

Instituto de Técnicas de Prefabricados y Construcción Prefabricada (IFF) de 99423 Weimar, Alemania

Influencia de las bandejas de producción en la compactación de las máquinas bloqueras

Los artículos de hormigón son productos de gran difusión destinados al diseño de superficies rodadas, jardines y paisajes. Se fabrican con una gran variedad en cuanto a la forma y al color.

La mayor parte de los artículos de hormigón fabricados en Alemania y en Europa se fabrican en máquinas bloqueras que moldean y compactan los productos sobre bandejas de producción. Sobre estas bandejas de producción, los productos se trasladan y se almacenan en estantes.

El moldeado y la compactación del hormigón tiene lugar en las máquinas bloqueras por medio de un proceso de vibración por impacto muy intenso. Aquí, con movimientos coordinados de determinados grupos del sistema de producción –las masas de trabajo– se generan impactos periódicos de determinada intensidad que se transmiten a través del grupo moldeador al hormigón que se desea compactar. Las bandejas de producción pertenecen a las masas de trabajo del conjunto de vibración de una máquinas bloquera.

■ Dr. Ing. Jörg-Henry Schwabe,
Lcdo. Ing. Jürgen Martin, IFF Weimar, Alemania ■

El conjunto de vibración es un sistema de vibración complejo que es muy importante para la calidad que se desea conseguir en los artículos de hormigón.

La interacción de las masas de trabajo (elementos)

- mesa de vibración
- molde
- bandeja de producción
- carga aplicada

determina, además de la calidad del hormigón, el resultado del proceso de moldeado y de compactación y, con ello, las propiedades del producto.

En la Fig. 1 se muestra un discreto modelo de masas múltiples simplificado del conjunto de vibración de una máquina bloquera con sus masas de trabajo.

La zona marcada en rojo muestra la masa de trabajo “bandeja de producción”. El comportamiento de la vibración de la bandeja de producción en el conjunto de vibración está determinado por su masa (m^2) y por su rigidez y sus propiedades de amortiguación ($c_2, k_2, c_3, k_3, c_7, k_7$).

Las bandejas de producción se fabrican y se utilizan con diferentes materiales, combinaciones de materiales y estructuras de construcción. Dependiendo de las propiedades del material y de la estructura, las

propiedades técnicas de la vibración se diferencian entre las diferentes bandejas de producción y con ello su influencia en el efecto de compactación.

Desde el punto de vista del usuario, los siguientes parámetros de la bandeja de producción y sus propiedades son importantes para garantizar una fabricación de calidad de los artículos de hormigón:

- ¿Qué propiedades técnicas de la vibración (parámetros) de la bandeja de vibración influyen en el proceso de compactación?
- ¿Qué relaciones cuantitativas existen entre las propiedades relevantes para la compactación (parámetros) y la calidad de la compactación?

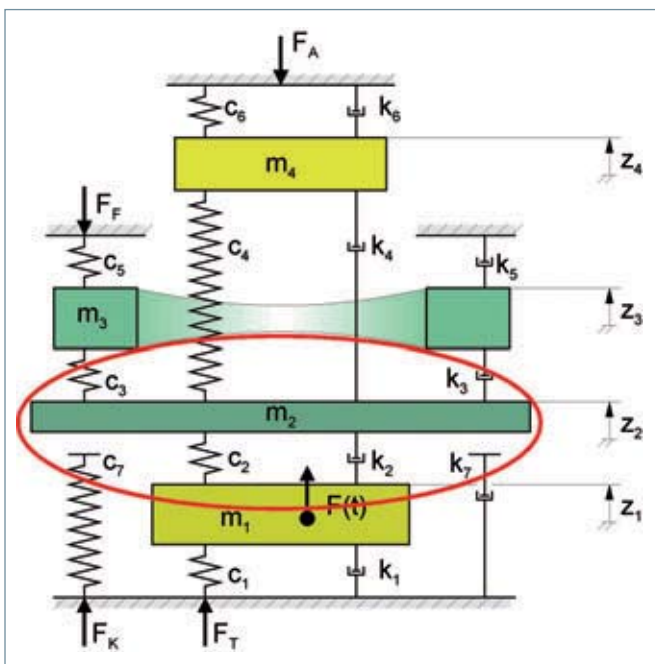


Fig. 1: Modelo discreto de masas múltiples del conjunto de vibración de una máquinas bloquera

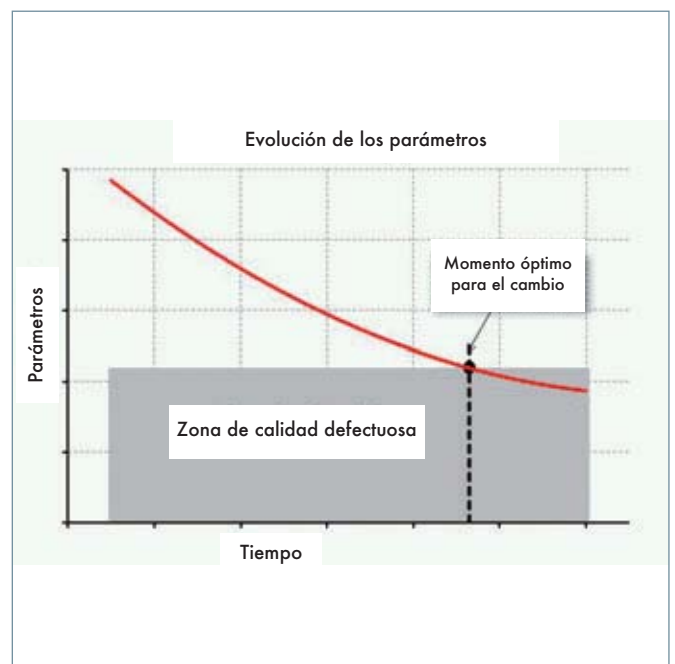


Fig. 2: Evolución de los valores característicos (hipótesis de un proceso cualitativo)

- ¿Qué propiedades técnicas de la vibración (parámetros) tienen las diferentes construcciones de las bandejas?
- ¿Cómo cambian las propiedades técnicas de la vibración durante el periodo de utilización?

Para los propietarios de las plantas de carrusel con máquinas bloqueras, un importante ejemplo es determinar el momento más favorable para sustituir todas las bandejas de la planta. Las bandejas de producción, condicionadas por el proceso, están sometidas a un enorme desgaste y a un envejecimiento. Se parte de la base de que a lo largo del periodo de utilización las propiedades técnicas de la vibración varían. A menudo empeora la calidad de los productos con los mismos ajustes de la máquina y las mismas cantidades de hormigón debido a una transmisión de las vibraciones y a un efecto de compactación diferentes de la bandeja de producción. Un cambio de las bandejas de producción mejoraría de nuevo la producción en la planta. Por otro lado, las bandejas de una planta de carrusel con cantidades que oscilan aproximadamente entre 3.000 y 5.000 unidades supone una inversión muy costosa que se debe aprovechar el mayor tiempo posible.

Sería una gran ventaja conocer la evolución temporal de los valores característicos (ver hipótesis en la Fig. 2) para realizar un pronóstico del momento óptimo para llevar a cabo el cambio de las existencias con el fin de aprovechar al máximo el valor de la inversión y para evitar un empeoramiento de la calidad no deseado.

Aunque entre el material o el tipo de material de una bandeja de producción, su estado de envejecimiento y de desgaste y el de la calidad esperada del producto existe claramente una relación, hasta ahora no hay parámetros conocidos que

- describan de forma objetiva el estado de las vibraciones de las bandejas de producción,
- sean fáciles de medir y
- permitan realizar un pronóstico lo suficientemente seguro sobre la calidad que se espera en los productos.

El objetivo de los estudios que se describen a continuación era elaborar los parámetros de las bandejas de producción que influyen en la compactación de la masa de hormigón. Con esta base se deben determinar los parámetros específicos de las piezas. Además de determinar parámetros apro-



■ El Dr. Ing. Jörg-Henry Schwabe, de 1988 a 1993 realizó sus estudios de Ingeniería Mecánica / Mecánica Aplicada y en 2002 se doctoró en la Universidad Técnica de Chemnitz (Alemania). Desde 1993 trabaja en el Instituto de Técnicas de Prefabricados y Construcción Prefabricada (IFF) de Weimar (Alemania). Trabaja en el campo de la dinámica de máquinas de materiales de construcción, miembro del Comité Técnico "Simulation of fresh concrete flow" del RILEM



■ El Ing. Jürgen Martin, de 1975 a 1979 realizó sus estudios de Tecnología Electrónica y Técnica de Aparatos de Precisión, especialidad en Aparatos, en la Universidad Técnica de Dresde (Alemania). Desde 1997 trabaja en el Instituto de Técnicas de Prefabricados y Construcción Prefabricada (IFF) de Weimar (Alemania). Desde 04/2006 es jefe del área de investigación del Instituto de Técnicas de Prefabricados y Construcción Prefabricada (IFF), especializado en las siguientes áreas: construcción y diseño de máquinas para fabricar elementos de la construcción, especialmente moldes de vibración y sistemas de excitación.

j.martin@iff-weimar.de

piados, estaba la tarea de determinar la relación entre los parámetros y el efecto de compactación o la calidad del producto. Conociendo la relación entre los parámetros de las bandejas que se pueden determinar y que varían con el tiempo y el resultado de la compactación se debía crear un aparato de medición para un uso fiel al

proceso que les permitiera a las fábricas de hormigón comprobar el estado de las bandejas de producción de forma rápida y sin complicaciones.

Parámetros relevantes para la compactación

La compactación efectiva del método de vibración por impacto se basa en impactos periódicos entre la bandeja de producción y los listones de la mesa en movimiento de avance o de la bandeja de producción y los listones de impacto fijos en el bastidor en movimiento de avance y, a veces, los impactos entre la bandeja de producción y el molde.

Debido a la dinámica de este proceso, a la hora de calcular parámetros apropiados se deben tener en cuenta estas características de las bandejas de producción que permiten relacionar los valores del movimiento y de la fuerza.

Elección de parámetros

A la hora de elegir parámetros apropiados se estudió con más detalle la zona espacial del proceso típico del impacto (ver Fig. 3). Desde el punto de vista del moldeado, se pueden deducir visualmente zonas con dilatación del material, cizallamiento del material y compresión del material, siendo imposible obtener información sobre los porcentajes cuantitativos de los tipos de esfuerzo en las deformaciones.

Para emplearlos como parámetros relevantes para la compactación, en primer lugar son apropiados los parámetros del material. Por eso se desarrolló la idea de crear un parámetro apropiado para la rigidez de la bandeja de producción con el efecto del impacto, que

- tuviera en cuenta las complejas deformaciones (compresión, dilatación) del proceso del impacto,
- se determinara bajo condiciones de medición fieles al proceso en las interacciones dinámicas entre fuerza, deformación y velocidad de deformación y
- se midiera como parámetro de movimiento y/o de fuerza.

Para este parámetro adaptado, a continuación se introduce el nombre de rigidez al impacto S_K .

Otro parámetro es la amortiguación D , que es una medida para la conversión de la energía de vibración en otra forma de energía -casi siempre calor- y que se calcula con valores del movimiento dependientes del tiempo.

Descripción de los parámetros

Para calcular los parámetros adaptados

- rigidez al impacto S_K y
- amortiguación D

se creó la siguiente solución para el principio de medición.

En la superficie de función de la bandeja de producción (objeto de medición) actúan fuerzas dinámicas de una magnitud que originan deformaciones y velocidades de deformación como en la vibración de impacto. En los puntos de contacto o en las cercanías se calculan y se almacenan valores de fuerza o de movimiento dependientes del tiempo. La bandeja de producción se apoya de tal manera que se evitan con seguridad las deformaciones locales (por ejemplo el pandeo de la bandeja).

A partir de este principio de medición se elaboraron varias soluciones para un método de medición, de los cuales en primer lugar se estudió el método del "martillo de caída" en una variante técnica de labora-

torio y dentro de su consiguiente elaboración se diseñó, construyó y probó con una muestra de funcionamiento un aparato de medición fiel al proceso.

El funcionamiento del método de medición del "martillo de caída" se basa en gran medida en el proceso de producción de la vibración por impacto (ver Fig. 4). Para ello, la bandeja de producción se tiende sobre una base rígida para las vibraciones con la superficie opuesta al punto de medición. La masa m del peso y la altura de caída h_0 se calculan de tal manera que se generan deformaciones y velocidades de deformación similares al proceso de compactación con la vibración por impacto. Dependiendo de la rigidez y de las propiedades de amortiguación de la bandeja de producción, el peso se desacelera y rebota. Después de una fase de vuelo, el peso vuelve a caer sobre la bandeja de producción y se origina un segundo impacto. Este proceso se repite varias veces hasta que se detiene en peso. Los movimientos del peso de caída se calculan como comportamiento temporal de la aceleración por medio de un sensor de aceleración con la suficiente tasa de exploración, pudiendo constatar un transcurso del tiempo como en el ejemplo de la Fig. 5. A partir de estos datos primarios se pueden determinar de la siguiente manera las propiedades de la rigidez y de la amortiguación.

Rigidez – Rigidez al impacto S_K

La magnitud del primer impulso de impacto \hat{a}_1 se determina por medio de las propiedades de la rigidez de las dos partes del impacto. Suponiendo que la rigidez del peso de caída es mucho mayor que la de la bandeja de producción (algo que es cierto

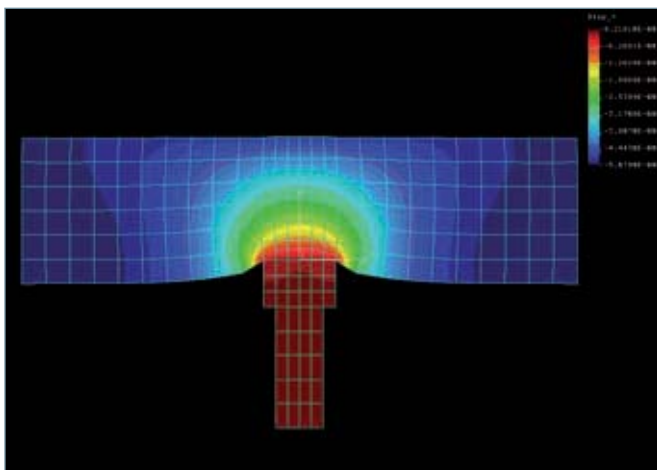


Fig. 3: Cálculos de deformación durante el proceso de impacto entre la bandeja de producción y el listón de la mesa

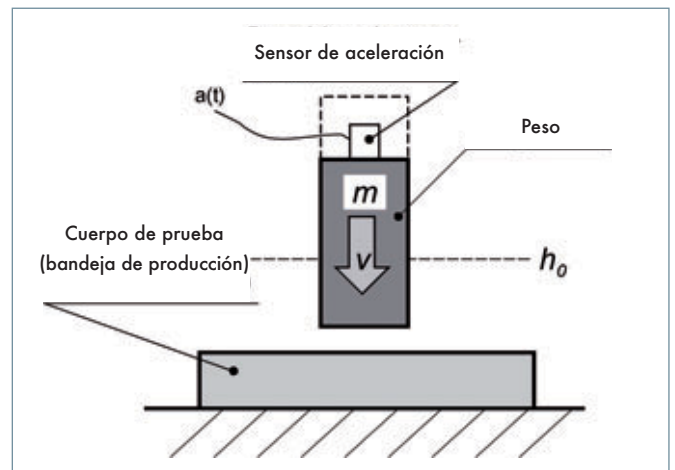


Fig. 4: Esquema del funcionamiento del "martillo de caída"

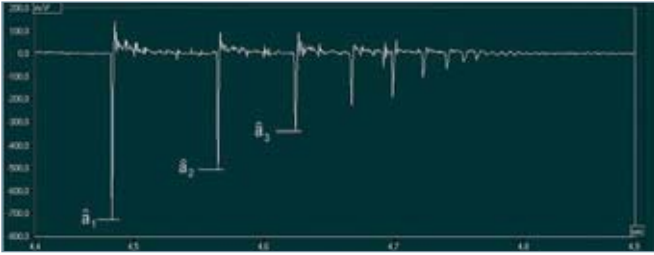


Fig. 5: Registro del transcurso del tiempo de la aceleración (ejemplo de medición)

para todas las bandejas de madera y de plástico conocidas), la magnitud del primer impulso de impacto está determinado esencialmente por la rigidez de la bandeja de producción. Únicamente en el caso de las bandejas de acero, la rigidez de ambas partes es similar. Además de las propiedades del material, las propiedades estructurales del cuerpo de prueba también determinan la rigidez. Con un cuerpo macizo homogéneo esto es el espesor de la bandeja en la disposición de medición descrita. De este modo resulta la magnitud del primer impulso del impacto \hat{a}_1 un parámetro de medición que se puede determinar fácilmente como la medida de la rigidez al impacto SK de la bandeja de producción.

$$S_K \sim \hat{a}_1$$

Propiedades de amortiguación – Amortiguación al impacto D

La amortiguación D se calcula como relación lineal de la amplitud $\Delta\hat{a}_{rel}$ o como decremento logarítmico Λ a partir de los valores de la primera y segunda amplitud de aceleración o de la amplitud de aceleración n y (n+1).

$$\Delta\hat{a}_{rel} = \frac{\hat{a}_1 - \hat{a}_2}{\hat{a}_1} = \frac{\hat{a}_n - \hat{a}_{n+1}}{\hat{a}_n}$$

$$\Lambda = \ln\left(\frac{\hat{a}_n}{\hat{a}_{n+1}}\right)$$

$$D \sim \Delta\hat{a}_{rel} \quad \text{bzw.} \quad D \sim \Lambda$$



Fig. 6: Vista del dispositivo de ensayo del laboratorio

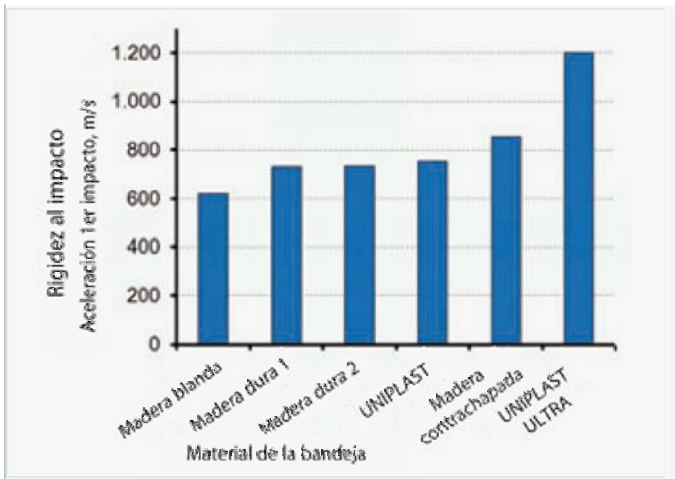


Fig. 7: Rigidez al impacto en función del material de la bandeja

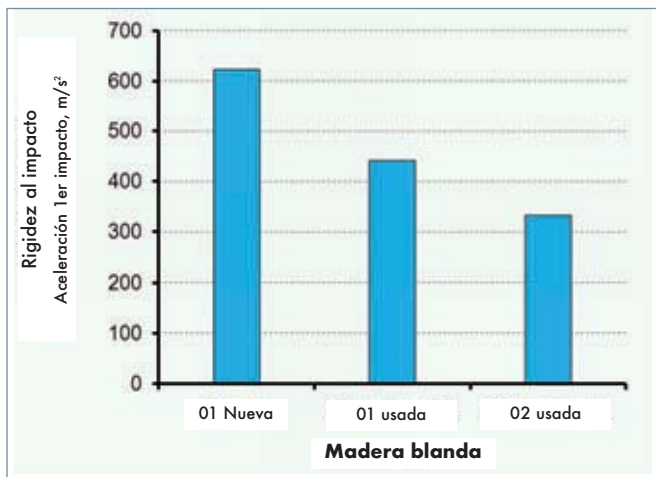


Fig. 8: Rigidez al impacto en función de la duración del uso de las bandejas de madera blanda

Medición de los parámetros

Para poner en práctica el método de medición y determinar los parámetros específicos de la pieza se creó un dispositivo de medición de laboratorio (ver Fig. 6). Se determinaron los parámetros de las bandejas de producción en series de medición. Aquí se estudiaron factores de influencia como

- Material
- Humedad (en bandejas de madera)
- Edad o grado de utilización

Los siguientes diagramas muestran resultados elegidos de las mediciones de estos parámetros.

El diagrama de la Fig. 7 muestra a modo de ejemplo los valores de rigidez calculados a partir de la amplitud de aceleración del primer impacto para diferentes materiales de bandejas.

En el diagrama de la Fig. 8 se muestran los parámetros de las bandejas de madera blanda con diferentes duraciones de uso.

Relación parámetros – compactación/calidad del producto

Con las bandejas de producción medidas en máquinas bloqueadoras se fabricaron adoquines en los que se comprobó la densidad aparente y la resistencia a compresión alcanzadas. Se fabricaron y se estudiaron bloques de hormigón en dos máquinas bloqueadoras diferentes con los correspondientes ajustes de los parámetros.

El diagrama de la Fig. 9 representa la relación entre la rigidez al impacto y el efecto de la compactación con la densidad aparente como criterio de valoración. Los puntos de medición representan valores medios de la densidad aparente a partir de varios adoquines que fueron fabricados en un tipo de bandeja de producción (madera blanda, madera dura, plástico). En sentido estricto, el diagrama es válido únicamente para el ajuste de la máquina elegido.

Resumen del cálculo de parámetros

Con el método descrito del martillo de caída, con efectos mecánicos definidos sobre una bandeja de producción y la medición de valores de movimiento dependientes del tiempo durante el efecto, es posible determinar parámetros a partir de valores de medición que describen las propiedades técnicas de la vibración de esta bandeja de producción con referencia a su aplicación en el método de vibración por impacto para fabricar artículos de hormigón.

Los parámetros medibles apropiados que se calcularon fueron:

- la primera amplitud de aceleración \hat{a}_1 como medida para las propiedades de la rigidez, aquí descrita como rigidez al impacto S_K
- la relación lineal de la amplitud $\Delta\hat{a}_{rel}$ o el decremento logarítmico Λ como medida para la amortiguación D

En ensayos de laboratorio y a pequeña escala se determinaron parámetros para los tipos de bandejas que se emplean habitualmente. Se estudió la influencia del material de las bandejas, la humedad y el tiempo de uso en las propiedades técnicas de la vibración.

En ensayos de procesamiento, con unos ajustes constantes de las máquinas bloqueadoras, se determinaron las relaciones cuantitativas entre los parámetros de la rigidez al impacto S_K y el efecto de la compactación y de la resistencia a compresión de los adoquines.

Aparato de medición para fábricas de hormigón

Para una aplicación del método de medición fiel al proceso se desarrolló, construyó y probó bajo condiciones industriales un dispositivo de medición.

El dispositivo de medición está creado para una aplicación en una máquina bloqueadora en una planta de carrusel y cuenta con tres cabezales sensores para medir las propiedades de la bandeja en diferentes puntos de la misma.

En la Fig. 10 se muestra una vista del modelo CAD de un cabezal sensor con la descripción de los componentes principales para poner en práctica el método de medición. En la Fig. 11 se muestra

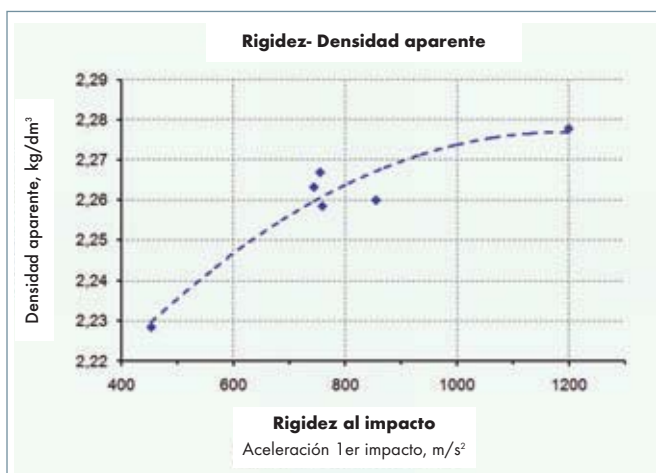


Fig. 9: Efecto de la compactación (densidad aparente) en función de la rigidez al impacto

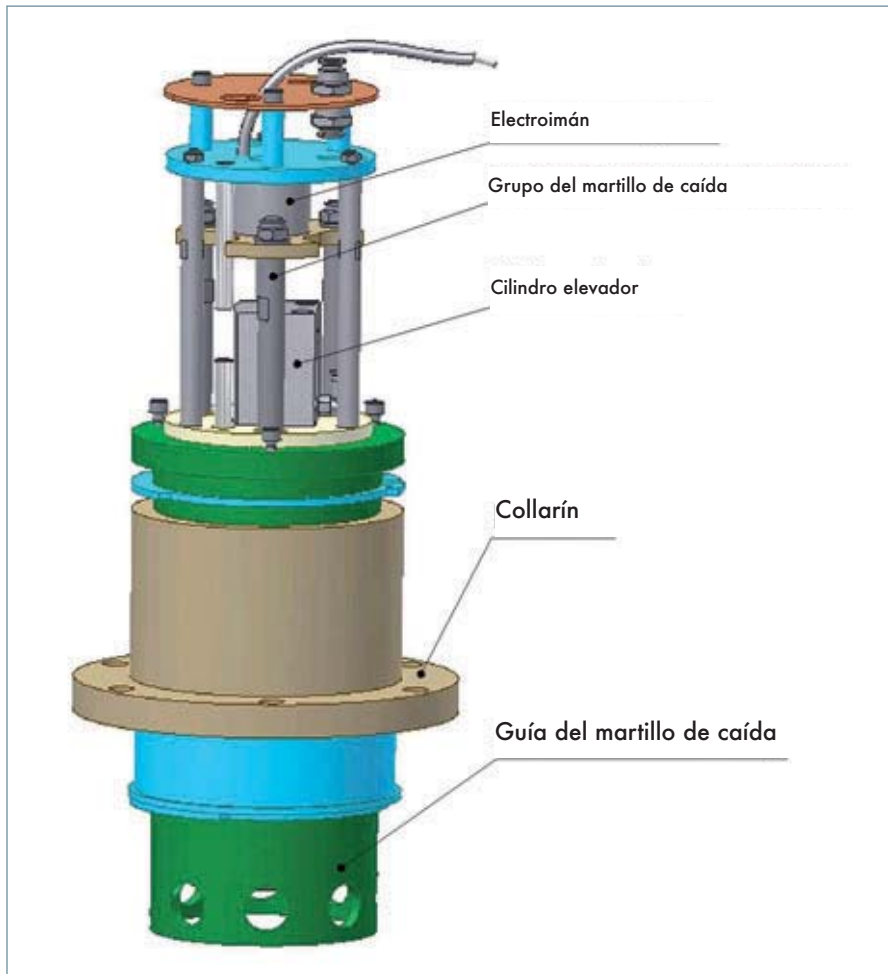


Fig. 10: Vista del modelo CAD de un cabezal sensor

el dispositivo de medición listo antes de su instalación en la máquina bloquera.

En una primera serie se midieron 200 bandejas de producción de madera blanda (pino) y con un tiempo de uso hasta el momento de 2,75 años.

Una valoración estadística dio los siguientes resultados:

- Valor medio 457 m/s^2
- Desviación estándar $89,7 \text{ m/s}^2$

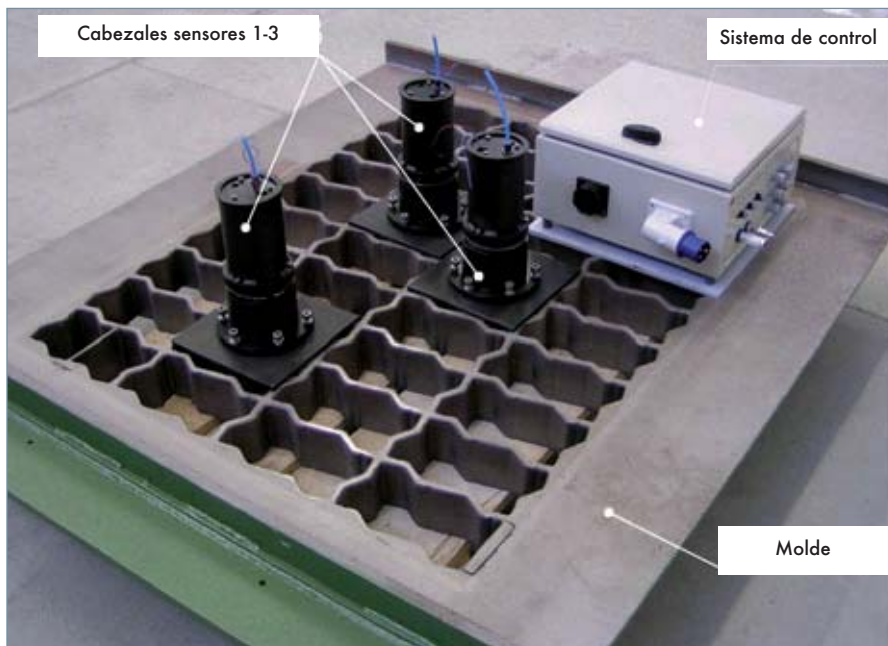


Fig. 11 Vista del dispositivo de medición listo

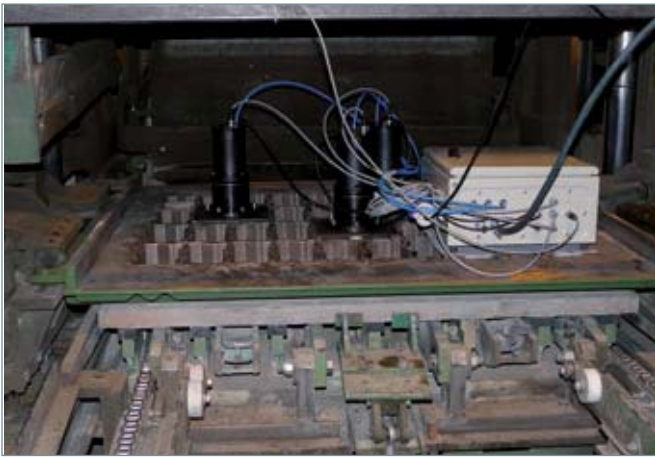


Fig. 12 Vista del dispositivo de medición dentro de la máquina bloquera

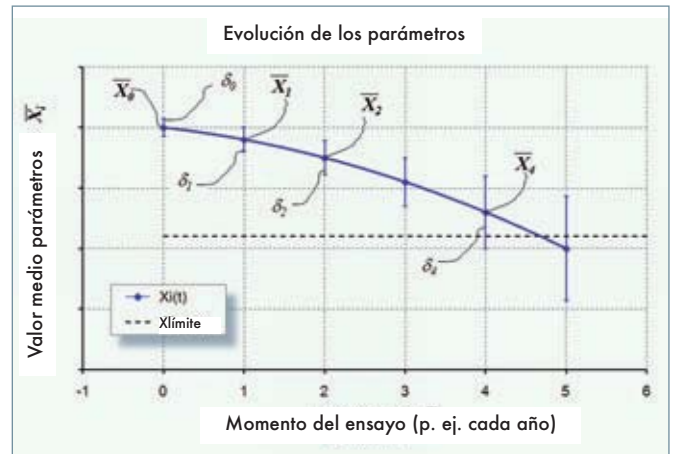


Fig. 13: Evolución en el tiempo de los parámetros de las bandejas (hipótesis a modo de ejemplo)

Otras series de medición para calcular los parámetros de todas las bandejas están previstas para 2010. Para medir el comportamiento de los parámetros en función del tiempo se han previsto otras mediciones en intervalos cíclicos.

Posibilidades de aplicación del método de medición

El método de medición desarrollado ofrece ventajas tanto para los fabricantes de bandejas de producción, como también para los usuarios en una fabrica de bloques de hormigón.

Desde el punto de vista de los fabricantes de bandejas de producción se aprecian las siguientes posibilidades de aplicación:

- Medición y valoración de las propiedades dinámicas de las bandejas en la fábrica del productor y en el cliente como un control de calidad o una prueba de calidad
- Prueba de las propiedades técnicas de la vibración a la hora del suministro de las bandejas de recambio (por ejemplo cuando se necesitan cambiar pocas cantidades) para la planta de producción existente
- Fabricación y suministro de bandejas de producción con propiedades definidas y adaptadas a las propiedades de las otras masas de trabajo dentro del conjunto de vibración

Para los propietarios de las máquinas bloqueras resultan, entre otras, las siguientes posibilidades de aplicación:

- Elección de las bandejas de producción en función de las condiciones de la máquina y del proceso de producción, y las calidades del producto deseadas desde el mismo momento de la planificación de una máquina bloquera

- Identificación de bandejas de producción con un efecto insuficiente de la compactación, si es necesario clasificación selectiva/ cambio selectivo
- Cálculo y valoración de la evolución en el tiempo de las propiedades de las bandejas a través de mediciones cíclicas y pronósticos del momento óptimo para cambiar todas las bandejas (ver también el diagrama de la Fig. 13).

Conocer el desarrollo en el tiempo de los valores característicos con sus valores medios y la dispersión puede ayudar con valores de medición objetivos a decidir el momento apropiado para cambiar las bandejas de producción.

Resumen

Se definieron parámetros para las propiedades técnicas de la vibración de las bandejas de producción. Para determinar los parámetros se desarrollaron y probaron métodos de medición y dispositivos de medición. De este modo, los fabricantes y los usuarios de bandejas de producción disponen de valores de medición objetivos acerca de las propiedades de las bandejas relevantes para la compactación.

Los resultados de la investigación fueron elaborados en el marco de un proyecto de investigación conjunto en el que participan las empresas

- Fritz Herrmann GmbH & Co., Betonsteinwerke KG, Eisenberg
- Wasa Pallets GmbH & Co. KG, Neubrunn
- Institut für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e. V.

El proyecto de investigación fue apoyado dentro del marco del programa "PROgramm

INNOvationskompetenz mittelständischer Unternehmen" (PRO INNO) (Programa de Competencia Innovadora de Empresas Medianas) por el Ministerio Alemán de Industria y Tecnología (referencia KF 0031713UK7).

Bibliografía

[1] Kuch, H.; Schwabe, J.-H.; Palzer, U.: Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteilen – Verfahren und Ausrüstungen, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 2009

MÁS INFORMACIÓN



IFF Institut für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar e.V.
 Cranachstr. 46
 99423 Weimar, Alemania
 T +49 3643 86840
 F +49 3643 868413
 kontakt@iff-weimar.de
 www.iff-weimar.de