el control en línea.

| | Teja libre sobre soporte de goma | | |
|---|--------------------------------------|------------|---------|
| Modo de vibración | Flexión | Compresión | Torsión |
| Impacto en centro de teja sobre soporte de goma | 605 | 877 | 1260 |
| Impacto en teja sobre 2 barras paralelas | Teja sobre barras distantes de 14 cm | | |
| | Flexión | Compresión | Torsión |
| A : centro de teja | 615 | - | 1262 |
| B: a 2 cm del centro | 615 | - | 1263 |
| C: a 6,5 cm del centro | 616 | 879 | 1243 |
| Impacto en teja sobre 2 barras paralelas | Teja sobre barras distantes de 25 cm | | |
| | Flexión | Compresión | Torsión |
| A : centro de teja | 616 | - | 1261 |
| B: a 2 cm del centro | 617 | - | 1261 |
| C: a 6,5 cm del centro | 616 | 880 | - |

Tabla 2: espectro de una teja engobada OK y efecto de la distancia entre barras paralelas (simulando las bandas de transporte) y del punto de impacto sobre los valores leídos

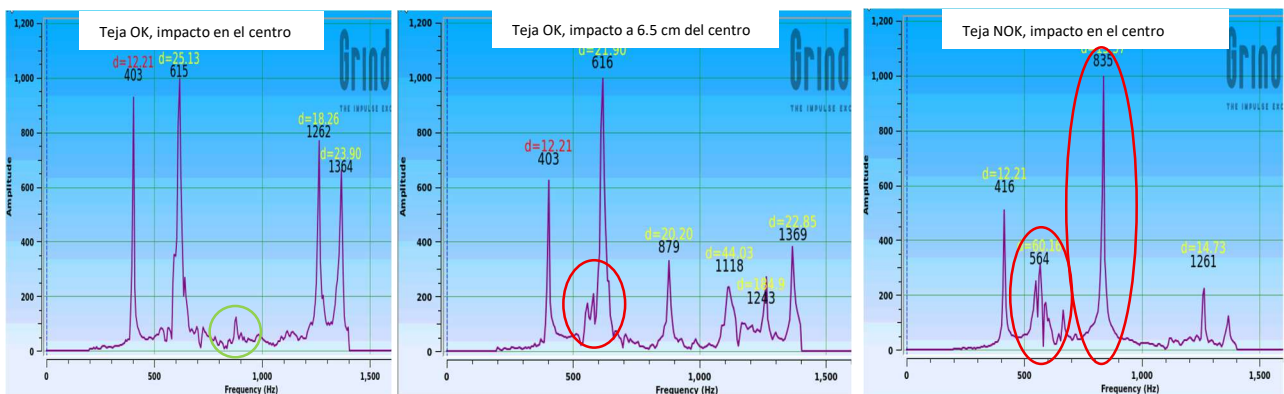


Fig. 10: aspecto del espectro de una teja OK engobada, al impactar (a) en el centro (b) demasiado lejos del centro (c) teja engobada con grieta (impacto al centro): los picos 520-560 Hz generan falsos positivos si se hace el impacto demasiado lejos del centro.

El test realizado en línea de producción industrial con bandas distantes de 14 cm fue llevado a cabo sobre tejas con engobes, a una cadencia cercana a 3000 piezas/hora. Se observó que mientras el martillo impactaba la zona central de la teja, las evaluaciones OK/NOK del aparato y del operario sonador coincidían bien (tabla 3) y los chequeos de integridad realizados a posteriori por un sonador referente confirmaban las mediciones acertadas. Se confirmó que el sistema robot de descarga de las tejas – línea de transporte daba lugar, esporádicamente, a una disposición alterada de las tejas y, asimismo, del punto de impacto por el martillo automático de la línea: el golpe podía ocurrir lejos del centro de la pieza o incluso en el vacío. En estas condiciones, tanto el operario como el aparato daban lugar a una evaluación errónea (falso positivo). Frente a la confusión generada por el sonido alterado, el operario se veía obligado a dar varios golpes adicionales con una barra metálica en la superficie de la teja sospechosa antes de poder emitir un veredicto: esto redundaba en pérdidas de tiempo y producción, así como en mayor desgaste del operario.

Este problema de sincronización del par martillo-teja, que es intrínseco a la línea estudiada e independiente del modo de detección escogido (humano o con el aparato), está en curso de tratamiento por parte de la empresa. Se prevé ensayos sobre otra línea de producción, libre del artefacto espectral mencionado.

| OK/NOK | Limite bajo pico 1 | Limite alto pico 1 | FLEXION | Limite bajo pico 2 | Limite alto pico 2 | TORSION |
|--------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|---------|
| | 580 | 640 | 595 | 1247 | 1300 | 1249 |
| | 580 | 640 | 602 | 1247 | 1300 | 1262 |
| NOK | 580 | 640 | 562 | 1247 | 1300 | 1255 |
| | 580 | 640 | 604 | 1247 | 1300 | 1262 |
| | 580 | 640 | 623 | 1247 | 1300 | 1272 |
| | 580 | 640 | 624 | 1247 | 1300 | 1291 |
| | 580 | 640 | 628 | 1247 | 1300 | 1298 |
| | 580 | 640 | 609 | 1247 | 1300 | 1267 |
| | 580 | 640 | 598 | 1247 | 1300 | 1251 |
| | 580 | 640 | 599 | 1247 | 1300 | 1297 |
| | 580 | 640 | 609 | 1247 | 1300 | 1275 |
| | 580 | 640 | 628 | 1247 | 1300 | 1271 |
| | 580 | 640 | 616 | 1247 | 1300 | 1278 |
| | 580 | 640 | 603 | 1247 | 1300 | 1265 |
| NOK | 580 | 640 | 589 | 1247 | 1300 | 1238 |
| | 580 | 640 | 592 | 1247 | 1300 | 1240 |
| | 580 | 640 | 598 | 1247 | 1300 | 1256 |
| | 580 | 640 | 601 | 1247 | 1300 | 1250 |
| | 580 | 640 | 626 | 1247 | 1300 | 1256 |
| | 580 | 640 | 600 | 1247 | 1300 | 1262 |
| | 580 | 640 | 599 | 1247 | 1300 | 1249 |
| | 580 | 640 | 601 | 1247 | 1300 | 1260 |
| | 580 | 640 | 614 | 1247 | 1300 | 1271 |
| | 580 | 640 | 605 | 1247 | 1300 | 1259 |
| | 580 | 640 | 622 | 1247 | 1300 | 1273 |
| | 580 | 640 | 603 | 1247 | 1300 | 1252 |
| | 580 | 640 | 619 | 1247 | 1300 | 1254 |
| NOK | 580 | 640 | 585 | 1247 | 1300 | 1238 |
| | 580 | 640 | 585 | 1247 | 1300 | 1277 |
| | 580 | 640 | 603 | 1247 | 1300 | 1264 |
| | 580 | 640 | 593 | 1247 | 1300 | 1247 |
| | 580 | 640 | 591 | 1247 | 1300 | 1274 |
| | 580 | 640 | 590 | 1247 | 1300 | 1252 |
| | 580 | 640 | 602 | 1247 | 1300 | 1248 |
| | 580 | 640 | 592 | 1247 | 1300 | 1244 |
| | 580 | 640 | 602 | 1247 | 1300 | 1247 |
| | 580 | 640 | 596 | 1247 | 1300 | 1253 |

Tabla 3: extracto del cribado de piezas OK/NOK (tejas con engobe) en modo software QC del MK7 sobre línea industrial con bandas de transporte (14 cm), golpeando correctamente en el centro de las tejas



Fig. 11: (a) Configuración de la línea con robot de descarga y con (b) bandas distantes de 14 cm; (c) configuración con bandas de distancia 25 cm

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos confirman que el sistema GrindoSonic MK7 ofrece un gran potencial para sustituir el control acústico manual de tejas cerámicas en líneas de alta cadencia, tanto en ensayos estáticos como en configuraciones dinámicas sobre bandas transportadoras. Su capacidad multimodal para excitar y analizar modos de flexión, torsión y compresión, junto con una electrónica ajustable a entornos ruidosos y cadencias de producción elevadas (más de 3000 piezas/hora), permite discriminar de forma fiable entre piezas OK y

NOK, incluso en geometrías complejas y con variaciones de masa, engobe, nivel de sinterización o temperatura dentro de los rangos industriales habituales. En los ensayos realizados se ha demostrado una buena concordancia entre las decisiones del aparato y las del operario sonador, y en ciertos casos una mejor sensibilidad frente a fisuras y grietas de difícil percepción auditiva, lo que se traduce en mayor repetibilidad, mejor trazabilidad digital del control y una reducción esperable de la penosidad y del riesgo de trastornos musculoesqueléticos asociados al golpeo manual repetitivo. La metodología propuesta de aprendizaje en tres etapas (pieza en libertad, pieza cautiva sobre barras paralelas y finalmente en línea real) ofrece al usuario industrial un protocolo intuitivo para seleccionar los modos útiles, fijar ventanas de aceptación y adaptar el sistema a diferentes modelos de teja y condiciones de producción. No obstante, los ensayos han puesto de relieve la importancia crítica de garantizar la repetibilidad del punto de impacto del martillo sobre las tejas que transitan sobre las bandas transportadoras, ya que desplazamientos excesivos respecto al centro de la teja pueden activar modos adicionales de resonancia y generar artefactos espectrales (caso de la flexión) que se traducen en falsos positivos, capaces de confundir tanto al sistema automatizado como al propio operario. Este aspecto, ligado a la sincronización martillo-teja y al posicionamiento proporcionado por un robot de descarga, debe considerarse un punto de vigilancia esencial en cualquier proyecto de automatización del control por resonancia acústica. En conjunto, el estudio confirma la viabilidad del sistema como herramienta robusta de control no destructivo para fabricantes industriales de tejas cerámicas, siempre que el usuario integre en la fase de implantación un trabajo previo de caracterización de referencia y un control riguroso de las condiciones mecánicas de excitación en línea. Como continuación natural de este trabajo, se prevé ampliar las campañas a otras líneas de producción y a otros modelos de teja, así como optimizar los algoritmos de cribado y las estrategias de integración con sistemas ópticos y de supervisión de proceso, con el objetivo de consolidar una solución industrial completa y fácilmente transferible a diferentes fábricas.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM International. ASTM E2534-20: Standard Practice for Targeted Defect Detection Using Process Compensated Resonance Testing Via Swept Sine Input for Metallic and Non-Metallic Parts
2. ASTM International. ASTM E1876-22: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration.
3. R.Michel & col, Contribution of Non-Destructive Measurements on Refractory Concrete to Characterize the Microstructure during Drying, Firing and Thermal Shock, *refractories Worldforum* 13 (2021) [2] 1-5
4. A.F Obaton y col, Classification of metal PBF-LB parts manufactured with different process parameters using resonant ultrasound spectroscopy, *Welding in the World*
5. W.Pabst & col, Elasticity of porous ceramics—A critical study of modulus-porosity relations, *Journal of the European Ceramic Society* 26 (2006) 1085–1097
6. K. Hautekiet, An introduction to Impulse Excitation Technique: Overview of the Value Proposition per segment, *Grindosonic*, Leuven, 10/2022
7. T.Poirier, Effet de la température de tuiles sur leur réponse acoustique, *Grindosonic*, 03/2026 (confidencial)

6. NOTA

Se empleó una herramienta de inteligencia artificial exclusivamente para la corrección gramatical y de estilo; todas las interpretaciones y conclusiones son responsabilidad de los autores