

CUADERNOS INTEMAC

Compactación del hormigón. Reglas para el vibrado del hormigón

Concrete consolidation. Rules for vibrating concrete

Roberto Barrios Corpa
Ingeniero de Caminos



INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

N.º 42
2.º TRIMESTRE '01

INTEMAC



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

CONTROL DE PROYECTO

CONTROL DE OBRA

GARANTIA DE CALIDAD

SONDEOS, ENSAYOS E INFORMES GEOTECNICOS

INFORMES DE PATOLOGIA, REHABILITACION Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PUBLICAS
EDIFICACION
INSTALACIONES



INTEMAC
AUDIT

AUDITORIA TECNICO-ECONOMICA DE CONSTRUCCIONES

- ASESORIA EN EL PLANTEAMIENTO Y EN LA CONTRATACION DE LA OBRA
- SEGUIMIENTO DE COSTOS Y PLAZOS DURANTE LA CONSTRUCCION
- VALORACIONES DE TERRENOS, INMUEBLES Y CONSTRUCCIONES
- AUDITORIAS DE TRABAJOS PARCIALES Y DE LIQUIDACION DE LA OBRA



INTEMAC
ECO

AUDITORIA TECNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas

Edificación

Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

Aire

Agua

Ruido

AUDITORIA MEDIOAMBIENTAL

ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

**COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN.
REGLAS PARA EL VIBRADO DEL HORMIGÓN**

**CONCRETE CONSOLIDATION.
RULES FOR VIBRATING CONCRETE**



Roberto Barrios Corpa

Ingeniero de Caminos
Jefe de la Sección de Control
de Estructuras de Intemac

Civil Engineer
Head of the Intemac
Structural Control Section

Copyright © 2001, INTEMAC

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida de ninguna manera ni por ningún medio, ni almacenada en base de datos o sistema de recuperación, sin el previo permiso escrito del editor.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

ISSN 1133-9365

Depósito legal: M - 8341 -2002
Infoprint, S.A. - San Vicente Ferrer, 40

CONTENTS

1. INTRODUCTION
2. FRESH CONCRETE AND CONSOLIDATION
3. CONCRETE CONSOLIDATING METHODS
 - 3.1. MANUAL METHODS
 - 3.2. MECHANICAL METHODS
4. CONCRETE CONSOLIDATION VIA VIBRATION
 - 4.1. VIBRATORY MOTION AND CONSOLIDATION
 - 4.2. STAGES IN CONSOLIDATION BY VIBRATION
 - 4.3. VIBRATION METHODS
5. EQUIPMENT FOR CONSOLIDATING CONCRETE
 - 5.1. INTERNAL VIBRATORS
 - 5.2. FORM VIBRATORS
 - 5.3. VIBRATING TABLES
 - 5.4. SURFACE VIBRATORS
6. RULES FOR CONCRETE VIBRATION
 - 6.1. GENERAL
 - 6.2. ITEMS OF SPECIAL INTEREST
7. CONSIDERATIONS FOR CONSOLIDATION IN CONGESTED AREAS
 - 7.1. DESIGN STAGE CONSIDERATIONS
 - 7.2. CONSTRUCTION PHASE CONSIDERATIONS
8. CONSOLIDATION OF TEST SPECIMENS
9. CONSOLIDATION AND SURFACE BLEMISHES
10. REFERENCES

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. HORMIGÓN FRESCO Y COMPACTACIÓN
3. MÉTODOS DE COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN
 - 3.1. MÉTODOS MANUALES
 - 3.2. MÉTODOS MECÁNICOS
4. COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN MEDIANTE VIBRACIÓN
 - 4.1. MOVIMIENTO VIBRATORIO Y COMPACTACIÓN
 - 4.2. ETAPAS EN LA COMPACTACIÓN POR VIBRACIÓN
 - 4.3. MÉTODOS DE VIBRACIÓN
5. EQUIPOS PARA LA COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN
 - 5.1. VIBRADORES INTERNOS
 - 5.2. VIBRADORES DE ENCOFRADOS
 - 5.3. MESAS VIBRANTES
 - 5.4. VIBRADORES SUPERFICIALES
6. REGLAS PARA EL VIBRADO DEL HORMIGÓN
 - 6.1. ASPECTOS GENERALES
 - 6.2. ASPECTOS PARTICULARES
7. CONSIDERACIONES PARA LA COMPACTACIÓN DE ZONAS DE GRAN DENSIDAD DE ARMADURAS Y DIFÍCIL ACCESO PARA EL HORMIGÓN
 - 7.1. CONSIDERACIONES EN LA FASE DE PROYECTO
 - 7.2. CONSIDERACIONES EN LA FASE DE EJECUCIÓN
8. COMPACTACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYO
9. COMPACTACIÓN Y DEFECTOS SUPERFICIALES
10. BIBLIOGRAFÍA

ABSTRACT

Proper consolidation is imperative for concrete quality, in terms of both strength and durability.

But concrete consolidation is only briefly addressed in the standards and codes in force, leaving the quality and degree of consolidation essentially to the discretion of equipment operators.

This overall discussion of concrete consolidation deals with the various aspects of the process, focusing on vibratory methods. It includes an introduction to the phenomenon of fresh concrete densification, describes existing consolidation methods, illustrates consolidation equipment and recommendations on how it should be used and concludes with practical rules on ways to vibrate and consolidate concrete for different types of uses.

1. INTRODUCTION

Consolidation is one of the fundamental processes in concrete placement, ensuring that the material reaches a suitable density and therefore the desired strength and durability. A brief review of the origins of this process and its development to present times follows.

In the early twentieth century, when concrete was first used as a structural material in construction, the very dry mixtures employed were deposited in large, scantily reinforced sections comprising successive thin courses whose density was increased by ramming. This procedure was gradually replaced with the use of thinner and thinner and more heavily reinforced sections, in which consolidation and placement called for the use of mixtures with a higher water content. But this had a drawback. With the growing use of wetter mixtures, the quality of the concrete was observed to decline, resulting in less strength, greater shrinkage, more cracking and reduced durability. This phenomenon began to be understood around 1920 when the concept of the water/cement ratio was introduced.

Early concrete vibrating equipment began to appear in the thirties, along with the first studies on the subject. An important breakthrough came in 1948 with the publication of a paper by L'Hermite and Tournon (1) in which the authors sustained that friction between particles was the main hindrance to suitable consolidation and that such friction practically disappeared when mixtures were subjected to vibration.

The sixties were golden years for research on concrete consolidation. The roles of the different factors associated with the process were established, such as the importance of the acceleration transmitted, the frequency used and the eccentric. In a congress held in Budapest in 1963, Kolék (2) provided an explanation of the consolidation process in which he maintained that it took place in two stages and Kirkham (3) developed a series of formulas by way of vibrating rules for consolidating concrete slabs. At mid-decade Forssblad (4) published his studies on the radii of action of vibrating machinery and towards the end of this golden age Ritchie (5) revised a number of concepts relating to the rheology of fresh concrete such as stability, mobility and compactibility.

The research begun the decade before continued in the seventies, with Tuthill's (6) introduction of the concept of revibration. In the late eighties several papers were presented to an international symposium held in San Francisco on the use of internal, external and form vibrators (Forssblad) (7), minimum energy thresholds (Olsen) (8) and the possibility of obtaining better consolidation with low slump concrete by adding the water to the mixture in two phases (Lida and Horigome) (9).

The evolution of the understanding of the consolidation process in concrete has, then, been satisfactory, but sight should not be lost of the fact that developments in concrete composition and the use of new materials in its manufacture call for ongoing research on concrete consolidation.

2. FRESH CONCRETE AND CONSOLIDATION

A full understanding of the consolidation process entails a knowledge, first of all, of the different parameters governing the behaviour of fresh concrete as they relate to the nature and proportioning of the materials used in its manufacture.

Although there are many similarities in the considerable number of theoretical and empirical papers that have attempted to explain these parameters, they also have in common that the methods they describe for determining concrete workability usually focus on one property only, a circumstance that does not facilitate subsequent correlation. Of the studies published in this regard perhaps the papers authored by Reiner, Tattersall, Bache and Ritchie are the most relevant.

The present review discusses the parameters governing the behaviour of fresh concrete according to Ritchie's (5) studies, supplemented with certain contributions made by Bache (10), as both are readily understandable and afford a plastic representation of the process.

RESUMEN

El proceso de compactación del hormigón es fundamental de cara a obtener un hormigón de calidad, tanto en lo referente a su resistencia como en cuanto a su durabilidad.

En la actualidad el proceso de compactación del hormigón se trata de manera sucinta en la normativa existente, quedando en muchas ocasiones a juicio de los operarios la calidad y el grado de compactación conseguido.

En este trabajo se trata el proceso de la compactación del hormigón de una manera global analizando de una manera especial el caso de la compactación por vibrado y exponiendo los diferentes aspectos relacionados con el proceso de compactación. Se introduce el fenómeno de la densificación del hormigón fresco, se exponen los métodos de compactación existentes, se muestran equipos de compactación dando reglas para su empleo, y se finaliza con la aportación de reglas prácticas para realizar la vibración y compactación del hormigón en sus diferentes formas de empleo.

1. INTRODUCCIÓN

La compactación es uno de los procesos fundamentales en la puesta en obra del hormigón, dado que gracias al mismo se consigue una densificación adecuada del material confiriéndole así las características deseables de resistencia y durabilidad. Veamos cómo surgió el proceso y su evolución hasta nuestros días.

Inicialmente, en los comienzos de la utilización del hormigón como material de construcción estructural a principios del Siglo XX, este se empleaba en forma de mezclas muy secas en secciones grandes, abiertas y poco armadas y se densificaba apisonando las delgadas capas en que era colocado. Poco a poco esto cambió con su empleo cada vez más frecuente en secciones más delgadas y cada vez más armadas, siendo necesario para una adecuada compactación el empleo de mezclas con mayor contenido en agua, lo cual suponía además una mayor facilidad en la colocación. Pero esto tuvo una contrapartida. Al extenderse el empleo de mezclas más húmedas se observó que la calidad del hormigón disminuía, obteniéndose menores resistencias, mayores retracciones, incrementos de la fisuración y hormigones menos durables. El fenómeno se explicó alrededor del 1920 cuando se introdujo el concepto de relación agua/cemento.

Situados ya en los años treinta comenzó a aparecer la primera maquinaria que aplicaba movimientos vibratorios a las masas de hormigón y los primeros estudios al efecto fueron publicados. Un avance importante se dio en 1948 cuando L'Hermite y Tournon (1) publicaron que el rozamiento entre las partículas era el principal factor que impedía una adecuada consolidación y que éste prácticamente desaparecía con el estado de vibración.

Los años sesenta fueron una de las épocas doradas de la investigación sobre la consolidación del hormigón. Se dieron diferentes relaciones de factores asociados al fenómeno como la importancia de la aceleración impartida, la frecuencia empleada y la masa de la excéntrica. En un congreso celebrado en Budapest en 1963, Kolek (2) mostró una explicación del proceso de consolidación por la que este se daba en dos etapas y Kirkham (3) presentó diversas fórmulas para el empleo de reglas vibrantes para la consolidación de losas de hormigón. Justo en la mitad del decenio Forssblad (4) publicó sus estudios sobre los radios de acción de la maquinaria de vibración y a finales de esta época dorada Ritchie (5) revisó diversos conceptos relacionados con la reología del hormigón fresco como estabilidad, movilidad y capacidad de compactación.

En los años setenta se prosiguió con las investigaciones comenzadas en el decenio anterior, introduciéndose el concepto de revibrado por Tuthill (6). Próximos ya a los años noventa en un Simposium Internacional en San Francisco se presentaron trabajos relacionados con el empleo de diferentes tipos de vibradores, internos, externos y en encofrados (Forssblad) (7), umbrales mínimos de energía (Olsen) (8) y la posibilidad de obtener mejores resultados de compactación de hormigones secos mediante la división de la aportación de agua en dos etapas (Lida y Horigome) (9).

Como se puede apreciar, la evolución del conocimiento sobre el proceso de consolidación del hormigón ha sido satisfactoria, pero es importante tomar conciencia de que la evolución en la composición de los hormigones y el empleo de nuevos materiales en la fabricación de estos hacen que sea fundamental el continuar con los estudios sobre la consolidación del hormigón.

2. HORMIGÓN FRESCO Y COMPACTACIÓN

Para una adecuada comprensión del proceso de compactación es conveniente conocer en primer lugar los diferentes parámetros que gobiernan el comportamiento del hormigón fresco relacionados con los materiales empleados en su fabricación y la dosificación que de este se haga.

Existen diferentes estudios tanto teóricos como experimentales para tratar de explicar los parámetros, existiendo una gran cantidad de similitudes entre estos, siendo común a todos el que los métodos habituales para determinar la trabajabilidad del hormigón conciernen sólo a un determinado aspecto, no siendo fácil llevar a cabo correlaciones posteriores. Dentro de los mencionados estudios destacan los de Reiner, Tattersall, Bache y Ritchie.

Further to these authors the parameters to be considered when studying concrete rheology are:

1. **Stability:** Stability is defined to be concrete flow in the absence of any external force and is measured by bleeding and segregation. Bleeding, the release of unmixed water in unstable mortar, needs to be controlled and reduced to a minimum. Segregation, in turn, consists of mixture instability due to the inability of the weak matrix to hold individual aggregate particles in homogeneous dispersion. This occurs frequently in flowing concrete because the paste cannot hold the particles in position during transportation and consolidation, but may also occur with dry concrete during handling due to the tendency of these mixtures to crumble. When the concrete is vibrated the matrix is momentarily liquefied, developing cohesion and shear resistance. Ritchie relates these forces to the mixture's resistance to segregation.
2. **Compactibility:** This is the readiness with which fresh concrete is consolidated by expelling the entrapped air and repositioning the particles in a dense state without causing segregation. To analyse the differences between the mixture in the compacted state and the maximum compaction that is theoretically reachable, specimen densities can be compared to the compactness obtained with the maximum density possible, computed on the grounds of the specific weights of the components. This comparison provides a measure of the amount of entrapped air content, which in turn furnishes information on durability, permeability and relative strength of the hardened concrete.
3. **Mobility:** As both Ritchie and Bache sustain, the mobility of fresh concrete may be expressed in terms of viscosity, cohesion and internal resistance to shear. According to the latter cohesion develops due to the attraction between the aggregate particles, whereas resistance is due to the viscous flow of the matrix. When shear stresses are increased below the yield value no flow occurs and the concrete behaves like a solid. As oscillating stresses rise, the bond strength between particles is insufficient to prevent flow and viscosity declines. Ritchie took the following approach to these considerations. The viscosity of the matrix contributes to the readiness with which the particles can move and reposition themselves in the mixture. Cohesion is defined as the bonding force between the matrix and the aggregate, while the internal friction forces that arise with this movement vary depending on the shape and texture of the aggregate, the richness of the mixture, the water/cement ratio and the type of cement used.

It will be observed from the foregoing that parameters such as stability, compactibility and mobility are necessary to ascertain the suitability of any concrete mixture.

The behaviour of fresh concrete and its workability are conditioned by the proportioning used, the properties of the components in the mixture, the use of admixtures and the mixing conditions applied. The impact of each of these features is considered below.

1. **Proportioning:** Mixture proportions are fundamental since they are largely responsible for workability and it is essential for the various components to be properly proportioned. Mixtures with an excess of coarse aggregate may lack sufficient mortar to fill the voids between aggregate particles, leading to decreased cohesion and mobility. Consolidating such concrete mixtures calls for a great deal of effort. But the other extreme is equally objectionable, since mixtures with a high fine aggregate content tend to be sticky and sluggish.
2. **Consistency:** Consistency is an indication of the relative amount of water in the mixture. As with aggregate proportioning, both too much and too little water are inadvisable. Excess water increases the risk of segregation, while a shortage renders the mixture sluggish and difficult to consolidate.
3. **Setting and hardening:** Rapid loss of workability is associated with high temperatures and the use of early setting cement or accelerators. In such cases, in addition to agile and speedy placement, arrangements must be made for more vigorous concrete consolidation.
4. **Aggregate shape and texture:** Aggregates with rough surfaces and angular shapes have a smaller unit weight than smooth and rounded aggregates of the same density. Therefore, the void ratio in the former is greater, calling for a larger amount of mortar to fill the air pockets; as the friction between particles is likewise greater, it takes more effort to consolidate such mixtures.
5. **Maximum aggregate size:** Increasing the maximum size of the aggregate as much as possible reduces the fines content needed to maintain mixture workability.
6. **Admixtures:** Nonetheless, it should be borne in mind that rheological conditions can be modified by the use of admixtures that enhance certain characteristics.

3. CONCRETE CONSOLIDATING METHODS

The first distinction to be made when classifying concrete consolidating methods is between manual and mechanical methods. Whereas the former can only be used under very specific circumstances, as discussed below, the latter, much more effective and versatile, are widely used today.

En el presente documento se expondrán los parámetros que rigen el comportamiento del hormigón fresco de acuerdo con los estudios de Ritchie (5) contando con ciertas aportaciones de Bache (10), puesto que resultan de una fácil comprensión y representan plásticamente el fenómeno.

De acuerdo con estos autores los parámetros a considerar al estudiar la reología del hormigón son los siguientes:

1. **Estabilidad:** La estabilidad se define como el flujo del hormigón sin que se le hayan aplicado fuerzas externas y se mide mediante la exudación y la segregación. La exudación ocurre cuando el mortero es inestable y desprende agua libre que no se combina, y de manera generalizada debe ser controlada y reducida al mínimo posible. Por su parte la segregación consiste en la inestabilidad de la mezcla causada por la debilidad de la matriz que no puede retener las partículas individuales de árido para que estas formen una dispersión homogénea. Es frecuente con consistencias fluidas debido a que la pasta no puede sostener las partículas en posición cuando el hormigón es transportado y compactado, pudiendo darse con consistencias secas durante la manipulación del hormigón por la tendencia de estas mezclas a ser desmenuzadas. Cuando se vibra el hormigón la matriz se convierte momentáneamente en un fluido y se desarrolla la cohesión y las fuerzas tangenciales. Estas son relacionadas por Ritchie con la resistencia a la segregación.
2. **Facilidad de compactación:** Es la facilidad con la que el hormigón fresco es compactado, expulsando el aire ocluido posicionándose las partículas en un estado densificado sin que se produzca segregación. Para analizar las diferencias entre el estado de compacidad de la mezcla con el máximo que teóricamente es posible alcanzar se pueden comparar las densidades de la muestra con el estado de compacidad obtenido con la máxima densidad que es posible obtener, calculando esta a partir de los pesos específicos de los constituyentes de la mezcla. Esta comparación nos dará una indicación de la cantidad de aire ocluido, la cual a su vez proporciona información sobre la durabilidad, la permeabilidad y la resistencia relativa del hormigón endurecido.
3. **Movilidad:** La movilidad dentro del hormigón fresco puede ser expresada en términos de viscosidad, cohesión y tensiones tangenciales. Tanto Ritchie como Bache así lo hacen. De acuerdo con este último la cohesión se desarrolla debido a las fuerzas de atracción entre las partículas mientras que la resistencia es debida al flujo viscoso de la matriz. Cuando las tensiones tangenciales sobrepasan el umbral mínimo no se produce ningún flujo y el hormigón se comporta como un sólido. Con tensiones oscilantes, la adherencia entre las partículas resulta ser insuficiente para evitar el flujo y al mismo tiempo la viscosidad disminuye. Por su parte Ritchie concibió estos aspectos de la siguiente manera. La viscosidad de la matriz contribuye a la facilidad con la que las partículas se pueden mover y readaptarse entre ellas dentro de la mezcla. La cohesión se define como la fuerza de adhesión entre la matriz y los áridos, y las fuerzas de rozamiento interno se producen cuando se dan los desplazamientos, dependiendo de la forma y textura de los áridos, la riqueza de la mezcla, la relación agua/cemento y el tipo de cemento empleado.

Ante lo expuesto anteriormente se observa que los parámetros de estabilidad, facilidad de compactación y movilidad son necesarios para determinar la adecuación de cualquier mezcla.

El comportamiento del hormigón fresco y la trabajabilidad del hormigón se encuentran condicionadas por la dosificación que se lleve a cabo, propiedades de los componentes de la mezcla, el empleo de aditivos y las condiciones de mezclado que se empleen. La repercusión que estos aspectos tienen se muestra a continuación.

1. **Dosificación:** La dosificación de la mezcla es fundamental dado que fija en gran medida las condiciones de trabajabilidad, siendo primordial que los diferentes componentes entren a formar parte de ella en las adecuadas proporciones. Un exceso de árido grueso puede conllevar que la mezcla carezca de suficiente mortero para llenar los huecos existentes entre los mencionados áridos disminuyendo la cohesión y la movilidad. Estas mezclas requieren importantes esfuerzos para llevar a cabo su consolidación. Pero también el extremo opuesto es desaconsejable dado que mezclas con una gran cantidad de finos hacen que estas resulten pegajosas y difíciles de mover.
2. **Consistencia:** La consistencia es un indicador de la cantidad relativa de agua que contiene la mezcla. Al igual que en el apartado anterior tanto un exceso de agua como un defecto de esta resultan desaconsejables. Un exceso de esta hace que las posibilidades de segregación aumenten, mientras que su carencia hará a la mezcla difícil de mover y ser consolidada.
3. **Fraguado y endurecimiento:** Pérdidas rápidas de trabajabilidad se pueden asociar a las altas temperaturas, el uso de cementos de endurecimiento rápido y el empleo de acelerantes de fraguado. En estos casos aparte de una ágil y rápida puesta en obra será necesario el estar preparado para actuar con mayor energía a la hora de consolidar el hormigón.
4. **Forma y textura de los áridos:** Los áridos de superficies rugosas y formas angulares presentan un peso específico del conjunto menor que los suaves y redondeados a iguales valores de densidad. Por lo tanto el índice de huecos en lo primeros es mayor y será necesaria una mayor cantidad de pasta de mortero para rellenarlos, siendo también mayor el rozamiento entre las partículas haciéndose necesario mayores esfuerzos de consolidación para conseguir su compactación.
5. **Tamaño máximo de árido:** El aumentar en la medida de lo posible el tamaño máximo de árido reduce el contenido de finos necesario para mantener la trabajabilidad de la mezcla.

The overall criterion to be borne in mind when choosing a consolidation method is that it must be consistent with the mixture characteristics, concrete placement, formwork, etc., since as observed above, not all methods are applicable to all situations. The various methods are addressed below.

3.1. Manual methods

Such methods are no longer in use except in very specific cases, due to low performance and the enormous effort required to reach suitable consolidation. Their use has been relegated to small, non-structural members.

One possible method is rodding. The procedure, which consists of repeatedly poking a rod into the concrete, is widely used to consolidate test specimens for concrete that is not overly dry.

In spading, a flat tool is used for consolidation in much the same way as in rodding, primarily for consolidating mixtures near form walls with an up and down motion to move the coarse aggregates away from the surfaces while also releasing the entrained air.

Finally, dry or stiff concrete can be hand tamped, but for this to be effective the concrete needs to be poured in thin layers and the energy deployed is enormous, making it a long and tedious process.

3.2. Mechanical methods

Mechanical methods, on the contrary, are the ones used today to ensure suitable concrete consolidation. A number of methods has been developed for the different types of mixtures and construction methods.

One of the procedures used in the case of low slump concrete is ramming or compaction. This method has a wide range of applications and varies from the large roller compactors used to build dams to the machines employed in the manufacture of precast elements such as concrete blocks.

A device known as a shock table, likewise used for stiff concrete, is suitable for the manufacture of precast members. Consolidation is achieved by pouring thin layers of concrete into a mould, after which the mould is repeatedly raised and dropped; the forces hindering consolidation are released upon impact with the base.

As far as members with hollow sections are concerned, consolidation may be inherent in the construction process, achieved by centrifugation. Such is the case of pipe manufacture, although the method is not widely used outside this particular application.

Nonetheless, the method most commonly used today to consolidate concrete is vibration. This, then, is the procedure that will be discussed in detail here, along with its parameters, processes and range of possible applications.

4. CONCRETE CONSOLIDATION VIA VIBRATION

4.1. Vibratory motion and consolidation

Even though this procedure is used with all kinds of concrete and under a wide variety of circumstances, the mechanisms taking place during concrete vibration are still poorly understood. Even so, it may be deduced from the studies conducted that, although with certain reservations for specific cases, the process can be modelled around the laws of simple harmonic motion.

This is so because, as it rotates, the eccentric weight generates such simple harmonic motion, which can be represented by means of a sinusoidal wave.

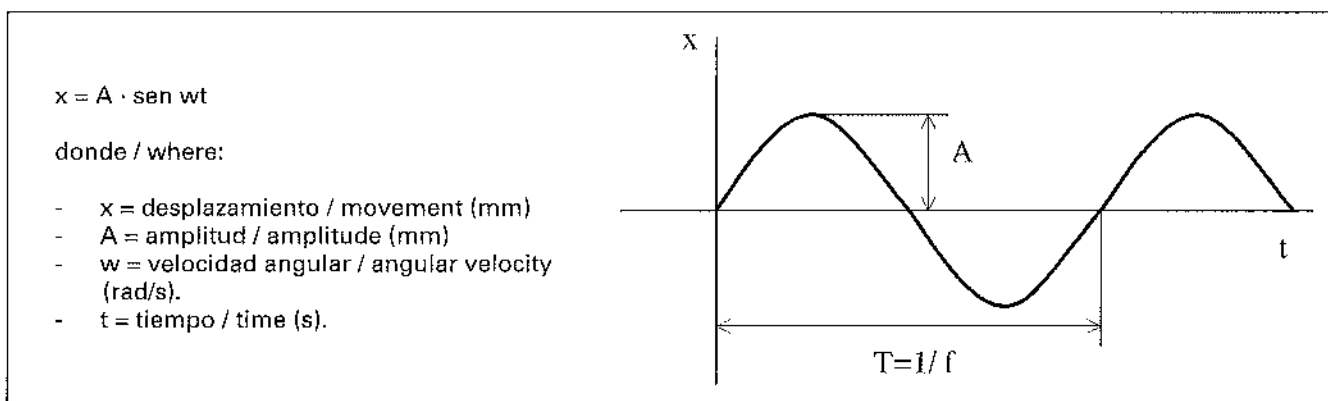


Fig. 1. Movimiento armónico simple
Fig. 1. Simple harmonic motion

6. *Aditivos*: Es importante no obstante tener presente que las condiciones reológicas pueden ser modificadas mediante el empleo de aditivos que potencien ciertas características.

3. MÉTODOS DE COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN

La primera y principal división de los métodos para la compactación del hormigón se puede hacer entre métodos manuales y métodos mecánicos. Son estos últimos los más extendidos en la actualidad dado que resultan ser mucho más efectivos y son aplicables a todo tipo de situaciones, mientras que los primeros sólo pueden ser empleados bajo circunstancias muy concretas como veremos a continuación.

Es fundamental tener en cuenta a la hora de escoger el método de compactación a emplear que este ha de estar en consonancia con las características de la mezcla, la puesta en obra que se haga del hormigón, características del encofrado, etc., ya que como se ha comentado anteriormente, no todos los métodos son aplicables a todas las situaciones. Pasamos a continuación a describir los diferentes métodos.

3.1. Métodos manuales

En la actualidad estos se encuentran en desuso salvo para algunos casos muy concretos, dados los bajos rendimientos que presentan y los grandes esfuerzos a realizar para que la compactación obtenida se considere adecuada. Su empleo ha quedado reducido únicamente para pequeños elementos de carácter no estructural.

Uno de los posibles métodos es el "picado con barra". El procedimiento consiste en la introducción repetidas veces de una barra en el hormigón. Este sistema es ampliamente utilizado en el caso de la compactación de las probetas de hormigón para ensayo cuando estas se elaboran para hormigones de consistencias no excesivamente secas.

También es empleado de manera similar a la anterior como método de compactación en las proximidades de las caras de los encofrados principalmente, el introducir y sacar repetidamente una pala plana, de manera que se alejen de las mencionadas caras de los encofrados los áridos gruesos a la vez que se reduce la cantidad de aire ocluido.

Por último el apisonado de los hormigones de consistencias secas puede llevarse a cabo manualmente, pero para que este sea efectivo es necesario que el hormigón se disponga en finas capas, y la energía empleada sea grande, lo que desemboca por lo tanto en un procedimiento largo y laborioso.

3.2. Métodos mecánicos

Los métodos mecánicos son por el contrario los empleados en la actualidad para conseguir que la compactación del hormigón sea la adecuada. Existen multitud de métodos que se adecuan a los distintos tipos de mezclas y los diferentes métodos constructivos.

Uno de los métodos aplicados en el caso de los hormigones de consistencias secas es el apisonado o compactado. El rango de aplicación de este método es muy grande y varía desde los grandes compactadores de rodillos empleados en la construcción de presas hasta las máquinas utilizadas en la construcción de elementos prefabricados como bloques.

También para el caso de los hormigones de consistencias secas se emplean la denominadas mesas de sacudidas. Son aplicables a la construcción de elementos prefabricados y la compactación se consigue con un procedimiento en el que sobre la mesa se disponen finas capas de hormigón, tras lo cual la mesa es ascendida y liberada de las coacciones produciéndose en el impacto tras la caída por gravedad de la mesa la densificación.

En los casos de elementos que presentan secciones huecas su consolidación puede ser inherente al proceso constructivo llevándose a cabo mediante procesos de centrifugado. Dentro de estos se encuentra el caso de la fabricación de tuberías, no siendo este un método ampliamente utilizado fuera del mencionado caso.

Pero el método mayormente extendido en la actualidad es el desarrollar la consolidación del hormigón mediante vibración. De este modo, este es el procedimiento que pasamos a tratar a continuación analizando los parámetros, procesos y diferentes posibilidades de aplicación.

4. COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN MEDIANTE VIBRACIÓN

4.1. Movimiento vibratorio y compactación

A pesar de ser un procedimiento que se ha empleado con todo tipo de hormigones y en muy diferentes situaciones, sorprendentemente el conocimiento de los mecanismos que se desarrollan durante la vibración del hormigón todavía es limitado. No obstante, de los estudios desarrollados se desprende que, aunque con ciertas reservas para casos concretos, es posible el empleo de un modelo de representación consistente en un movimiento armónico simple.

Esto deriva de que los vibradores empleados contienen una masa excéntrica que al girar produce el mencionado movimiento armónico simple. Dicho movimiento puede ser representado mediante una onda sinusoidal.

Moreover, the angular velocity of the rotation can be expressed in terms of frequency (Hz), i.e., the number of revolutions effected by the eccentric weight per unit of time: $f = \omega/2\pi$, and the acceleration found via two successive derivations:

$$x = A \cdot \sin 12\pi ft \quad x = 4\pi^2 f^2 A \sin 2\pi ft = a \cdot \sin 2\pi ft$$

where "a", the maximum acceleration during oscillation, is expressed in mm/s².

Another consideration to be taken into account in this respect is that consolidation occurs as a result of transmission of the motion described above by compression waves propagated through the fresh concrete, where the maximum pressure is directly proportional to wave velocity, which in turn is the result of the product of the frequency and amplitude of the wave transmitted. It should be borne in mind that such propagation decays and the effect of the wave declines as the distance from the point of emission increases, due both to damping and expansion of the wave front.

On the grounds of the foregoing, the parameters that describe the vibration process are, clearly:

- **Acceleration:** Acceleration is generally expressed in such cases in terms of "g". This is a fundamental parameter since the studies conducted show that a minimum acceleration threshold needs to be crossed for consolidation to begin. This minimum threshold may be set at around 0.5 g. Once this figure is reached, the consolidation effect rises linearly up to values of 1 to 4 g, depending on concrete consistency (with the lower values corresponding to stiffer mixtures), after which increases in acceleration have little effect on consolidation (see Fig. 5).
- **Amplitude:** Like acceleration, amplitude is a parameter that needs to exceed a minimum value for consolidation to be effective. The value proposed by Kolek is 0.04 mm.
- **Frequency:** This is a fundamental parameter in view of its impact both on other parameters and on the pressure transmitted.
- **Energy:** An important parameter during vibration, it must also reach certain minimum values for effective consolidation, applicable to any kind of mixture.

It is also important to stress here that although implicit in all the others described above, the mass of the element producing the vibration is also a fundamental parameter, since the force initially transmitted to the concrete to propagate the compression waves is highly dependent on it.

4.2. Stages in consolidation by vibration

A knowledge of the process whereby the dense state is reached is requisite to a suitable understanding of vibratory consolidation in fresh concrete. Different papers on the subject, based on different methodologies, as discussed below, show that there are two clearly distinguishable stages.

By the late forties L'Hermite and Tournon (1) showed that there were large differences in concrete behaviour during the process, although they did not actually define different stages. It was Kolek (2) who in the early sixties first postulated the existence of two stages in concrete consolidation. Subsequently in the very late seventies, Alexander (11) conducted research on the vibration process by measuring the mechanical impedance of the concrete mass to the pressure exerted on its surface, on which grounds he distinguished three different behaviours, although if the first two are grouped together, his findings can be regarded to concur with Kolek's two stages. The following description of the process is based, then, on the earlier of the two authors.

When initially placed at the job site, concrete is honeycombed. It may be sustained that at this stage the mixture consists of mortar, coarse aggregate and a series of irregularly distributed voids. The overall volume of such air pockets depends largely on the consistency of the mixture, since, as the concrete is deposited in the forms, it tends to settle as a result of the force of gravity. The amount of entrained air can range from 5 to 20 per cent. The purpose of concrete consolidation is to eliminate practically all this air.

The two stages of consolidation mentioned, which are, to some extent, simultaneous, are as follows:

- In the *first stage*, the mixture settles rapidly. When vibration begins, the compression waves transmitted in the concrete produce disorganised movement of the particles in the mixture within the vibrator's radius of action. Due to this the mortar is momentarily liquefied and the internal friction that makes the concrete hold its shape is drastically reduced. Thus, according to L'Hermite and Tournon, in the vibration phase friction is estimated to be approximately 0.001 MPa, or only about one twentieth of the figure when the mixture is at rest, i.e., 0.02 MPa. Alexander, in turn, deduced from his studies that friction was reduced by a factor of from five to ten, values substantially smaller than found by the earlier authors. Nonetheless, for the intents and purposes of an understanding of the process, it is obvious that internal friction plummets, rendering the mixture unstable and fluid as it settles and reaches a dense state. By the end of this first stage the initial honeycombing disappears and all the large air pockets are filled with mortar.

Por otro lado es posible expresar la velocidad angular del movimiento giratorio en función de la frecuencia (Hz) que es el número de revoluciones que efectúa la masa excéntrica por unidad de tiempo: $f = \omega/2\pi$, y obtener la aceleración mediante una doble derivación:

$$x = A \cdot \sin 12\pi ft \qquad x = 4\pi^2 f^2 A \sin 2\pi ft = a \cdot \sin 2\pi ft$$

siendo "a" la máxima aceleración durante el movimiento oscilatorio en mm/s².

Pero por otro lado es importante tener en cuenta que la consolidación se produce a través de la transmisión del movimiento anteriormente descrito por ondas de presión que se propagan a través del hormigón fresco, siendo la máxima presión directamente proporcional a la velocidad de la onda, que a su vez es resultado del producto de la frecuencia y la amplitud de la onda transmitida. Debe tenerse en cuenta que esta propagación será amortiguada y el efecto de la onda se reduce con la distancia del punto de emisión tanto por el amortiguamiento como por el crecimiento del frente de onda.

Visto lo anterior, quedan claramente orientados los parámetros que marcan el proceso de vibración:

- **Aceleración:** La aceleración suele expresarse en estos casos en términos de "g". Es un parámetro fundamental dado que los estudios efectuados revelan que es necesario superar un umbral mínimo de aceleración para que comience la consolidación. Este umbral mínimo puede ser fijado en torno a 0,5-g. Una vez superado este, el efecto de densificación crece linealmente hasta que se alcanzan valores de 1-g a 4-g dependiendo de la consistencia del hormigón (los valores menores corresponden a consistencias secas), momento a partir del cual un aumento en la aceleración tiene pequeñas repercusiones en la consolidación (Ver Fig. 5).
- **Amplitud:** Al igual que sucede con la aceleración la amplitud es un parámetro que requiere que se supere un valor mínimo de este para que la consolidación sea efectiva. El valor mínimo propuesto por Kolek se sitúa en 0,04 mm.
- **Frecuencia:** Será un parámetro fundamental por su influencia tanto en otros parámetros como en las presiones que se transmiten.
- **Energía:** Durante la vibración es un parámetro importante que marca unos mínimos para que la consolidación sea efectiva y que es aplicable a cualquier tipo de mezcla.

Es importante destacar aquí también que a pesar de ser un parámetro que queda implícito dentro de todos los descritos hasta este momento, la masa del elemento que produce la vibración es fundamental, dado que la fuerza inicialmente transmitida a la mezcla para la propagación de las ondas de presión dependerá altamente de ella.

4.2. Etapas en la compactación por vibración

Para un adecuado conocimiento del fenómeno de la compactación por vibración del hormigón fresco es fundamental comprender cómo es el proceso a través del cual se llega al estado de densificación. Diferentes estudios al respecto basados en diferentes metodologías, como a continuación veremos, muestran que existen dos etapas claramente diferenciadas.

Ya a finales de los años cuarenta L'Hermite y Tournon (1) mostraron que existían grandes diferencias en el comportamiento del hormigón a lo largo del proceso, si bien no se llegaron a diferenciar las etapas. Será Kolek (2) al comienzo de los años sesenta quién por primera vez postulará que existen dos claras etapas en la consolidación del hormigón. Posteriormente, ya casi en los años ochenta Alexander (11) investigó el proceso de vibración mediante mediciones de la impedancia mecánica de la masa de hormigón a las presiones ejercidas en su superficie, llegando a reconocer tres comportamientos diferentes, si bien los dos primeros podrían ser agrupados, quedando los dos propuestos por Kolek. Nos basaremos por lo tanto en el primero de los autores para describir el proceso.

Cuando el hormigón es puesto en obra se encuentra en forma de una masa que contiene una gran cantidad de huecos que se encuentran distribuidos de una manera desorganizada. Se podría decir que en ese momento la mezcla consiste en mortero, árido grueso y una serie de cavidades de aire distribuidas irregularmente. La cantidad de huecos de aire depende en gran medida de la consistencia de la mezcla, ya que por la acción de la gravedad, en el momento de depositar el hormigón en el encofrado tiende a producirse una acomodación inicial de la mezcla. Así el aire ocluido inicialmente varía entre un 5 y un 20 por ciento. El objetivo de la consolidación del hormigón será el eliminar prácticamente la totalidad de este aire.

Las dos etapas de la compactación que se han comentado son las siguientes, si bien existe una cierta simultaneidad entre ambas:

- En una primera etapa se produce el rápido asentamiento de la mezcla. Cuando comienza la vibración, las ondas de presión transmitidas en el hormigón hacen que se de un movimiento desorganizado de las partículas de la mezcla dentro del radio de acción del vibrador. Debido a esto el mortero pasa momentáneamente de un estado sólido a un estado líquido y las fuerzas de rozamiento internas que hacen que el hormigón mantenga su forma se reducen drásticamente. Así, de acuerdo con L'Hermite y Tournon, las tensiones de rozamiento en la fase de vibración tienen un valor aproximado de 0,001 MPa, mientras que en reposo estas son de 0,02 MPa, reduciéndose por tanto a un veintavo. Por su parte Alexander de sus estudios dedujo que la reducción se producía con un factor de cinco a diez, valores notablemente inferiores al veinte comentado anteriormente. No

obstante para la comprensión del fenómeno, es claro que la reducción es importante en las tensiones de rozamiento interno, convirtiéndose la mezcla en inestable, fluyendo, asentando y alcanzando un estado densificado. Una vez completada esta primera etapa la trama de huecos inicial ha desaparecido, quedando ya los grandes huecos de aire rellenos de mortero.

- En la segunda etapa, desde el comienzo de la misma, la mezcla se comporta como un fluido en el que se encuentran suspendidos los áridos y resto de partículas. No obstante, el mortero todavía contiene una gran cantidad de burbujas de aire que pueden llegar a tener tamaños de hasta 25 mm. La misión en esta segunda etapa será conseguir que la mayor cantidad posible de estas burbujas aflore en la superficie. Las burbujas que tienen mayores tamaños tienen una mayor facilidad de ascender, por lo que progresivamente las burbujas remanentes tendrán menores tamaños. Es importante tener en cuenta también que se producirá una mayor reducción en el número de burbujas en las proximidades del vibrador. Esta etapa debe mantenerse en el tiempo hasta que la cantidad de aire ocluido ha sido reducida hasta una cantidad tal que se obtengan en el hormigón las características de resistencia, durabilidad y otros requerimientos necesarios, no siendo práctico en la actualidad con los procedimientos habituales de vibración el conseguir una total eliminación del aire ocluido.

Respecto a los modelos físicos y matemáticos para simular el proceso conviene mencionar que han sido diversos, y si bien no ha sido posible el encontrar un único modelo que represente a la totalidad del proceso, sí se han planteado modelos parciales de las diferentes etapas. Para la primera etapa los modelos planteados han consistido principalmente en sistemas de oscilaciones forzadas (Alexander) o consideraciones de cuerpo elástico (Bache y Jureka), habiendo resultado ser estas últimas únicamente aplicables a mezclas muy secas. Por el contrario para la segunda etapa los diferentes autores coinciden en la adecuación de representación del fenómeno, al comportarse la mezcla como un fluido, mediante las leyes de la hidrodinámica. De este modo, será aplicable la segunda ley de Newton ($F = m \cdot a$) quedando de nuevo de manifiesto la importancia de la aceleración dentro del proceso de consolidación.

4.3. Métodos de Vibración

Los diferentes métodos de vibración son agrupados de acuerdo con la maquinaria empleada al efecto y su posición relativa con respecto a la masa de hormigón a vibrar. De este modo, pasamos a presentar los diferentes métodos separadamente.

Vibración interna

Su nombre deriva del hecho de que el vibrador se sitúa inmerso en la masa de hormigón a vibrar, transmitiéndose su efecto y consiguiéndose la compactación mediante una serie de ondas circulares de presión. Debido a que el efecto de estas ondas se ve atenuado por la pérdida de energía que supone el aumento del frente de onda y la absorción de energía por el amortiguamiento que produce la masa de hormigón, será fundamental el estudio de los radios de acción que es posible alcanzar.

Al respecto existen diferentes estudios que han evaluado los radios de acción mediante metodologías diferentes como la observación de fotografías de la superficie (Bergstrom y Forssbald) o la medida de densidades con densímetros nucleares (Taylor y Ersoy).

Dentro de estos estudios resulta muy ilustrativo el analizar las siguientes gráficas de ensayos tomadas de (15) (Fig. 2). Estas muestran relaciones entre la amplitud, la frecuencia y el radio de acción para un vibrador cilíndrico de 60 mm de diámetro después de 10 y 30 segundos de vibrado. En ellas se puede observar un óptimo valor de la frecuencia de vibrado en torno a los 200 Hz (12.000 r.p.m.) obteniéndose sin embargo siempre aumentos en el radio efectivo al aumentar la amplitud.

Dada la importancia que tiene la amplitud es fundamental el tener en cuenta que esta no tendrá los mismos valores cuando el vibrador se encuentra trabajando en vacío que cuando el vibrador se encuentra inmerso en el hormigón, debido a la resistencia que ejerce el hormigón al movimiento, reduciéndose los valores de la amplitud a un 70 a 75 por ciento cuando el vibrador se encuentra en el interior.

Por otro lado, derivado de la transición entre las etapas en las que se produce la consolidación es posible ver el incremento que se produce del radio efectivo con el aumento del tiempo de vibrado. Esto se puede observar en las dos gráficas mostradas para los tiempos de 10 y 30 segundos, pero resulta interesante ver la evolución de la influencia partiendo del inicio del proceso de vibrado. Para esto emplearemos la gráfica de la Fig. 3 tomada al igual que las anteriores de (15). En esta podemos observar cómo la amplitud decrece con el tiempo al pasar a comportarse la masa como un fluido y cómo para que los radios de acción comiencen a ser realmente efectivos debemos estar situados en tiempos entre 5 y 10 segundos, corriendo el riesgo en caso de bajar de estos umbrales de quedarnos simplemente en la primera etapa de la consolidación lo cual resultaría inadmisibles.

A further conclusion that can be drawn by comparing the two graphs, for times of 10 and 30 seconds, is that the effective radius rises with increases in vibration times, coinciding with the transition between the consolidation stages. Nonetheless, the pattern of the impact of vibration times from the beginning of the vibration process is of even greater interest in this regard. Using the graph in Figure 3, taken, like the others, from (15), the amplitude can be seen to decline with time as the mixture begins to behave like a fluid. The graph also shows that the radii of action do not start to become truly effective until after around 5 to 10 seconds, from which it may be concluded that if the concrete is vibrated for times below these thresholds there is a risk that consolidation may proceed no farther than the first stage, which is inadmissible.

While the above examples assume a constant vibrator diameter, the variability of the effective radii with the diameter of the vibrator used is another factor to be considered. According to principles of hydrodynamics, which are applicable to the process as observed above, the mass of concrete displaced is directly proportional to the area of the vibrator head, whereby the radius of action is likewise directly proportional to such diameter. Forssblad proved this experimentally.

Having reached this point in the discussion, another factor must be introduced, namely cavitation, which compounds the complexity of the foregoing explanation of values and combinations of amplitudes and frequencies. Kolenda (12) found in his studies that there is a series of combinations of amplitudes and frequencies for each head diameter used that may not be exceeded without causing cavitation in the area adjacent to the vibrator. Where this happens the effectiveness of vibration drops significantly and the resulting concrete falls far short of quality standards. The respective values are shown in the Graph in Figure 4, taken from (15).

The arrangement of the reinforcing steel and the interference in the propagation of the waves caused by the forms themselves are further factors that may affect concrete consolidation. With regard to the former, Forssblad has shown that the radius of action can be substantially reduced by the reinforcing steel, by as much as 50 per cent, making this a matter of special concern in heavily reinforced members. On the contrary, for forms near the points where the vibrator is inserted, the reflection of the waves off the form walls appears to have a beneficial effect, although it has not been quantified to date. Also in connection with wave interference, improvement in consolidation has been detected when, with the use of several vibrators at the same time, the waves transmitted by the different devices overlap, such as in the case of pavers equipped with a series of gang-mounted vibrators.

Surface vibration

This form of vibration is carried out primarily by so-called vibrating screeds, which consist of a straightedge of variable width to which the vibration mechanism is attached. They are drawn over the surface of the concrete and consolidation is achieved due to the waves created on the contact surface where the screeds scrape against the mixture.

Flowing to plastic mixtures can be consolidated with relatively light single or double vibrating screeds, if lift thicknesses are not over 200 mm. Here the frequencies are smaller than indicated in the case of internal vibration and generally range from 50 to 100 Hz, while the most common acceleration values are from 5 to 10 g. Stiff mixtures call for heavier screeds. In both the former and the latter case, amplitudes should be distributed as evenly as possible, which indirectly implies that the screeds need to be sufficiently rigid.

In this case the impact of the different factors can be seen from the equation proposed by Walz (13):

$$\text{consolidation effort} = \frac{\text{static load} \cdot \text{amplitude} \cdot \text{frequency}}{\text{rate of travel}}$$

Furthermore, there may be different amplitude and frequency combinations within similar "consolidation effort" values. In this case experience has shown that for a given acceleration, combinations of high amplitudes and low frequencies are preferable to the contrary.

It is interesting to note that one important factor when consolidating very thick layers of concrete is the width of the vibrating screed, which should be greater than certain minimum values so the bulb of dynamic pressure located underneath the contact surface also reaches the lower parts of the layer.

Surface vibration may also be construed to include consolidation methods using vibrating rollers. Nonetheless, this will not be addressed in the present review, as comprehensive information is available elsewhere, primarily in connection with dam construction.

Form vibration

This method of vibration falls under what is known as external vibration, as the vibrators are not in contact with the concrete, but outside it. The method consists of coupling the vibrators to the concrete formwork, through which the vibration is transmitted to the mixture. As in the case of vibrating screeds, the vibration amplitude must be kept as uniform as possible across the entire surface of the forms. This means that the vibrators must be positioned at distances of no greater than 1.5 to 2.5 m.

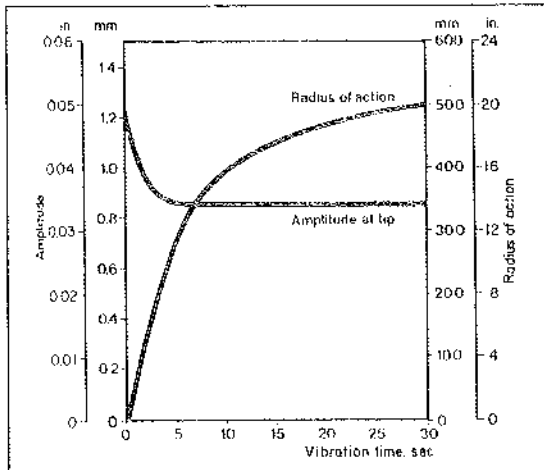


Fig. 3. Amplitud y radio de acción para un vibrador interno

Fig. 3. Amplitude and radius of action for an internal vibrator

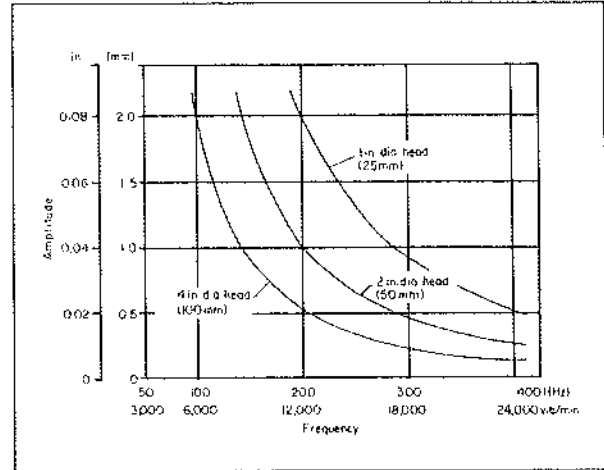


Fig. 4. Frecuencias y Amplitudes para que no se de cavitación

Fig. 4. Requisite frequencies and amplitudes to avoid cavitation

Para estos razonamientos hemos partido de unos diámetros constantes del vibrador. Pero otro factor a tener en cuenta es la variabilidad de los radios efectivos con el diámetro del vibrador que empleemos. Empleando principios de la hidrodinámica, los cuales son aplicables al proceso tal y como se comentó anteriormente, la masa de hormigón que se desplaza es directamente proporcional al área del vibrador, por lo que el radio de acción resulta ser directamente proporcional al diámetro de dicho vibrador. Esto ha sido verificado experimentalmente por Forssblad.

Llegados a este punto es necesario introducir un nuevo factor que complica un poco más la trama de valores y combinaciones de amplitudes y frecuencias. Este es el problema de la cavitación. De los estudios realizados por Kolenda (12) se obtiene que existen una serie de combinaciones entre la amplitud y la frecuencia para cada diámetro de vibrador empleado que no deben ser superadas para que no aparezcan problemas de cavitación en las proximidades del vibrador. En caso de que se de este hecho la efectividad de la vibración se ve altamente mermada y estaremos lejos de los estándares de calidad a alcanzar. En el Gráfico de la Fig. 4, tomado de (15), se pueden observar valores al respecto.

Otros factores que resultan influir en la compactación del hormigón son las armaduras dispuestas y las interferencias en la propagación de las ondas por los encofrados. Respecto al primer factor ha sido demostrado por Forssblad que las armaduras hacen que el radio de acción se reduzca notablemente, llegando en algunos casos a reducirse hasta valores próximos al 50 por ciento, por lo que será necesario prestar especial atención a los casos de elementos fuertemente armados. Por el contrario en los casos de encofrados próximos a los puntos de inserción del vibrador los efectos de la reflexión de las ondas en las caras de los encofrados parecen tener un efecto beneficioso, si bien no se ha cuantificado por ahora tal efecto. Relacionado con la interferencia de ondas se ha detectado también una mejora en la consolidación cuando al emplear varios vibradores simultáneamente se superponen las ondas transmitidas por los diferentes vibradores como sucede en los casos de las máquinas empleadas en la construcción de pavimentos que disponen de diversos vibradores alineados en el frente de avance en una estructura que los soporta.

Vibración superficial

Esta forma de vibración se lleva a cabo principalmente mediante el empleo de las denominadas reglas vibrantes, consistentes en una estructura recta de longitud variable sobre la que se dispone un mecanismo de vibración. Estas son desplazadas sobre la superficie del hormigón llevándose a cabo la compactación a través de las ondas que se crean en la superficie de contacto entre la regla vibrante y el hormigón.

En el caso de mezclas que presentan consistencias fluidas a blandas, la compactación se puede llevar a cabo mediante reglas relativamente ligeras de simple o doble vibración, y se llega hasta espesores de 200 mm, no debiendo superarse este espesor para las tongadas a compactar. Aquí las frecuencias son inferiores a las comentadas en el caso de la vibración interna y se suelen situar en un rango que varía de los 50 a 100 Hz, siendo valores habituales de las aceleraciones de 5 a 10 g. Para mezclas que presentan consistencias de tipo seco será necesario el empleo de reglas que presenten mayores pesos. Tanto para las primeras como para las segundas la distribución de amplitudes debe ser lo más uniforme posible, lo cual indirectamente implica la necesidad de que las reglas comporten una rigidez suficiente.

The following comments are in order with respect to acceleration and frequency. Acceleration values of 1 to 3 g are recommended after the concrete is poured into the mould to ensure efficient vibration. This is equivalent to values of from 5 to 10 g in an empty form. Frequency values depend heavily on the nature and design of the forms, which can be a more powerful determining factor than the nature of the concrete deposited in them and are therefore difficult to establish. Experience has shown that better surface results are obtained with higher frequency values, which entails high noise values; where high frequencies are forfeited to reduce the noise level, this must be offset by increasing the amplitude. For these reasons the frequency values used range widely, from 50 to 200 Hz.

Table vibration

Like form vibration, this is an example of external vibration. The respective forms for members are positioned on so-called vibrating tables, which transmit the vibration to the moulds. Analysis of this type of vibration entails more complex processes than in the preceding cases, as additional factors are involved, such as the union between tables and forms and the possible relative movement between the two or the reflection of the waves against the concrete surface.

However, it has been found that the consolidation effect can be determined by the values of the acceleration used, which range from 5 to 10 g when the table is empty and must reach values of from 2 to 4 g during vibration of the mould. This is shown in the test results given in Figure 5, taken from (15).

The optimum frequency values for tables range from 50 to 100 Hz. However, relatively high amplitude values are required to obtain suitable consolidation. Hence, combinations consisting of low frequencies and high amplitudes call for shorter vibration times for a given acceleration. Also in connection with vibration time it should be noted that the same amount of energy may be deployed by decreasing vibration intensity and increasing the time.

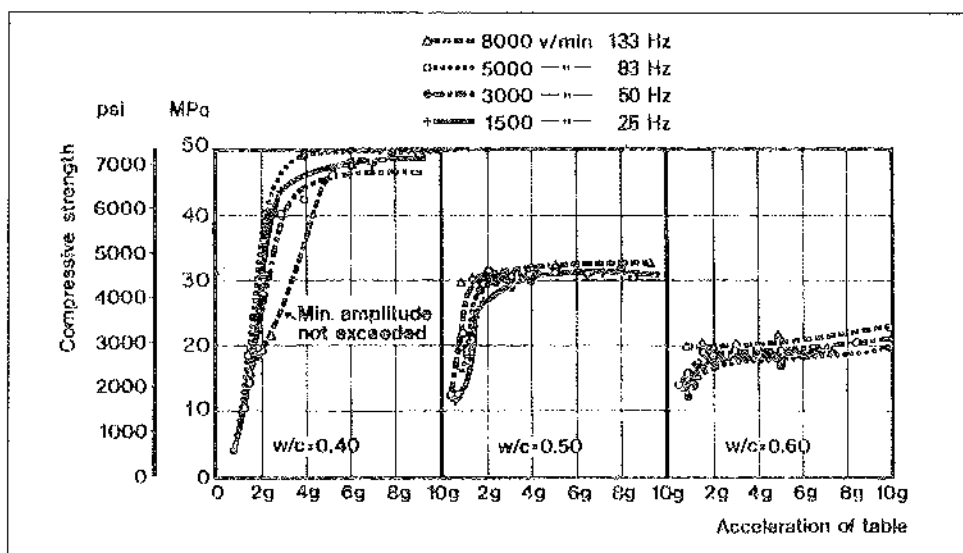


Fig. 5. Correlación entre resistencias a compresión y aceleración para mesas vibrantes

Fig. 5. Correlation between compression strength and acceleration for concrete consolidated on vibrating tables

Another issue often addressed in connection with this type of vibration is whether forms should be rigidly or loosely attached to the tables. Both procedures have advantages and drawbacks. More flexible fastening provides for improved consolidation results due to the relative impact between tables and forms, but this is a noisier process that involves greater wear on both machinery and formwork.

Table vibrations may be circular, vertical or a combination of the two. Circular vibration is achieved with a single vibrator, centred under the form. Vertical vibration, in turn, is generated by two vibrators rotating synchronically but in opposite directions to neutralise the horizontal and compound the vertical forces. Combinations of these two types of motion account for the third alternative. The advantages of using one or another kind of motion depend on the kind of concrete used. Combined circular and vertical vibration is advisable for low slump mixtures, whereas vertical vibration is generally recommended for flowing concrete, although in this latter type of mixture the impact of using one or another type of vibration is less significant.

La influencia de los diferentes factores en este caso puede verse a través de la expresión propuesta por Walz (13):

$$\text{Esfuerzo de compactación} = \frac{\text{carga estática} \cdot \text{amplitud} \cdot \text{frecuencia}}{\text{tasa de desplazamiento}}$$

Por otro lado, dentro de valores similares de "esfuerzo de compactación" pueden existir diferentes combinaciones de amplitud y frecuencia. Pues bien en este caso la experiencia ha demostrado que son preferibles para una misma aceleración, combinaciones de grandes amplitudes y bajas frecuencias sobre las contrarias.

Resulta interesante apuntar que un factor importante cuando se pretende consolidar espesores de hormigón grandes es el ancho de la regla vibrante, el cual debe superar unos valores mínimos para que el bulbo de las presiones dinámicas que se sitúa bajo la superficie de contacto afecte también a las partes inferiores de la capa.

Dentro de la vibración superficial podrían en cierto modo incluirse los métodos de compactación mediante rodillos vibrantes. Este caso sin embargo no se tratará en el presente documento, existiendo al respecto amplia documentación principalmente de los casos concernientes a la construcción de presas.

Vibración con encofrados

Este método de vibración se engloba dentro de lo que se conoce como vibración externa, al no quedar los vibradores en contacto con el hormigón y ser estos exteriores al mismo. Consiste el método en la disposición de los vibradores acoplados a los encofrados del hormigón, transmitiéndose las vibraciones a la mezcla a través de estos. Como sucedía con el caso de las reglas vibrantes la amplitud de la vibración debe ser lo más homogénea posible a lo largo de toda la superficie de los encofrados. Esto conlleva el que sea necesaria la colocación de los vibradores a distancias no superiores a 1,5 a 2,5 m.

Respecto a los valores de la aceleración y la frecuencia cabe hacer las siguientes consideraciones. Valores de la aceleración una vez el hormigón ha sido puesto en el molde situados entre 1 y 3 g son recomendables para conseguir una vibración eficiente. Esto supone valores entre 5 y 10 g en vacío. Para la frecuencia es difícil fijar los valores que se deben emplear, ya que dependen altamente de la naturaleza y configuración de los encofrados, llegando incluso a ser más condicionante el encofrado que la naturaleza del hormigón que en el se deposita. La experiencia ha mostrado mejores resultados superficiales del hormigón mediante el empleo de valores altos de la frecuencia, lo cual conlleva valores altos de ruido, sacrificándose en algunos casos dichos valores altos de la frecuencia para reducir el nivel de ruidos, teniéndose como contrapartida que aumentarse la amplitud. Debido a esto los rangos de frecuencia que se emplean son grandes variando entre 50 y 200 Hz.

Vibración con mesas

Al igual que la vibración con encofrados este es un caso de vibración externa. Sobre las denominadas mesas vibrantes se disponen los correspondientes encofrados de los elementos, imprimiéndoles a estos las mesas los movimientos vibratorios oportunos. Los procesos de análisis de este tipo de vibración son más complejos que en los casos anteriores, al influir diferentes factores como la unión de los encofrados a las mesas y los posibles movimientos relativos entre ambos o la reflexión de las ondas transmitidas en la superficie del hormigón.

No obstante se ha encontrado que el efecto de compactación puede ser determinado mediante los valores de las aceleraciones impuestas, las cuales varían entre 5 y 10 g en vacío, siendo necesario que posteriormente durante la vibración se alcancen valores entre 2 y 4 g. Esto se puede observar en los ensayos reflejados en la Fig. 5, tomada de (15).

Para el caso de las mesas los valores óptimos de la frecuencia varían entre 50 y 100 Hz. Sin embargo son necesarios valores relativamente altos de la amplitud para obtener una consolidación adecuada. Así las combinaciones de valores bajos de frecuencia con valores altos de amplitudes resultan en la necesidad de menores tiempos de vibrado para una aceleración dada. En relación con el tiempo de vibrado también hay que reseñar que puede ser interesante aún aplicando la misma cantidad de energía el disminuir la intensidad de vibrado aumentando el tiempo.

Otra discusión habitual para este tipo de vibración ha sido si los encofrados deben unirse rígidamente a las mesas o deben disponerse de una manera más flexible. Los dos procedimientos tienen sus ventajas y sus inconvenientes. En caso de ser dispuestos con una menor rigidez los resultados de la compactación mejoran por el golpeo relativo entre las mesas y los encofrados, pero esto tiene la desventaja de un mayor ruido durante el proceso y un mayor deterioro de los encofrados y las mesas.

Las vibraciones de las mesas pueden ser de tipo circular, vertical o una combinación de ambas. La vibración circular se consigue mediante la disposición de un único vibrador centrado. La vibración vertical por su parte se consigue mediante el empleo de dos vibradores que giran en sentido contrario sincronizados de manera que se compensen las fuerzas horizontales y se superpongan las verticales. Las combinaciones de ambos darían el caso restante. Las ventajas del empleo de unos u otros tipo dependen del tipo de mezcla que se emplee. Para mezclas secas es conveniente el empleo de una combinación de vibración vertical y circular, mientras que para mezclas de consistencias más fluidas suele ser recomendable el empleo de vibraciones verticales, si bien en este último tipo de mezcla las diferencias entre el empleo de los diferentes tipos de vibrado son menores.

5. EQUIPMENT FOR CONSOLIDATING CONCRETE

The various kinds of equipment used for consolidating concrete are associated with the consolidation methods discussed above. The discussion that follows focuses on equipment used for consolidating concrete by vibration.

5.1. Internal vibrators

Versatile and easy to handle, these are the vibrators most commonly used for concrete consolidation. They are associated with internal concrete vibration processes and consist of a head at one end that encases the eccentric. The head is immersed in the concrete, directly transmitting the vibration to the mixture, which in turn serves as a cooling medium.

Some of the requisite features for a vibrator to perform efficiently are: suitable radius of action; ability to flatten the concrete surface and reduce entrained air; reliability; ease of handling; resistance to wear and innocuity to the medium with which it is in contact.

The various types of vibrators available are described below:

Flexible shaft

This, in turn, is perhaps the most widely used internal vibrator. It consists of three main elements. The first, the head, houses the revolving eccentric that generates the circular vibratory motion leading to consolidation. The second is the motor or engine that drives rotation, transmitted to the head through the third member, a flexible drive shaft encased in a sheath.

The characteristics of this type of vibrator depend largely on whether the shaft is driven by an electric motor or a combustion engine.

In most cases the eccentric and the shaft frequencies are equal, the exception being roll-gear type vibrators in which the head reaches higher frequencies than transmitted by the shaft because the eccentric strikes the inner housing as it revolves. Its use is not widely extended.

Since the head houses the eccentric only, head diameters can range from as little as 20 mm to around 100 mm.

Electric motor-in-head

These vibrators operate in much the same way as the flexible shaft type, although in this case the three elements cited are bundled into one element, the head. This is possible because the motor that drives the eccentric is housed in it, an arrangement that also obviates the need for a shaft to transmit the rotation.

They are gaining popularity because of their ease of use, despite the drawback of having to depend on the proximity of an electric outlet. Another consideration is that because of the space needed inside the head to house the electric motor, the minimum – and most common - diameter of these vibrators is around 50 mm.

Pneumatic

Compressed air is used to operate these vibrators. As in the preceding case, the motor is usually inside the head, with the compressed air reaching it through a flexible hose. The motor may also be located outside the head, with transmission to the head running through a flexible shaft.

The use of such vibrators is particularly convenient when compressed air is available on the job site as a source of power for other machinery.

The frequency attained in these cases depends highly on the air pressure provided by the compressor and it is most important to have a constant and uniform flow of air. Moreover, air flow may be varied to achieve different operating frequencies during vibration. One advantage of such vibrators is the low maintenance required, in view of the simplicity of the mechanism involved. Head diameters may range from 25 to 100 mm, with the lower values corresponding to models in which the motor is outside the head.

Hydraulic

Driven by hydraulic motors, these vibrators are associated with a very specific use, namely paving machines. They are connected to the paver by high pressure hoses and are driven by its hydraulic system. As in the case of air vibrators, frequency is dependent on the flow and may therefore be regulated by varying the water pressure.

5. EQUIPOS PARA LA COMPACTACIÓN DEL HORMIGÓN

Los diferentes equipos existentes para la compactación del hormigón se encuentran asociados a los distintos métodos de compactación comentados en apartados anteriores. Nos centraremos a continuación en los equipos empleados en la compactación del hormigón por vibración.

5.1. Vibradores internos

Estos vibradores son en la actualidad los más empleados en la compactación del hormigón por su fácil manejo y versatilidad. Asociados al proceso de vibración interna del hormigón, constan para desarrollar su función de una cabeza en el extremo en cuyo interior se encuentra situada una masa excéntrica. Dicha cabeza se introduce dentro de la masa de hormigón, quedando esta en contacto con el mismo transmitiéndole a este de una manera directa las acciones, sirviendo por su parte al vibrador el hormigón para su refrigeración.

Algunas de las características que ha de tener un vibrador para que desempeñe su función de una manera efectiva son las siguientes: Tener un adecuado radio de acción; ser capaz de conseguir regularizar la superficie de hormigón y una reducción admisible del aire ocluido; ser fiable; ser fácil de manipular; ser resistente a las condiciones en que este se emplea y no dañar a los elementos con los que estará en contacto.

Los diferentes tipos de vibradores que es posible encontrar se describen a continuación:

Eje flexible

Es a su vez dentro de los vibradores internos el posiblemente, más extendido en cuanto a utilización. Se compone de tres elementos fundamentales. El primero de estos es la cabeza, en la que se sitúa la masa excéntrica que al girar producirá el movimiento vibratorio circular causante de la consolidación. El segundo es el motor, que produce la rotación que le llega a la cabeza mediante el tercer elemento, compuesto por una manguera dentro de la cual queda embebido el eje flexible transmisor del giro del motor a la cabeza.

Las características de estos equipos de vibración dependen en gran medida del tipo de motor empleado para la rotación del eje, pudiendo ser estos tanto eléctricos como de combustión.

En la mayoría de los casos la frecuencia de la excéntrica es igual a la del eje, siendo una excepción a esto los vibradores que constan de excéntricas cónicas. En estos tipos, la excéntrica al girar golpea la carcasa consiguiendo frecuencias mayores a las transmitidas por el eje. Su empleo está poco extendido.

Al quedar situada dentro de la cabeza tan sólo la masa excéntrica, los diámetros de las cabezas (también denominadas agujas) se pueden reducir hasta valores de 20 mm, situándose los valores mayores de estos diámetros en torno a los 100 mm.

Motor eléctrico en el interior de la cabeza

Su funcionamiento es similar a los de eje flexible si bien en este caso los tres elementos comentados anteriormente se condensan todos en uno. Aquí el único elemento es la cabeza. Esto es posible al situarse el motor que proporciona la rotación de la excéntrica dentro de dicha cabeza, no siendo por tanto necesario el eje para transmitir el giro del motor a la misma.

Su empleo se encuentra cada vez más extendido por la facilidad de manejo del conjunto del equipo, si bien por contrapartida tiene el inconveniente de depender de la posibilidad de disponer de una toma eléctrica próxima. Otro aspecto a tener en cuenta es que dada la necesidad de espacio para alojar el motor eléctrico en su interior el diámetro mínimo de estos vibradores se sitúa en torno a los 50 mm, siendo este un valor no obstante adecuado para la consolidación de la práctica totalidad de elementos.

Neumáticos

Para el funcionamiento de estos se emplea como forma de energía aire comprimido. El motor se sitúa generalmente en el interior de la cabeza como en el caso anterior, llegándole el aire del compresor mediante una manguera flexible. Ocasionalmente se encuentran algunos casos en los que el motor se sitúa fuera de la cabeza realizándose la transmisión a esta por un eje flexible.

El empleo de este tipo de vibradores será interesante en general en aquellos casos en los que se disponga por otras razones de maquinaria de aire comprimido como fuente de energía disponible.

La frecuencia en estos casos obtenida para el movimiento es altamente dependiente de la presión de aire que pueda suministrar el compresor, siendo necesario para que se mantenga que el flujo de aire comprimido sea constante y lo más uniforme posible. Por otro lado es posible jugar con la variación del flujo de aire para conseguir diferentes frecuencias de trabajo durante la vibración. Una ventaja de este tipo de vibradores es el bajo mantenimiento que requieren dada la simplicidad del mecanismo de funcionamiento, pudiendo emplearse diámetros para las agujas entre 25 y 100 mm, correspondiendo los menores valores a aquellos casos en los que el motor es externo a la cabeza.



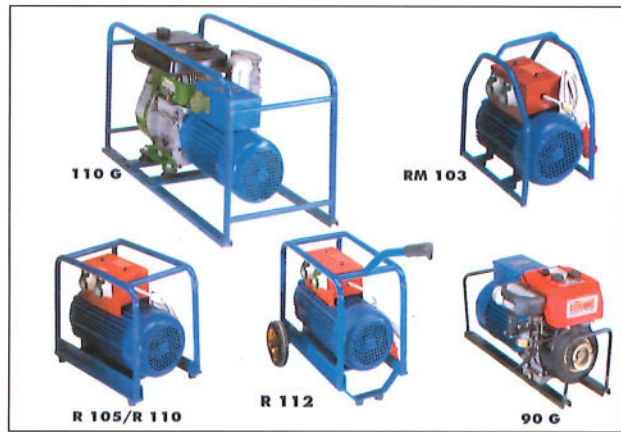
Vibrador de eje flexible (cortesía de Wacker)
Flexible shaft vibrator (courtesy of Wacker)



Vibrador de motor en cabeza
(cortesía de Fastverdini)
Electric motor-in-head vibrator
(courtesy of Fastverdini)



Vibrador neumático (cortesía de Wacker)
Pneumatic vibrator (courtesy of Wacker)



Convertidores (cortesía de Fastverdini)
Converters (courtesy of Fastverdini)

Fig. 6

The main parameters to consider when selecting the right vibrator for each specific use are: head diameter, frequency and amplitude. Of the three, the first is obviously easy to measure. As far as the other two are concerned, additional aspects must be borne in mind, as discussed below. Frequency may be determined with tachometers, taking measurements in air, although it is not easy to ascertain the value of this parameter once the vibrator is immersed in the concrete. However, the frequency of internal vibrator heads when operating in concrete can be estimated to drop to approximately one fifth of the value measured in air. Similar considerations are applicable to amplitude. Amplitude values may be measured in air by placing vibration scales on the vibrator surface, but the values of this parameter once the vibrator is in the concrete mixture are very difficult to measure. For this reason, although it is not strictly correct for internal vibrators, centrifugal force may be used as a rough indication of output.

Such force may be computed from the following expression:

$$F = \frac{w}{g} 4\pi^2 n^2 e$$

where:

- F = centrifugal force (kN).
- w = weight of eccentric (kg).
- n = Frequency (Hz).
- e = eccentricity, i.e., distance from c.g. of eccentric to its centre of rotation (mm).

Hidráulicos

Compuestos por motores hidráulicos, su uso se encuentra asociado a un caso muy concreto que es el de las máquinas para la construcción de pavimentos. Estos se conectan directamente al sistema de la máquina en cuestión mediante manguitos de alta presión y utilizan el sistema hidráulico de la propia máquina. De manera similar al caso de los vibradores neumáticos las características de la frecuencia dependen del correspondiente flujo pudiendo regularse dicha frecuencia variando el flujo.

Los principales parámetros a la hora de seleccionar el vibrador adecuado para cada uso concreto son: el diámetro de la cabeza, la frecuencia y la amplitud. De estos tres, el primero resulta obviamente fácil de medir. Respecto a los otros dos es necesario tener en cuenta los aspectos que seguidamente son comentados. La frecuencia es posible determinarla mediante el empleo de tacómetros, realizándose la medición en aire, no siendo sencillo el conocer este parámetro una vez el vibrador se encuentra inmerso en el hormigón. No obstante, se puede estimar que los valores de la frecuencia de funcionamiento en aire de las cabezas en los vibradores internos se reducen en una quinta parte aproximadamente cuando estas son introducidas en el hormigón. Consideraciones similares a las de la frecuencia se pueden hacer para la amplitud. El valor de esta es posible medirlo en aire mediante escalas de vibración dispuestas en la superficie del vibrador, pero los valores que toma este parámetro una vez el vibrador se encuentra dentro de la masa de hormigón resultan muy difíciles de medir. Por esto en ocasiones, aunque no sea completamente correcto para vibradores internos, es posible emplear como un parámetro global dentro de la caracterización del mismo la Fuerza centrífuga del vibrador.

El valor de esta Fuerza centrífuga es posible calcularlo mediante la siguiente expresión:

$$F = \frac{w}{g} 4\pi^2 n^2 e$$

donde:

- F = Fuerza Centrífuga (kN).
- w = Peso de la excéntrica (kg).
- n = Frecuencia (Hz).
- e = excentricidad, distancia del c.d.g. de la excéntrica a su eje de rotación (mm).

Es habitual la definición de algunos de estos términos mediante otras relaciones, como el momento de excentricidad que es el producto $w \cdot e$, o la amplitud media:

$$a' = w \frac{e}{w + W}$$

donde:

- a' = Amplitud media (mm).
- W = Peso total de la carcasa y otras partes no móviles de la cabeza del vibrador (kg).

A partir de estas expresiones es posible deducir los diferentes parámetros, unos en función de los otros.

Visto lo anterior, para una adecuada definición de los vibradores el fabricante debería definir los diferentes parámetros anteriormente comentados del equipo que suministra, definiendo al menos los parámetros a partir de los cuales puedan ser definidos el resto. Así deberían estar definidos al menos los siguientes:

- Dimensiones de la cabeza: longitud y diámetro.
- Masa total de la cabeza y de la excéntrica.
- Momento de excentricidad.
- Frecuencia en aire y valor aproximado de la frecuencia en trabajo.
- Fuerza centrífuga para las dos frecuencias.

Asimismo, deberían facilitarse parámetros relacionados con la utilización y manejo de los equipos, como características de los elementos de conexión entre la cabeza y el motor, y características de este último. Para el caso de los motores eléctricos deberían facilitarse los voltajes y características de la corriente, para los motores neumáticos e hidráulicos, presión de aire o líquido y capacidad de flujo en función de las longitudes de las mangueras de conexión a utilizar, y para los de combustión la velocidad de funcionamiento.

A continuación se incluye una tabla tomada de (14) (Fig. 8) mediante la cual es posible efectuar la elección del vibrador adecuado para cada trabajo, proporcionando valores aproximados de los radios de acción y tasas de colocación de hormigón, calculando algunos de los valores que en ella figuran de acuerdo con las expresiones anteriormente mostradas.

Some of these terms are often defined by means of other relationships, such as the eccentric moment, which is the product $w \cdot e$ or the average amplitude:

$$a' = w \frac{e}{w + W}$$

where:

- a' = Average amplitude (mm).
- W = Total weight of housing and other non-mobile parts of the vibrator head (kg).

The above expressions can be used to deduce the various parameters, in terms of one another.

In view of this, in their definition of their vibrators manufacturers should include the parameters mentioned, indicating at least the ones from which all the others can be defined. That is to say, at least the following should be indicated:

- Head dimensions: length and diameter.
- Total head and eccentric mass.
- Eccentric moment.
- Frequency in air and approximate value of operating frequency.
- Centrifugal force for the above two frequencies.

Moreover, other parameters relating to the use and handling of such equipment should be provided, such as characteristics of the elements connecting head and motor, and the specifications of the latter. Voltage and current specifications should be given for electric motors; air or water pressure and flow capacity should be specified for pneumatic and hydraulic motors in terms of the lengths of the connecting hoses, and operating speed should be indicated for combustion engines.

The table in Figure 8 (taken from (14)) can be used to choose the most suitable vibrator for each job, applying approximate values of radii of action and concrete placement rates and computing some of the values shown in the table from the above expressions.

5.2. Form vibrators

Form vibrators, contrary to the above, are external vibrators, since their operation involves no contact with the concrete to be consolidated. They are attached to the forms or moulds in which the concrete is deposited, which transmit the vibration generated. Since they are not in contact with the concrete they do not benefit from the cooling effect of the mixture, as in the case of internal vibrators, and must be equipped with a self-cooling system.

One essential question to be considered when using these vibrators is the limitation of their scope. They are generally restricted to vertical forms less than 300 mm across when the members are of substantial depth or height, such as in the case of walls. They can also be used for larger sections but in that case must be supplemented with internal vibrators. However, when the members are not overly high, experience acquired in precasting indicates that thicknesses of up to 600 mm can be accommodated, providing the concrete is properly proportioned.

The following is a discussion of the most common types of form vibrators.

Rotary

Rotary vibrators operate on the same principles as internal vibrators and their operation can, therefore, be modelled on the basis of simple harmonics. Vibratory action is generated by the rotation of eccentrics inside the vibrators. Also like internal vibrators, they may be driven by electric, pneumatic or hydraulic motors. The parameter values to be furnished by the manufacturer must also be the same as described for internal vibrators.

Reciprocating

In reciprocating vibrators, which are pneumatically driven, vibration is generated by a piston repeatedly striking a steel plate attached to the form and the thrust of the concrete against the wall opposite the vibrator. The cylindrical mass of the piston is accelerated in the direction of the plate, where it is stopped by the impact and subsequently accelerated in the opposite direction until it strikes the butt end of the vibrator. In this case the principles of simple harmonic motion are not applicable and it is of utmost importance to keep the air flow as uniform as possible to ensure suitable vibration.

APLICACIÓN DE VIBRADORES INTERNOS PARA COMPACTACIÓN DE HORMIGÓN

1	2	3	4	Valores sugeridos de			7	8	9
				5	6	Valores aproximados de			
GRUPO	Diámetro de la cabeza (mm)	Frecuencia recomendada r.p.m. (Hz)	Momento de excentricidad Kg·mm (10 ⁻³)	Amplitud media (mm)	Fuerza Centrífuga (kN)	Radio de acción (mm)	Capacidad de puesta en m ³ /h	Aplicación	
1	20 - 40	9000 - 15000 (150 - 250)	3,5 - 12	0,4 - 0,8	440 - 1800	80 - 150	0,8 - 4	Hormigones de consistencias blandas a fluidas colocados en elementos delgados y elementos confinados. Conviene su empleo para suplementar a vibradores de mayor diámetro, especialmente en elementos pretensados, donde los cables y conductos conllevan zonas congestionadas en los encofrados. También se emplean para la fabricación de probetas de ensayo.	
2	30 - 60	8500 - 12500 (140 - 210)	9 - 29	0,5 - 1,0	1400 - 3900	130 - 250	2,3 - 8	Hormigones de consistencias blandas en muros delgados, pilares, vigas, pilas prefabricadas, losas delgadas, y a lo largo de juntas de construcción. También conviene su empleo como suplemento de otros vibradores de mayor diámetro en zonas confinadas.	
3	50 - 90	8000 - 12000 (130 - 200)	23 - 81	0,6 - 1,3	3100 - 8800	180 - 360	4,6 - 15	Hormigones de consistencias blandas a plásticas en construcción en general. En muros, pilares, vigas, pilas prefabricadas y losas pesadas. También como complemento de vibradores de mayor diámetro en hormigones en masa para las zonas próximas a los encofrados. Pueden montarse en batería soportados por una estructura en la construcción de pavimentos.	
4	80 - 150	7000 - 10500 (120 - 180)	81 - 290	0,8 - 1,5	6700 - 17700	300 - 510	11 - 31	Hormigón estructural y hormigón en masa de consistencias plásticas a secas puestas en obra en cantidades de 3 m ³ aproximadamente en secciones abiertas de construcciones pesadas (macizos, estribos, cimentaciones, etc.) También como vibradores auxiliares en la construcción de presas cerca de los encofrados, elementos embebidos y armaduras.	
5	130 - 180	5500 - 8500 (90 - 140)	260 - 400	1,0 - 2,0	10800 - 26500	400 - 610	19 - 38	Hormigones en masa de presas de gravedad, muros de gravedad, macizos, grandes cimentaciones, etc. Será necesario el empleo de 2 o más vibradores cuando de coloquen más de 3 m ³ en cada vertido.	

Columna 3 - Valor de la frecuencia con el vibrador introducido en el hormigón.

Columna 7 - Distancia a la cual la efectividad de la consolidación en el hormigón es total.

Columna 8 - Se supone una inserción del vibrador con un espaciamiento de 1_v el radio de acción y que el vibrador actúa durante dos terceras partes del tiempo en el que el hormigón es puesto en obra.

Fig. 8

USE OF INTERNAL VIBRATORS FOR CONCRETE CONSOLIDATION

1	2	3	4			5		6		7		8		9
			GROUP	Diameter of frequency vibrations per min (mm)	Recommended frequency, vibrations per min (Hz)	Eccentric moment, kg (10 ⁻³) mm	Average amplitude, mm	Centrifugal force (kg)	Radius of action, mm	Rate of concrete placement, m ³ /h	Approximate values of			
1	20-40	9000-15000 (150-250)									3.5-12	0.4-0.8	440-1800	80-150
2	30-60	8500-12500 (140-210)	9-29	0.5-1.0	1400-3900	130-250	2.3-8	Plastic concrete in thin walls, columns, beams, precast piles, thin slabs and along construction joints. May be used to supplement larger vibrators in confined areas.						
3	50-90	8000-12000 (130-200)	23-81	0.6-1.3	3100-8800	180-360	4.6-15	Stiff plastic concrete in general construction such as wells, columns, beams, prestressed piles and heavy slabs. Auxiliary vibration adjacent to forms of mass concrete and pavements. May be gang mounted to provide full-width internal vibration of pavement slabs.						
4	80-150	7000-10500 (120-180)	81-290	0.8-1.5	6700-17700	300-510	11-31	Plastic to stiff mass and structural concrete deposited in quantities up to 3 m ³ in relatively open forms of heavy construction (powerhouses, heavy bridge piers and foundations). Also auxiliary vibration in dam construction near forms and around embedded items and reinforcing steel.						
5	130-180	5500-8500 (90-140)	260-400	1.0-2.0	10800-26500	400-610	19-38	Mass concrete in gravity dams, large piers, massive walls, etc. Two or more vibrators will be required to operate simultaneously to mixture and consolidate quantities of concrete of 3 m ³ or more deposited at one time in the form.						

Column 3 - While vibrator in operation in concrete.
 Column 7 - Distance over which concrete is fully consolidated.
 Column 8 - Assumes the insertion spacing is 1 times the radius of action, and that vibrator operates two-thirds of time concrete is being placed.

Fig. 8

5.2. Vibradores de encofrados

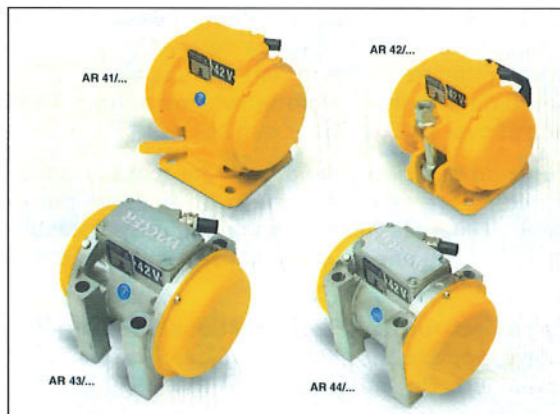
Los vibradores de encofrados al contrario de los anteriores son vibradores de tipo externo, ya que estos durante su funcionamiento no se encuentran en contacto con el hormigón objeto de consolidación. Estos se sitúan sujetos a los encofrados o moldes en los que se dispone el hormigón, sirviendo estos últimos como elementos transmisores de las vibraciones. Dado que no quedan en interior del hormigón no se puede considerar el efecto de refrigeración que este tenía con los vibradores internos y será necesario que los vibradores de encofrados tengan su propio sistema de refrigeración.

Un aspecto fundamental para la utilización es conocer las limitaciones que presentan a su campo de aplicación. Generalmente el empleo de estos se reduce a encofrados verticales con separación entre caras inferior a 300 mm, cuando los elementos tienen una profundidad o altura considerables, como sucede con los muros. Para secciones mayores también es posible su empleo pero será necesario complementar la vibración con vibradores internos. No obstante, cuando la altura de los elementos es reducida, existe experiencia dentro del campo de la prefabricación de la que se deduce que es posible, con dosificaciones de hormigón adecuadas, llegar a espesores de hasta 600 mm.

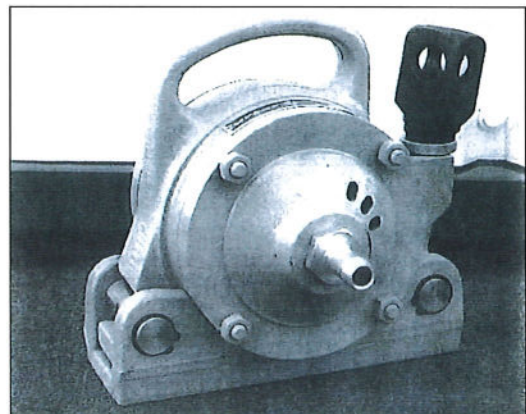
A continuación se describen los tipos más habituales de vibradores de encofrados.

Rotatorios

Los vibradores rotatorios basan su funcionamiento en los mismos principios dinámicos expuestos para los vibradores internos, pudiendo modelizarse este mediante un movimiento armónico simple. Las acciones vibratorias se producen por el giro de masas excéntricas en el interior de los vibradores. Al igual también que con los vibradores internos estos pueden ser eléctricos, neumáticos o hidráulicos. Los parámetros definitorios de los vibradores a facilitar por el suministrador han de ser los mismos que los ya comentados para el caso de los vibradores internos.



Vibrador de encofrados eléctrico
(Cortesía de Wacker)
Electric form vibrator (courtesy of Wacker)



Vibrador de encofrados neumático
(Cortesía de Urbar)
Air form vibrator (courtesy of Urbar)

Fig. 9

De reciprocidad

Los vibradores de reciprocidad o recíprocos, son propulsados neumáticamente y la vibración se produce mediante el golpeteo repetido de un pistón sobre la placa que se encuentra unida al encofrado y el tiro que se produce al llegar la masa al extremo opuesto a la placa del vibrador. En este pistón la masa cilíndrica es acelerada hasta chocar contra la placa para posteriormente ser acelerada en sentido contrario hasta el tope del vibrador. En este caso no son aplicables los principios del movimiento armónico simple, siendo muy importante mantener el flujo de aire lo más uniforme posible para obtener una adecuada vibración.

La elección del vibrador adecuado en estos casos viene, de acuerdo con la experiencia existente en este campo, en parte marcada por la naturaleza de la mezcla. Así, para mezclas de consistencias de tipo seco será recomendable el empleo de vibradores de bajas frecuencias y amplitudes grandes, mientras que en consistencias blandas, se obtendrá una mejor vibración y los defectos superficiales serán menores en caso de emplear bajas amplitudes y altas frecuencias. Los límites entre los valores altos y bajos de frecuencia se establecen tomando como divisoria las 6.000 r.p.m. y para la amplitud los 0.13 mm. No obstante, el parámetro que se ha revelado como fundamental para

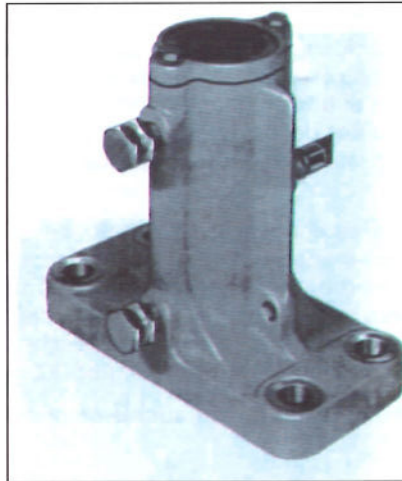


Fig. 10

Vibrador de encofrados de reciprocidad (Fotografía tomada de (14))
Reciprocating vibrator (Photograph taken from (14))

On the grounds of field experience, the choice of the right form vibrator depends on the nature of the mixture. In stiff mixtures, for instance, the use of low frequency, high amplitude vibrators is recommended, whereas for plastic concrete, vibration is more effective if low amplitudes and high frequencies are used. Values of 6,000 r.p.m. and 0.13 mm are defined to be the mid-points dividing high and low frequencies and amplitudes, respectively. However, the parameter that has proved to be most instrumental for effective vibration with form vibrators is acceleration. It has been shown that suitable vibration can be obtained for plastic mixtures with acceleration values of from 1 to 2 g and amplitudes of over 0.025 mm, and from 3 to 5 g and amplitudes of over 0.050 mm for stiff concrete.

Nevertheless, for a given centrifugal force, acceleration is a function of the form and concrete mass and thus varies from case to case. Therefore, if recommended acceleration values are taken and the form and concrete masses known, the centrifugal force of the vibrator can be established. This was the approach taken by Forssblad, who found in his studies that the proportion of masses that should be used to ensure suitable consolidation is as follows: (form mass + 0.2 concrete mass).

Given that the guarantee of suitable consolidation is highly subject to empirical conditions, acceleration values should be verified after system set-up to check whether they correspond to the expected values. This can be done by measuring the operating frequency and amplitude values obtained. On the grounds of these figures, for rotary vibrators, acceleration can be computed from the following formula:

$$A = 4\pi^2 n^2 a$$

where:

- A = acceleration in m/s².
- n = frequency in Hz.
- a = amplitude in m.

Dividing this acceleration value by 9.81 m/s² yields the number of vibrator "g"s.

The manufacturer should be asked to provide information on the recommended number and spacing of vibrators, although the distance between vibrators is usually between 1.5 and 2.5 m.

Form design is particularly important in these cases. When external vibrators are used, in addition to the pressure transmitted by the liquefied concrete, the forms must bear the stresses induced by the vibratory motion generated by the vibrators and transmit these vibrations uniformly; all of this translates into the need for considerable form rigidity.

In view of the above, steel is the material that performs best for form construction under these circumstances, because of its high structural strength and good fatigue properties as well as its suitability for attaching vibrators.

The recommended design for such forms consists of steel wales and tie bars in the bearing structure and steel, plastic or wood plates for the sheathing. The vibrators are attached to profiles positioned on the bearing structure, preferably in the longitudinal direction for optimum vibrator spacing. On occasion, in longitudinal forms, the

la consideración de una adecuada vibración mediante vibradores de encofrados ha sido la aceleración. Se ha comprobado que es posible obtener una vibración adecuada para mezclas blandas con aceleraciones de 1 a 2 g y amplitudes por encima de los 0.025 mm y de 3 a 5 g y amplitudes que superen los 0.050 mm para mezclas de consistencias secas.

Pero la aceleración es función de la masa del encofrado y la masa de hormigón una vez se ha fijado la fuerza centrífuga del vibrador, por lo que variará en cada caso. Por lo tanto, tomando unos valores recomendables de la aceleración es posible conociendo las masas correspondientes del encofrado y el hormigón fijar cual ha de ser la fuerza centrífuga del vibrador. Este proceso fue el adoptado por Forssblad, el cual obtuvo en sus estudios que la proporción de masas a utilizar en los cálculos debería ser la siguiente: (masa del encofrado + 0,2 masa del hormigón).

Dado que la garantía de una adecuada compactación tiene unas componendas experimentales muy fuertes, será recomendable una vez se monte el sistema el verificar que los valores de la aceleración corresponden a los valores esperados. Esto es posible llevarlo a cabo midiendo en funcionamiento los valores de la frecuencia y la amplitud que se obtienen. A partir de estos y para el caso de vibradores rotatorios, la aceleración se puede obtener aplicando la siguiente fórmula:

$$A = 4\pi^2 n^2 a$$

Donde:

- A = aceleración en m/s².
- n = frecuencia en Hz.
- a = amplitud en m.

Dividiendo este valor de la aceleración por 9,81 m/s² se obtiene el número de "g" que tenemos.

Para la disposición y número de vibradores a emplear es recomendable consultar al suministrador, si bien la distancia entre vibradores se sitúa normalmente entre 1,5 y 2,5 m.

Resulta especialmente importante en estos casos el tener en cuenta algunas consideraciones respecto al diseño de los encofrados. Cuando se emplean vibradores externos, los encofrados han de soportar además de las presiones transmitidas por el hormigón durante el estado líquido, las tensiones inducidas por el movimiento vibratorio causado por los vibradores, teniendo por añadido que transmitir estas vibraciones de una manera uniforme, lo que conlleva la necesidad de una rigidez considerable para los encofrados.

Debido a los anteriores considerandos, el material que presenta un mejor comportamiento para la construcción de encofrados en estos casos es el acero, por las altas resistencias que presenta y su adecuado comportamiento frente a fenómenos de fatiga, siendo también un material adecuado para el acoplamiento de los vibradores.

La configuración recomendable de estos encofrados consta de largueros y travesaños de acero formando la estructura portante, pudiendo estar la superficie del encofrado formada también por planchas de acero, o bien de plástico o madera. Sobre la estructura portante se dispondrán los perfiles a los cuales se acoplarán los vibradores, siendo muy útil la disposición longitudinal de estos para permitir el situar los vibradores en diferentes puntos, optimizando las distancias entre los mismos. En ocasiones para encofrados longitudinales es posible incluso el desplazar los vibradores con el avance del hormigonado, si bien esta resulta una práctica delicada debiendo coordinar las características de la vibración con la velocidad de avance. De cualquier forma, resulta fundamental que los vibradores se encuentren rigidamente unidos a los encofrados, dado que de esta manera se obtendrán mejores resultados y se evitará una degradación prematura de estos. Como método de unión de los diferentes elementos metálicos se suelen emplear soldaduras debiendo tener presente los aspectos de fatiga en el diseño de las mismas.

Para el apoyo de los encofrados es recomendable la disposición de juntas de neopreno u otros elastómeros, evitando de esta manera el transmitir las vibraciones al terreno por rozamiento, y evitando pérdidas de lechada en esas juntas. El empleo de estos materiales es recomendable para evitar la pérdida de lechada también en otras juntas que se den en los encofrados.

5.3. Mesas vibrantes

Las mesas vibrantes al igual que se ha comentado para la vibración con encofrados cuentan con equipos de vibración externos. Están compuestas por una estructura con forma de mesa de hormigón armado o acero a la cual se le acoplan una serie de vibradores similares a los empleados en la vibración de encofrados, proporcionando a dichas mesas los movimientos vibratorios que estas transmitirán produciéndose la compactación del hormigón. Pero al contrario que en el caso anterior, en general las mesas no se encuentran en contacto con el hormigón, dado que sobre estas se disponen los moldes o encofrados que contendrán la mezcla. Por lo tanto las acciones de los vibradores se transmitirán en primer lugar a la mesa, posteriormente al encofrado y por último la acción llegará al hormigón. Normalmente las mesas se disponen aisladas de la base mediante muelles, neoprenos, u otros sistemas de aislamiento.

vibrators can be moved over the form as placing advances, although this is an intricate operation calling for close co-ordination between vibration specifications and placement speed. In any case, the vibrators must be rigidly attached to the forms to ensure the best results and prevent premature wear on the formwork. The metal parts are generally fastened by welding, which must be engineered to withstand the fatigue involved.

Neoprene or other elastomere pads and seals should be used at formwork bases and joints to prevent loss of vibration to the terrain because of friction as well as mortar leakage at joints. The use of these materials is likewise recommended to prevent grouting leakage at other form joints.

5.3. Vibrating tables

Vibrating tables, like form vibrators, are a kind of external vibrator. They consist of a structure in the form of a reinforced concrete or steel table to which a series of vibrators, similar to the ones used for form vibration, are attached. These vibrators generate the vibratory motion transmitted by the tables to consolidate the concrete. But unlike form vibrators, tables are generally not in contact with the concrete, which is, rather, in the forms or moulds that rest on the tables. Therefore, vibrations are transmitted first to the table, then to the form and finally to the mixture. Tables are usually isolated from their base by means of springs, neoprene isolation pads or similar.

A number of theories has been advanced about the advantages and drawbacks to attaching the moulds or forms to the tables rigidly or loosely, some of which are discussed in an earlier section of this paper.

The operating principles are the same as described in the foregoing discussion on form vibrators, although since vibrating tables are primarily used in precasting, the consistency of the concrete involved is nearly always stiff. This, in turn, means that the tendency is to use low frequencies and high amplitudes, with the same minimum amplitude values as indicated in the preceding section.

Once again, the determining parameter is acceleration, which should be between 3 and 10 g, with the value increasing with stiffness. Where vibrating tables are used, the acceleration value also depends on the mass of the mould or form, the concrete and the table itself. The values to be considered in this case, according to Forssblad's empirical findings, are as follows:

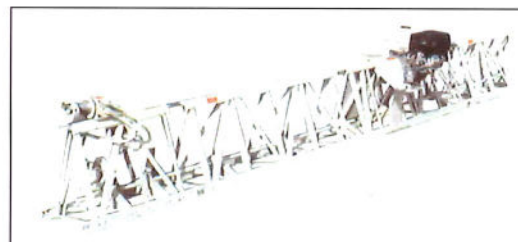
- Rigid vibrating tables or beams with loosely attached forms: (table mass + 0.2 form mass + 0.2 concrete mass).
- Vibrating tables with rigidly attached forms: (table mass + form mass + 0.2 concrete mass).

The layout and number of vibrators varies depending on table characteristics and the type of vibrator used. The manufacturer should be consulted and different distances initially tested until the maximum spacing between vibrators is achieved, to optimise their use without risking the appearance of dead spots in which no consolidation takes place. It is advisable to bear in mind that tables to be used for the manufacture of different kinds of members require vibrators with variable amplitudes and frequencies so they can be adjusted as needed in each case.

Vibrators may also transmit motion in one or several directions, as explained in the section on table vibration.



Mesa vibrante (Cortesía de Colle)
Vibrating table (Courtesy of Colle)



Regla vibrante (Cortesía de Terex)
Vibrating screen (Courtesy of Terex)

Fig. 11

Respecto a la fijación de los moldes o encofrados a las mesas existen diversas teorías sobre las ventajas e inconvenientes derivados de que esta se lleve a cabo de una manera rígida o flexible. Algunas de estas ha sido ya comentadas en este documento.

Los principios de funcionamiento son los mismos que los anteriormente expuestos para los vibradores de encofrados, si bien en este caso al ser al campo de utilización de las mesas vibrantes el de la prefabricación las mezclas tendrán prácticamente siempre consistencias secas. Por lo tanto se tenderá al empleo de bajas frecuencias y grandes amplitudes, siendo los valores mínimos de la amplitud los mismos que los fijados en el apartado anterior.

El parámetro determinante de nuevo resulta ser la aceleración, debiendo estar esta comprendida entre 3 y 10 g, siendo necesario mayores valores cuanto más seca sea la mezcla. El valor de esta en el caso de las mesas vibrantes dependerá además de la masa del molde o encofrado y la masa de hormigón de la masa de la propia mesa. Los valores a considerar de las masas en este caso de acuerdo con los experimentos realizados por Forssblad son los siguientes:

- Mesas o vigas vibrantes rígidas con los encofrados fijados de manera flexible: (masa de la mesa + 0,2 masa del encofrado + 0,2 masa de hormigón).
- Mesas vibrantes con encofrados rígidamente unidos: (masa de la mesa + masa del encofrado + 0,2 masa del hormigón).

La disposición y número de vibradores variará con las características de la mesa y el tipo de vibrador que se disponga. Es recomendable consultar con el suministrador y probar inicialmente diferentes espaciamientos hasta conseguir las máximas distancias entre vibradores, lo cual conllevará una economía de estos, sin que queden zonas muertas en las que la consolidación no sea efectiva. Conviene tener en cuenta que si la mesa va a emplearse en la fabricación de elementos diferentes será necesario disponer de vibradores con amplitudes y frecuencias variables para que estos puedan ajustarse adecuadamente a cada caso.

También es posible que los vibradores transmitan movimientos en una o varias direcciones, como se explicó en el apartado de vibración con mesas.

5.4. Vibradores superficiales

Los vibradores superficiales son vibradores de tipo externo al no encontrarse durante su funcionamiento dentro de la masa de hormigón pero, al contrario que los vibradores de encofrado y las mesas vibrantes, éstos se encuentran en contacto con la mezcla y transmiten directamente las vibraciones al hormigón. Su aplicación se limita a superficies horizontales o con muy ligeras pendientes y su efecto de nivelación hace que contribuyan de una manera importante al acabado superficial de la pieza. El principal uso de estos vibradores es para la consolidación de losas.

Los principales tipos de vibradores superficiales son los siguientes:

Reglas vibrantes

Son ampliamente utilizadas en la construcción de pavimentos. Están compuestas de una viga simple o compuesta sobre la que se encuentran montados uno o varios vibradores eléctricos, neumáticos o de combustión. La longitud de las reglas se encuentra de manera general entre 1 y 5 m, si bien el ancho dependerá de la aplicación concreta de la misma, llegando incluso hasta los 20 m. Son especialmente versátiles las reglas en las que es posible variar la longitud de estas. En caso de querer obtener la nivelación final mediante la aplicación de la regla vibrante esta se dispone montada sobre raíles en sus bordes, siendo desplazada manual o mecánicamente dependiendo de sus dimensiones.

En su funcionamiento se requieren grandes amplitudes para alcanzar una adecuada profundidad de compactación. Se ha comprobado que valores de la frecuencia entre las 3.000 y las 6.000 r.p.m. (50 a 100 Hz) resultan adecuadas. Respecto al valor de la aceleración es recomendable que esta se sitúe en torno a 5 g.

Compactadores

Están compuestos por placas de pequeña superficie que se manejan manualmente y generalmente consiguen su movimiento vibratorio mediante el accionamiento de la masa excéntrica por un motor de combustión. Su utilización no se encuentra muy extendida y se limita a hormigones de consistencias secas.

Rodillos compactadores

Estas unidades alisan la superficie a la vez que compactan el hormigón. Su uso se limita a hormigones de consistencias secas y en ocasiones están compuestos de varios rodillos. La masa excéntrica la constituye en este caso el propio rodillo, girando normalmente entre 100 y 400 r.p.m. (1,7 a 6,7 Hz), pudiendo regularse este giro en función de la consistencia de la mezcla.

5.4. Surface vibrators

Surface vibrators are external type vibrators since they are not immersed in the concrete mixture during operation, but unlike form vibrators and vibrating tables, they do come into contact with the concrete and transmit vibrations to it directly. Their use is limited to horizontal or very slightly sloping surfaces and the levelling effect they convey plays an important role in the surface finish of the member. These vibrators are primarily used in slab construction.

The main types of surface vibrators are described below.

Vibrating screeds

These are widely used in pavement construction. They consist of a single or double beam on which one or several electric, pneumatic or combustion vibrators are mounted. The width of such screeds ranges from 1 to 5 m, generally speaking, although it depends on the specific use and may reach up to 20 m. Screeds with variable widths are particularly versatile. When final levelling is to be performed with the vibrating screed it is mounted on rails or form edges. Depending on the size, screeds are drawn manually or mechanically.

Large amplitudes are required to reach a suitable consolidation depth with screeds. Frequency values of from 3,000 to 6,000 r.p.m. have been shown to be suitable. The recommended acceleration values, in turn, are on the order of 5 g.

Grid vibratory tampers

These consist of small, manually or mechanically driven plates that normally generate vibratory motion by means of an eccentric moved by a combustion engine. Not especially common, they are generally limited to use with stiff concrete.

Vibratory roller screed

These units smooth over the surface as they consolidate the concrete. Their use is limited to stiff concrete and thus may consist of several rollers. In this case the eccentric is the roller itself, which generally rotates at from 100 to 400 r.p.m. (1.7 to 6.7 Hz); rotation speed may be regulated to adjust it to mixture consistency.

6. RULES FOR CONCRETE VIBRATION

The following discussion sets out recommendations for best consolidation practice once the consolidation equipment has been chosen pursuant to the foregoing criteria.

6.1. General

Internal vibration is the method best suited for construction in general, member design permitting. In the event of thin sections, however, and in particular in precasting, external form or table vibration may be preferable, while in shallow lift pavements surface vibration may prove to be the most effective method.

Internal vibration

The various factors to bear in mind for suitable concrete consolidation are largely related to placement. In the first place, for instance, the concrete should be deposited in layers of depths of under 0.5 m and such depth should not be more than very slightly greater than the vibrator height. Moreover, the concrete should be spread and the surface generally levelled during placement. This latter feature is important to avoid the temptation to use the vibrator for lateral movement of the concrete, which could prompt segregation. Since, despite all the foregoing, there may still be some mounds or high spots, they may be flattened by inserting the vibrator in the centre of the mound, providing this is done on a merely incidental basis and does not involve prolonged use of the vibrator. Where levelling calls for keeping the vibrator in the centre of the mound for long periods of time, the method should be ruled out; rather, the mound should be flattened by inserting the vibrator at different points successively further away from the centre, to prevent the appearance of the effects of localised overconsolidation.

Once the concrete is properly levelled, the consolidation process can proceed by repeatedly inserting the vibrator in a vertical position. The distance between vibrator insertion points depends on its radius of action, with spacing of 1 times the radius of action between insertion points regarded to be suitable; care should be taken to ensure that the areas of action overlap, as it does not suffice for them to be merely tangential.

When consolidating the first course, the vibrator should be kept at least 5 cm from the bottom, especially where the bottom is the outside surface on high quality fair-faced concrete. In subsequent layers insertion should be performed in such a way that adjacent layers are suitably knitted together. This calls for inserting the vibrator at least 15 cm into the preceding layer.

Insertion should be performed rapidly and the vibrator held in the mixture for 5 to 15 seconds, depending on concrete characteristics. The vibrator is withdrawn at a variable speed, again depending on mixture consistency. The

6. REGLAS PARA EL VIBRADO DEL HORMIGÓN

A continuación se exponen diversas recomendaciones de buena práctica en el proceso de compactación una vez que el equipo de consolidación ha sido seleccionado de acuerdo con los criterios anteriores.

6.1. Aspectos generales

Para construcción, en general, el mejor método de vibración del hormigón es la vibración interna, siempre que la configuración de los elementos la permita. No obstante en el caso de secciones delgadas y especialmente en prefabricación el método más adecuado puede ser la vibración externa con encofrados o mesas y en pavimentos de pequeño espesor la vibración superficial.

Vibración interna

Los diferentes aspectos a tener en cuenta para llevar a cabo una adecuada compactación del hormigón están en gran medida relacionados con la puesta en obra de este. Así en primer lugar, es necesario para una adecuado proceso que el hormigón se disponga en tongadas inferiores a 0,5 m, no debiendo por otro lado exceder el espesor de la tongada la altura del vibrador más que ligeramente. Al mismo tiempo las tongadas deben disponerse extendiendo el hormigón durante su colocación, quedando la superficie nivelada en gran medida durante la puesta en obra. Este último aspecto es importante para evitar la tentación de emplear el vibrador para conseguir el desplazamiento lateral del hormigón, lo cual conllevaría la segregación. Dado que a pesar de lo anterior quedarán puntos altos, será posible llevar a cabo la inserción del vibrador para la nivelación de estos en el centro del montón cuando dicha inserción sea puntual y rápida sin necesidad de mantener el vibrador durante periodos prolongados. En caso de que fuese necesario mantener el vibrador durante largos periodos en el centro para la nivelación deberá desecharse este método, procediéndose por aproximaciones a conseguir la nivelación introduciendo el vibrador repetidamente desde las proximidades del punto elevado hacia el exterior, evitando así la aparición de puntos localizados en los que se produzcan costras de sobrecompactación.

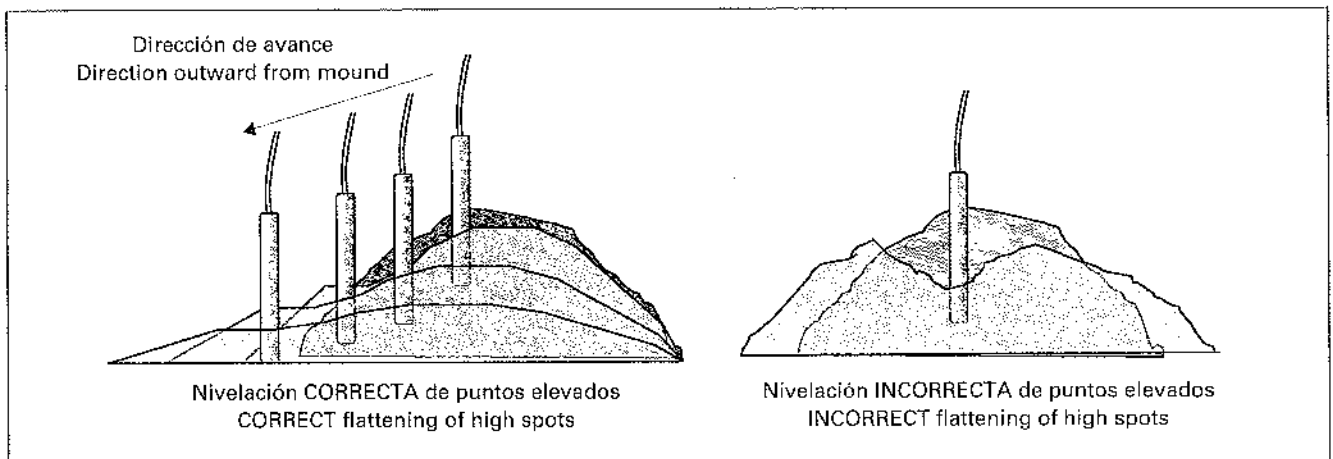


Fig. 12

Vibración de hormigones y desplazamiento lateral Concrete vibration and levelling

Una vez se ha obtenido la adecuada nivelación del hormigón se continuará con el proceso de compactación introduciendo reiteradamente el vibrador en vertical. La distancia entre los puntos de inserción del vibrador será función del radio de acción que este presente, considerándose adecuada entre puntos de inserción una distancia de 1 el radio de acción, debiendo prestarse atención a que las zonas de actuación del vibrador se solapen; no es correcto el que estas zonas queden simplemente tangentes.

En el caso de la primera tongada el vibrador deberá mantenerse alejado del fondo al menos 5 cm, especialmente si dicho fondo ha de ser hormigón visto de alta calidad. Posteriormente la inserción del mismo deberá efectuarse de una manera tal que las diferentes capas queden cosidas. Para esto el vibrador se introducirá en la tongada anterior en al menos una profundidad de 15 cm.

La inserción puede llevarse a cabo de una manera rápida, manteniendo a continuación el vibrador un periodo de tiempo entre 5 y 15 segundos dependiendo de sus características. Posteriormente se retirará el vibrador, variando la velocidad de ascensión dependiendo de la consistencia de la mezcla. En mezclas de consistencia blandas podrá

vibrator may be lifted out of plastic concrete more quickly than out of stiff mixtures. In both cases the suitable extraction speed is one at which the concrete immediately moves back into the space vacated by the vibrator after withdrawal. The vibrator should not touch the formwork during this process.

Where concrete is placed by layers or courses, care should be taken to ensure that the second batch is deposited while the first is still plastic and thus avoid cold joints. If, when the second course is poured the vibrator can barely penetrate the preceding layer, vibration should be intensified in the upper layer to achieve acceptable bonding between the two. Nonetheless, in such cases the placement line between the two layers will be visible after the forms are removed.

There is presently no quick and easy way to check whether consolidation has been suitably completed. The surface appearance of each layer of concrete is generally observed for this purpose. The two main factors to look for are:

1.- *Appearance of a thin film of mortar on the surface.* This is an approximate indication that the first part of the consolidation process is complete and the coarse aggregate particles are embedded in the mortar.

2.- *Cessation of emergence of air bubbles.* When practically no more air bubbles rise to the surface this is an indication that the volume of entrained air has been substantially reduced and the second stage is complete to the desired extent, since total consolidation, that is to say, the total lack of air bubbles, is impractical.

It may be deduced from the foregoing that the vibrator operator should have the necessary training and experience. Furthermore, other possible indicators of vibration process stages are the pitch and feel of the vibrator. These parameters vary with frequency. When the vibrator is first inserted frequency drops considerably and then gradually rises during the process until it hits a plateau, at which point the process is complete.



Fig. 14

**Proceso de vibración interna
Internal vibration process**

When the concrete is not within reach due to the arrangement of the reinforcing steel, it may be useful to vibrate small exposed portions of the steel itself. Despite the criticism levelled against this procedure, it does not cause bonding problems providing the concrete is plastic and sufficiently mobile. In fact, this type of vibration tends to free air entrapped under the bars positioned in the upper layers and enhances bonding. The use of internal vibrators under these circumstances has the drawback of equipment wear, so the use of form (external) vibrators may be recommended.

When normal vibration is complete, revibration may be called for in certain situations. This process, which consists of vibrating concrete already vibrated at some previous time, may be carried out providing the vibrator can penetrate the concrete under the force of its own weight and is able to re-liquefy the mixture. Revibration improves the compressive strength of the concrete although it is not clear whether it has a beneficial or adverse effect on reinforcement bonding. In general, it has been observed to diminish bonding of reinforcing steel in the lower part of the member and enhance it in the upper part, so care should be taken to prevent revibration from affecting the former. This is true for plastic mixtures but the method should not be used in stiff concrete where the effects on bonding are clearly adverse. It is useful when applied to the upper part of members, where there is a larger volume of entrained air, a development clearly visible in the upper part of wall lifts, for instance, where this procedure proves to be most helpful in achieving an acceptable surface finish.

subirse el vibrador más rápido que en aquellas con consistencias secas. En ambos casos para que la velocidad de ascensión se considere adecuada durante la retirada deberá observarse que el hueco ocupado por el vibrador se ha cerrado inmediatamente después de ser este retirado. Durante el proceso se debe evitar que el vibrador entre en contacto con el encofrado.

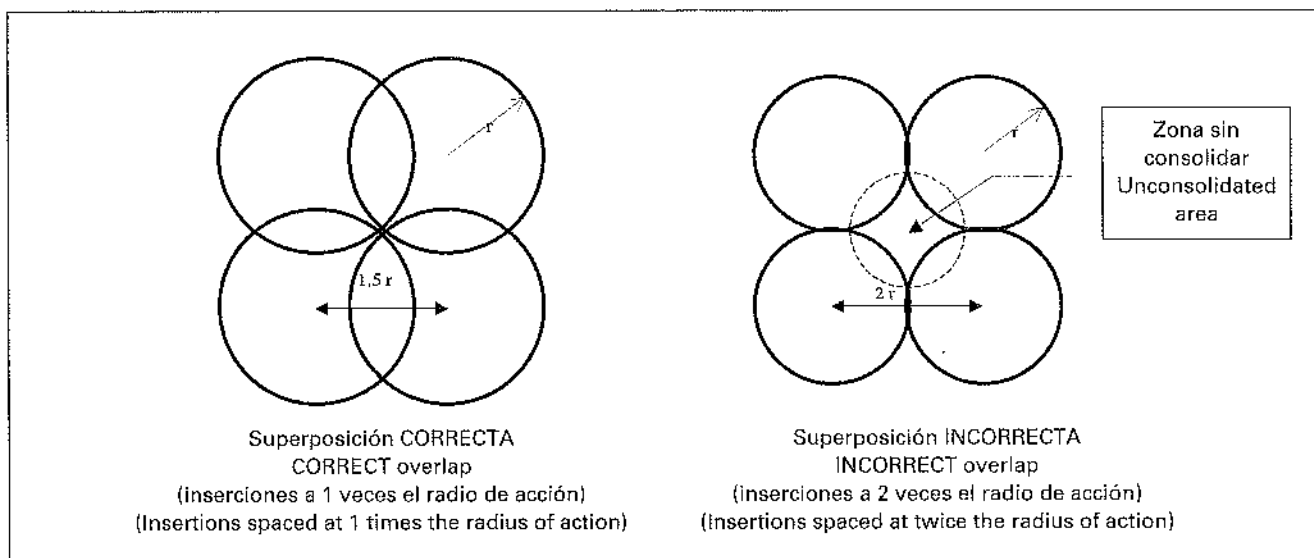


Fig. 13

Superposición de radios de acción
Radius of action overlap

Se debe prestar atención cuando el hormigón ha de disponerse en varias capas o tongadas a que el periodo de tiempo entre el vertido de las mismas sea lo suficientemente pequeño para que al colocar el hormigón de la segunda el primero todavía se encuentre en un estado plástico evitando así que se den juntas de discontinuidad en el hormigonado. En caso de que al verter el segundo hormigón el vibrador no pueda penetrar prácticamente en la capa precedente, se deberá intensificar el vibrado de la capa superior para obtener una adherencia entre ambas que pueda considerarse admisible. No obstante la diferencia entre tongadas se distinguirá visualmente al retirar el encofrado.

En la actualidad no hay un método fácil y rápido de comprobar que la consolidación se ha llevado a cabo de una manera adecuada. Para esto se suele generalmente observar el aspecto de la superficie del hormigón en cada capa. Los dos principales factores a observar serán los siguientes:

- 1.- *Aparición de una fina película de mortero en la superficie.* Una vez esto se ha producido, será un indicador aproximado de que la primera parte del proceso de compactación se ha llevado a cabo y los áridos gruesos se encontrarán envueltos por el mortero.
- 2.- *Cese de aparición de burbujas que emergen a la superficie.* Cuando prácticamente no aparezcan burbujas en la superficie será indicativo de que el aire atrapado se ha reducido de una manera considerable, habiéndose completado la segunda fase en la medida deseada, ya que no resulta práctico el obtener la compactación total, para lo cual no debería emerger ninguna burbuja a la superficie.

De lo anterior se deduce la necesidad de que el operario que desempeñe la función de vibración del hormigón tenga la formación y experiencia adecuada. A esto se le añade el hecho de que otros posibles indicadores de las fases por las que pasa el proceso de vibración son, el sonido del vibrador y el tacto del mismo. Estos varían relacionados con la frecuencia. Al introducir el vibrador la frecuencia se reduce notablemente, incrementándose durante el proceso para mantenerse constante una vez ha terminado el proceso.

Cuando en ocasiones no es posible debido a la disposición de las armaduras llegar al hormigón, puede ser útil el vibrar pequeñas porciones de armaduras. Esto a pesar de las críticas que ha recibido, no presenta problemas de adherencia para las armaduras siempre y cuando el hormigón tenga una movilidad suficiente y su consistencia sea blanda. De hecho este tipo de vibración tiende a liberar el aire ocluido bajo las barras situadas en las capas superiores mejorando su adherencia. El empleo de vibradores internos sin embargo presenta la desventaja del deterioro de estos por lo que puede ser recomendable el empleo de vibradores de encofrados (externos).

Form vibration

It is highly important for vibration to be as uniform as possible across the entire area of the form, for which purpose the formwork should be sufficiently rigid and the vibrators distributed evenly. Initially, spacing of from 1.2 to 2.4 m may be tested. Amplitude and frequency distributions must be ascertained throughout the member to judge whether the spacing is suitable, preferably by taking measurements, which is the recommended procedure, although a rough indication may be obtained by running one's hand over the form. Excessive local vibration must also be avoided and the use of vibrators on which frequency can be regulated is recommended, since this facilitates adjustment processes.

As far as the placement of the concrete in moulds is concerned, it should be noted that the layers must be shallower than in internal vibration, with depths of from 25 to 40 cm, and each course must be vibrated separately. Vibration time is also substantially longer than in internal vibration and may range anywhere from 2 to 30 minutes.

Since in most cases the principal motion is at right angles to the contact surface, air suction may occur in the gap between the concrete and the form. This is a particularly sensitive problem at the top of vertical forms, where further layers of concrete are not poured to fill in any possible voids. The supplementary use of internal vibrators in such areas is recommended for this reason.

6.2. Items of special interest

Certain questions of specific interest associated with the various uses of concrete are addressed below.

Structural concrete

Members should be designed in such a way that the concrete can be deposited as closely as possible to its final position. Of equal importance is the reinforcement arrangement in members, which should allow for suitable vibrator insertion and spacing between reinforcement; one 10-cm opening is usually required per 60 cm to provide for insertion points. Openings also need to be envisaged in the forms for vibration purposes.

Another extremely important aspect is the choice of the mixture to be used. Plastic concrete with slumps of 6 to 9 cm is suitable for proper placement and consolidation in most cases. Lower slump values may involve placement difficulties and an inordinate effort to reach adequate consolidation. When higher slump concrete is needed for whatever reason, such as the need to pump the mixture, such higher values should be reached by using the respective admixtures as opposed to changing the water/cement ratio. The awareness that different consolidation equipment and methods are needed depending on the kind of concrete used is of crucial importance.

For internal vibration, the number of vibrators to be used depends on the concreting specifications and performance envisaged, although the use of at least two vibrators is always recommended, the first to complete the first consolidation stage and level the mixture and first settlement of the concrete after pouring and the second to release entrained air in the second consolidation stage; operation should be staggered, with the second vibrator lagging behind the first. The use of only one vibrator entails the risk of inadequate completion of the second stage or failure to effect it altogether, due to the need to keep up with the pace of placement.

Where the concrete cannot be internally vibrated, form vibration may be the most suitable approach. This is the case of shallow lifts, heavily reinforced areas, etc. Care must be taken in these cases to avoid overconsolidation in localised spots.

Various different vibration methods may also be combined. The use of form vibrators may need to be supplemented with internal vibrators in the upper areas or in sensitive zones. A combination of internal and surface vibration is used, for instance, to achieve certain finishes on slabs, lightweight or otherwise.

Mass concrete

Mass concrete is understood here to mean non-reinforced concrete or any other concrete subject to high hydration heat values and concomitant changes in volume.

Such concrete requires low cement content, large coarse aggregate and low slump values. This means that consolidation is complex and calls for enormous amounts of energy. The use of both admixtures and additives is important to reduce the energy required.

Given the huge mass of concrete in play, in the event of internal vibration the equipment to be deployed should have very large head sizes; air vibrators are generally used in such cases. In very large masses, sets of gang mounted vibrators are sometimes used.

Concrete placement is usually scaled in these cases due to the need to control temperature and for reasons of economy in connection with the use of forms. For this reason, special attention must be paid to course knitting in this type of concrete, with meticulous vibration of the areas around joints. In such works, knitting the successive

Finalizado el vibrado del hormigón de una manera habitual, en ciertas ocasiones se procede a llevar a cabo un revibrado del mismo. Este proceso consiste en vibrar hormigones que han sido vibrados algún tiempo antes. Este se puede llevar a cabo siempre y cuando el vibrador pueda penetrar en el hormigón bajo su peso propio y sea capaz de convertir al estado líquido de nuevo el hormigón. Con este proceso se consigue incrementar la resistencia a compresión del hormigón, no estando tan claro el beneficio o perjuicio que esto tiene en la adherencia de la armadura. En general se ha observado que reduce la adherencia de las armadura inferiores, incrementado sin embargo la adherencia en las barras superiores, por lo que se debe evitar que el revibrado afecte a las primeras. Esto se da para mezclas de consistencias blandas, no debiendo aplicarse a mezclas de consistencias secas puesto que los efectos en la adherencia son negativos. Es interesante su aplicación en la parte superior de los elementos, donde aparece una mayor cantidad de aire ocluido, aspecto claramente observable en la parte superior del alzado de los muros, donde es especialmente interesante su aplicación para la obtención de unos adecuados resultados superficiales.

Vibración con encofrados

Es de gran importancia conseguir que la vibración sea lo más homogénea y uniforme posible en toda la superficie, para lo que el encofrado deberá disponer de una rigidez adecuada y la distribución de vibradores ser correcta. Inicialmente se puede partir de separaciones de vibradores entre 1,2 y 2,4 m. Para ver la adecuación de la separación es necesario conocer las distribuciones de la amplitud y la frecuencia a lo largo de la pieza, siendo recomendable el llevar a cabo mediciones, si bien esto se puede observar de una manera orientativa pasando la mano por la superficie del encofrado. Se debe también vigilar que no se den puntos localizados de vibración excesiva y es recomendable que se puedan variar los valores de la frecuencia de los vibradores, ya que esto facilita los procesos de ajuste.

Respecto a la colocación de hormigones en los moldes, señalar que ha de hacerse con espesores de tongadas menores que en el caso de la vibración interna, debiendo estar estos entre los 25 y 40 cm, vibrando por separado cada una de las capas. El tiempo de vibrado también es en estos casos notablemente superior al caso de la vibración interna variando entre 2 y 30 minutos.

Debido a que la parte principal del movimiento es en la mayoría de los casos perpendicular a la superficie de contacto entre el hormigón y el encofrado se pueden producir fenómenos de succión de aire que se introduzca en dicha interfase. Esto es especialmente delicado en la parte superior de los encofrados verticales ya que sobre estas no se disponen nuevas tongadas de hormigón que rellenen los huecos que se hayan podido producir. Debido a esto, es recomendable en la mayoría de los casos el complementar la vibración superior de estas zonas con vibradores internos.

6.2. Aspectos particulares

Se exponen seguidamente algunos aspectos particulares a considerar en función de los diferentes empleos que del hormigón se hacen.

Hormigón estructural

Las formas de los elementos deben ser tales que el hormigón pueda ser puesto en obra lo más próximo posible a su posición definitiva. No menos importante serán las condiciones de armado de los elementos, debiendo efectuarse este de manera que sea posible la introducción del vibrador entre las armaduras con los espaciamientos correspondientes, así es habitual requerir espacios de 10 cm aproximadamente cada 60 cm entre puntos de inserción. Deberán preverse también los correspondientes huecos en los encofrados para acceder a vibrar ciertas zonas.

Es de una enorme importancia dentro de los aspectos anteriormente comentados la elección de la mezcla a emplear. Consistencias de tipo blando con asentos de cono entre 6 y 9 cm son adecuadas para una correcta puesta en obra y compactación para la mayoría de los casos. Consistencias menores pueden implicar grandes dificultades en la puesta en obra y esfuerzos desmesurados para una adecuada compactación que deben ser previstos en los casos en los que tales consistencias se hacen necesarias. En caso de necesitar hormigones más fluidos por diversas circunstancias, como la necesidad de bombeo del hormigón, es recomendable el alcanzar mayores asentos del cono mediante el empleo de los aditivos correspondientes, manteniendo las relaciones agua/cemento. Es de vital importancia tener en cuenta que diferentes hormigones necesitan diferentes equipos y métodos de consolidación.

Para la vibración interna, el número de vibradores a emplear dependerá de las características y rendimientos de hormigonado previstas si bien es recomendable el empleo siempre de al menos dos vibradores, el primero para cumplir la primera fase de la compactación nivelando y consiguiendo un primer asentamiento del hormigón tras su vertido y el segundo para la segunda fase de la compactación trabajando retrasado respecto al primero y consiguiendo la evacuación del aire ocluido. En caso de emplear un único vibrador se corre el peligro de que la segunda fase no se complete adecuadamente o no se lleve a cabo por la necesidad de desplazarse al ritmo al que se vierte el hormigón.

layers should be performed by penetrating the entire lower layer with the vibrator. Correct placement joint treatment calls for properly flattened surfaces that must be free of voids and vibrator holes. To achieve this it may be necessary for final vibration to be effected by an operator on snowshoes to eliminate surface flaws.

Vibration times should usually be over 10 s, the normal range being from 10 to 20 s.

One common example of the use of mass concrete is in roller-compacted concrete, where slump values decline to 0 cm and in which consolidation is called compaction. Placement courses of from 20 to 30 cm are recommended, along with roller-compactor vibrators with static linear masses ranging from 1800 to 4500 kg/m. After the first pass, in which the roller is generally in the static (i.e., non-vibration) mode, a number of vibratory mode passes are run. A final finish pass is then effected approximately 1 hour after the last of the series of vibrational passes. Attention should be paid to ensure that a suitable (20-cm) overlap is maintained between rolling lanes and that no damage is caused to the preceding lane if initial setting has begun.

When fresh concrete is deposited on a layer of hardened concrete, the contact surface should be clean and covered with a 10-cm layer of a cement-paste rich mortar prior to placement.

The number of passes is generally from 4 to 6, although this should be empirically established for the equipment, mixtures and course depths used on initial test layers poured prior to beginning work.

Slabs and pavements

In slabs and pavements, in addition to suitable consolidation, good resistance to abrasion and a surface finish suited to use must be ensured, which entails selecting the right mixture. Plastic concrete with slump values of under 5 cm is commonly used to achieve suitable abrasion resistance. The use of more flowing mixtures may involve the appearance of large amounts of cement paste on the surface, in turn causing unacceptable, low abrasion-resistant finishes. Slump values of under 3 cm, however, may call for inordinate consolidation efforts that impact productivity. Moreover, since the consolidation equipment is chosen on the grounds of mixture characteristics and equipment specifications remain constant, concrete specifications must also be kept constant to prevent consolidation flaws.

Both surface and internal vibration may be used for depths of less than 20 cm, whereas only internal vibrators are recommended for thicker courses. Surface vibration, moreover, is only applicable to non-reinforced members or members scantily reinforced with welded wire fabric. Internal vibration may also be required even with depths of under 20 cm in non- or scantily reinforced members where productivity targets require equipment to progress rapidly.

Surface vibrating equipment consisting of vibrating screeds is well adapted, when applicable, to this type of members, since in most cases it provides for both consolidation and surface finish in one and the same operation. Screeds are drawn over edge forms or screed rails that mark the elevation desired and the width is generally the same as the pavement or slab lane to be laid. Low frequency, high amplitude equipment should be used to ensure consolidation from top to bottom, with frequencies ranging from 3,000 to 6,000 r.p.m. (50 to 100 Hz). Where they are used for the surface finish only, low amplitude, high frequency vibrating screeds may be used, although special care should be taken to avoid high concentrations of fines on the surface. Internal vibrators may be used as a supplement in surface vibration in areas next to form walls, ducts, etc.

When surface vibrators are used it should be borne in mind that while a certain surcharge in front of the leading straightedge is needed for a uniform surface, it should not be allowed to build up since this may dampen and diminish the effectiveness of consolidation. Two passes of the vibrating screed are recommended, the first for consolidation and flattening and the second to obtain the desired surface finish, varying the frequency accordingly as mentioned above.

Where internal vibrators are used, suitable productivity calls for gang-mounting vibrators on horizontal frames which, like screed vibrators, are drawn over edge boards or screed rails. The width should be the same as the paving width, which in some cases may be up to 7.5 m and entail mounting from 10 to 14 vibrators. Screeds are set behind the vibrators for the surface finish. In such cases vibrators must be operated simultaneously and they must be capable of vertical movement for adjustment purposes. Recommended frequencies range from 8,000 to 12,000 r.p.m. (130 to 200 Hz).

When internal vibrators are used for pavements, they should remain in the concrete mixture at all times, without penetrating the sub-base, which could cause contamination of the concrete. They should be kept at a distance of at least 5 cm from the bottom for this reason. This may call for angular adjustment of the vibrators. At depths of less than 25 cm, the vibrators should be placed in a horizontal or nearly horizontal position, whereas for greater depths they can be set vertically or nearly vertically, taking care to keep them off the bottom but underneath the concrete surface. The vibrators should have a centrifugal force of around 4,000 kN and spacing should be on the order of 60 cm. Reinforcement arrangement may call for variations in vibration parameters. Thus, for instance, where concrete is placed around reinforcement in two stages, it is important to vibrate the concrete in both. If the reinforcement is introduced after concreting to the full depth, the concrete must be vibrated before the reinforcement is inserted.

En los casos en los que no es posible llevar a cabo la vibración interna del hormigón puede ser especialmente interesante el recurrir a la vibración con encofrados. Esto se da en elementos de espesores delgados, zonas fuertemente armadas, etc. Se ha de tener cuidado en estos casos el no llevar a cabo sobreconsolidaciones en puntos localizados.

También es posible el combinar diferentes métodos de vibración. Cuando se emplean vibradores de encofrados puede ser necesario el empleo de vibradores internos en zonas superiores o junto a zonas delicadas. También se emplea por ejemplo la combinación de vibración interna del hormigón con vibradores superficiales que consiguen un cierto acabado en losas, aligeradas o no.

Hormigón en masa

Se entenderá aquí por hormigón en masa aquel que no dispone de armado, y todos aquellos con altos calores por la hidratación de grandes masas o a cambios de volumen importantes.

Estos hormigones requieren condiciones especiales de dosificación con bajos contenidos de cemento, tamaños grandes de áridos y bajas consistencias. Esto implica que la consolidación sea un proceso complicado y con la necesidad de grandes energías. Será muy importante para reducir estos esfuerzos el emplear en las dosificaciones tanto adiciones como aditivos.

Dadas las grandes masas de hormigón puestas en juego en caso de emplear vibración interna los equipos a emplear deberán constar de grandes dimensiones de la cabeza siendo empleados en estos casos en una proporción importante los vibradores neumáticos. Para grandes producciones se han empleado en algunos casos baterías de vibradores montadas en una estructura.

Es habitual la puesta en obra del hormigón en estos casos, debido a la necesidad de control de las temperaturas y la economía de encofrados, de una manera escalonada. Por lo tanto, en este tipo de hormigones se ha de prestar especial atención al cosido de las juntas vibrando concienzudamente las zonas próximas a los distintos frentes. Para el cosido de las sucesivas tongadas, en estos casos es interesante el penetrar con el vibrador en la totalidad de la capa inferior. Para que el tratamiento de las juntas de discontinuidad del hormigonado se puedan llevar a cabo de una manera adecuada, las superficies han de quedar correctamente niveladas y libres de huellas y agujeros de retirada de los vibradores. Para conseguir esto puede ser necesario que la última pasada de vibración se realice por un operario sobre raquetas que elimine los defectos superficiales.

Los tiempos de vibración deberán mantenerse en general por encima de los 10 s, siendo habitual rangos entre 10 y 20 s.

Un caso habitual de los hormigones en masa lo constituyen los hormigones de consistencias secas de incluso cono 0 cm cuyo proceso de densificación se denomina apisonado. La puesta en obra es recomendable que se lleve a cabo mediante tongadas entre 20 y 30 cm empleando en la compactación compactadores vibratorios de rodillos con cargas estática lineales que varían entre los 1800 y los 4500 kg/m. La primera pasada suele darse sin vibración pasando a continuación a dar las sucesivas ya con vibración para terminar con una última pasada también sin vibración aproximadamente 1 hora después de la última de la anterior serie de pasadas. Se debe prestar atención a un adecuado solape de las líneas de hormigonado en la vibración, debiendo solaparse ambas al menos 20 cm y teniendo cuidado de no dañar la línea anterior si esta ha comenzado su endurecimiento inicial.

Cuando el hormigón fresco se disponga sobre una capa de hormigón endurecido, la superficie de contacto deberá estar limpia y se deberá disponer una capa de mortero rico en pasta de cemento de aproximadamente 10 cm de espesor previo a la colocación del hormigón habitual.

El número de pasadas a efectuar suele situarse entre 4 y 6, si bien este deberá fijarse experimentalmente para los equipos, mezclas y espesores de tongadas a emplear a través de tongadas de prueba iniciales previas al comienzo de los trabajos.

Losas y pavimentos

En los casos de losas y pavimentos, es importante además de conseguir una compacidad adecuada, obtener unas buenas características superficiales de resistencia a la abrasión y rugosidad superficial de acuerdo con su uso, lo que implica realizar una adecuada selección de la mezcla. Es usual que para conseguir una correcta resistencia a la abrasión se empleen mezclas de consistencia plástica con asientos en cono inferiores a los 5 cm. En caso de la utilización de hormigones de consistencias más fluidas, esto puede conllevar la aparición de grandes cantidades de pasta de cemento en la superficie que implicarían rugosidades que pueden ser inadecuadas y resistencias bajas a la abrasión. Por el contrario, asientos de cono por debajo de los 3 cm pueden requerir esfuerzos de consolidación desmesurados que incidan en la productividad. Por otro lado, dado que los equipos de compactación se regularán de acuerdo con la mezcla permaneciendo sus características constantes, es fundamental la uniformidad de las características de dicha mezcla para que no aparezcan defectos de compactación.

Para espesores inferiores a 20 cm es posible el empleo de vibración superficial e interna, mientras que para espesores mayores tan sólo será recomendable el empleo de vibradores internos. Por otro lado, sólo será aplicable

When the reinforcement is placed on chairs prior to concreting, care needs to be taken to ensure that the concrete underneath the reinforcement is properly consolidated. Hand-held internal vibrators are recommended to knit the concrete in all joint assemblies. In both cases a practical measure of suitable consolidation is a uniform texture and sheen on the surface with the aggregate visible on the surface.

When concreting takes place in two stages for whatever reason, the second course must be placed before the first has finished setting and the two should be knitted by vibrating. Concrete may be deposited in two separate operations to optimise materials, with higher grade concrete in the upper course. Where either the surface course or the entire depth contains fibre-reinforced concrete, vibrators must be spaced closer than specified above and longer vibrating times are needed for satisfactory consolidation.

In the event of concrete requiring a certain amount of entrained air for frost resistance, care should be taken to ensure that the air volume does not dip under the minimum specified level during consolidation.

When fixed formwork is used, after removal, the edges must be checked for surface characteristics and consolidation parameters should be varied if honeycombing or other flaws are observed. When slipforms are used, the rate of advance should be as uniform as possible to prevent surface tearing due to the friction between the paver and the concrete when speed is reduced or work is stopped altogether. Should the concrete tear, the damaged areas have to be repaired by revibration.

In large works consolidation should be monitored by analysing cores taken from the slabs or pavements; the cores extracted to check thickness may be used for this purpose. Such samples should be checked for surface mortar, which should not be over 3 mm thick for the reasons advanced above, and for density, which is a good indication of the degree of consolidation reached. Nuclear densimeters may also be used for density measurements.



Fig. 15

**Proceso de vibración con regla vibrante
Vibration procedure using a vibrating screen**

Lightweight and heavyweight concrete

The foregoing comments on normal concrete are generally applicable to lightweight and heavyweight concrete, but the special characteristics of the latter two with regard to aggregate proportioning make it necessary to take special precautions in certain respects.

One of the main factors to bear in mind is the greater tendency towards segregation in such concrete during vibration, which calls for special prevention measures. Firstly, the recommended slump values are from 4 to 7 cm. Higher values may cause light aggregates to float or the heavy ones to sink.

Entrainment of a certain volume of air is recommended in lightweight concrete, since this increases cohesiveness and helps prevent lightweight aggregates floating to the surface. Nonetheless, due to the lighter specific weight of such mixtures air bubbles rise to the surface less readily so vibration times must be slightly longer than for normal concrete; times of around 10 s usually suffice, while course thickness should be about 20 per cent less than specified for normal concrete. Another recommended practice is to position vibrators horizontally at about the same spacing as if inserted vertically.

In heavyweight concrete attention should be lent to the higher pressure exerted on forms during vibration. The radius of action of internal vibrators is smaller in this case than in normal concrete so insertion points should be spaced more closely. By contrast, higher frequency vibrators, of around 11,000 r.p.m., and shorter vibration times, on the order of 5 s, should be used.

la vibración superficial a aquellos elementos que no dispongan de armadura o esta sea una ligera malla. En caso de desear una elevada producción con altas velocidades de desplazamiento, puede ser necesario el empleo de vibración interna incluso con espesores inferiores a 20 cm y sin armadura o siendo esta ligera.

Los equipos de vibración superficial constituidos por reglas vibrantes se adaptan perfectamente, cuando son aplicables, a este tipo de elementos ya que se consigue en la mayoría de los casos en una misma operación además de la consolidación el correspondiente acabado superficial. Se desplazan sobre los encofrados laterales o raíles que marcarán la nivelación deseada y tendrán en general el ancho de la franja de pavimento o losa a ejecutar. Deberán emplearse equipos de baja frecuencia y alta amplitud para que se alcance con la compactación a la totalidad del espesor, variando las frecuencias entre las 3.000 y las 6.000 r.p.m. (50 a 100 Hz). En caso de que su empleo sea tan sólo para alcanzar el acabado superficial es posible emplear reglas vibrantes de baja amplitud y alta frecuencia, debiendo prestarse especial atención en estos casos a que no aparezcan concentraciones de finos excesivas en la superficie. Como complemento a los equipos de vibración superficial se emplean vibradores internos junto a encofrados, conductos, etc.

Se debe tener en cuenta durante el empleo de vibradores superficiales que si bien es necesario la acumulación de una cierta carga de hormigón frente a la regla para que la superficie quede uniforme, el espesor de esta debe controlarse porque grandes acumulaciones amortiguarán el efecto de la consolidación disminuyendo su eficacia. Es recomendable que el proceso se lleve a cabo mediante dos pasadas de la regla vibrante, la primera para consolidar y nivelar y la segunda para obtener el acabado superficial deseado, para lo cual se variará la frecuencia de acuerdo con lo comentado anteriormente.

En caso de emplear vibradores internos, para una producción adecuada es habitual el empleo de baterías de vibradores soportados por una estructura que al igual que en el caso de las reglas vibrantes se desplaza sobre los encofrados o raíles. El ancho debe ser igual al de la franja a ejecutar pudiendo llegar en algunas ocasiones a suponer anchos de hasta 7,5 m teniendo entre 10 y 14 vibradores acoplados. Tras dichos vibradores se disponen reglas para el acabado superficial. Los vibradores en estos casos deben ser accionados simultáneamente y debe ser posible su movimiento ascendente - descendente para su regularización. Es recomendable el empleo de frecuencias que varíen entre las 8.000 y las 12.000 r.p.m. (130 a 200 Hz).

En pavimentos, con vibradores internos, estos deben permanecer durante su empleo dentro de la masa de hormigón evitando el contacto con la subbase, lo cual podría conllevar contaminaciones del hormigón, por lo que deberán situarse al menos a 5 cm del fondo. Para que esto sea posible en algunas ocasiones puede ser necesario disponer los vibradores formando un cierto ángulo con la vertical o incluso horizontales. Con espesores inferiores a 25 cm los vibradores deben disponerse horizontales o formando un ligero ángulo con la horizontal, mientras que para espesores mayores estos estarán en posición prácticamente vertical cuidando la distancia al fondo y permaneciendo por debajo de la superficie del hormigón. Los vibradores a emplear deberán presentar una fuerza centrífuga entorno a los 4000 kN y el espaciamiento se situará próximo a los 60 cm. Con relación a la disposición de la armadura la vibración puede variar. Así, en caso de disponerse la armadura realizando el hormigonado en dos fases es importante tener en cuenta que ha de vibrarse el hormigón en ambas fases. Si la armadura se introduce posterior al hormigonado de la totalidad del espesor mediante vibración es necesario realizar la vibración antes de la introducción de dicha armadura. Cuando la armadura se ha colocado previa al hormigonado posicionándola mediante patas se debe cuidar que el hormigón bajo la armadura se encuentre correctamente consolidado. En todas las zonas en las que se den juntas de hormigonado recomendamos el empleo de vibradores internos manualmente para el cosido de los hormigones. Para ambos casos de consolidación una medida práctica de una adecuada consolidación será observar una textura uniforme y brillante en la superficie con los áridos descubiertos en la superficie.

Cuando por diversas circunstancias el hormigonado se lleve a cabo en dos fases es importante que la colocación del segundo hormigón se produzca antes de que el primero haya terminado su proceso de fraguado, tratando de coser mediante vibración ambas capas. El llevar a cabo la disposición del hormigón en dos tandas puede ser debido a una optimización de materiales empleando hormigones de mejor calidad en la zona superior. En caso de que se empleen en la parte superior hormigones reforzados con fibras o este se lleve a cabo en todo el espesor el espaciamiento entre vibradores ha de ser menor que los especificados anteriormente y el tiempo de vibrado mayor.

Se deberá prestar atención en los casos en los que se empleen hormigones en los que sea necesaria una cierta cantidad de aire ocluido como medida preventiva de la heladicidad a que no se reduzca dicha cantidad por debajo de la mínima durante la vibración.

Si los encofrados laterales son fijos, una buena práctica es, una vez retirados estos, observar los cantos para ver las características superficiales que presentan, variando los parámetros de consolidación en caso de que aparezcan nidos de grava u otros defectos. Por su parte si los encofrados son deslizantes la velocidad de avance debe ser lo más uniforme posible evitando así que se produzcan desgarramientos del hormigón tras reducciones de la velocidad o paradas, debido al aumento del rozamiento con el endurecimiento del hormigón. Si estas se diesen será necesario reparar las zonas dañadas procediendo a una revibración de las mismas.

Es igualmente recomendable en grandes producciones llevar a cabo un seguimiento de la consolidación mediante el análisis de testigos tomados de las losas o los pavimentos, pudiendo emplear los que se extraigan para

7. CONSIDERATIONS FOR CONSOLIDATION IN CONGESTED AREAS

It should be borne in mind when consolidation procedures are designed that the possible existence of special circumstances may call for special precautions. The main factor in such cases is the appearance of congested areas due to dense reinforcing steel, i.e., with small distances between reinforcement elements or between them and the walls of the formwork, particularly when such distances approach the lower limit of 1.25 times the maximum aggregate size. Such situations generally appear in splices, bends or beam-column connections or when reinforcement is layered but not vertically aligned.

Moreover, the existence of embedded elements of different kinds such as prestress hardware, ducts, raceways, anchorages, boxouts, etc., render concrete placement and consolidation most difficult and consideration must be given to the spacing of such elements or between such elements and the reinforcing steel similar to those discussed in the preceding sections.

Another factor in this connection is the use of complex form design and rough surfaces that obstruct concrete and entrained air motion along such surfaces, making the use of suitable form release agents of utmost importance.

The existence of such areas may lead to a number of adverse effects if proper measures are not taken during design and execution to prevent them. Some of the most common are discussed below.

- *Honeycomb and other surface flaws:* This may be due to the use of aggregate size larger than the spacing between reinforcing steel or other elements, with the consequent entrapment and build-up of coarse aggregates in certain areas and the failure of the mortar to fill the voids between them. It may also be due to the inability of the vibrator to reach all parts of the structure. Finally, a high concentration of reinforcing steel extending beyond the formwork may hinder operator mobility, leading to fatigue and discouragement, which has a negative impact on workmanship and consolidation.
- *Low concrete quality:* Poor consolidation leads to a higher entrapped air content, with the concomitant effects of increased permeability, lower strength and poor reinforcement bonding.
- *Increased cleaning, form and placement costs:* Pre-placement cleaning in areas where reinforcing steel, ducts, etc. are dense is much more tedious. Moreover, since concrete consolidation in such areas calls for more vigorous vibration the thrust generated is greater and as a result requires more robust forms. This often involves special provisions in connection with forms such as side ports and other accesses to place and consolidate the concrete. Out-of-the-ordinary procedures, such as pumping and elephant trunks, may also be needed for suitable depositing.



Zona de gran densidad de armaduras
Zone with a high density of reinforcement



Defecto en zona de gran densidad de armaduras
(Obsérvese que el tramo superior del pilar, hormigonado conjuntamente con la viga, queda sin aporte de hormigón)
Defect on the reinforcement high density zone
(Notice that the top of the column remains without concrete inflow)

Fig. 16

comprobar los espesores. Se deberá observar en estos casos la acumulación de mortero en la superficie, no debiendo esta superar los 3 mm por las razones anteriormente expuestas así como las densidades obtenidas, las cuales serán un buen índice del grado de consolidación alcanzado. Para la mediada de las densidades también es posible el empleo de densímetros nucleares.

Hormigones ligeros y pesados

En general los aspectos comentados para hormigones de peso normal son aplicables para los hormigones ligeros y los hormigones pesados, pero las características particulares de estos hormigones respecto a los áridos empleados en su dosificación hacen que sea necesario tener precauciones especiales en algunos aspectos.

Uno de los aspectos principales a tener en cuenta es la mayor tendencia de estos hormigones a la segregación durante la vibración, por lo que se deberán tomar medidas especiales para evitarla. En primer lugar es recomendable que la consistencia sea tal que los asentos de cono se sitúen entre 4 y 7 cm. Valores mayores del cono pueden conllevar que los áridos ligeros floten o que los áridos pesados se hundan.

Con los hormigones ligeros es recomendable la introducción de una cierta cantidad de aire en la mezcla, ya que esto aumentará la cohesión de la misma evitando la tendencia a la segregación de los áridos ligeros por flotación. Por otro lado, en estos casos debido al menor peso específico de la mezcla la tendencia a la ascensión de las burbujas de aire es menor por lo que los tiempos de vibración deberán ser ligeramente mayores que para los hormigones normales siendo suficiente normalmente tiempos de unos 10 s, y los espesores de las tongadas deberán ser un 20 por ciento menores que los comentados para los hormigones normales. Otra práctica adecuada es la introducción de los vibradores horizontalmente con los mismos espaciamientos que si estos se introdujeran verticalmente.

Para los hormigones pesados se debe prestar atención a los mayores empujes que sufrirán los encofrados durante el proceso de vibración. El radio de acción de los vibradores internos en estos caso es menor que en el caso de los hormigones normales por lo que requieren que las distancias entre las inserciones sean también menores. Por el contrario es recomendable emplear vibradores de rangos de frecuencia elevada próxima a las 11.000 r.p.m. con tiempos de vibración menores, esto es, próximos a los 5 s.

7. CONSIDERACIONES PARA LA COMPACTACIÓN DE ZONAS DE GRAN DENSIDAD DE ARMADURAS Y DIFÍCIL ACCESO PARA EL HORMIGÓN

En el momento de afrontar el proceso de compactación hay que tener en cuenta que se pueden dar situaciones especiales que requieren a su vez precauciones especiales. El principal factor en estos casos es la aparición de zonas de gran densidad de armadura con distancias escasas entre armaduras o entre estas y los bordes del encofrado, especialmente cuando estas distancias se aproximan a 1,25 veces el tamaño máximo del árido. Estas situaciones se presentan principalmente en zonas de solape, cruces, giros y nudos, siendo también notable el problema cuando al disponer las armaduras en varias capas estas no coinciden en la alineación vertical.

Por otro lado, la disposición de elementos embebidos de diverso tipo como son los conductos de pretensado, tubos para el alojamiento posterior de cables de instalaciones, anclajes, etc. y la disposición de elementos para la formación de huecos hacen que el hormigón sea puesto en obra y consolidado difícilmente bajo estos, debiendo tenerse en cuenta consideraciones de separación entre dichos elementos o entre estos y las armaduras similares a los ya comentados.

Un aspecto que también influye es la aparición de formas complicadas de encofrados y de superficies rugosas que dificulten el movimiento del hormigón y el aire ocluido a lo largo de tales superficies, haciendo que el empleo de los desencofrantes adecuados juegue un papel muy importante.

La aparición de este tipo de zonas puede conllevar diversos aspectos negativos si no se toman las medidas adecuadas durante el proyecto y la ejecución. Entre estos son de destacar:

- *Aparición de nidos de grava y otros defectos superficiales:* Esto puede deberse a que el tamaño de los áridos sea superior a la separación entre armaduras o elementos quedando por tanto retenidos no rellenándose todos los huecos produciéndose la acumulación de áridos gruesos en ciertas zonas. También se puede deber a la imposibilidad de acceder con el vibrador a algunas partes de la estructura. Por último, la abundancia de armadura saliente del encofrado puede dificultar la movilidad del operador produciendo su hastío y desgana bajando la capacidad de trabajo y consolidación.
- *Bajas de calidad en las características del hormigón:* Una mala compactación hará que la cantidad de aire ocluido sea mayor, aumentando por tanto la permeabilidad y disminuyendo la resistencia y la adherencia de la armadura.
- *Incremento de costes de limpieza, encofrados y puesta en obra:* Con la aparición de zonas densas de armadura y conductos, la limpieza de los fondos previa al hormigonado será mucho más laboriosa. Por su parte debido a que en estas zonas la vibración para compactar el hormigón ha de ser más enérgica los empujes que aparecerán como consecuencia de esto serán mayores requiriéndose por tanto encofrados más robustos, necesitándose en numerosas ocasiones llevar a cabo disposiciones especiales de los encofrados empleando

7.1. Design stage considerations

- ✦ **Reinforcing steel arrangement:** Reinforcing steel must be arranged in a way to allow for suitable concreting and consolidation.

With respect to the former it is usually recommended for spacing between reinforcement or between reinforcement and forms to be 1.25 times the maximum aggregate size. While this value may prove to fall short of needs in some cases it is an absolute minimum which cannot be reduced. Nonetheless, for the usual maximum size of aggregate particles in construction (20 mm, for instance), this may prove to be insufficient for inserting vibrator heads in slabs and beams. Hence, spacing between reinforcing elements must be greater, at least 50 mm. This can be followed either as a general rule or in certain points only, although the latter alternative may render vibration more complex since the operator has to feel around in the concrete for the cavities where the vibrator can be inserted.

Possible solutions for suitable reinforcing steel arrangement include the use of larger diameter rebar, bundling bars or layering the reinforcing steel. When none of these is possible it may be necessary to increase structural member dimensions to ensure suitable placement and reinforcing cover. Circumstances are even more complex in connection with splicing, since lapping bars may lead to the inadmissible disappearance of any clearance between them. Mechanical splicing or welding may be used in such situations. Another practical solution, splicing location permitting, is to overlap the bars vertically. The feasibility of this procedure should be analysed in terms of the reduction of useful depth it entails in the splice area, although this is normally admissible.

- ✦ **Arrangement of embedded elements and boxouts:** Given the adverse effects that the use of such elements involves, their deployment should be optimised, attempting to use the smallest possible sizes and rounded shapes and avoiding angles and flat surfaces under which it is difficult for the concrete to flow. The layout of such elements should, as far as possible, avoid congestion that would render execution even more difficult.

In this regard, in (27), Prof. José Calavera sets out the "two golden rules of concrete placement", reproduced below:

1. Concrete should reach its final position over an essentially vertical run.
2. When held in a vertical position, the vibrator should reach the bottom of the form.

7.2. Construction phase considerations

- ✦ **Concrete mixtures:** Two essential factors should be considered. The first is concrete consistency and the second the maximum size aggregate to be used to manufacture it.

With respect to the former, the use of flowing concrete with high slump values is recommended, achieved through the use of superplasticiser admixtures to avoid any increase in the water/cement ratio that would diminish concrete quality. Further benefits can be obtained if such admixtures also have retarding effects, since placement may be a long and complex process.

The advantage of using smaller size aggregate than in the rest of the structure is obvious in such cases, and may involve choosing the next smaller size on the scale, i.e., using 20-mm aggregate if the maximum size for the structure in general is 40 mm or 12-mm aggregate if the general size is 20 mm.

- ✦ **Formwork arrangement and design:** Vertical forms that cannot be accessed from above must be equipped with side ports to facilitate concreting and vibrator insertion. They may be positioned all along the forms at different heights, so that as the concrete reaches each height the respective port is sealed and the next higher one used. This kind of device may also be used when boxouts cut through the entire form. In such cases the mobility of the lower part of the boxout frame is maintained as an access for concrete placement and vibration until the concrete reaches the respective level, when it is sealed. If this is not possible, vibrating tubes have to be run through the opening for concrete placement, since if neither of the two former alternatives is possible the concrete has to be positioned horizontally underneath the opening, which may entail segregation and unsuitable concrete consolidation in that area.
- ✦ **Consolidation equipment:** Vibrators with small diameter heads need to be used, given the scant room available in congested areas. External vibrators may be indispensable in the event of thin layers and recommended as well around openings. Small diameter head vibrators are recommended with high slump values where the maximum size aggregate is small, whereas larger diameter vibrators are more suitable for normal worksite concrete because of the enhanced vibration effects and improved performance afforded.
- ✦ **Placement:** Concrete should be deposited as close as possible to its final position. For this reason concrete is usually pumped to congested areas rather than lifted with cranes and buckets. Pumping may be supplemented with the use of elephant trunks attached to the end of the steel-reinforced pump hose. These trunks may be

trampillas y oros accesos para poder realizar el hormigonado y la compactación. En cuanto a la puesta en obra también será necesario llevarla a cabo fuera de los procedimientos habituales en multitud de ocasiones requiriendo el empleo de bombeo y trompas de hormigonado.

7.1. Consideraciones en la fase de proyecto

- ◆ **Disposición de armaduras:** La disposición de las armaduras ha de ser tal que permita el acceso del hormigón y los equipos de compactación adecuados.

Para lo primero es habitual recomendar que la separación entre las armaduras o entre estas y los encofrados sea superior a 1,25 veces el tamaño máximo del árido. Si bien este valor puede resultar escaso en ciertas ocasiones constituye un valor mínimo absoluto que no es posible reducir. Sin embargo, para los tamaños máximos de árido habituales en construcción (20 mm por ejemplo) esto no hará posible la introducción de las cabezas de los vibradores en ciertos casos como en forjados, losas y vigas. Será necesario por tanto que las separaciones entre armaduras sean superiores, al menos a 50 mm. Esto se puede llevar a cabo de una manera generalizada o al menos en ciertos puntos, si bien esto último complica la ejecución ya que el operario deberá buscar tanteando durante la vibración dónde se encuentran las cavidades en las que el vibrador puede acceder.

Algunas de las posibilidades para llevar a cabo una disposición de armaduras adecuadas puede ser el empleo de diámetros mayores de armaduras, el empleo de grupos de barras o la disposición de armaduras en capas. Cuando lo anterior no sea posible será necesario aumentar las dimensiones de los elementos estructurales para una adecuada disposición y alojamiento de las armaduras. La situación es todavía más complicada en el momento en el que es necesario llevar a cabo el empalme de armaduras. En estos casos si se solapan las armaduras los espacios entre estas pueden desaparecer, lo cual no es admisible. Para salvar esta solución es posible emplear empalmes mecánicos o soldaduras. Una solución práctica puede ser, en caso de que la ubicación en la que se lleva a cabo el solape lo permita es el realizar este en vertical, debiendo analizar la viabilidad de llevar esto a cabo en función de la reducción de canto útil que esto conlleva en la zona del solape, si bien esta reducción suele ser admisible.

- ◆ **Disposición de elementos embebidos y elementos empleados en la formación de huecos:** Dado el aspecto perjudicial que el empleo de estos elementos conlleva se deberá tratar de optimizarse su utilización, buscando el empleo de elementos del menor tamaño posible y de formas preferiblemente redondeadas evitando aristas y planos bajo los que el hormigón tendrá un difícil acceso. En la medida de lo posible será recomendable llevar a cabo la distribución de estos elementos evitando concentraciones que dificulten todavía más la ejecución.

En este sentido, en (27) el Profesor José Calavera recoge las "dos reglas de oro en la puesta en obra del hormigón", las cuales reproducimos a continuación:

1. El hormigón debe llegar a su posición con un recorrido fundamentalmente vertical.
2. El vibrador debe poder llegar verticalmente al fondo del encofrado.

7.2. Consideraciones en la fase de ejecución

- ◆ **Mezclas de hormigón:** Hay dos factores fundamentales a tener en cuenta. El primero será la consistencia del hormigón y el segundo el tamaño máximo de árido a emplear en la fabricación del mismo.

Respecto al primero, es conveniente el empleo de hormigones de consistencia fluida, con valores de asentos de cono elevados, consiguiendo esto mediante el empleo de aditivos de tipo superplastificante que permitan no incrementar la relación agua/cemento y no quede mermada así la calidad del hormigón. Será ventajoso en general el que los anteriores aditivos conlleven también un efecto retardante ya que la puesta en obra puede ser complicada y lenta.

La ventaja del empleo de tamaños máximos de árido inferiores a los empleados para el resto de la estructura es clara en estos casos, pudiendo pasarse al escalón habitual anterior del citado tamaño, esto es, emplear árido de 20 mm si el general para toda la estructura es de 40 mm, o emplear árido de 12 mm si el general es de 20 mm.

- ◆ **Disposición y diseño de encofrados:** Con encofrados verticales, cuando no sea posible el acceso desde la parte superior será necesario la disposición de trampillas laterales que faciliten el hormigonado y permitan la introducción del vibrador. Estas pueden disponerse según las necesidades a lo largo del encofrado y en diferentes alturas, de manera que al llegar el hormigón a la altura de la correspondiente trampilla esta se sella y se pasa a emplear la superior. Este tipo de dispositivo también es posible emplearlo cuando los huecos a disponer atraviesan todo el encofrado. En estos casos se deja móvil la parte inferior del marco que forma el hueco como acceso para el hormigonado y vibrado, procediendo a su sellado al alcanzar el hormigón ese nivel. Si esto último no fuera posible llevarse a cabo será necesario la disposición de tubos vibrantes que atraviesen el hueco para el hormigonado, ya que de no emplearse alguna de las dos alternativas planteadas el hormigón tendrá que alcanzar su posición desplazándose horizontalmente bajo el hueco, lo cual conllevará segregación y una inadecuada compactación del hormigón bajo el mismo.

more or less pliable, although fold- or roll-up models are preferred, as they are more versatile. This kind of trunk can be inserted even as the reinforcing steel is being set into place.

When forms are to house elements with long horizontal surfaces, such as embedded steel profiles, slide valves must be used to pressure pump the concrete into place. These valves are set into the formwork for coupling the elephant trunk and pumping the concrete. Once the operation is complete, the valve is closed with a vertical port and the trunk is removed. Other possible placing procedures recommended for these areas include pumping from the bottom of the forms or the use of preplaced aggregate concrete.

8. CONSOLIDATION OF TEST SPECIMENS

The consolidation of test specimens constitutes a special application of concrete consolidation. The legislation in force in different countries establishes the general criteria to be followed. In Spain UNE 83-301-91 defines such standards, although the consolidation criteria are not classified by type of test to be conducted.

Consolidation procedures vary depending on the consistency of the mixture from which the specimen is to be made. The limits set in the UNE code are as follows:

- Mean slump under 40 mm: vibrating table or needle vibrator.
- Mean slump 40 mm or over: rodding.

The use of vibration in specimen consolidation is limited to reduce the risk of segregation if too much entrained air is released when this method is used in very plastic mixtures. Spanish legislation is conservative in this respect, however, since the respective ASTM code (19) only requires rodding for mixtures with a mean slump of over 75 mm, allowing both vibrators and rodding in concrete with slump values of from 25 to 75 mm and requiring vibration in mixtures with slumps of under 25 mm.

As far as the specifications of the vibrating equipment to be used are concerned, the UNE code recommends the following:

- Needle vibrator: The head diameter recommended is 25 mm and in any case less than one fourth of the mould diameter, and the minimum vibration frequency required is 120 Hz (7,200 r.p.m.). These values coincide with the figures given in the ASTM code, which also recommends a frequency of 120 Hz and a diameter of from 25 to 40 mm.
- Vibrating table: A minimum frequency of 40 Hz (2,400 r.p.m.) is recommended, lower than the 60 Hz (3,600 r.p.m.) recommended by the ASTM code, in which the use of even higher frequencies is suggested.

During consolidation, it is important to ensure that the various layers poured to fill the specimen mould are properly knitted, by penetrating the preceding layer with the vibrator or rod.

Where vibrators are used care must be taken to avoid touching the mould walls, inserting them into the middle and keeping them at a distance of over 20 mm from the bottom at all times. No code sets the necessary vibrating time, although consolidation is generally acknowledged to be reached when a film of mortar covers the aggregate particles.

If the area vacated by the consolidation tool does not fill up with concrete when removed, the sides of the mould should be gently tapped with a rubber hammer until the gap is filled.

Where fibre-reinforced concrete is used, ASTM C1018 requires external specimen vibration.

9. CONSOLIDATION AND SURFACE BLEMISHES

It is imperative to take all due precaution prior to executing members in which the concrete surface must be completely smooth or otherwise finished and free of blemishes, since repairs in this respect are costly and the results are rarely fully satisfactory.

Consolidation processes must be carefully monitored in the areas close to the surface and provision made for the use of small diameter vibrators. The vibrator should not come too close to the surface and should never touch the formwork; vibrators should always be inserted inside the reinforcement and never between the rebar and the forms. As blemishes may be due either to overvibration or undervibration, vibration times must be kept within the recommended range. Members should be vibrated from the bottom up, raising the vibrator slowly, since if vibrators are inserted in the opposite direction, from top down, the gap between the concrete and the form will close and obstruct the release of air entrapped in the lower areas.

Mixtures with a high fines content should be avoided, as they are extremely sticky and this also hinders the air entrained in the interface between the concrete and the form wall from rising to the surface. Moreover, any build-up of fines on the surface increases surface shrinkage and causes cracking.

- ◆ **Equipos de consolidación:** Es de destacar que deberá preverse el empleo de vibradores de diámetros de cabeza reducidos dados los escasos huecos existentes en este tipo de zonas. Con espesores delgados puede hacerse imprescindible el empleo de vibradores externos, los cuales son recomendables también en las proximidades de los huecos. Con las mezclas de conos altos y bajo tamaño máximo de árido será recomendable el empleo de vibradores que dispongan de una cabeza de bajo diámetro mientras que al pasar a utilizar los hormigones comunes de la obra convendrá el empleo de vibradores de mayor diámetro que aumenten el efecto de la vibración y mejoren el rendimiento.
- ◆ **Puesta en obra:** El hormigón deberá colocarse lo más próximo posible a su posición definitiva. Para esto es habitual la aplicación en zonas congestionadas de hormigón bombeado en lugar de emplear el cubo movido por grúa. Junto con el empleo de la bomba es posible la utilización de trompas de hormigonado adaptadas a los extremos del tubo de la bomba. Estas trompas pueden ser más o menos flexibles, si bien presentan una mayor utilidad en estos casos las trompas plegables y enrollables por su facilidad de adaptación. Este tipo de trompas pueden introducirse incluso durante la colocación de la armadura.

Cuando dentro del encofrado se disponen largas superficies horizontales, como sucede cuando quedan embebidos perfiles metálicos es necesario el empleo de válvulas laterales para la introducción a presión del hormigón. Estas válvulas se disponen en el encofrado y se acopla a ellas la trompa de hormigonado procedente de la bomba procediéndose al bombeo del hormigón. Una vez terminada la operación se cierra la válvula mediante una trampilla vertical y se retira la trompa. Otros posibles procedimientos de puesta en obra recomendados para estas zonas es el hormigonado por bombeo desde la parte inferior del encofrado o el empleo de hormigón de árido precolocado.

8. COMPACTACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYO

Un caso especial de compactación de hormigón lo constituye la consolidación de probetas para ensayo. Al respecto, la normativa de diferentes países fija los criterios a seguir de manera generalizada. En España la norma UNE 83-301-91 recoge estos aspectos, si bien los criterios de consolidación no se especifican en función del tipo de ensayo a efectuar.

El procedimiento de compactación varía en función de la consistencia de la mezcla a partir de la cual se va a elaborar la probeta. Los límites fijados por la mencionada norma UNE son los siguientes:

- Asiento medio menor de 40 mm: compactación por mesa vibratoria o vibrador de aguja.
- Asiento medio mayor o igual a 40 mm: compactación por picado.

La razón de limitar el empleo de vibración para la compactación de la probeta se debe al peligro de segregación existente y eliminar en exceso la cantidad de aire ocluido al aplicar este método a mezclas muy blandas. No obstante la normativa española es conservadora en este aspecto, ya que la ASTM (19) tan sólo exige como tal el empleo de consolidación por picado para mezclas que presenten un asiento medio de cono superior a 75 mm, entre 25 y 75 mm es posible el empleo tanto de vibradores como de picado, exigiendo el empleo de vibración para consolidar mezclas cuyo asiento medio de cono sea inferior a 25 mm.

En cuanto a las características de los equipos de vibración a emplear la norma UNE recomienda las siguientes:

- Vibrador de aguja: Se recomienda un diámetro de la cabeza de 25 mm, debiendo ser esta inferior a la cuarta parte del diámetro del molde y disponer de una frecuencia mínima de vibración de 120 Hz (7.200 r.p.m.). Estos valores se corresponden con los fijados por ASTM que recomienda también una frecuencia de 120 Hz y un diámetro entre 25 y 40 mm.
- Mesa vibratoria: Se recomienda una frecuencia mínima de 40 HZ (2.400 r.p.m.), valor inferior al recomendado por ASTM que es de 60 Hz (3.600 r.p.m.) indicándose que se debe tender a valores más elevados.

En la consolidación será importante que se cosan bien las diferentes capas vertidas para el llenado de la probeta, penetrando con el vibrador o la barra de picado en la capa previa.

En el caso del vibrador se deberá prestar atención a no tocar los bordes del molde debiendo introducirse centrado y mantenerlo a una distancia siempre mayor de 20 mm del fondo. El tiempo necesario de vibración no queda fijado por ninguna norma, si bien es generalmente aceptado que la consolidación se habrá alcanzado cuando aparezca una película de mortero en la superficie que recubra los áridos.

En caso de que al retirar el elemento de consolidación queden oquedades se recomienda golpear ligeramente el molde con una maza de goma de manera que estas queden cerradas.

En el caso de emplear hormigón reforzado con fibras se requiere el empleo de vibración exterior de la probeta por parte de la ASTM C 1018.

9. COMPACTACIÓN Y DEFECTOS SUPERFICIALES

El tomar las precauciones adecuadas previo a la ejecución de un elemento en el que es primordial obtener una superficie de hormigón uniforme y con la apariencia deseada libre de defectos es fundamental, ya que las reparaciones resultan costosas y en raras ocasiones el resultado es completamente satisfactorio.

El proceso de consolidación de las zonas próximas a la superficie ha de cuidarse. Para esto se deberá prever el empleo de vibradores de diámetro reducido. Deberá evitarse una aproximación excesiva del vibrador a las caras no debiendo nunca entrar en contacto el vibrador con el encofrado, siendo recomendable en todos los casos el introducir el vibrador por dentro de la armadura y no entre la armadura y el encofrado. Es posible obtener defectos tanto por falta de vibración como por exceso de vibración, por lo que se deberá ajustar esta dentro de los márgenes recomendados. La vibración del elemento se ha de llevar a cabo desde la parte inferior ascendiendo lentamente ya que de hacerse de forma contraria comenzando por la parte superior, la interfaz entre el hormigón y el encofrado se irá cerrando dificultando la evacuación del aire ocluido que ha quedado en las zonas inferiores

Se deben evitar las mezclas con excesivos contenidos de finos ya que son altamente cohesivas y se incrementa la dificultad de que el aire ocluido en la interfaz entre el hormigón y la superficie del encofrado pueda ascender y ser liberado. La acumulación de los mismos en la superficie aumenta además la retracción superficial produciéndose fisuraciones.

La puesta en obra deberá ser rápida evitando segregaciones, ya que una vez que estas se hayan producido no será posible alcanzar una adecuada compacidad del hormigón mediante vibración porque no es posible devolver el mortero a los huecos que hayan quedado. Se deberá prestar atención a vibrar intensamente las zonas de juntas de vertido del hormigón cosiendo las tongadas ofreciendo al mismo tiempo un aspecto uniforme, incrementándose el esfuerzo cuando los tiempos transcurridos entre el vertido de las dos tongadas sea elevado. La compactación será mejor y las cavidades superficiales menores cuando las tongadas tengan espesores reducidos por el menor camino a recorrer por las burbujas de aire ocluido. Así es recomendable en estos casos limitar los espesores de las tongadas a 300 mm.

Se recogen a continuación los principales defectos superficiales que se pueden producir describiéndolos brevemente junto con la influencia que haya podido tener en estos la consolidación efectuada.

- ***Nidos de grava:*** Consiste en una distribución irregular de cavidades debido a un defecto en el relleno de los huecos del árido grueso por el mortero. Esto puede deberse a una falta de vibración, no habiéndose roto con esta los efectos de arcos de descarga por acodamiento y rozamiento del árido grueso impidiendo el paso del mortero a esa zona.
- ***Cavidades superficiales:*** Son pequeñas oquedades en la superficie con formas regulares o irregulares y tamaños variables, desde prácticamente imperceptibles hasta próximos a 25 mm, si bien no es habitual que pasen de los 15 mm de diámetro. Aparecen al quedar atrapadas burbujas de aire en la interfaz del hormigón y la superficie del encofrado. Se dan de una manera especial en las mezclas excesivamente cohesivas por la mayor tendencia de estas a retener el aire ocluido y dificultar su ascenso. Pueden aparecer por una falta de vibración debida a tiempos escasos o inserciones parciales del vibrador o por el empleo de equipos inadecuados como sucede por ejemplo al emplear vibradores de amplitudes excesivas. En los elementos verticales la tendencia de aparición se incrementa en la parte superior por lo que se debe tener una mayor precaución en la vibración de estas zonas. Para controlar su aparición es recomendable el empleo de vibradores de alta frecuencia y valores de amplitud de bajos a medios.
- ***Pérdidas de mortero o lechada:*** Son frecuentes en las juntas de encofrados o agujeros para la disposición de arriostramientos, siendo la aparición de estos defectos la de obtener aristas irregulares con aspectos de manchas en la zona afectada por la pérdida. La compactación puede agravar el fenómeno con el empleo de vibradores excesivamente potentes, especialmente en las zonas de juntas que causen deformaciones excesivas de los encofrados expulsando el material. El fenómeno se incrementa con el empleo de mezclas blandas.
- ***Fisuración por asiento plástico del hormigón:*** Esta se produce cuando el hormigón de la parte superior del elemento ha desarrollado tensiones de adherencia en las superficies y el hormigón de la parte inferior continúa asentando. Suelen aparecer sobre armaduras que se encuentran próximas a la cara superior. Para reducir este fenómeno es posible revibrar el hormigón, si bien esto es posible llevarlo a cabo cuando el vibrador puede todavía penetrar en el hormigón bajo su peso propio, ya que de hacerlo demasiado tarde el hormigón podría quedar dañado.
- ***Variaciones de color:*** Se producen cuando de acuerdo con su denominación aparecen aspectos superficiales no uniformes en cuanto a coloración. Pueden deberse a la disposición del vibrador excesivamente próximo a la superficie del encofrado o en contacto con este provocando concentraciones de finos localizadas. En caso de que la vibración sea mediante encofrados puede deberse a una distribución inadecuada de los vibradores o el empleo de encofrados que no cumplen con las condiciones de rigidez necesarias para un reparto uniforme de los efectos de la vibración, produciéndose una sobrevibración localizada que al igual que en el caso anterior produce concentraciones irregulares de finos en la superficie.
- ***Lavado de áridos:*** Aparece como un estría de árido fino causada por la pérdida en ella de la lechada por sangrado del hormigón. Se puede ver agravada por un exceso de vibración o el empleo de vibradores de amplitudes elevadas, de una manera similar a los defectos causados por pérdidas de mortero o lechada.
- ***Líneas de puesta en obra:*** Son líneas oscuras que aparecen en las superficies y muestran los límites de separación entre las diferentes tongadas de hormigón que se emplearon en la construcción del elemento. Están causadas por una inadecuada vibración de estas zonas debida a una falta de vibración o falta de penetración del vibrador en la capa precedente.
- ***Deformaciones superficiales:*** Consisten en irregularidades en la planeidad de la superficie y se agravan por el empleo de vibradores excesivamente potentes para los encofrados dispuestos que pueden deformar a estos últimos causando los mencionados defectos.

- (7) FORSSBLAD, LARS, "Need for Consolidation of Superplastized Concrete Mixes" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (8) OLSEN, MIKAEL P.J., "Energy Requirements for Consolidation of Concrete During Vibration" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (9) LIDA K, y HORMIGONE S., "Properties of Double-Mixed Lean Concrete Subjected to Vibrating Compaction" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (10) BACHE H.H., "The Processing of Fresh Concrete" Concrete Research Laboratory, Karlstrup, Ene 1973.
- (11) ALEXANDER A. MICHEL, "Study of Vibration in Concrete, Mechanics of Motion of Fresh Concrete" Technical Report N° 6 – 750, Report 3, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Sept., 1977.
- (12) KOLENDA J., "The Vibration Process in Compacting by Means of Internal Vibrators" Gdansk, 1972.
- (13) WALZ K., Vibrated Concrete (Ruttelbeton), 3ª Edición, Wilhelm, Ernst and Son, Berlin, 1960.
- (14) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Guide for Consolidation of Concrete, ACI 309.R-96, ACI Manual of Concrete Practice.
- (15) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Behaviour of Fresh Concrete During Vibration, ACI 309.1R-93, ACI Manual of Concrete Practice.
- (16) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Identification and Control of Visible Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces, ACI 309.2R-92, ACI Manual of Concrete Practice.
- (17) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Guide to Consolidation of Concrete in Congested Areas, ACI 309.3R-92, ACI Manual of Concrete Practice.
- (18) "Ensayos de Hormigón. Fabricación y Conservación de Probetas". UNE 83-301-91.
- (19) "Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field". ASTM C.31.
- (20) LONDOÑO N., CIPRIANO ALBERTO, "Vibración del Concreto para Pavimentos" Boletín ICPC N° 79 Oct/Dic 1997. Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón.
- (21) BLAKE L.S., "Recommendations for the Production of High Quality Concrete Surfaces" Cement and Concrete Association. 47.019, Londres, 1974.
- (22) WEDEN, KEN, "Mechanical Equipment for Consolidation of Concrete" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (23) BONIKOWSKY, DAN, "Consolidation of Concrete in Congested Areas at Darlington N.G.S." Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (24) OLSEN, MIKAEL P.J., "Consolidation of Continuously Reinforced Concrete Pavement" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (25) SCHRAEDER E.K., "Compaction of Roller Compacted Concrete" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (26) WHITTING D., SEEGBRETECH G.W. y TAYABJI S., "Effect of Degree of Consolidation on Some Important Properties of Concrete" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (27) JOSÉ CALAVERA RUIZ., "Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón", INTEMAC, Madrid 1999.

10. BIBLIOGRAFÍA

- (1) L'HERMITE R., Y TOURON G., "Vibration of Fresh Concrete (La vibration du beton frais)" Annales, Institut du Batiment et des Travaux Public (Paris), 1948.
- (2) KOLEK J., "Research on the Vibration of Fresh Concrete" Reports. Conference on Vibrations-Compaction Techniques, Budapest, 1963.
- (3) KIRKHAM R.H.H., "The Compaction of Concrete by Surface Vibration" Reports. Conference on Vibrations-Compaction Techniques, Budapest, 1963.
- (4) FORSSBLAD, LARS, "Investigations of Internal Vibration of Concrete" Civil Engineering and Building Construction Series N° 29, Acta Politechnica Scandinavica, Estocolmo 1965.
- (5) RITCHIE, ALISTER G.B., "The Rheology of Fresh Concrete" Proceedings, ASCE, V.94, C01, Ene. 1968.
- (6) TUTHILL, LEWIS H., "Vibration Reexamined" Concrete Construction, V.22 N° 10 Oct. 1977.
- (7) FORSSBLAD, LARS, "Need for Consolidation of Superplastized Concrete Mixes" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (8) OLSEN, MIKAEL P.J., "Energy Requirements for Consolidation of Concrete During Vibration" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (9) LIDA K, y HORMIGONE S., "Properties of Double-Mixed Lean Concrete Subjected to Vibrating Compaction" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (10) BACHE H.H., "The Processing of Fresh Concrete" Concrete Research Laboratory, Karlstrop, Ene 1973.
- (11) ALEXANDER A. MICHEL, "Study of Vibration in Concrete, Mechanics of Motion of Fresh Concrete" Technical Report N° 6 - 750, Report 3, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Sept., 1977.
- (12) KOLENDA J., "The Vibration Process in Compacting by Means of Internal Vibrators" Gdansk, 1972.
- (13) WALZ K., Vibrated Concrete (Ruttelbeton), 3ª Edición, Wilhelm, Ernst and Son, Berlin, 1960.
- (14) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Guide for Consolidation of Concrete, ACI 309.R-96, ACI Manual of Concrete Practice.
- (15) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Behaviour of Fresh Concrete During Vibration, ACI 309.1R-93, ACI Manual of Concrete Practice.
- (16) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Identification and Control of Visible Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces, ACI 309.2R-92, ACI Manual of Concrete Practice.
- (17) AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Guide to Consolidation of Concrete in Congested Areas, ACI 309.3R-92, ACI Manual of Concrete Practice.
- (18) "Ensayos de Hormigón. Fabricación y Conservación de Probetas". UNE 83-301-91.
- (19) "Standard Method of Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field". ASTM C.31.
- (20) LONDOÑO N., CIPRIANO ALBERTO, "Vibración del Concreto para Pavimentos" Boletín ICPC N° 79 Oct/Dic 1997. Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón.
- (21) BLAKE L.S., "Recommendations for the Production of High Quality Concrete Surfaces" Cement and Concrete Association. 47.019, Londres, 1974.
- (22) WEDEN, KEN, "Mechanical Equipment for Consolidation of Concrete" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (23) BONIKOWSKY, DAN, "Consolidation of Concrete in Congested Areas at Darlington N.G.S." Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (24) OLSEN, MIKAEL P.J., "Consolidation of Continuously Reinforced Concrete Pavement" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (25) SCHRAEDER E.K., "Compaction of Roller Compacted Concrete" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (26) WHITTING D., SEEGBRETCH G.W. y TAYABJI S., "Effect of Degree of Consolidation on Some Important Properties of Concrete" Consolidation Of Concrete, SP-96, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
- (27) JOSÉ CALAVERA RUIZ., "Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón", INTEMAC, Madrid 1999.

Relación de Personal Titulado de INTEMAC

Arquitectos

Fernández Sáez, Ana María
Fraile Mora, Serafín
Gil Vargas, Eduvigis
López-Nava Muñoz, Alberto Ignacio
Luzón Cánovas, José M^º
Sánchez Arroyo, Jesús M^º

Ingenieros de Caminos

Anillo Rodríguez, María
Baena Alonso, Eva
Barrios Corpa, Roberto
Beteta Cejudo, M^º Carmen
*Calavera Ruiz, José
Carpintero García, Ismael
Castillo Fernández, Luis Javier
Cortés Bretón, Juan María
Corral Folgado, Claudio
Dávila Sánchez-Toscano, Suyapa
Díaz Heredia, Elena
Díaz Lozano, Justo
*Fernández Gómez, Jaime Antonio
Fuente González, Jesús Miguel de la
Garay Sánchez, Raúl
Garrido Baró, Juan Carlos
Gil García, Alfonso
González González, Juan José
*González Valle, Enrique
*Hostalet Alba, Francisco
*Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M^º
Jiménez Ortiz, Gonzalo
Ley Urzaiz, Jorge
Molero Rodríguez, Teresa
Muñero Krambs, Daniel
Munugarren Martínez, Miguel Angel
Recio Cañadas, Alba
Reina Barranco, Francisco
Rodríguez Escribano, Raúl Rubén
Rodríguez Romero, Jesús M^º
Roquer i Sala, Ramón
Ruiz Carmona, Jacinto
Sanz Pérez, Lorenzo
Sirvent Sirvent, Enrique
Tapia Menéndez, José
Torre Cobo, María Carmen

Ingeniero en Cartografía y Geodesia

López-Cantí Casas, Elisa

Ingenieros I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo
Escarpizo-Lorenzana Martínez, Jorge

Ingenieros Industriales

*Alvarez Cabal, Ramón Amado
Arroyo Arroyo, José Ramón
Bayonne Sopo, Enrique
Estrada Gómez, Rafael
*Santos Olalla, Francisco
Torruella Martínez, Josep M^º
*Valenciano Carles, Federico

Ingenieros Técnicos Topógrafos

Arbesuk Prado, Mónica
Barragán Benmejo, M^º Vicenta
Campos Delgado, Juan Carlos
Carreras Ruiz, Francisco
Molero Vicente, M^º Isabel
Salado Rodilla, Rafael
Vicente Conde, M^º Isabel

Licenciado en C. Económicas y Empresariales

González Chavero, Antonio

Profesores Mercantiles

González Alvarez, Vicente
Sampedro Portas, Arturo

Técnico en Administración de Empresas

González del Olmo, M^º de la Peña de F.

Técnico en Informática

García Rodríguez, Juan Tomás

Técnico en Publicidad

Blanco Armas, Cristina

Topógrafo

Alquézar Falcoeto, Ricardo

Ingeniero de Minas

Ramos Sánchez, Adelina

Dra. en Ciencias Físicas

Tejedor Miralles, Beatriz

Dra. en Geografía e Historia

Calavera Vayá, Ana María

Licenciado en Ciencias Ambientales

Gil Esteban, Luis Miguel

Licenciados en Ciencias Geológicas

Abajo Clemente, Angel
Blanco Zorroza, Alberto
Figuera Ferrer, Juan
Orcjas Contreras, M^º Carmen
Usillos Espín, Pablo

Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María
López Sánchez, Pedro
Morgado Sánchez, José Carlos

Licenciado en Derecho

*Jarillo Cerrato, Pedro

Arquitectos Técnicos

Andrés Alarcón, Manuel
Baena Alonso, Carmen
Carrato Moñino, Rosa M^º
Estévez Márquez, Lourdes
Fernández Jiménez, Amelia
Martínez Pérez, Inmaculada
Miranda Valdés, Javier
Montejano Jiménez, María del Carmen
Muñoz Mesto, Angel
Sánchez Domínguez, Oscar

Ingenieros Técnicos Industriales

Díaz-Trechuelo Laffón, Antonio
González Carmona, Manuel
Madueño Morano, Antonio
Martínez Trigo, Francisco
Muñoz Fuentes, Miguel Angel

Ingenieros Técnicos Obras Públicas

Andrés Alarcón, Manuel
Carrero Crespo, Rafael
Galán de Cáceres, M^º del Puerto
García Menéndez, David
García Moreno, M^º José
González Isabel, Germán
González Nuño, Luis
Mata Soriano, Juan Carlos
Molina Collell, Blas
Montiel Sánchez, Ernesto
Muelas Moro, Elena
Muñoz Mesto, Angel
Prieto Antón, Eva Sonia
Romero Taboada, José Vicente
Rosa Moreno, José Andrés
Rozas Hemando, José Juan
Sánchez Vicente, Andrés
Sillero Olmedo, Rafael
Soto López, Elena del
Vicente Girón, Susana

NOTA: Todo el personal de INTEMAC trabaja en dedicación completa y exclusiva, con la excepción de las personas arriba indicadas con, a las que se autoriza la dedicación a la Enseñanza Universitaria en régimen de dedicación personal.

CUADERNOS INTEMAC

CUADERNOS INTEMAC es una publicación trimestral, bilingüe en español e inglés, en forma de monografías que recogen trabajos realizados por los técnicos del Instituto o presentados en los Cursos y Conferencias organizados por el mismo.

Los temas tratados cubren tanto el campo de las Obras Públicas como el de la Edificación y sus Instalaciones.

Precio de la suscripción Año 2000: 3300 pta.

ULTIMOS TITULOS PUBLICADOS

Cuaderno N° 41
 "Influencia de la puesta en obra del hormigón en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado y pretensado".
 Autores: M. BURÓN MAESTRO, Dr. Ing. de Caminos.
 J. FERNÁNDEZ GÓMEZ, Dr. Ing. de Caminos.
 P. LÓPEZ SÁNCHEZ, Licenciado en Químicas.

Cuaderno N° 42
 "Compactación del hormigón. Reglas para el vibrado".
 Autor: R. BARRIOS, Ing. de Caminos.

CUADERNOS DE PROXIMA APARICION

Cuaderno N° 43
 "Estudio sobre la variación de color y la durabilidad en hormigones vistos con adición de pigmentos sometidos a distintos tratamientos de exposición ambiental".
 Autores: F. CARVALHO DE ARRUDA, Dr. Ing. Civil.
 Prof. J. CALÁVERA RUIZ, Dr. Ing. de Caminos.
 Prof. J. FERNÁNDEZ GÓMEZ, Dr. Ing. de Caminos.
 P. LÓPEZ SÁNCHEZ, Ldo. en Ciencias Químicas.

Cuaderno N° 44
 "Distancias y detalles constructivos para la ejecución de juntas de cerramientos de fachadas de ladrillo".
 Autores: J. Mª. LUZÓN CÁNOVAS, Arquitecto.
 A. FERNÁNDEZ SÁEZ, Arquitecto.
 A. MUNOZ MESTO, Arquitecto Técnico e ITOP.
 J. SÁNCHEZ ARROYO, Arquitecto.

MONOGRAFÍAS INTEMAC

A partir de junio de 1998 INTEMAC emprendió una nueva línea de publicaciones con un carácter eminentemente práctico, destinadas a tratar temas muy concretos que, o bien presentan un nivel de problemas acusados en la práctica, o bien están insuficientemente cubiertos por la Normativa y la documentación técnica existente.

MONOGRAFÍA INTEMAC N° 3 AGOTADO
 "Aspectos visuales del hormigón".
 Autores: Prof. J. Calavera Ruiz, Prof. J. Fernández Gómez, G. González Isabel, P. López Sánchez, Prof. J. M. Pérez Luzardo
 Precio de la Monografía 5.000 Ptas.

MONOGRAFÍA INTEMAC N° 4
 "Prefabricación de edificios y naves industriales".
 Autores: Prof. J. Calavera, Prof. J. Fernández Gómez.
 Precio de la Monografía 5.000 Ptas.

VIDEOS TECNICOS

INTEMAC, dentro de sus actividades en el campo de la formación, ha iniciado la edición de una serie de VIDEOS TÉCNICOS, analizando distintos campos de la construcción.

SERIE OBRAS DE HORMIGÓN EN MASA, ARMADO Y PRETENSADO.

REFERENCIA	TÍTULO	CONTENIDO	DURACIÓN	PRECIO
N° 2001 (1-1)	MUESTREO DE HORMIGÓN FRESCO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS DE HORMIGÓN	Contempla de forma completa y detallada el proceso de toma de muestras de hormigón fresco en obra, la medida de la consistencia con el Cono de Abrams, fabricación de probetas, curado en obra, transporte al laboratorio, curado en cámara, refrentado y ensayo a compresión. Esta nueva versión del Video 8801 (1), introduce las modificaciones de EHE y un sistema de estudio de la distribución de presiones de la prensa sobre la probeta así como los aspectos particulares del ensayo de hormigones de alta resistencia.	30 minutos	15.000 Ptas. 90,15 euros

BOLETIN BIBLIOGRAFICO

INTEMAC viene realizando desde su fundación un BOLETIN BIBLIOGRAFICO para uso interno, que ofrece, en una lectura rápida, un panorama general de todas las publicaciones técnicas disponibles. Desde 1991, esta publicación bimestral, ha sido puesta a disposición del público.

El BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

- Fotocopia del índice y de los resúmenes de los artículos contenidos en las 105 revistas técnicas que se reciben en el Instituto referentes a los campos de la Edificación, Instalaciones, Obras Públicas y Urbanismo.
- Una sección de Normativa reciente, nacional y extranjera.
- Secciones de Bibliografía y Cursos.
- Una sección de Congresos, Reuniones Técnicas y Ferias de próxima celebración en todo el mundo.
- Tarifa de suscripción anual (6 números) 18.000 ptas.

CONSULTAS E INFORMES BIBLIOGRAFICOS

EL INSTITUTO tiene un SERVICIO DE DOCUMENTACION, que pone a su disposición y que le puede informar sobre cualquier tema relacionado con la Edificación, Instalaciones, Obra Civil y Urbanismo. Se efectúan CONSULTAS BIBLIOGRAFICAS sobre cualquiera de los temas indicados anteriormente, de acuerdo con las siguientes tarifas:

Apertura de expediente	2.000 ptas.
Cantidad a abonar por referencia60 ptas.
Cantidad a abonar por hoja de fotocopia de documento	25 ptas

Además de la Consulta Bibliográfica correspondiente, el INFORME BIBLIOGRAFICO contiene un breve documento redactado por un especialista en el tema, miembro de INTEMAC, con una serie de recomendaciones sobre la Bibliografía básica, así como los comentarios correspondientes.

Tarifa correspondiente al Informe Bibliográfico: 15.000 ptas. más la tarifa de la consulta.

ARTICULOS TECNICOS

INTEMAC dispone de una amplia serie de trabajos publicados por nuestros técnicos en diferentes revistas. A continuación incluimos la lista de los últimos. Si está Vd. interesado, solicite relación completa de títulos.

- INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD Y LA CUANTÍA DE COSIDO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PIEZAS COMPUESTAS SOLICITADAS A FLEXIÓN
 Enrique González Valle; Jaime Gálvez Ruiz; Luis García Dutari; Ramón Álvarez Caval.
- EL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA (HSC): LAS CARACTERÍSTICAS QUE CONDICIONAN EL CALCULO ESTRUCTURAL. Enrique González Valle.
- LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE INFORMACIÓN EN LAS OBRAS. Aoolfo Delibes Liniers.
- INVESTIGACIÓN SOBRE REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO DAÑADAS POR CORROSIÓN DE ARMADURAS. Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez.
- HORMIGONADO EN CONDICIONES METEOROLÓGICAS ADVERSAS: ESTUDIO DE LOS ACCIDENTES OCURRIDOS DURANTE EL HORMIGONADO DE UN TABLERO POSTENSADO. Adolfo Delibes Liniers; Jaime Fernández Gómez; Miguel Angel Acón Robleña.
- LA INFLUENCIA DEL DIAGRAMA TENSIÓN DEFORMACIÓN EN EL CÁLCULO A FLEXIÓN DE SECCIONES REALIZADAS CON HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA. Enrique González Valle; José Mº Izquierdo; Bernaldo de Quirós.
- EFFECTOS DINÁMICOS EN PUENTES. VARIACION DEL COEFICIENTE DE IMPACTO. Enrique López del Hierro Fernández; Juan José Benito Muñoz; Javier Gallego Valarde; Ramón Álvarez Cabal.
- CUBIERTAS METÁLICAS DE GRAN LUZ. Mercedes Gómez Álvarez; Justo Díaz Lozano; Ramón Álvarez Cabal.
- LA INSPECCIÓN Y ENSAYO. ORGANIZACIONES DE CONTROL DE CALIDAD Y LABORATORIOS. José Calavera Ruiz.

P.V.P. 400 ptas./ ejemplar.



NUEVO
2001

De acuerdo con la nueva instrucción EHE

MUROS DE CONTENCIÓN Y MUROS DE SÓTANO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- 374 páginas
- 244 Figuras
- 23 Fotografías
- 88 Referencias Bibliográficas
- Encuadernación en gualflex

Precio: 67,45 €



HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

G. GONZÁLEZ-ISABEL
(Ingeniero Técnico de O. P.)

- 316 páginas
- Encuadernación en gualflex

Precio: 41,97 €

CÁLCULO, CONSTRUCCIÓN Y PATOLOGÍA DE FORJADOS DE EDIFICACIÓN

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

Agotada la 4ª Edición
5ª Edición: Noviembre 2001

AGOTADO

MANUAL DE FERRALLA

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

E. GONZÁLEZ VALLE

(Dr. Ingeniero de Caminos)

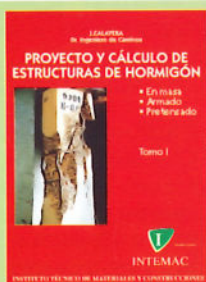
J. FERNÁNDEZ GÓMEZ

(Dr. Ingeniero de Caminos)

F. VALENCIANO (Ingeniero Industrial)

Nueva edición: Marzo 2002

AGOTADO



PROYECTO Y CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

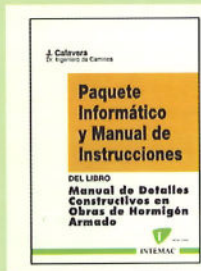
J. CALAVERA
(Dr. Ingeniero de Caminos)

De acuerdo con la nueva instrucción EHE

- EN MASA
- ARMADO
- PRETENSADO

- 2 Tomos con 2014 páginas
- 1296 Figuras
- 96 Fotografías
- 47 Ejemplos resueltos
- 139 Gráficos y Tablas de Cálculo
- 634 Referencias Bibliográficas

Precio de la obra completa: 148,95 €



MANUAL DE DETALLES CONSTRUCTIVOS EN OBRAS DE HORMIGÓN ARMADO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- 506 páginas, tamaño UNE A-4 • 210 detalles constructivos • 210 páginas de comentarios y recomendaciones • Encuadernación en gualflex

Precio: - Libro: 106,41 € - Paquete informático: 188,12 €
(Manual de Instrucciones y Disquetes)

El libro y el programa se venden por separado



NUEVO
2000

De acuerdo con la nueva instrucción EHE

CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE CIMENTACIÓN

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- Un volumen con 519 páginas
- 271 Figuras
- 24 Ejemplos resueltos
- 39 Gráficos y Tablas de Cálculo
- 30 Tablas para el cálculo directo de Zapatas corridas según EHE, EUROCÓDIGO EC-2 Y ACI 318-99
- 30 Tablas para el cálculo directo de Zapatas aisladas según EHE, EUROCÓDIGO EC-2 Y ACI 318-99
- 90 Referencias Bibliográficas
- Encuadernación en gualflex

Precio: 67,15 €



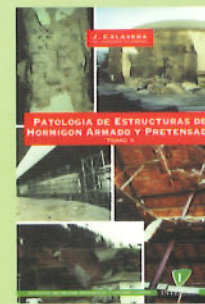
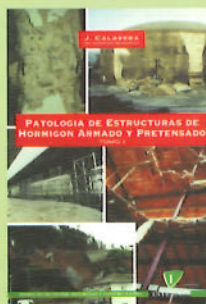
TECNOLOGÍA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

A. DELIBES (Dr. Ingeniero de Caminos)

2ª Edición

- 396 páginas
- Encuadernación en gualflex

Precio: 51,03 €

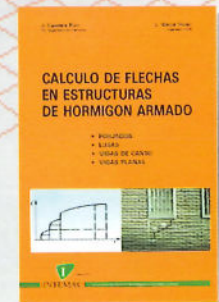


PATOLOGÍA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

- Tomo I - Capítulos 1 a 12 • Tomo II - Atlas de fisuras - Ábacos de cálculo
- 680 páginas • 231 fotografías • 258 figuras • 118 referencias bibliográficas
- Encuadernación en gualflex

Precio de la obra completa: 106,41 €



CÁLCULO DE FLECHAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

J. CALAVERA (Dr. Ingeniero de Caminos)

L. GARCÍA DUTARI (Ingeniero Civil)

- 336 páginas
- 312 tablas de comprobación de Forjados, Losas, Vigas de Canto y Vigas Planas
- Un disquete conteniendo tres programas informáticos de Cálculo de Flechas, para secciones de forma cualquiera
- Encuadernación en gualflex

Precio: 47,41 €
(Libro más paquete Informático)