# Métodos para dosificar concretos de elevado desempeño

Vitervo A. O'Reilly Díaz

imcyc

# Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño

Vitervo A. O'Reilly Díaz

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A. C.

**Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño**
**Autor: Vitervo A. O'Reilly Díaz**

**Corrección y Supervisión**
Dr. Sc. Vitervo A. O'Reilly Díaz
Ing. Miriam A. Cardet Pérez
Mecanografía: Susana García Linares
**Certificado de obra protegida: R – 45 – 2007**

Producción editorial:
**Lic. Abel Campos Padilla**

Todos los derechos reservados incluyendo los derechos de reproducción y uso de cualquier forma o medio, incluyendo el fotocopiado por cualquier proceso fotográfico, o por medio de dispositivo mecánico o electrónico, de impresión, escrito u oral, o grabación para reproducción audio o visual o para el uso en cualquier sistema o dispositivo de almacenamiento y recuperación de la información, a menos que exista permiso escrito obtenido de los propietarios del Copyright.

La presentación y disposición en conjunto de **Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño** son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, por algún sistema o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información), sin consentimiento por escrito del editor.

Derechos reservados:

© 2007 Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

Av. Insurgentes Sur 1846, Col. Florida, Méx. D.F. C.P. 01030

ISBN 968-464-

# ÍNDICE

**Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño** I

PROLOGOS DE EDICIONES EN DIFERENTES PAISES

PRÓLOGO DE LA EDICIÓN DE MÉXICO-IMCYC III

PRÓLOGO DE LA EDICIÓN DE MÉXICO-U.A.E.M V

PRÓLOGO DE LA EDICIÓN DE BOLIVIA VII

PRÓLOGO DE LA EDICIÓN DE BRASIL IX

PRÓLOGO DE LA EDICIÓN DE COLOMBIA XI

PRÓLOGO DE LA EDICIÓN DE ESPAÑA VX

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 LA NUEVA VISIÓN DEL CONCRETO

CAPÍTULO 2. SÍNTESIS CRONOLÓGICA DEL DESCUBRIMIENTO, USO, EVOLUCIÓN Y DESARROLLO DEL CEMENTO PORTLAND Y DEL CONCRETO 5

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS 5

2.2 DESCUBRIMIENTO, USO, EVOLUCIÓN Y DESARROLLO DEL CEMENTO PÓRTLAND Y DEL CONCRETO 7

2.3 DESARROLLO HISTÓRICO DE LA DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO 10

CAPÍTULO 3. EL CONCRETO EN LA ACTUALIDAD 19

3.1 ANTECEDENTES 19

3.2 LA DURABILIDAD DEL CONCRETO 22

3.3 AGENTES QUE DETERIORAN EL CONCRETO 22

3.4 LA ESTRUCTURA DEL CONCRETO 27

3.4.1 LA MICROESTRUCTURA DEL CONCRETO 28

3.4.2 LA PASTA DE CEMENTO HIDRATADA. SU POROSIDAD. 29

3.4.3 COMPOSICIÓN DEL CEMENTO ANHIDRO E HIDRATADO 30

3.4.4 ORIGEN DE LOS POROS CAPILARES 36
3.4.5 CLASIFICACIÓN DE LA POROSIDAD 38
**3.5 LA INTERFASE PASTA-AGREGADO 42**
**3.6 EL AGUA EN LOS POROS DEL CONCRETO 45**
**3.7 COMPOSICIÓN DEL AGUA EN LOS POROS DEL CONCRETO 47**
**3.8 MECANISMOS DE TRANSPORTE A TRAVÉS DE LA MICROESTRUCTURA DEL CONCRETO 48**
**3.9 TIPOS DE MECANISMO DE TRANSPORTE 49**
3.9.1 PERMEABILIDAD 49
3.9.1.1 Coeficiente de permeabilidad 50
3.9.1.2 Permeabilidad a los líquidos 50
3.9.2 SUCCIÓN CAPILAR 50
3.9.3 DIFUSIÓN 51
3.9.4 ABSORCIÓN Y DESORCIÓN 52
3.9.5 MIGRACIÓN 52

**CAPÍTULO 4. LA DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO. SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES QUE SE LE EXIGEN 53**
**4 LA DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO 53**
**4.1 DEFINICIÓN. 53**
**4.3 PRINCIPALES CUALIDADES QUE SE LE EXIGE AL CONCRETO, A CONSIDERAR EN EL PROCESO DE DOSIFICACIÓN: 54**
4.3.1 RESISTENCIA MECÁNICA 54
4.3.2 CONSISTENCIA DE LA MEZCLA 55
4.3.3 LA DURABILIDAD DEL CONCRETO 55
4.3.4 DEFORMACIONES DEL CONCRETO 56
**4.3 EXIGENCIAS AL CONCRETO DE HOY DEL FUTURO 57**

**CAPÍTULO 5. MÉTODO PARA DOSIFICAR MEZCLAS DE CONCRETO CON BAJA CONSISTENCIA 59**
**5.1. ANTECEDENTES 59**
**5.2 ESTUDIOS E INVESTIGACIONES 66**
**5.3 NUEVOS CONOCIMIENTOS APORTADOS POR LA INVESTIGACIÓN 68**
**5.4 CONCLUSIONES PARA LA PRÁCTICA Y EL DESARROLLO ULTERIOR DE LA CIENCIA 72**

**5.5 MÉTODO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO BASADO EN LA DETERMINACIÓN CORRECTA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS** **77**

5.5.1 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÓPTIMA DE LOS AGREGADOS GRUESOS Y FINOS **78**

5.5.2 EJEMPLO DE CÁLCULO **79**

5.5.3 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA NECESARIA PARA LA CONSISTENCIA REQUERIDA **80**

5.5.4 DETERMINACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA "A" DEL AGREGADO GRUESO **82**

5.5.5 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CEMENTO **82**

**5.6 RECOMENDACIONES** **84**

**5.7 VACÍO, SUPERFICIE ESPECÍFICA Y OTROS FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS MEZCLAS DE LOS AGREGADOS** **89**

**5.8 EJEMPLO DEL MÉTODO PARA DOSIFICAR MEZCLAS DE CONCRETO** **97**

**5.9 EJEMPLO DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO PARA DOSIFICAR MEZCLAS DE CONCRETO DE ELEVADO DESEMPEÑO** **107**

5.9.1 ANTECEDENTES **107**

5.9.2 EJEMPLO **107**

**CAPÍTULO 6. MÉTODO FÍSICO-MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LA CARACTERÍSTICA "A" DE LOS AGREGADOS GRUESOS PARA CONCRETOS** **113**

**6.1 ANTECEDENTES** **113**

**6.2 ESTUDIOS E INVESTIGACIONES** **120**

**6.3 INFLUENCIA DE LA CARACTERÍSTICA DE FORMA DE LOS AGREGADOS TRITURADOS SOBRE LA RESISTENCIA DE LOS CONCRETOS** **121**

**6.4 INFLUENCIA DE LA CARACTERÍSTICA A DE LOS AGREGADOS TRITURADOS SOBRE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO ENDURECIDO** **124**

**6.5 MÉTODO PARA OBTENER LA CARACTERÍSTICA A DE LOS AGREGADOS GRUESOS** **125**

6.5.1 CÁLCULOS DE CONTROL CON EL AGREGADO DE SOMORROSTRO **160**

6.5.2 CÁLCULOS DE CONTROL CON EL AGREGADO DE CONCRETO CUBANO **161**

**6.6 CONCLUSIONES** **164**

**CAPÍTULO 7. MÉTODO PARA DOSIFICAR MEZCLAS DE CONCRETO CON ALTA CONSISTENCIA, QUE SE COMPACTAN POR VIBRACIÓN** **167**

7.1 ANTECEDENTES 167
7.2 CONCEPTO DE CONSISTENCIA DIRECTIVA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO 176
7.3 DISEÑO DE LA COMPOSICIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON UNA CONSISTENCIA REQUERIDA. 177
7.4 ESTUDIOS E INVESTIGACIONES 179
7.5 DEPENDENCIA DE LA CONSISTENCIA CON RESPECTO AL VALOR DE LA RELACIÓN AGUA CEMENTO W 184
7.6 EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS TÉCNICO-ECONÓMICOS AL EMPLEAR MEZCLAS DE CONCRETO CON UNA CONSISTENCIA SUPERIOR 191
7.7 PROCESO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO 195

BIBLIOGRAFÍA 207

# Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño

# Prologo de la edición en México-IMCYC

Uno de los objetivos primordiales del IMCYC es la importante labor de capacitación a través de cursos, conferencias, la revista C y T, y el fondo editorial. En especial, la publicación periódica de artículos y la difusión de obras que enriquezcan, complementen y actualicen a los profesionales de la industria del cemento y del concreto.

La edición realizada por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC), es obra del Dr. Vitervo O'Reilly y es de suma importancia tanto para quienes desean actualizarse, como para quienes quieren familiarizarse con el cumplimiento de los estándares de calidad de los concretos de alto rendimiento.

Este libro es un invaluable aporte sobre la ciencia de los materiales y un magnifico impulsor de nuevas investigaciones. Entre los temas de mayor relevancia dentro de esta investigación, contamos con: la necesidad actual de desarrollar concretos mas durables y por lo tanto un consumo optimo de cemento; un análisis profundo sobre la ciencia de los materiales; requisitos de estándares de calidad mas altos y con mayores características.
Todo lo anterior aporta los fundamentos necesarios para la elaboración de obras de mayor calidad, durabilidad y resistencia.

Otra de las variables indispensables de considerar y presentadas en esta investigación científica desarrollada por el Dr. O'Reilly, es la influencia de las condiciones ambientales.
Resulta determinante la elaboración de un diseno de mezclas eficiente, con calidad y sobretodo que permita aumentar la durabilidad de las obras que se desarrollan. Esto habla no solo de una ética profesional, sino además de una responsabilidad social muy valiosa.

Por lo anterior, consideramos que esta obra será en el corto plazo, uno de los libros de cabecera mas importantes para cualquier ingeniero.

**M. en C. Daniel Dámazo Juárez**
**Director del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.**
**México, D.F. Enero 2008**

# Prólogo de la edición de México-U.A.E.M

En un viaje a la República de Cuba tuve contacto con el Prof. DrSc. Ing. Vitervo O'Reilly Díaz quien se dedica a la investigación científica del concreto.

En su Tesis Doctoral, él investigo y logro un nuevo método de dosificar concreto a partir de la Ecuación de Bolomey, la cual es empleada por muchos países, sobre todo europeos.

Sin embargo, con su investigación, no sólo logró el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, sino que al llevarla a la práctica, estableció un método de dosificación de concreto que ha ahorrado a su país, durante varios años, un promedio de 200 000 toneladas de cemento anuales, con concretos más durables.

Para cualquier lugar del mundo que tenga déficit en la producción de cemento, su aplicación es significativa, razón por la que el ha sido condecorado por su país y otros más, varias veces, por su trabajo científico.

El ahorro que proporciona el "Método O'Reilly", comparado con otros métodos, alcanza hasta el 14% del consumo de cemento por $m^3$ de concreto. Esto tiene una repercusión económica muy importante en la industria de la construcción.

En México, la producción de concreto en forma industrializada es muy baja comparado con la de otros países, ya que del total del concreto consumido en la industria de la construcción, el 20% es producido por concreteras y el 80% es producido en la obra.

En los últimos años y a raíz del sismo de 1985 en las normas técnicas del reglamento de construcción del Distrito Federal, que sirve de base para casi todos los reglamentos de construcción del país, con ayuda de normas de otras dependencias oficiales, se establece que el concreto en el Distrito Federal se deberá dosificar por peso y no por volumen.

Esto genera que la producción de concreto en obra prácticamente desaparezca o que las grandes empresas de la industria de la construcción empleen dosificadoras.

Y ya que una de las inquietudes de la actual administración de la Facultad de Arquitectura de la U. A. E. M., es la de estar en contacto con las tecnologías aplicadas que puedan aportar beneficio, tanto para sus alumnos, como a los profesionales de la construcción, se propuso ante la comisión editora de la U. A. E. M., la publicación de este libro que sirva como texto al curso de "Tecnología del Concreto", que se impartirá en nuestra Facultad por el DrSc. Ing. Vitervo O'Reilly Díaz con lo cual nuestra Facultad daría a conocer un Método que puede traer beneficios para nuestro país, en el momento que necesitamos alternativas, para poder afrontar el compromiso que el Tratado de Libre Comercio necesita.

Agradezco al Prof. Vitervo O'Reilly por brindarnos la primicia de ser publicado su libro fuera de Cuba, así como su amistad.

**Prof. Arq. Armando López Gasca**
**Coord. Área Tecnología Facultad de Arquitectura de la U. A. E. M**
**Cuernavaca – Morelos - México Enero de 1993**

# Prólogo de la edición de Bolivia

El libro que se presenta, es un resumen del amplio trabajo de investigación desarrollado por el Prof. Vitervo O'Reilly en Cuba, países de Latinoamérica y Europa por más de treinta años; estudios que le han permitido profundizar en el arte de dosificar concretos. Partiendo de investigaciones realizadas por Bolomey, Fuller, Kaplan, Feret, y otros; bajo el concepto de considerar la forma de las partículas de los agregados y en el objetivo de reducir al mínimo el porcentaje de vacíos de la mezcla, se han llegado a obtener concretos mucho más compactos y durables, con el consiguiente ahorro de cemento, con ello el Prof. O'Reilly ha demostrado que el modelo tradicional de la "curva granulo-métrica ideal", no es el más indicado para dosificar concretos constituidos por agregados con elevadas proporciones de partículas con geometría inadecuada. Por otra parte, su método de dosificación viene siendo difundido por países de América y Europa, lo cual ha posibilitado estudiar y comparar con otros métodos ampliamente reconocidos en dichos países. En el caso particular de Bolivia, en los últimos años se han venido realizando múltiples estudios comparativos con otros métodos, tanto en el Instituto de Ensayo de materiales de la Universidad Mayor de San Andrés como en laboratorios de otras Universidades del país; los cuales nos permiten afirmar que el método de dosificación es óptimo por la compacidad obtenida, las resistencias alcanzadas y el ahorro en el consumo de cemento de un porcentaje mayor al diez porciento. Por tanto, creemos que esta obra es un aporte muy importante para la difusión del conocimiento sobre la ciencia de los materiales y que la misma seguirá motivando el desarrollo de estudios que permitan optimizar la dosificación de concretos en nuestro país.

**Prof. Ing. Mario R. Terán Cortez**
**Director del Instituto de Ensayos de Materiales – UMSA**
**La Paz – Bolivia – Sept 1997**

# Prólogo de la edición de Brasil

"Certos engenheiros e pesquisadores, muitas vezes até os de renome internacional, consideram a dosagem dos concrettos de cimento Portland mais uma arte que propiamente uma técnica. Reconhecem, no entanto, que essa arte pode trazer ao seu mentor e usuário econômicos.

Não há dúvida de que a introdução do conceito de resistêcia característica do concreto à compressão (actual $f_{ck}$, antigo $\sigma_c$), formulado pela primeira vez na década de 50 e efetivamente introduzido nessa época nas normas técnicas alemãs, americanas e brasileiras, viabilizou a implantação das primeiras centrais dosadoras de concreto pré-misturado no início da década de 60. Quem conseguia produzir um concreto mais econômico, de resistência média mais baixa, porém atendendo ao $f_{ck}$, prosperava.

Aqueles que dominavam os conhecimentos de dosagem, empírica ou racionalmente, receberam a maior das recompensas que pode ter um emprésario, ou seja, um negócio sólido e rentável. Daqueles anos para os nossos, muita coisa mudou e as centrais de concreto passaram a ser tão bom negócio que a grande maioria das empresas do país está em mãos de grandes grupos multinacionais. Engenheiros que conhecem e practicam dosagem conduzem empresas prósperas; os demais são simples compradores e usuários do producto.

Se do ponto de vista econômico essas afirmativas estão absolutamente certas, do ponto de vista da metodologia de dosagem, a afirmativa inicial não é bem verdade.

Não há dúvida de que sempre há uma pitada de arte...., mas o Prof. Dr. Vitervo O'Reilly demonstra neste livro que é muito mais inteessante utilizar uma metodologia cientifica para obter os melhores resultados.

As exigências atuais das estructuras e dos concretos são muito superiores às de antigamente. Hoje, os concretos endurecidos devem ser duráveis, devem ser de alta resistência, devem ser compactos e pouco deformáveis. Os concretos frescos devem ser bombeáveis, devem ser projetáveis, devem ser auto-adensáveis, devem ser coesos.

Além disso, é grande quantidade atualmente disponível de aditivos superplastificantes, plastificantes, redutores de água, retardadores, aceleradores,inibidores de corrosão, assim como de adições de sílica ativa, de pozolanas, de cinzas, de escórias e outras mais, até resíduos e materiais reciclados. Como atender a tantas exigências?

A metodologia empregada e sugerida neste livro pelo Prof. Vitervo é reultado de muitas experiências conduzidas por vários anos em Cuba e nos países da América Latina, inclusive no Brasil. Seu enorme e singular conhecimento da tecnologia do concreto, das realidades e das exigências regionais o colocam em situação de destaque como o pesquisador de maior expressão no tema de dosagem dos concretos.

Vale a pena observar, neste livro, como o Prof. Vitervo conduz com arte aqueles que desejam conhecer e bem praticar a dosagem dos concretos de cimento Portland.

São Paulo, 20 de março de 1998

**Prof. Dr. Ing. Paulo Helene**
**PCC/USP- Universidade de São Paulo**

**Prof. Dr. Ing. Antonio Carmona Filho**
**FAM- Facultades Anhembi-Morumbi**

# Prólogo de la edición de Colombia

La tecnología actual del concreto tiene gran reto de garantizarle al usuario de este material, no solamente sus propiedades físico-mecánicas, sino también la apropiada durabilidad en servicio durante una vida útil definida. Dar una garantía de la estabilidad de la obra civil en general, contribuye al reconocimiento de una imagen positiva de las empresas y de los profesionales que la otorgan, situación básica para el mundo de la competitividad en que estamos inmersos; pero también a mi juicio, constituye una de las mayores oportunidades de contribuir a la paz social tan alterada en nuestros países de América Latina.

Esta aseveración plantea una responsabilidad ética a los profesionales de la construcción y más específicamente para este caso, a los ingenieros o arquitectos responsables del diseño y preparación de las mezclas de concreto, pues en últimas, la calidad de su trabajo se verá identificado con el respeto que le demuestran a la comunidad en general y al individuo en particular, en cuanto a minimizar el costo imprevisto por reparación y mantenimiento de la obra elaborada en concreto de cemento hidráulico, sean éstas en el campo de la vivienda, las vías, las conducciones eléctricas, los alcantarillados, etc.

*Un **concreto de alto comportamiento*** es aquel en que se manipulan sus propiedades de tal forma que se garantiza la estabilidad de la obra, impidiendo la interacción de sustancias externas nocivas.

Son múltiples las causas de patologías en el concreto armado, muchas de ellas dependen de la calidad y la estabilidad en el tiempo del material de recubrimiento de los aceros. La durabilidad del concreto exige un pleno reconocimiento de las condiciones climáticas, ambientales y de servicio de la obra; esto debe relacionarse con el comportamiento de los materiales constituyentes, las proporciones empleadas, la ejecución, la colocación y el curado.

Uno de los factores fundamentales para garantizar la estabilidad de la obra en concreto es el proporcionamiento de los materiales constituyentes, lo que ha sido preocupación permanente de la tecnología; por esto existe en el mundo una amplia gama de métodos para la dosificación y se ha generalizado el trabajo con mezclas de pruebas ceñidas a procedimientos de error y ensayo, como práctica para el proporcionamiento de la dosificación de este material.

Durante años se desconoció, casi completamente, que las propiedades mecánicas del concreto no eran las únicas a tener en cuenta, solamente cuando los investigadores se introdujeron en el campo de su microestructura se comprendió mejor y se establecieron nuevos parámetros para definir su apropiada dosificación. La tecnología actual del concreto nos presenta el gran reto de conseguir de él la máxima capacidad posible como material, definiéndole una durabilidad y estabilidad desde el proporcionamiento.

Hoy reconocemos que la porosidad interconectada, la capacidad a la difusión de iones, la fase de transición entre agregados y la pasta de cemento, las adiciones activas o inertes, juegan un papel preponderante en el concepto de estabilidad y durabilidad de la obra de concreto. Por ello proporcionar una mezcla de concreto toma un carácter más trascendente de lo que fue hasta el momento.

Cuando se trata de cerrar la porosidad de una mezcla al máximo; es fundamental trabajar sobre el esqueleto del concreto, esto es, sobre su fase agregado, e involucrar en el análisis como aspecto básico la forma de éste, pues ella conduce de alguna manera a una relación de superficie específica y de espacios vacíos que definen la cantidad de cemento óptima y mínima requerida para conseguir las propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad buscadas.

Después de muchos años de investigación el profesor Vitervo O'Reilly consiguió aproximarse de forma acertada a la respuesta científica, técnica y práctica ofreciéndonos un trabajo de excepción el cual, en la práctica de laboratorio como en la industrial, ha permitido

alcanzar reducciones del consumo de cemento, hasta 35 $Kg/m^3$ de concreto, con su consecuente efecto económico y mejorando también, las propiedades de las mezclas en cuanto a su comportamiento de durabilidad ensayada por métodos directos como son la reducción de la permeabilidad y la capacidad de difusión.

Con esta obra, el profesor O'Reilly introduce esta nueva visión y presenta un sistema de trabajo que no dudo terminará por ser apropiado por "la moderna tecnología del concreto". Esto no significa que sea un trabajo terminal pero constituye a mi juicio, el primer trabajo que jalonará sin duda algunas nuevas investigaciones y mayores desarrollos en el mundo del concreto.

Es para América Latina y en particular para Colombia un orgullo lanzar este texto pues su difusión y aprendizaje contribuirá decididamente a una nueva cultura de manejo y trabajo con el material por excelencia de la construcción en nuestro país y espero también que continúe, como ya lo ha hecho, impulsando nuevas investigaciones y desarrollos que beneficien al sector de la construcción en general.

**Prof. Alejandro Salazar Jaramillo**
**Universidad del Valle**
**S. de Cali – Colombia, Nov 1997**

# Prólogo de la edición de España

El texto que sigue es un resumen práctico de un amplio trabajo realizado por el Prof. Vitervo O'Reilly en Cuba, donde es Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular e Investigador Titular y Presidente de la Comisión Nacional del Cemento y el Concreto de Cuba.

El Prof. O'Reilly ha realizado una importantísima labor técnica de investigación y de optimización en el campo del cemento y el concreto.

Ante la necesidad de mejorar los costes de producción del concreto fabricado en su país, en el ejercicio de sus funciones como asesor del gobierno de Cuba, el Dr. Ing. Vitervo O'Reilly ha desarrollado y puesto a punto un método de dosificación compendio de sus logros tras largos años de estudio, experimentación y minuciosa observación de las propiedades que presentaban distintos concretos fabricados con materiales pétreos de varias características y procedencias.

Tras un análisis profundo de los diferentes métodos de dosificación de concretos habitualmente utilizados (Bolomey, Fuller, Feret, ACI, etc.), el Dr. O'Reilly observa un denominador común en todos ellos: la atención preferencial que prestan a la composición granulométrica de las partículas de agregados y la escasa consideración que merece la relativa a la forma de dichas partículas. Este planteamiento implica el cuestionamiento de los referidos métodos de dosificación, especialmente para producción de agregado con elevada proporción de fracciones geométricamente inadecuada, en los que resulta decisivo el factor de forma del material y no es de aplicación el modelo de referencia de la "curva granulométrica ideal".

Al respecto, debemos significar la sintonía de estas apreciaciones del Dr. O'Reilly con las formuladas hace algunos años por D. Carlos de la Peña durante su intervención en uno de los cursos de postgrado INTEMAC, en la que manifestaba su disconformidad con el concepto de "tamaño máximo de agregado" que manejan algunos de los métodos de dosificación antes

reseñados, por los errores inadmisibles de composición de mezcla de agregados que, en determinadas circunstancias, puede conducir.

Estos inconvenientes son obviados por el método de O'Reilly que permite, en función de las características reales de los materiales componentes, fabricar un concreto "a la medida" y optimizar sus propiedades de consistencia, resistencia y compacidad.

Como consecuencia de dicha optimización, la aplicación de este método indica, según su autor, un ahorro de cemento, con respecto al requerido por otros alternativos, superior al 10%. Complementariamente, resulta incuestionable que el método posibilita la reducción del porcentaje de huecos del concreto resultante, lo que incide muy favorablemente en la durabilidad del material.

La importancia que en el momento actual se concede a la citada característica del concreto, así como la mejora tecnológica que el método O'Reilly puede proporcionar a nuestros criterios de dosificación, nos ha impulsado a publicarlo en esta serie de cuadernos monográficos del Instituto.

**Prof. Dr. Ing. José Calavera Ruiz**
**Presidente de INTEMAC**
**Madrid - España - Octubre 1995**

El concreto armado se sigue valorando en el mundo como el material fundamental de construcción por sus valores técnicos y económicos.

Él, forma parte del que hacer humano y es imposible concebir el desarrollo actual sin su presencia y perfeccionamiento, pero desde el momento de su diseño hasta su colocación en obra, le acechan peligros de su destrucción por corrosión.

A ello se debe el gran interés despertado por los estudios de la corrosión del acero de refuerzo del concreto armado y los factores que inciden en esta, cuya finalidad no es otra que tratar de evitar o por lo menos reducir los daños ocasionados por la misma, y sus consecuentes efectos en la economía de un país, al destruirse gran número de construcciones realizadas con dicho material.

Hay que conocer y valorar adecuadamente todas las causas de su destrucción, para así poder adoptar las medidas optimas deprecaución, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Debido a la estrecha dependencia de la intensidad de penetración de los agentes corrosivos en el concreto con su porosidad y la relación de esta, con la compacidad de la masa, este debe lograrse con la mayor impermeabilidad posible.

Mediante investigaciones científicas y sus comprobaciones en la producción de constr c-ciones, a quedado demostrada la determinante influencia que tiene el Método de Dosificar el Concreto, en la calidad de la masa de este, que envuelve las barras de acero y su resistencia al paso de los agentes agresivos externos, razón por la que se creó este nuevo método, que tiene en cuenta estas exigencias.

Este nuevo Método de Dosificar Concreto, que partió de lograr la máxima compacidad de su masa, demostró y comprobó por estudio y comparaciones con otros métodos, que los tradicionales que determinan la relación óptima entre los áridos (arena y grava) no son válidos para obtener la máxima compacidad, como punto de partida fundamental para el logro de dichos objetivos.

El Método también incorpora otros nuevos conceptos y factores NO tenidos en cuenta por los investigadores contemporáneos, tales como: determinación de la característica de lo áridos gruesos, la influencia de la consistencia de la masa del concreto en estado fresco de una forma directa y la determinación de una forma más exacta de la cantidad de agua de la mezcla para obtener una consistencia necesaria.

La aplicación del Método aporta ahorros considerables de cemento en la roducción de los concretos y logra que este sea mas compacto y menos poroso, garantizando una mejor protección a las barras de acero que circundan, lo cual lo hacen un método ideal para dosificar Concretos de Elevado Desempeño.

# Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN

Los reglamentos y proyectos de normas vigentes en muchos países para dosificar el concreto recomiendan el empleo de la ecuación de Bolomey, por ser una de las pocas, por no decir la única que tiene en cuenta entre sus factores componentes, el coeficiente empírico K, cuyo valor caracteriza la calidad del agregado seleccionado para confeccionar la mezcla del concreto.

La demostración de que esta ecuación y los valores dados para K no son validos para muchos agregados, constituye parte del contenido de mi tesis para la obtención del Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Pero lo más importante es haber obtenido científicamente un nuevo método para dosificar el concreto que requiere de la determinación previa de las características de los agregados y en función de ellas, se diseña la mezcla. Además, se incluye la influencia de la plasticidad del concreto en estado fresco en forma directa, la cual no está introducida en las ecuaciones de los autores contemporáneos.

Es muy importante señalar que para los agregados de forma irregular o con granulometría inadecuada, no es correcto aplicar los métodos de la composición óptima de las mezclas de éstos, basados en las relaciones directivas de las fracciones de ellos, tal como lo recomiendan por ejemplo, las curvas granulométricas ideales. Tanto este último aspecto, como los anteriormente expresados tienen una gran influencia en las cualidades del concreto en estado fresco y endurecido.

El objetivo fundamental de la investigación fue demostrar la influencia del conjunto de estos factores en la calidad final del concreto, fundamentalmente su durabilidad y la influencia

cuantitativa en el consumo de pasta de cemento, que es la que en definitiva aporta la porosidad a la masa del concreto y por ende influye en la durabilidad de él.

Las nuevas ecuaciones para el cálculo de la resistencia del concreto a la compresión, posibilitan en cada condición dada, determinar con mayor exactitud los valores necesarios para el cálculo de la composición de la mezcla del concreto, mediante una forma asequible a los técnicos que trabajan en las plantas de premezclados y prefabricados de concreto, así como los que trabajan en obras.

En este libro se presentan métodos muy comprensibles y racionales para aplicar los resultados de las investigaciones científicas realizadas. El resultado final de esta aplicación depende solo del rigor con que se realicen los ensayos para:

a) Obtención de la combinación óptima de los agregados.
b) Determinación de la característica de forma de los agregados que se usen en la mezcla de concreto.
c) La cantidad de agua necesaria para la consistencia exigida del concreto que se ha de usar.

En la búsqueda de cómo simplificar la determinación de las características de forma de los agregados, logré posteriormente un método FÍSICO-MATEMÁTICO que expongo en este libro y aún sigo en la búsqueda de otros métodos más eficientes, con los medios tecnológicos actuales, por la importancia que representa para el concreto.

En este método se parte de las características específicas de las partículas de los agregados a estudiar, tales como la esfericidad estereométrica y la redondez de cada una de ellas, con las cuales llegamos a una expresión que permite calcular con exactitud la característica deseada, sin que otros factores ajenos a ellas puedan influenciarla. Esto garantiza poder determinar la

característica de forma de los agregados en muy poco tiempo, a diferencia de mi primer método que requiere esperar como mínimo 28 días.

La tendencia mundial, de emplear en grandes obras como presas, carreteras, aeropuertos y en la producción de elementos prefabricados con alta tecnología, concreto de alta consistencia (secos) que se compactan con equipos vibratorios, es cada vez mayor, ya que representan en el orden económico, un gran ahorro de cemento y un mejoramiento de sus características técnicas, entre las más significativas están: ser más compacto, menos poroso, más durable.

Esta tendencia nos condujo al completamiento de los estudios científico-integrales de las dosificaciones del concreto, ya que en el Capitulo 5 de este libro expongo el método para el diseño de concreto de baja consistencia, es decir, concretos plásticos y posteriormente el diseño de mezclas de concreto con alta consistencia, o sea, concreto seco, cuya consistencia se mide en el consistómetro VeBe, diseñándose a partir de los equipos de vibración que se dispongan para su compactación y en el que también se tienen en cuenta las características de los agregados a utilizar y la consistencia requerida del concreto.

Estas dos últimas partes del libro constituyeron parte de la investigación realizada, con la que obtuve el Doctorado en Ciencias, por la Universalidad de la Solución.

## 1.1 La nueva visión del concreto

El concreto armado se sigue valorando en el mundo como el material fundamental de construcción por sus valores técnicos y económicos. Forma parte del quehacer humano y es imposible concebir el desarrollo actual sin su presencia y perfeccionamiento, pero desde el momento de su diseño hasta su colocación en obra, le acechan peligros de su destrucción por la corrosión. A ello se debe el gran interés despertado por los estudios de corrosión del acero de

refuerzo del concreto armado y los factores que inciden en éste, cuya finalidad no es otra que evitar o por lo menos reducir los daños ocasionados por la misma y sus consecuentes efectos en la economía de un país, al destruirse gran número de construcciones realizadas con dicho material.

Debido a la estrecha dependencia de la intensidad de penetración de los agentes corrosivos en el concreto con su porosidad y la relación de ésta con la compacidad de su masa, este debe lograrse con la mayor impermeabilidad posible.

Mediante investigaciones científicas y sus comprobaciones en la producción de construcciones, ha quedado demostrada la determinante influencia que tiene el Método de dosificar el concreto, en la calidad de la masa de este, que envuelve las barras de acero y su resistencia al paso de los agentes agresivos externos, por lo que hubo que crear este nuevo método, que tuviera en cuenta estas exigencias.

Este nuevo método de dosificar concreto, que partió de lograr la máxima compacidad de su masa, demostró y comprobó que los métodos tradicionales de determinar la relación óptima entre los agregados (arena y grava), no son validos para obtener una máxima compacidad, como punto de partida fundamental para el logro de dicho objetivo. También ha demostrado la obtención de mayores resistencias mecánicas, baja permeabilidad, mayor resistencia a la corrosión y a la abrasión, menor exudación y menor segregación en su colocación, así como menor deformación lenta del concreto endurecido. También han quedado demostradas sus óptimas posibilidades para la obtención de concretos de alta resistencia, razón por la cual se le ha considerado como: un **"Método para dosificar concreto de elevado desempeño"**.

# Capítulo 2

# SÍNTESIS CRONOLÓGICA DEL DESCUBRIMIENTO, USO, EVOLUCIÓN Y DESARROLLO DEL CEMENTO PORTLAND Y DEL CONCRETO

## 2.1 Antecedentes históricos

El concreto de cemento Portland es actualmente el material manufacturado más extensamente utilizado por el hombre, que de acuerdo con las tendencias mundiales, su futuro tiende a ser más significativo e importante, porque para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería de construcción, ofrece propiedades adecuadas a bajo costo, combinada con el ahorro de energía y ventajas ecológicas.

Esto se constata al comparar la producción mundial de cemento Portland que en el año 1920 fue de 32 300 000 TM para un percápita de 19 Kg. por cada ser humano, pasando en el 2002 a 1 750 000 000 TM para un percápita de 289 Kg./sh. y se pronostica un crecimiento vertiginoso de su producción y empleo en los próximos años.

Son muchas las razones por las que el concreto juega este papel tan protagónico en el desarrollo de la humanidad, en primer lugar, se debe a la posibilidad de lograr elementos estructurales de diversas formas, debido a su carácter plástico en estado fresco, posee una magnífica resistencia al agua sin un serio deterioro, a diferencia de la madera y el acero, pero lo

más significativo de sus ventajas, es, que está constituido por materiales abundantes y baratos que existen en todas partes del globo terraqueo.

No todas son ventajas en este extraordinario material, pues tiene como inconveniente su relación peso/resistencia muy elevada, es poco resistente a la tensión comparado con su resistencia a la compresión, presenta inestabilidad de volumen frente a acciones térmicas, hidráulicas o mecánicas que pueden fisurarlo. También es sensible a ser destruido por la acción agresiva de agentes físicos o químicos que lo circundan.

Pero son múltiples los investigadores científicos que trabajan arduamente para atenuar estos defectos, creando adiciones en la fabricación del cemento, aditivos químicos para la producción del concreto, métodos y equipos más eficientes para su producción, productos anticorrosivos y protectores, etc. que garanticen, seguir siendo el más empleado de los materiales de construcción. Solo el agua es consumida, más que el concreto, por los seres humanos.

La heterogeneidad de los materiales que componen el concreto y la complejidad de su comportamiento, tanto en estado fresco como endurecido, así como los poros de variadas formas y tamaño que pueden estar completa o parcialmente llenos de soluciones alcalinas, representan siempre un desafío a los técnicos responsabilizados con su fabricación y empleo de éste, el cual es manufacturado en diversas formas.

Para obtener este conglomerado siempre se supuso que el proporcionamiento de sus componentes no podían ser arbitrarios, ya que el objetivo final de éste, es que sea, un sólido compacto durable.

Inicialmente estos conglomerados eran usados sin grandes exigencias de resistencia estructural, ya que las solicitaciones actuantes eran bajas y consecuentemente, las reglas de proporcionamiento eran completamente empíricas y provenían del conocimiento tradicional de la preparación de los morteros. Estando limitadas a la obtención de conglomerados en los cuales los

ligantes eran cales aéreas o cales combinadas con puzolanas, denominadas cales hidráulicas, resultando sus proporciones casi fijas e independientes de los materiales constituyentes.

El empleo de estos criterios se ha mantenido en muchos casos en la actualidad, al asegurar ciertas propiedades en el concreto con un exceso de aglomerante, que conduce a mezclas antieconómicas y poco durables.

## 2.2 Descubrimiento, uso, evolución y desarrollo del cemento Pórtland y del concreto

| *FECHA* | *ESTADO DEL CONOCIMIENTO* |
|---|---|
| 5000 años atrás | Aparecen en Chile las primeras obras de grava unidas por un conglomerante hidráulico, procedente de la calcinación de algas. Estas obras formaban las paredes de chozas utilizadas por los indios. |
| Año 27 a.n.e. | Agripa, construye el PANTEÓN en Roma, el cual fue destruido por un incendio y reconstruido posteriormente por Adriano en el año 120 de nuestra era y que desde entonces desafió el paso del tiempo sin sufrir daños, hasta que en el año 609 se transformó en la iglesia de Santa María de los Mártires. Su cúpula de 44 m de luz, está construida de concreto y no tiene más huecos que un lucernario situado en la parte superior. Esta cúpula se encuentra aligerada por medio de casetones.<br>Tras largo tiempo de no ser empleado el concreto, John Smeaton vuelve a usarlo en la reconstrucción del Faro de Edystone en la costa sur de Inglaterra, estudiando el comportamiento de mezclas de calizas impurificadas con arcillas, en la fabricación de morteros, descubriendo, que de éstos, los mejores eran los que poseían una proporción importante de arcilla. Este es el primer paso en el empleo de la materia prima actual de los cementos. |

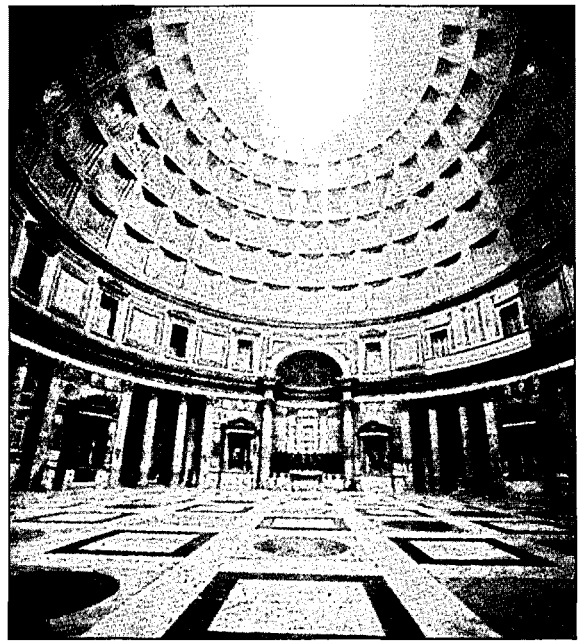


Fig. 2.1 PANTEÓN en ROMA

1796 Parker, J. patenta en Inglaterra un método para fabricar cemento hidráulico por calcinación de nódulos de cal, con alto contenido de arcilla. A este cemento se le conoció con el nombre de "cemento romano".

1817 Vicat, L. es considerado el creador del cemento, a él se debió el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad. Publicó importantes trabajos en 1818 y 1828 sobre la fabricación del cemento por medio de mezclas de calizas y arcillas, dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente.- Vicat empleó el sistema de vía húmeda para la fabricación del cemento, con el que marcó el inicio del actual proceso de fabricación. Vicat comienza en 1853 a estudiar la acción destructiva del agua de mar sobre morteros y concretos. M. de Saint-Leger con orientaciones de Vicat patenta el proceso de fabricación de las cales hidráulicas, calcinando carbonato de calcio y arcilla a la temperatura del orden de los 1000 grados centígrados. A partir del año 1826 se inicia su fabricación regular en Moulineaux puerto de Francia.

1824 Aspdin, J. patenta en Inglaterra un proceso de fabricación de las cales hidráulicas que difiere del proceso de Saint-Leger, al aumentar considerablemente la temperatura de calcinación, obteniendo un producto

de significativas características superiores, compensando el aumento de su elevado costo energético. De esta forma se logró obtener un producto final de mayor valor hidráulico y de resistencia mecánica más elevada. El adherente así obtenido, recibió el nombre de Cemento Portland, ya que, una vez que se mezcla con agua y se endurece, resulta una masa pétrea semejante en color, solidez y durabilidad a una grava calcárea de la Isla de Portland en Inglaterra. En Francia, Vicat publica varios informes en el que lo sitúan como precursor de los conocimientos actuales sobre la importancia de la cantidad de agua de mezclado y de la granulometría de la arena en la resistencia de la argamasa; hizo consideraciones sobre los inconvenientes del exceso o insuficiencia de la cantidad de arena en una argamasa, resaltando la importancia de su finura, recomendando, la mezcla de arenas finas y gruesas, lo cual considera ventajoso, estableciendo así las reglas clásicas de la composición granulométrica, que fueron más tarde cuantificadas. Vicat expone, además, la influencia de la compacidad en la resistencia de los conglomerados y los inconvenientes del exceso de agua y de las consistencias muy fluidas, anticipando el significativo predominio de la relación agua/cemento sobre las propiedades de los conglomerados, comprobados posteriormente por Feret y Abrams. De esta forma, él logra obtener un producto final de mayor valor hidráulico y de resistencia mecánica más elevada.

1830 Rodelet por esos años afirma que la naturaleza de la arena no tiene importancia fundamental en la resistencia del mortero, porque sólo su finura interviene de forma significativa en su calidad final. Preconiza el empleo de arenas tan gruesas como sea posible, compatible con los espesores de recubrimiento y de las juntas de revenimientos de los componentes de albañilería.

1884–1885 Ransome, F. Descubrió el horno horizontal rotatorio de elevada producción continua, usado en la actualidad. Anteriormente se habían usado los hornos verticales intermitentes y en 1884 se usaron los hornos continuos hasta llegar al uso del horno horizontal rotatorio.

1887 Le Chatelier, H. a través de observaciones efectuadas en el microscopio óptico, empleando la técnica semejante a la usada en mineralogía y petrografía, determina cuales son los componentes presentes en el cemento Portland e indica como se producen las reacciones químicas principales. De ese trabajo fundamental de Le Chatielier se derivan los trabajos actuales sobre la química del cemento.

1893 Michaellis critica la teoría de fraguado de Le Chatelier al plantear que en el proceso de fraguado se forman cristales. Ambas teorías coloides y cristaloides son aceptadas en la actualidad y son la base de las teorías de hidratación del cemento. Le Chatelier observa ya, por ese tiempo, la importancia del silicato y aluminato tricálcicos en la resistencia del cemento hidratado, así como la baja hidraulicidad del silicato bicálcico.

1929 Bogue, R. H. propuso la formula clásica para obtener, en primera aproximación, la composición química potencial del Cemento Portland a partir de los resultados del análisis químico convencional – Método Gravimétrico universalmente reconocido hasta la actualidad.

## 2.3 Desarrollo histórico de la dosificación del concreto

| *FECHA* | *ESTADO DEL CONOCIMIENTO* |
|---|---|
| 1881 | Preaudeau presentó un método de dosificar los morteros y el concreto. Propuso, fuera determinado el volumen de vacío de la arena y que el volumen de pasta aglomerante para llenar éste sea un 5 % superior al volumen de vacíos encontrados en este agregado. A continuación se debe determinar el volumen de vacío de la grava o agregado grueso, a partir de la cual se calcula el volumen de morteros como un 10 % superior al volumen del vacío del agregado grueso, anticipándose al método de granulometría discontinua, enunciado en 1927 por Lecler du Sablon. |
| 1888 | Alexandre, P. estudia la influencia del agua en la resistencia a compresión de las argamasas y la divide en dos partes. La primera destinada a formar la pasta de cemento y la otra para mojar la arena, estableciendo el |

concepto de agua de mojado, llegando a formular el coeficiente para el cálculo del agua de mojado en función de las dimensiones de las partículas de arena.

1892 Feret, R. Jefe del Laboratorio de "Ponts et Chaussees" de Francia, fue el primero en realizar los estudios del proporcionamiento racional de los componentes de una mezcla de concreto. Feret descubrió la Ley Fundamental que relaciona la resistencia del mortero con su compacidad. Estudió mezclas con el mismo cemento, la misma arena, la misma edad y condiciones de curado, verificando experimentalmente que la resistencia a compresión del mortero, inicialmente plástico, está en función solamente de la relación del volumen absoluto de agua, más el volumen de vacíos del mortero, con la del cemento.

1896 Feret, R. perfecciona su modelo matemático que correlaciona la resistencia a compresión con el volumen de agua y de vacíos, proponiendo la siguiente expresión:

$$f_{cj} = k_1 \left[ \frac{C_{abs}}{1 - M} \right]^2$$

$f_{cj}$ = resistencia a compresión del mortero a j día de edad.

$k_1$ = constante que depende de la naturaleza de los materiales, de la edad y de las condiciones de curado.

$C_{abs}$ = volumen absoluto de cemento por unidad de volumen del mortero.

$M$ = volumen absoluto de agregado fino por unidad de volumen de mortero.

1901 Fuller, W. B. con motivo de la construcción de varios tanques para agua, en el estado de New Jersey EUA, verificó experimentalmente que a partir de la curva granulométrica del agregado total, conducían a concretos de máxima compacidad y resistencia a compresión y propuso una ecuación que representa el fenómeno.

1907 Fuller, W. junto a S. E. Thompson, establecieron una serie de reglas para el proporcionamiento de los materiales constituyentes del concreto. A Fuller y Thompson, se les consideran los primeros en defender la importancia de aplicar la composición granulométrica de los agregados en la dosificación del concreto, seguidos posteriormente por Bolomey.

1918 Abrams, D. A. fue el que realizó uno de los aportes de mayor significación al estudio de la dosificación del concreto al estudiar un gran número de pruebas y al analizar más de 50 000 probetas. Anuncio la siguiente ley "Dentro del campo de los concretos plásticos, la resistencia a los esfuerzos mecánicos, así como las otras propiedades del concreto endurecido, varían en relación inversa a la relación agua-cemento".

Abrams introduce, el término Módulo de Finura, que propuso para representar por medio de un sólo índice, la distribución granulométrica de los agregados.

1922 Abrams, D. A. también introduce la noción de la trabajabilidad del concreto y propuso la medida de su consistencia a partir del abatimiento de un cilindro de 15 cm. de diámetro y 30 de altura. Más tarde, en 1922 lo modifica por un tronco cónico de 30 cm. de altura, 20 cm. de base inferior y 10 cm. en la superior.

1923 Talbot, A. N y Richart, F. E. dos investigadores de la Universidad de Illinois cuestionan en este año la validez del modelo de Abrams. Ellos, como Feret, defendieron que la magnitud total de los vacíos en el concreto (espacios ocupados por el aire y el agua) son los que determinan su resistencia final. Planteaban que dentro de ciertos límites, la resistencia del concreto era la misma que la de su mortero, ya que el agregado grueso sólo actuaba como relleno inerte. Con el advenimiento del concreto de consistencia seca y la incorporación de aire en éste, se comprueba que la teoría de Abrams sólo se ajusta a concretos plásticos y de bajo porciento de aire incorporado y requiere de ajustes cuando no se trata de estos concretos.

1925 Bolomey introdujo el uso de la trabajabilidad en el concreto, proponiendo el empleo de las curvas granulométricas ideales elaboradas por Fuller y Thompson. Él, plantea unas ecuaciones para la determinación de la resistencia del concreto que es la más difundida mundialmente, al considerar que la característica de forma de los agregados tiene una marcada influencia en la resistencia final del concreto que se diseña.

$$R_h = R_c \cdot K\left(\frac{1}{w} - 0{,}5\right)$$

donde:

$R_h$ = Resistencia a compresión del concreto establecida por proyecto a una edad determinada en $Kg/cm^2$.

$R_c$ = Resistencia a la compresión del cemento en $Kg/cm^2$.

$K$ = Coeficiente empírico prefijados de acuerdo al tipo y graduación de los agregados.

$w$ = Relación agua – cemento en peso del concreto.

1927 Du Sablon, L publica los siguientes principios contra la granulometría continua:

a) Cuanto más uniformes fueron las dimensiones de los granos, mayor fue la compacidad, en el concreto obtenido de la mezcla de ese agregado con el mortero.

b) El máximo de compacidad fue obtenido cuando el volumen de mortero fue del 35% superior al volumen de vacíos del agregado.

c) Debe existir una relación de 2.5 entre la mínima dimensión del agregado grueso y la máxima dimensión del agregado fino.

1931 Lyse, I. realiza este año, su contribución al diseño de los concretos, demostrando que dentro de ciertos límites es posible considerar la masa de agua por unidad de volumen de concreto como la principal determinante de la consistencia del concreto fresco, cualesquiera que sea la proporción de los demás materiales de la mezcla. Esta verdad se verifica siempre que sean mantenidos materiales de la misma naturaleza, con granos de la misma forma, textura y tamaño máximo. Inge Lyse sugiere, además, emplear en la Ley de Abrams la relación agua-cemento en masa y no en volumen como originalmente propuso Abrams.

1937 Caquot establece la ley de variación de los índices de vacíos de una composición granulométrica, como el inverso de la raíz quinta de la máxima dimensión del inerte y anuncia el principio del efecto pared.

1941 Faury incorporando los estudios de Caquot y Bolomey, propuso un método de diseño basado en una curva granulométrica que consideraba el efecto pared y la trabajabilidad del concreto.

1944 El ACI publica en EUA el texto elaborado en el año 1936 por su Comité 613, el primer documento normativo consensual para la América, sobre dosificación del concreto.

1948 L' Hermite destacado investigador francés propuso el conocimiento del concreto fresco a partir de sus constantes reológicas, correlacionándolas con las propiedades del concreto endurecido.

1952 Joisel A. propuso un complejo método fundamentado en la granulometría continua de Fuller, que tenía en cuenta: trabajabilidad, efecto pared, consumo de cemento, agua, compacidad del concreto y área específica de la mezcla. Por su complejidad de aplicación no se difundió.

1954 El ACI realiza la primera revisión del documento elaborado por el Comité 613 y publicado en 1944, el cual incluye los aspectos relativos al aire incorporado y estimación del agregado grueso a partir del volumen aparente compactado seco, por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de finura de las arenas, indicado en el texto ACI 613 54. Este Comité a partir del año 1970 cambió al ACI–211.11.

También en ese mismo año 1954, en Londres, la Cememnt and Concrete Association, promueve el Symposium on Mix Desing Quality Control of Concrete, rescatando la importancia de la contribución de los ingleses en esta esfera. En este evento se presentó una revisión del estado del conocimiento de la época, sobre el control de la calidad del concreto, actualizando los criterios sobre el diseño del concreto, sobre la base de la resistencia especificada en el proyecto estructural y se resaltó el diseño del concreto, tomando como base los datos estadísticos, abriendo mayor perspectiva del conocimiento de la probabilidad del colapso de las estructuras. Desde ese evento, se presentan aplicaciones en modelos estadísticos adecuados que representan los fenómenos relacionados con la calidad del concreto. Muestra la influencia de escoger la resistencia de diseño y define y adopta la desviación promedio, como parámetro de valoración del rigor de la producción del concreto, una vez que se acredita y no, el coeficiente de variación, definido por los investigadores de la época.

1955 De Lochhan, M. G. inventa la máquina moldeadora sobre banco de losas ahuecadas, que se producen con concreto vibrocompactado. En 1960 en Canadá la Sociedad SPIROLL desarrolla una máquina original para producir esta losa, por compactación por vibración del concreto y permite el uso de bajas relaciones agua-cemento. Se difunde por Europa el uso de esta tecnología para la producción de diferentes elementos prefabricados.

1958 Walz, K. publica en Alemania, recomendaciones para la dosificación y producción de concretos con propiedades específicas, mediante curvas que correlacionan la resistencia del cemento con la del concreto, exponiéndose en la norma DIN 1045 a partir del año 1970.

1965 Se obtienen en EUA los primeros concretos de alta resistencia, con resistencias a compresión superiores a 50 MPa. Hoy en día se han obtenido en diversos países, elementos estructurales en edificios altos, fundamentalmente columnas, con concretos con resistencias de 90 y 120 MPa.

1970 Power, T. C. realiza aportes significativos en el campo de los estudios del concreto que constituyen la base a su vez de estudios para el desarrollo de múltiples investigaciones realizadas por otros científicos dedicados al concreto.

1970 y 1972 Se origina el concepto de Concreto Compactado con Rodillo (HCR) en la conferencia Engineering Fundation, efectuadas en Asilomar California, que no es más que el concreto vibro-compactado.

1978 O´Reilly, V. A. después de largos años de estudios e investigaciones y probar más de 20 000 testigos, logra un Nuevo Método de Dosificar Concreto de baja consistencia, en la que intervienen:

a) la influencia de las características de forma de los agregados gruesos.

b) establece una nueva forma de determinar las proporciones de los agregados finos y gruesos.

c) incluye en su ecuación, de forma directa la influencia de la consistencia del concreto en su resistencia. Lo cual se logra por primera vez en una ecuación.

d) hace la determinación de la cantidad de agua para una consistencia requerida de forma más exacta y racional. El método garantiza los parámetros que se exigen para lograr la durabilidad del concreto.

1983 O´Reilly V. A. ante la inexistencia de un método universal para dosificar el Concreto de Alta Consistencia que se compacta por vibración, creó uno de forma científica, después de muchos años de investigación y pruebas en la producción de construcciones, basado en:

a) medición de la consistencia del concreto siempre con el consistómetro VeBe.

b) establece una nueva forma de determinar las proporciones óptimas de los agregados finos y gruesos.

c) determina la cantidad de pasta de cemento pc, que requiere la consistencia y resistencia, de un concreto exigido y que será compactado con un equipo predeterminado, cuya aceleración está especificada.

d) determina la característica de forma de los agregados gruesos que se empleén

Metha, P.K. y Aitcin, P.C. introducen él termino Concretos de Alto Desempeño, HAD, para calificar las mezclas de éste. Tienen tres características: gran trabajabilidad, alta resistencia y gran durabilidad. La primera diferencia fundamental entre el concreto de alta resistencia y el concreto de alto desempeño, es el requisito obligatorio de la durabilidad en el caso del HAD.

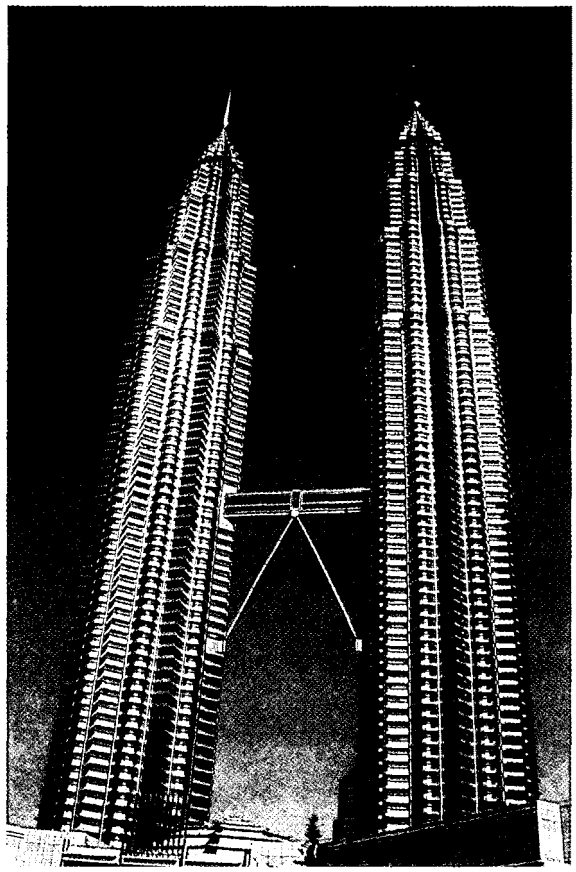


Fig. 2.2 Torres Petronas, Kuala Lumpur Malasia–1997

Una expresión del uso del Concreto de Alto Desempeño

Al hacer esta síntesis cronológica de la creación, el uso y el desarrollo del cemento Portland y del concreto, la cual tiene un objetivo didáctico orientativo, hemos estado obligados a

dejar de mencionar importantes trabajos de significativos investigadores de diferentes países, los cuales pueden encontrarse en la bibliografía adjunta.

Como se puede observar en este proceso de desarrollo en el que los protagonistas principales son el cemento y el concreto, por la trascendencia que su uso ha aportado al desarrollo de la humanidad se pone de manifiesto la evolución ascendente que han tenido estos dos materiales, fundamentalmente por las investigaciones realizadas con rigor científico, que han dado resultados notables frente a las suposiciones y el empirismo, que también existió y que han servido para contrastar a la hora de escribir la historia.

# Capítulo 3

# EL CONCRETO EN LA ACTUALIDAD

## 3.1 Antecedentes

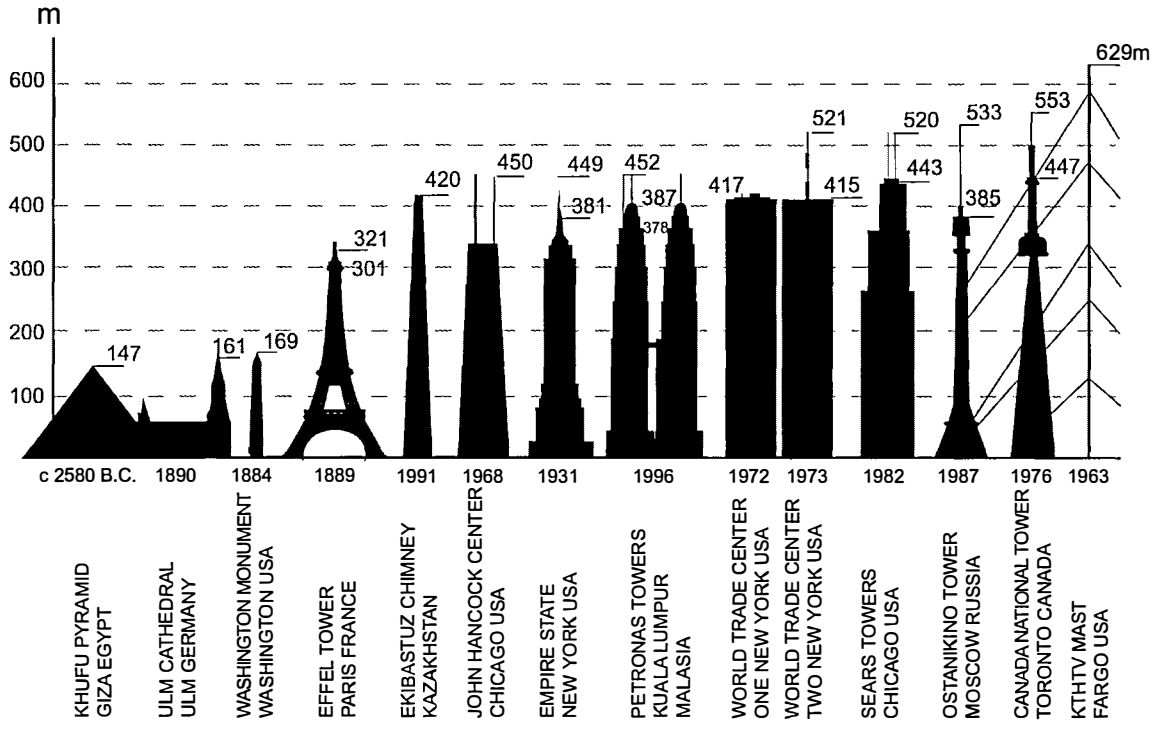
La exigencia fundamental que se le hizo al concreto en la primera etapa de su creación fue su resistencia a la compresión, además de satisfacer la resistencia al agua. Más tarde, cuando se une al acero para constituir el concreto armado, aparecieron otras exigencias adicionales, como él módulo de elasticidad, la estabilidad dimensional, la tenacidad, etc.

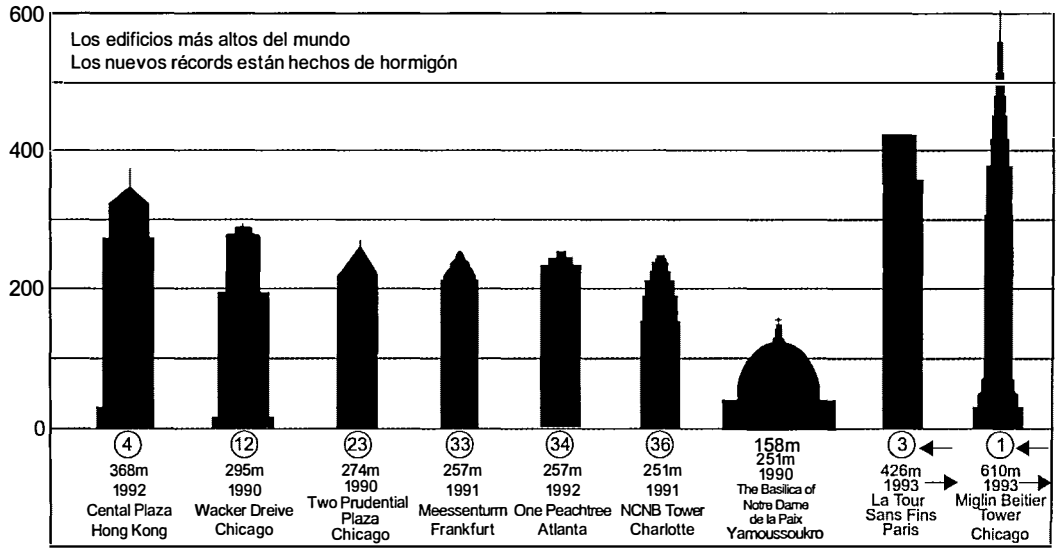
Pero a partir de la década de los años 70 comenzaron a aparecer síntomas de deterioro significativos en las estructuras de concreto armado, hechas con este material, que se le consideraba invulnerable y eterno, razón por la que se intensificaron los estudios sobre la durabilidad de éste.

Hoy, se debe incluir siempre a la hora de diseñar una estructura de concreto armado no sólo las anteriores exigencias, sino también su durabilidad.

Por lo que deseamos reafirmar la necesidad de que el concreto no sólo debe cumplir con las exigencias de resistencia exigidas, para desarrollar su papel como material de construcción en elementos estructurales. Poco valor tendría tanto técnica como económicamente lograr concretos de resistencia exigida sí durante su vida de servicio, agentes agresivos de diversas naturalezas disminuyeran sus propiedades, con el consiguiente deterioro de los elementos estructurales afectados, pudiendo llegar a producirse el colapso de la estructura. En consecuencia, no es suficiente que un concreto sea resistente solamente.

Es fundamental que el concreto además de resistente, sea ***durable***. Esta necesidad, aunque de carácter evidente y determinante se ha mantenido en un segundo plano, subestimado por el natural interés en conseguir un concreto que dé respuesta a las crecientes necesidades de resistencia que, por razones estructurales exigen, los cada vez más altos edificios y complejas construcciones como muestra el desarrollo histórico, de éstas, en la Fig. 3.1



Actualmente está resuelta de forma óptima la obtención de concretos de alta resistencia, basta señalar la posibilidad de alcanzar resistencias superiores a los 100 MPa. Siempre que usemos agregados y cementos de alta calidad, aditivos químicos de última generación y Silica Fume.

Contrasta significativamente, que mientras la producción del cemento y del concreto, se incrementaban vertiginosamente por año y los edificios de grandes alturas y las obras de grandes claros se multiplican, las investigaciones y el establecimiento de códigos basados en éstas garanticen la durabilidad de dichas estructuras en función del medio agresivo que la circunda, son comparativamente limitadas.

No obstante, ya son muchos los países desarrollados y algunos en vías de desarrollo que preocupados por la significación de esta problemática, trabajan arduamente en hacer que la durabilidad de las estructuras de concreto armado, tenga la atención que le corresponde a través de prestigiosas instituciones como el RILEM, el CEB, CIB, el ACI, la ASTM, el CYTED mediante la RED DURAR y la RED REHABILITAR y otras por sólo mencionar algunas.

Razón poderosa, para hacer en este libro una introducción al problema que le sirva a estudiantes y profesionales, como guía para estudiar con profundidad el tema de forma cuidadosa, en obras especialmente escritas con dicho objetivo específico, que posibilite crear una conciencia de la trascendencia e importancia que esta temática tiene para nuestro país y para todos aquellos que estén sometidos a un fuerte brisa marina ó a la acción de otros agentes agresivos, que afectan la durabilidad de las estructuras de concreto.

## 3.2 La durabilidad del concreto

El Comité 201 del ACI define la durabilidad del concreto de cemento Portland, como:

> ***La capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga a su medio ambiente.***

Ningún material es intrínsecamente durable. Producto de la interacción entre su microestructura y el ambiente que lo rodea hace que sus propiedades cambien con el tiempo.

Se considera que un material alcanza el final de su vida de servicio cuando sus propiedades bajo ciertas condiciones de uso se han deteriorado a tal extremo, que el continuar utilizándolo se le considera inseguro ó antieconómico.

Los procesos que pueden provocar una durabilidad insuficiente son variados y complejos y están en dependencia, tanto de la concepción del elemento estructural realizada durante el proyecto, la calidad de los materiales componentes, forma de dosificación, fabricación, y su mantenimiento.

## 3.3 Agentes que deterioran el concreto

El deterioro de las características del concreto es debido de forma general a la acción combinada de diferentes agentes agresivos, los cuales se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, en función de su forma de actuar:

Acciones ***químicas***, acciones ***físicas***, acciones ***mecánicas*** y acciones ***biológicas***.

Entre las ***acciones químicas*** que influyen negativamente en la durabilidad del concreto se consideran: la corrosión del acero embebido en el concreto, la lixiviación de la pasta de cemento, las reacciones expansivas que incluyen el ataque de sulfato y la reacción álcali-agregado.

Estas acciones constituyen sin duda las más agresivas a la masa de concreto, son las más temidas por lo que se deben tener en cuenta cuidadosamente desde que se concibe el proyecto estructural de una construcción.

De acuerdo con lo antes expuesto los agentes químicos más frecuentes que producen el deterioro del concreto son:

- el aire y otros gases, en ambiente natural o contaminada.
- aguas agresivas (puras, de mar, industriales, negras agrícolas, negras urbanas) y otros líquidos.
- productos químicos orgánicos o inorgánicos.
- suelos y terrenos agresivos.

Los agentes químicos citados pueden actuar solos o de forma combinada lo que NO nos permite definir una forma de actuación similar, o con resultados semejantes.

Internacionalmente se clasifica la agresión química formada por uno o varios de los siguientes procesos:

a) Disolución de los compuestos hidratados del cemento, en particular la cal.
b) Formación de nuevas sales solubles, que van siendo arrastradas por el agua (generadas por ataques de aguas puras, ácidos orgánicos e inorgánicos, agua de mar, etc.).
c) Formación de cristales u otros compuestos poco solubles, con aumento de volumen y la consiguiente creación de tensión interna.

La reacción del $Ca(OH)_2$, o sea, la portlandita del concreto con el $CO_2$ del ambiente, produce la formación de carbonatos lo que genera una disminución de su pH. Al disminuir la basicidad del concreto disminuye la protección que este le ofrece a las armaduras de acero posibilitando que otros agentes puedan fácilmente atacarlos, transformando el acero en oxido de hierro por la corrosión, generando un aumento del volumen de éste, que ejerce esfuerzo de tensión sustancial en el concreto circundante a las barras oxidadas. También se manifiesta adicionalmente este proceso por la aparición de manchas, agrietamientos y fisuración del recubrimiento de concreto de refuerzo. Al propio tiempo la sección transversal del acero de refuerzo se reduce. Como consecuencia de este proceso, un agotamiento estructural puede ocurrir mediante una pérdida de la adherencia entre el acero y el concreto, debido a las grietas y fisuras, o bien como resultado de la reducción de la sección transversal del acero. Este último efecto puede tener una significación especial en estructuras de concreto pretensado, en las cuales un grado relativamente pequeño de la corrosión de los cables de acero para pretensar puede ocasionar su falla. Pero, también en las estructuras de concreto armado más comunes, los procesos degradantes escritos, conducen en todos los casos a la pérdida de su durabilidad y utilidad o a su desplome en caso extremo.

El deterioro de estructuras de concreto armado, debido a la corrosión del acero de refuerzo, ocurre mayormente en ciertos tipos de estructuras expuestas solamente a una condición especial de tensión. Este fenómeno se observó por primera vez en estructuras de concreto armado situadas en la costa, expuesta a un ambiente atmosférico marino o de agua de mar y también en plantas productoras de sustancias químicas. Más recientemente, la corrosión del acero de refuerzo ha resultado ser un problema extremadamente serio con la aparición en cubiertas de puentes, estructuras de estacionamientos de vehículos y otras estructuras de carreteras en las cuales durante el invierno se utilizan sales de descongelamiento.

En la mayoría de los casos la causa principal y más común de la corrosión del acero de refuerzo y del deterioro subsiguiente de las estructuras ya mencionadas, resulta ser la acción de los cloruros.

Los iones cloruros se consideran como el factor más importante que influye en la intensidad de la corrosión del concreto armado.

Los ***efectos físicos*** más comunes que actúan adversamente en la durabilidad del concreto incluyen: el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de las sales en los poros, la exposición a temperaturas extremas como son las heladas o el fuego y el desgaste de la superficie.

Las ***acciones mecánicas*** más comunes que pueden dañar la durabilidad de una estructura son las cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones, etc. que pueden estar provocadas por causas naturales, como el viento y el agua o por causas artificiales, que afectan el comportamiento futuro del elemento estructural. Este tipo de acción se debe considerar en el proyecto y es en general, de las que mayor conocimiento se tiene.

Entre las ***acciones físico-mecánicas*** de más significación que se producen en la estructura de concreto armado y que requieren de un estudio más detenido, está, el fenómeno de la fisuración que debe ser objeto de un cuidadoso análisis por parte de los especialistas estructurales. Si excluimos las fisuras motivadas por causa sísmica, se deben estudiar:

- fisuras por efectos directos de las cargas aplicadas, tanto por tensión como por flexión cortante y torsión. Este tipo de efecto es el más ampliamente considerado en las Instrucciones de concreto armado o pretensado.
- fisuración debida a la existencia de deformación impuesta, la cual puede proceder de movimiento de apoyo, contracción o variación de temperatura. A diferencia del caso anterior,

para este y para el siguiente, las indicaciones en las Instrucciones son inexistentes o muy escasas.

- fisuración debida a fenómenos plásticos a muy temprana edad en el concreto, sean estas por contracción o bien por asentamientos.

Las ***acciones biológicas***, las generan los microorganismos, fungicidas y bacterias.

Reiteramos que la durabilidad del concreto está íntimamente relacionada con su compacidad, su porosidad y su permeabilidad. Pudiéramos ser más categóricos expresando que de estas tres propiedades depende en gran medida la **VIDA ÚTIL** de una estructura de concreto armado, razón por la cual debemos dedicarle desde su dosificación, producción, transporte, colocación, vibrado, curado y todas las demás atenciones que garanticen estas cualidades en el concreto.

Estas propiedades del concreto son dependientes de su estructura, razón por la cual las relaciones estructuras-propiedades se deben analizar partiendo de las características más significativas que se le exige al concreto, tales como resistencia, estabilidad dimensional y durabilidad.

Conociendo que las propiedades fundamentales del concreto vienen dadas por su estructura interna, estas propiedades pueden ser modificadas exprofesamente haciendo cambios adecuados en su estructura.

Si bien es cierto que las relaciones entre sus propiedades y su estructura no se han desarrollado en su totalidad, ya existen conocimientos que permiten hacerles cambios que garanticen las propiedades exigidas por el desarrollo de la ingeniería.

Para una mejor comprensión de tan importantes cualidades del concreto haremos una presentación de los elementos básicos de su estructura.

## 3.4 La estructura del concreto

La estructura del concreto está constituida por tres componentes; el agregado, la pasta de cemento hidratada y la zona de transición entre la pasta y el agregado.

Para una mejor comprensión de estos tres componentes del concreto, hagamos un análisis de su estructura.

El concreto tiene una estructura altamente heterogénea y compleja por lo que resulta muy difícil predecir con exactitud y seguridad su comportamiento futuro, conociendo que esta estructura no se mantiene estable, debido a que la pasta de cemento y la zona de transición evolucionan con el tiempo, la humedad y la temperatura que le rodean.

La estructura del concreto está constituida por los elementos gruesos, que pueden ser percibidos por el ojo humano, (él limite de detección del ojo humano es de 0.2 mm) y se le denomina MACROESTRUCTURA la estructura total, y MICROESTRUCTURA a la que está constituida por los elementos que requieren de la aplicación microscópica para ser observada.

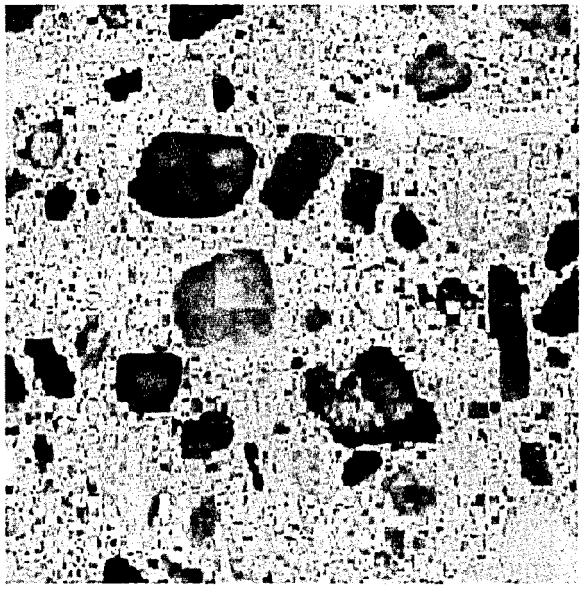


Fig. 3.2 Macroestructura de un concreto poco compacto

Si observamos la sección transversal de la masa de concreto expuesta en la Fig. 3.2 podemos ver y diferenciar las partículas del agregado de diferentes dimensiones y la masa que los aglutina, compuesta por la pasta de cemento hidratada endurecida.

Si partimos del principio que las propiedades del concreto pueden modificarse haciéndole los cambios adecuados a su estructura interna en función de las cualidades que se exigen para hacerlo resistente a la agresión de los agentes externos, se hace necesario conocer primero su microestructura y después otros factores influyentes en sus propiedades finales, para poder ejercer esas acciones de cambios deseados.

### 3.4.1 La microestructura del concreto

La microestructura del concreto, es la estructura material en estado sólido generada por el fraguado del cemento y cuyos tamaños son inferiores a 0.20 mm. Por lo que la microestructura es la fase sólida, en la que el concreto ha logrado un desarrollo mecánico debido al estado avanzado de las reacciones químicas del cemento con el agua, produciéndose una cierta rigidez conferida por los nuevos productos que se generan.

Las características de la microestructura del concreto estan relacionadas con la porosidad de la pasta de cemento endurecida, la conexión entre los poros, la distribución de sus tamaños, capacidad para el transporte de fluidos, relaciones y equilibrios entre los diferentes productos de la hidratación, la naturaleza de la interfase entre la pasta hidratada y el agregado, así como otros factores.

Los estudios de la microestructura del concreto pueden llegar a ser muy complejos, en dependencia de lo que se desea lograr. En función de los objetivos que se requieran obtener podrán usarse distintas técnicas y sistemas, tales como: microscopía óptica, microscopía electrónica (de barrido convencional, de barrido ambiental etc.) hasta procedimientos para

reproducir en computadoras los procesos de hidratación del cemento, por el uso de modelos matemáticos basados en la teoría de fractales.

El estudio de la microestructura del concreto tiene gran importancia para el conocimiento de su durabilidad, en tanto que:

1) Define el comportamiento mecánico del concreto (resistencia, tenacidad, etc).
2) Dimensiona los procesos de transporte de fluidos en el concreto, lo que repercute en:
    2.1 ***Funcionalidad:*** Impermeabilidad, estanquidad del concreto.
    2.2 ***Durabilidad:*** Acceso de sustancias agresivas a los componentes del concreto.
3) Define la reología del concreto: contracción, fluencia, etc.

### 3.4.2 La pasta de cemento hidratada. Su porosidad.

El cemento anhidro al ponerse en contacto con el agua reacciona químicamente, produciéndose una serie de nuevos componentes hidratados, dichos componentes se desarrollan en forma tal que establecen una determinada microestructura que se manifiesta por el crecimiento, la ubicación y la relación entre los cristales que se forman.

Este fenómeno está en un ***"equilibrio dinámico"*** que se transforma con el tiempo, en función del grado de hidratación. Los poros que se generan en esta microestructura se denominan "poros del gel".

Analicemos varios fenómenos que nos permitan conocer con mayor detalle la estructura interna del concreto, partiendo de los componentes químicos del cemento anhidro, sus reacciones con el agua y las características finales de la pasta de cemento endurecida.

### 3.4.3 Composición del cemento anhidro e hidratado

La composición química del cemento anhidro, está constituida por cuatro componentes básicos:

- silicato tricálcico -$SC_3$ - conocida como alita, en un contenido del 45 al 60%
- silicato dicálcico -$SC_2$- conocida como belita, en un contenido del 15 al 30%
- aluminato tricálcico -$AC_3$- en un contenido del 6 al 12%
- ferro aluminato tetracálcico -$AFC_4$- en un contenido del 6 al 8%

Estos componentes al entrar en contacto con el agua, reaccionan y originan los siguientes compuestos químicos:

- ***silicatos cálcicos hidratados*** -S-C-H- formado por una "masa" sin una estructura cristalina muy desarrollada, constituyendo del 50 al 60% del volumen de sólidos de una pasta de cemento Portland completamente hidratada, siendo el más importante de todos los compuestos formados.

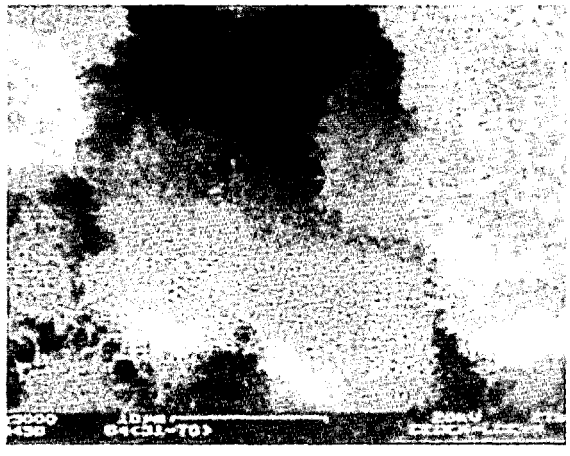


Fig. 3.3 SCH Morfología en láminas

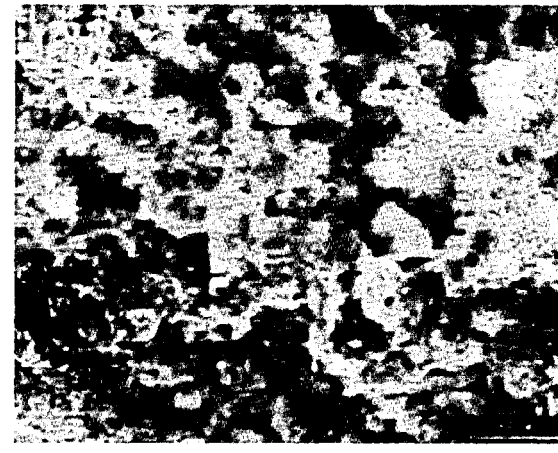


Fig. 3.4 SCH Estructura densa

- ***hidróxido de calcio*** -CH- conocido como Portlandita, que cristaliza con cristales hexagonales bien definidos, constituye del 20 al 25% del volumen de la pasta hidratada.

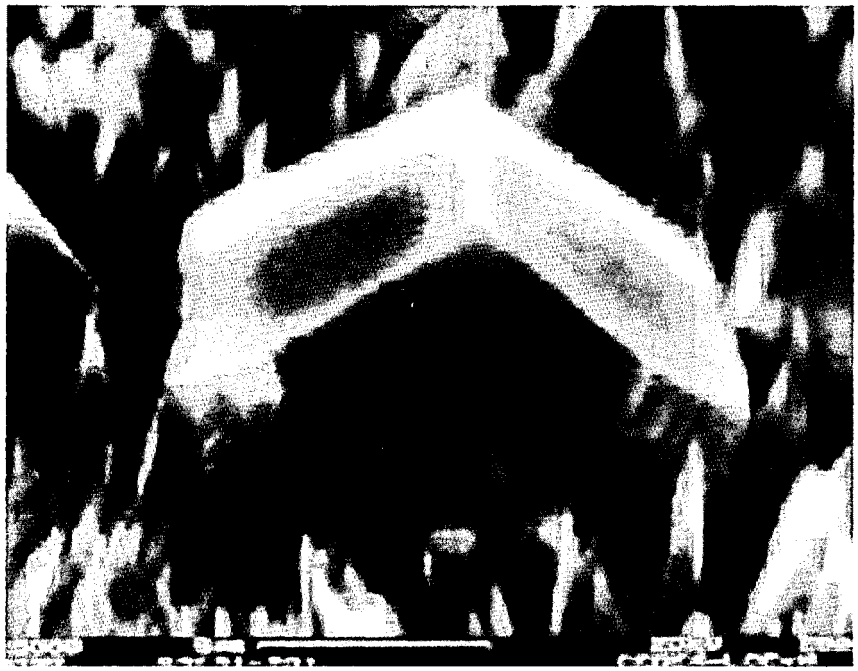


Fig. 3.5 Portlandita (CH). Aparece en los primeros estadios de hidratación de las alitas o belitas. Al ser un compuesto muy soluble en concretos o pastas por encima de los 28 días puede lixiviarse y facilitar vías de penetración a agentes externos.

En contraste con el S-C-H, el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ es un compuesto con una estequiometría definida. Comparado con el S-C-H, el potencial de contribución a la resistencia del hidróxido de calcio debido a las fuerzas de Van del Waals es limitado, como resultado de un área superficial considerablemente menor. Es importante conocer que una cantidad considerable de hidróxido de calcio en el cemento Portland hidratado tiene un efecto adverso en la durabilidad química frente a las soluciones ácidas, debido a que es mayor la solubilidad del hidróxido de calcio, que la del S-C-H.

- ***sulfoaluminato de calcio***, también llamado Ettringita, está presente en la masa de la pasta hidratada en un 15 al 20 % y se manifiesta en forma de cristales planos hexagonales y juegan un papel menor en las relaciones estructura-propiedades.

La presencia del hidrato de monosulfato $C_4ASH_{18}$, en el concreto de cemento Portlant, lo hace más vulnerable al ataque de los sulfatos.

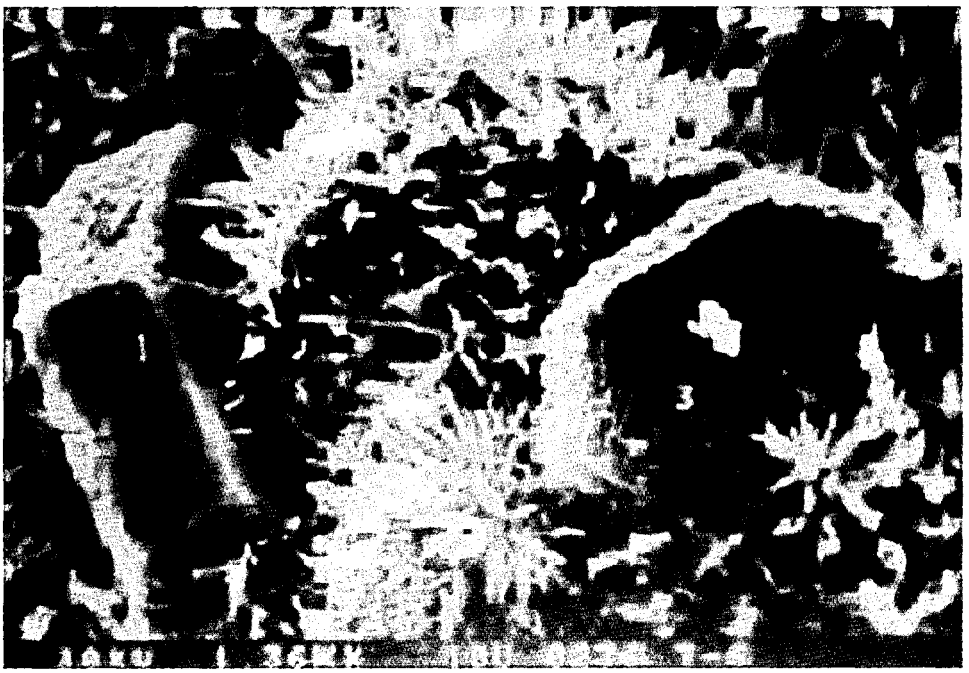


Fig.3.6 Ettringita ($CA_3$, 3CS, $H_{32}$). Denominada también "Sal de Candlot". Se produce por hidratación del yeso, la portlandita y el hidróxido de aluminio. Aparece en el momento del fraguado (ettringita primaria). Cuando hay un excedente de aniones de sulfato, y una vez hidratado el producto, puede combinarse con la portlandita (que pasa a la solución como iones OH) al variar su pH, dando lugar a un producto expansivo que desarrolla presiones destructivas por encima de los 6MPa.

Es posible, que cierta cantidad de granos de cemento sin hidratar quede en la microestructura de la pasta de cemento hidratada un largo tiempo después de la hidratación.

La estructura de los productos hidratados de la pasta de cemento como se ha expresado no permanecen, ni estática, ni constante, a lo largo del tiempo.

Se ha demostrado que la dinámica de reacción de cada uno de los componentes así como su repercusión en el fraguado, endurecimiento, permeabilidad y porosidad del concreto es como se representa en la Fig. 3.7 [ META P. K. y MONTEIRO P. J. Año 1998]

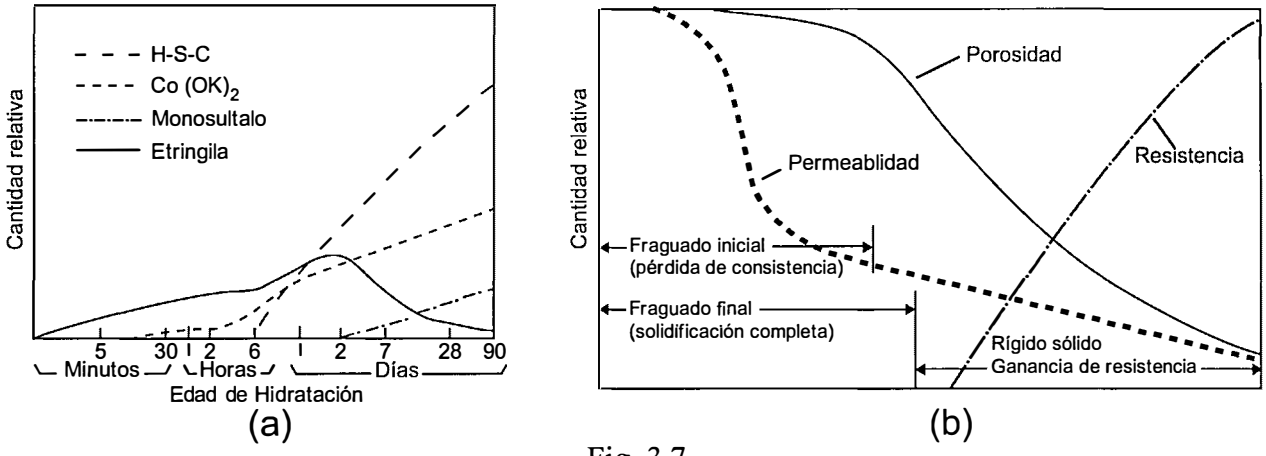



Fig. 3.7

K. L. SKRIVENER describió el desarrollo de la microestructura del gel, de acuerdo con los pasos siguientes Fig. 3.8:

***Estado a***: Grano de cemento no hidratado. Contiene parte de cada uno de los componentes mineralógicos.

***Estado b***: A los 10 minutos del comienzo de la hidratación. El sulfato cálcico se ha disuelto en el agua próxima al grano y posteriormente, reacciona con el aluminato formando Ettringita. Se forma un gel amorfo, rico en aluminato en la superficie del grano. Pequeñas agujas de aluminato se colocan tanto en el borde del gel como en la disolución.

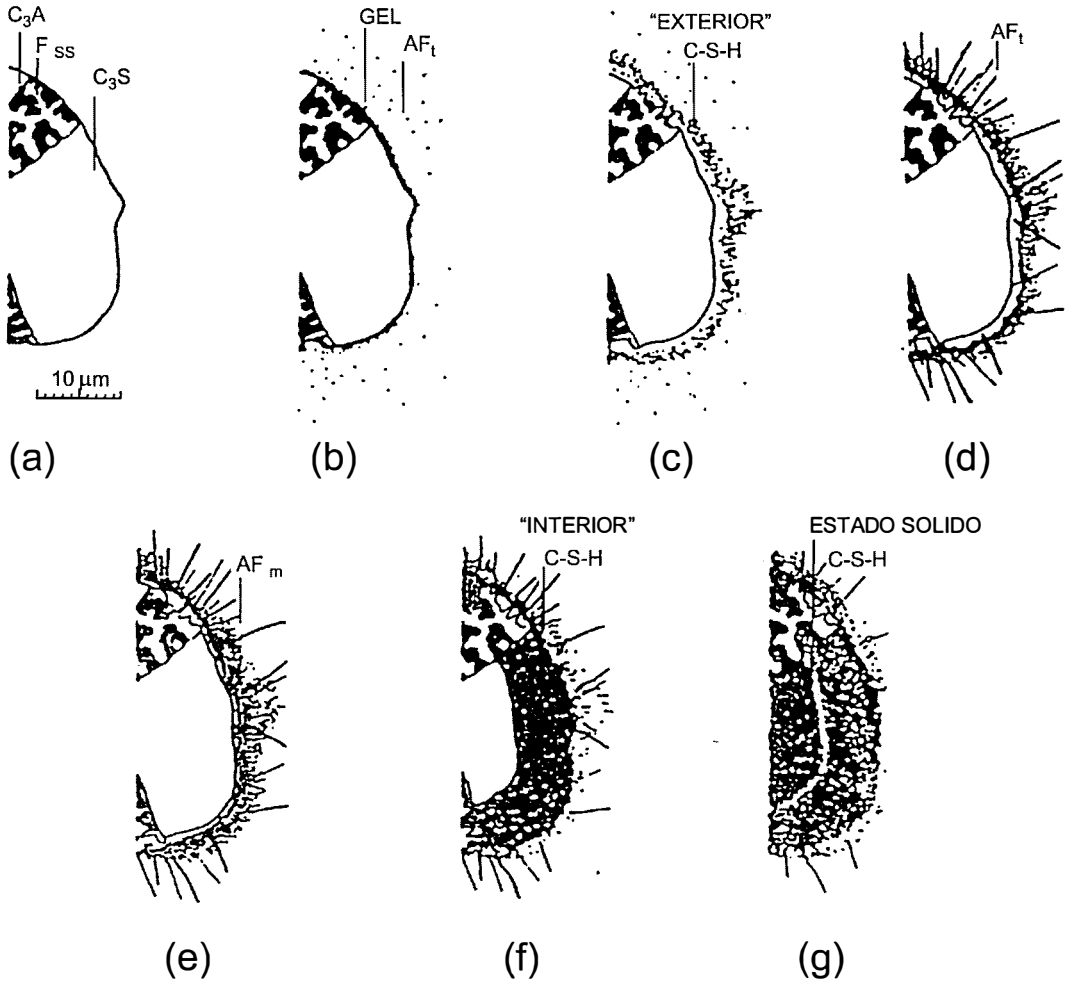



Fig. 3.8

***Estado c***: A las 10 horas. La reacción del $C_3S$ da lugar a la formación de una capa de S-C-H exterior que se apoya en los cristales de Ettringita, dejando un espacio de aproximadamente, 1 µm respecto a la superficie del grano. Se produce el fraguado.

***Estado d***: A las 18 horas. Se produce una segunda hidratación del aluminato, originando otra vez la aparición de agujas de Ettringita, pero su forma es ahora mucho más alargada que antes. Comienza la formación de una capa interior de S-C-H, a partir de la hidratación de los silicatos. Comienza el proceso de endurecimiento.

***Estado e***: Entre 1 y 3 días el aluminato reacciona con la Ettringita que se encuentra en la "capa externa" del gel, dando origen a cristales hexagonales de monosulfatos Afm. Además, continúa el desarrollo de la capa interior del gel S-C-H con lo que va disminuyendo paulatinamente la distancia entre la "capa externa" y la superficie del grano (ya hidratado en parte).

***Estado f***: A los 14 días. Se ha formado ya suficiente S-C-H en la capa interior como para rellenar y hacer desaparecer el hueco entre el grano y la "capa exterior". El gel de esta última capa se ha convertido en más fibroso.

***Estado g***: Después de varios años. El material anhidro va reaccionando lentamente mediante mecanismos de disoluciones sólidas, para formar S-C-H adicional en la "zona interna."

De acuerdo con el proceso antes descrito por SKRIVENER K.L, existen dos tipos de hidratación:

a) la hidratación "interior" que tiene lugar de ntro de la capa exterior de S-C-H que se encuentra en la fase c) y que se desarrolla en el espacio original ocupado por las partículas de cemento.

b) la hidratación "exterior", ocurre en el es pacio inicialmente ocupado por el agua y que es consecuencia de las formaciones cristalinas, generalmente acirculares o fibrosas surgidas hacia el exterior de las partículas de cemento.

La hidratación exterior es la que genera el crecimiento de volumen que se produce en el cemento al hidratarse. Por ejemplo una partícula de cemento completamente hidratada tiene un volumen "aparente" de unas 2.25 veces su volumen inicial. Esto se debe en parte a las diferentes densidades de los productos de hidratación, y también de manera fundamental a la aparición de

espacios internos que se originan como consecuencia de la formación y crecimiento de los cristales "exteriores".

Este modelo simplificado de hidratación nos muestra la formación de productos con diferencias tanto en su composición, naturaleza y estructura cristalina, como en su momento de formación. Por lo tanto, la estructura de la pasta hidratada crece de forma no homogénea y mediante una cinética concreta que da como resultado una pasta con discontinuidades tanto en su composición, como en su distribución en volumen. En esta masa hay zonas con formación de productos concretos y en otras partes existen mayores probabilidades de huecos y espacios intercristalinos.

### 3.4.4 Origen de los poros capilares

Los huecos y espacios que se originan como consecuencia de la separación existente entre las laminas de silicatos S-C-H se denominan como "porosidad del gel". Existe otra parte no cubierta por los productos de la hidratación que dará origen a la "porosidad capilar."

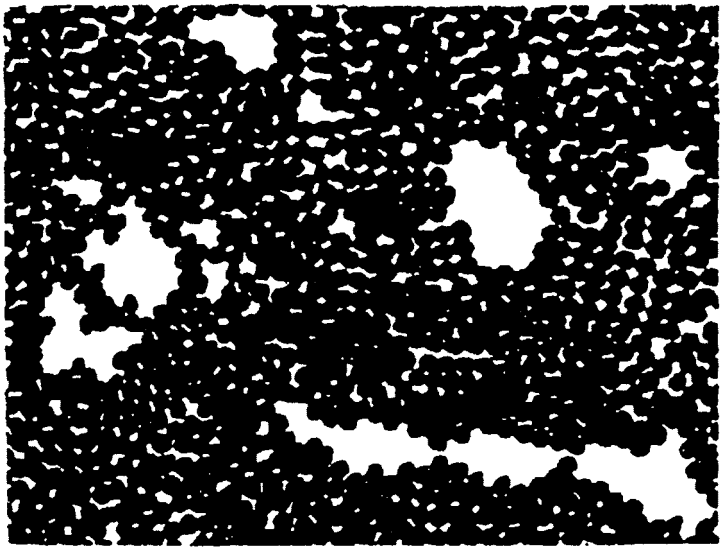


Fig. 3.9 Modelo simplificado de la estructura de la pasta de cemento, según Powers.

- Los puntos negros representan las partículas del gel.
- Los espacios intersticiales entre puntos son poros de gel.
- Los espacios en blanco de mayor tamaño son cavidades de aire ocluído.

Debemos tener presente que el volumen total del conjunto formado por el agua y el cemento permanece prácticamente constante durante los procesos de hidratación. También se sabe que la densidad de los productos hidratados es mucho menor que los anhidros. Cabe recordar que la afirmación de SKRIVENER plantea la densidad de una partícula de cemento anhidro es de 2.25 veces la del conjunto de productos hidratados a los que da lugar, suponiendo una hidratación del 100%.

Es importante señalar que al existir la necesidad tecnológica de emplear una relación agua/cemento muy superior a la que sería necesaria, desde el punto de vista teórico por exigencias de la trabajabilidad se genera un efecto negativo en la microestructura del concreto.

En la fabricación común del concreto, en la que al requerirse su manejo y puesta en obra de forma fácil, se recurre al incremento de cantidades de agua compatible con la trabajabilidad deseada.

El exceso de agua, respecto al volumen necesario para la reacción química del cemento el cual es aproximadamente de 23% del peso del cemento anhidro según Copeland, genera una reserva líquida que da origen a espacios y caminos de mayor tamaño, con mayor o menor interconexión en la que el agua se mueve por mecanismos capilares y que, en consecuencia da lugar a la formación de la ***"porosidad capilar"***.

Además de los huecos anteriores dentro de la masa de materia hidratada que constituye la pasta endurecida, hay otras discontinuidades de mayor tamaño las cuales las motiva la puesta en obra del concreto o el uso de ciertos aditivos en éste. Por ejemplo, una compactación deficiente o insuficiente durante la puesta en obra del concreto, va asociada a atrapar porciones de aire de mayor o menor dimensión. Los aditivos aireantes propician la distribución voluntaria a lo largo de toda la masa, de pequeñas burbujas de aire que presentan conexiones aleatorias con el resto de la estructura porosa del concreto.

La estructura de los poros en la pasta de cemento endurecida determina en gran medida la intensidad con que se desarrollan las interacciones del concreto con el ambiente que le rodea. Es necesario tener presente que los procesos destructivos del concreto comienzan en la superficie y se propagan a su interior por los poros capilares y hay que considerar que la superficie interna de los poros es varias veces mayor que la superficie exterior del elemento de concreto. Por lo que, el campo de acción de los agentes que generan el deterioro de éste, aumenta considerablemente al crecer su porosidad, lo que está íntimamente relacionado con la relación agua/cemento y otros factores que genera ésta.

### 3.4.5 Clasificación de la porosidad

Además de los sólidos antes descritos, la pasta de cemento hidratada contiene varios tipos de huecos y poros en el interior de su masa que tienen una influencia importante en la estructura del concreto y que lo caracteriza, de acuerdo a sus diferentes formas y tamaño.

Haremos una clasificación lo más universalmente reconocida en la bibliografía internacional, así como las funciones que cada grupo ejerce en el concreto:

1. ***Porosidad del gel:*** es el espacio que existe entre las diferentes láminas que constituyen los silicatos cálcicos hidratados. La separación de éstas se encuentra según Power, Feldman y Sereda entre 18 Å y 25 Å, y su volumen total es aproximadamente un 30% del volumen de S -C-H. Este tamaño de poros es muy pequeño para tener un efecto adverso en la resistencia y en la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada. Resulta importante saber que cantidad de agua puede ser retenida en estos pequeños poros, por adhesión del hidrógeno y su remoción bajo ciertas condiciones, que puedan contribuir a la contracción por secado y al flujo plástico.

2. ***Porosidad capilar:*** los poros capilares son los espacios no llenados por los componentes sólidos de la pasta de cemento hidratada. Su tamaño varía en función de la relación a/c y su grado de hidratación.

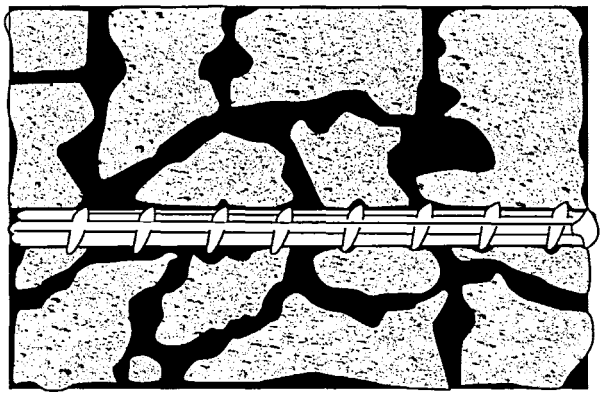


Fig. 3.10 Visualización simplificada de la red de poros capilares.

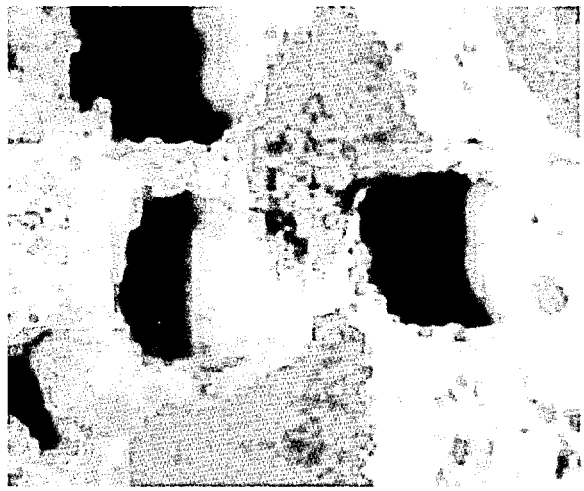


Fig. 3.11 Poros capilares en el concreto. Visto con microscopio óptico.

Fig. 3.12 Poro en el concreto visto en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB). Interior del poro.

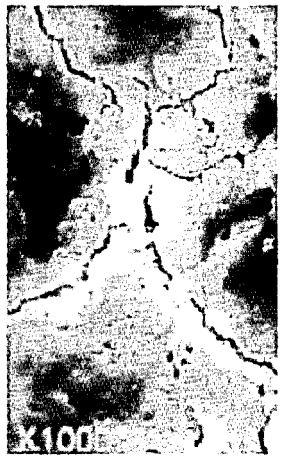



Fig. 3.13 Microgrietas que se forman en las paredes de un poro, observado con el MEB.

Fig. 3.14 Cristales formados de portlandita, constituyendo un reservorio de $Ca(OH)_2$ muy importante. A diferencia de los casos anteriores esta fase es muy soluble sobre todo en medios muy básicos, lo que constituye un indicador de las condiciones de pH del concreto. Su presencia se vincula frecuentemente al desarrollo de Ettringitas, si hay aportes de sulfatos.

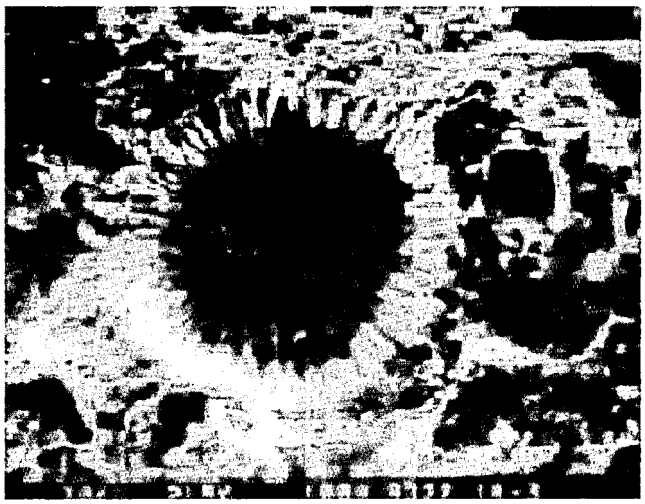


Fig. 3.15 Fases de Sulfoaluminatos cálcicos hidratados (Ettringitas) tapizando las microporosidades. Esta fase, al igual que la anterior provoca tensiones en el concreto, microfisurándolo.
Estas fases no son fácilmente solubles y su desarrollo viene controlado por el pH de la solución de poro.

- Para relaciones a/c bajas y un grado de hidratación elevado, su tamaño está entre 10 y 50 nm.
- Para relaciones a/c altas y grado de hidratación bajos, su tamaño está entre 300-500 nm.

Estos se corresponderían con el exceso de agua destinada a la trabajabilidad.

3. ***Huecos de aire:*** volúmenes de aire, con forma muy regular y próxima a la esférica, como consecuencia del uso de aditivos aireantes. Sus tamaños varían entre 50,000 y 200,000 μm.
4. ***Poros generados por el aire atrapado:*** son los huecos producidos por el aire atrapado en el interior de la masa de concreto, que aparecen como consecuencia de un procedimiento deficiente de colocación y compactación de la masa de concreto. Su tamaño es superior al 1,000,000 nm, o sea, 1mm.

Es muy común encontrar que muchos autores definan los poros en función de su tamaño, no teniendo en cuenta el origen de los mismos. Clasificándose de la forma siguiente:

a) MICROPOROS: los que tienen tamaño inferior a 10 nm.

b) MESOPOROS: los que su tamaño está comprendido entre 10 y 50 nm.

c) MACROPOROS: los que tienen tamaño superior a 50 nm.

Los Microporos y en parte los Mesoporos serían los que contienen el gel. Este tamaño de poros es muy pequeño para tener efectos adversos en la resistencia y en la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada y como se ha expresado, son considerados importantes en la contracción por secado y en el flujo plástico del concreto. De 50 nm en adelante se consideran los Macroporos, que serían calificados como poros capilares considerados nocivos para la resistencia, la compacidad y la impermeabilidad del concreto, por cuanto son los que facilitan la penetración de los agentes agresivos externos que acompañando el agua cargada de oxigeno, generan la corrosión en las barras de acero de concreto armado.

Es bien conocido que hay una relación directa entre la compacidad y la resistencia de los sólidos pétreos y que también existe una relación inversa entre la porosidad y la resistencia, porque la resistencia reside en la parte sólida de un material, por lo que cualquier tipo de hueco es perjudicial a la resistencia.

## 3.5 La interfase pasta-agregado

La interfase entre la pasta de cemento y el agregado, tiene una gran influencia en el comportamiento del concreto, la cual resulta determinante en muchas de sus propiedades más significativas, razón por la que expondremos los estudios más recientes hechos sobre la temática.

Los estudios efectuados en este campo han permitido identificar las siguientes características básicas de esta zona de transición:

— se produce un aumento de la concentración de agua alrededor del agregado grueso, lo que genera un aumento de la relación a/c en esa zona.

— presenta mayor porosidad que el resto de la masa de pasta de cemento hidratada.

— contiene mayor cantidad de hidróxido de calcio y ettringita y además, sus cristales tienen orientaciones preferentes respecto a la superficie del agregado.

— aumenta notablemente la microfisuración en las proximidades de los agregados.

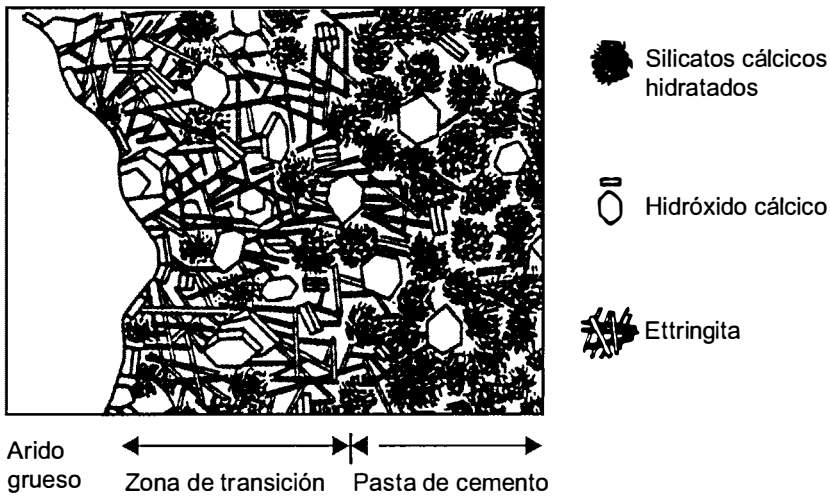



Fig. 3.16

La porosidad de esta zona puede llegar a alcanzar hasta 3 veces la del resto de la pasta de cemento hidratada. La Fig. 3.16 representa la variación de porosidad en función de la distancia a la superficie del agregado. El origen de este incremento del volumen de poros no es único. Está relacionado con la capa de agua que rodea los agregados durante el mezclado, la cantidad de agua que es capaz de absorber el agregado y las circunstancias que en dicha zona las reacciones de hidratación sólo se desarrollan siguiendo un único sentido de avance, dado que desde el interior del agregado no se puede producir la formación de compuestos hidratados [REINHARDT 1994]

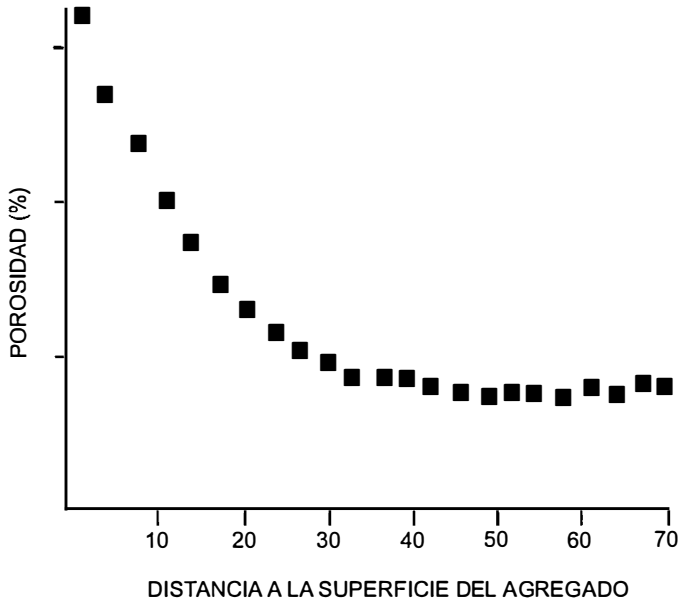



Fig. 3.17 Representación gráfica de la zona de transición

La mayor concentración del hidróxido de calcio, el elemento más soluble y poroso de los producidos en el proceso de hidratación del cemento va acompañada por una orientación preferente de los cristales. Estos se alínean de forma que sus placas hexagonales se colocan sensiblemente paralelas a la superficie más próxima del agregado, lo que favorece la formación preferente de microfisuración tangencial a dicha interfase.

Por otro lado, esta región es la que sufre con mayor intensidad cualquier estado tensional, ya sea como consecuencia de la acción de cargas externas, o debidas a movimientos de naturaleza térmica o higrométrica. En cualquier caso se producen contradicciones puntuales de tensiones que facilitan la aparición de microfisuras en la interfase.

Cabe señalar en este punto la coacción que ejercen los agregados frente a cualquier tipo de movimiento inducido desde la pasta. A título de ejemplo, es representativa la reducción que presenta la contracción de un concreto, respecto al valor de la contracción pura de la pasta de cemento. Power modelizó la relación entre ambas contracciones, de acuerdo con la siguiente ley:

$$S_c / S_p = (1-g)^n \qquad (3.1)$$

donde:

$S_c$ = contracción del concreto.

$S_p$ = contracción de la pasta de cemento

$g$ = fracción de volumen que representan los agregados respecto al total.

n = parámetro con valor entre 1.2 y 1.7 dependiendo del módulo de elasticidad del agregado.

## 3.6 El agua en los poros del concreto

La microestructura del concreto es porosa, como se ha descrito anteriormente y está llena de agua, por lo menos en una parte importante de la misma. Esta agua se clasifica en varios tipos, en dependencia del grado de dificultad o facilidad con la que pueda ser removida de la pasta de cemento hidratada del concreto. Al existir una pérdida continua de agua en la pasta de cemento saturada en cuanto se reduce la humedad relativa, la línea divisoria entre los diferentes estados del agua no es rígida. No obstante, realizar una clasificación resulta importante para entender mejor las propiedades de la pasta de cemento hidratada del concreto. Además de vapor en los poros vacíos o parcialmente llenados con agua, el agua existe en la pasta de cemento hidratada del concreto en los siguientes estados, en dependencia del tamaño de sus poros:

a) debido a la combinación química, existe en los productos hidratados.

b) el agua que se usó inicialmente en exceso, para la trabajabilidad del concreto, que por estar en poros muy pequeños, no ha podido salir al exterior.

c) el agua que, como consecuencia del equilibrio con la humedad del ambiente exterior, penetra o sale del concreto a través de su red capilar.

Los estados en que puede presentarse el agua mencionada son los siguientes:

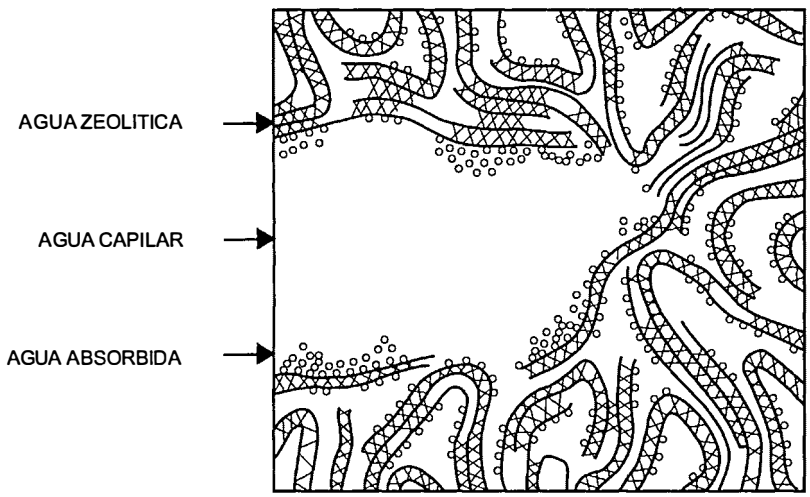



Fig. 3.18

1. Agua combinada químicamente: es la que constituye parte de los productos de la hidratación del cemento y que conforman la pasta de cemento endurecida y su cantidad depende del grado de hidratación del cemento y su finura. Reiteramos que para la hidratación del 100% del cemento, se requiere una cantidad de agua equivalente al 23% del peso del cemento anhidro usado. Esta agua no se pierde por el secado normal a 50 ó 60 grados C.
2. Agua de intercapa o "agua zeolítica": es agua que se encuentra entre las láminas que constituyen el S-C-H cuando crecen. Se depositan en monocapas entre las láminas de S-C-H, consiguiendo su unión mediante puentes de hidrógeno. Se elimina sólo mediante un secado enérgico a humedad relativa inferior al 11%. Su pérdida provoca una gran contracción en el concreto, resultando improbable que ésta se produzca dado el nivel de humedad tan extraordinariamente bajo que se requiere.
3. Agua absorbida: es el agua que se fija a la superficie que conforman los productos de hidratación, obedeciendo a mecanismos superficiales. Es posible que se formen capas hasta de 6 moléculas, pudiendo alcanzar espesores de unos 150 nm. Esta agua, puede perderse mediante secado a humedades relativas en el entorno de 40 – 45%. Esta pérdida es la causa fundamental de las deformaciones de contracción que aparecen durante la vida de las estructuras de concreto.

De igual forma, el desplazamiento de esta agua se acepta como la causa más determinante para gobernar los procesos de fluencia, junto con el nivel tensional al que se somete el concreto.

Es evidente que el proceso de pérdida de agua en la masa del concreto no se produce de manera uniforme en todo su volumen. Se inicia por las moléculas más lejanas a la superficie dado que la energía necesaria para ello será inversamente proporcional a su distancia a la superficie.

4. Agua libre o "agua capilar": es el resto del agua contenida en los poros definidos por el volumen "aparente" de la materia hidratada. Las diferenciaremos en dos clases, debido a sus comportamientos diferentes:
   - Agua capilar, en poros de radio inferior a 50 nm, o sea en los mesoporos, está muy fuertemente influenciada por los fenómenos de tensión superficial y por lo tanto su extracción o pérdida implica cierta disminución de volumen.
   - Agua capilar en los poros de radio superior a 50 nm. O sea los macroporos, donde ya no existe el efecto anterior y se suele definir como "agua libre", cuyo movimiento no genera variaciones de volumen y es la que gobierna los mecanismos de ingreso de sustancias agresivas desde el exterior que circunda al concreto.

## 3.7 Composición del agua en los poros del concreto

El agua de los poros constituye un medio que puede disolver las sales solubles que entran en contacto con ellas. Estas sales proceden del interior o el exterior de la masa del concreto.

a) ***del interior del concreto:*** producto de la reacción química del cemento con el agua, que crea la pasta de cemento hidratada, se generan sales como el Na(OH), el KOH y la portlandita $Ca(OH)_2$, creándose el carácter alcalino del concreto, con un pH de la fase acuosa por encima de 12.5 dándole la consiguiente protección a la armadura de acero embebida en éste. Cuando por cualquier motivo, disminuye la concentración de estos componentes químicos, baja el pH y, por tanto, desaparece la protección anterior, situando en estado crítico la durabilidad de la armadura.

b) ***del exterior del concreto:*** por efectos de la entrada de agua libre como vector conductor de sustancias disueltas, a través de su superficie exterior. Si fuesen sustancias capaces de

reaccionar con los compuestos de la pasta hidratada, puede provocar el ataque al concreto y la pérdida de sus propiedades originales, pudiendo alterar la durabilidad.

De todo lo antes expuesto sobre la influencia que tiene la microestructura porosa y el agua en ella contenida, sobre el comportamiento del concreto, es significativa, fundamentalmente su repercusión en su resistencia, en sus deformaciones de contracción y fluencia, y finalmente en su durabilidad propia y la de su armadura, lo que nos obliga a reflexionar al momento de cómo dosificar el concreto, como elaborarlo, trasportarlo y colocarlo, su necesidad de vibrarlo y curarlo, para disminuir al máximo estos efectos.

## 3.8 Mecanismos de transporte a través de la microestructura del concreto

La penetración de sustancias en el concreto se produce a través de sus poros interconectados en él, es decir, por la microestructura porosa de la pasta de cemento hidratada, sumado a las microfisuras que aparecen en la misma. Las sustancias a transportar pueden ser:

- iones en disolución acuosa
- agua o
- gases

Los mecanismos de transporte pueden ser de diferentes tipos, en función de una serie de factores entre los que pudieran presentarse:

- el tipo de sustancia (por ejemplo, el ion cloruro, anhídrido carbónico etc.)
- concentración de la sustancia
- condiciones ambientales que rodean el elemento de concreto (humedad relativa, temperatura, etc.).

- la estructura porosa del concreto (distribución de tamaño, porosidad total, radio de los poros medios, interconexión, etc).

## 3.9 Tipos de mecanismo de transporte

Conociendo la diversidad de posibilidades de la transportación de los agentes externos que atacan al concreto dentro de su medio, podemos aseverar que el transporte de sustancias al interior del concreto es consecuencia de la suma o coexistencia de diversos procesos individuales. Los más significativos procesos que pueden presentarse son los siguientes:

a) Permeabilidad.

b) Succión capilar.

c) Difusión.

d) Absorción y desorción.

e) Migración.

### 3.9.1 Permeabilidad

La permeabilidad es el flujo de líquidos o gases a través de la masa de un material, producto de un gradiente de presión.

El flujo podrá ser con régimen laminar o turbulento, en dependencia de la viscosidad del fluído y de las características de su microestructura.

Es importante señalar que la hipótesis de Darcy de proporcionalidad entre el caudal y la presión aplicada sólo se cumple en el primer caso.

En el concreto por tener una microestructura muy compleja no es posible obtener un flujo laminar, cualquiera que fuere el fluido que lo atraviese, pero se acepta este flujo hipotéticamente como laminar como un medio de simplificar sus procesos de análisis.

#### 3.9.1.1 Coeficiente de permeabilidad

#### 3.9.1.2 Permeabilidad a los líquidos

Al ser el agua el líquido que más se pone en contacto con el concreto, por las construcciones que con éste se realizan, tales como grandes tanques, tuberías por donde conducirlo, presas, cubiertas etc, la permeabilidad se evalúa de acuerdo con la conocida "Ley de Darcy" la cual se expresa de la forma siguiente:

$$K_w^* = \frac{Q}{t}\frac{l}{A}\frac{l}{\Delta h} \qquad (3.2)$$

donde:

$K_w^*$ = coeficiente de permeabilidad ($m^2/s$)

Q = volumen de agua ($m^3$)

l = espesor del elemento penetrado por el agua (m)

A = área del elemento penetrado por el agua ($m^2$)

t = tiempo (s)

$\Delta h$ = presión de agua (m)

### 3.9.2 Succión capilar

La Succión Capilar en la red porosa del concreto es una fuerza que está dada por la Ley de Darcy modificada para flujo de agua en un medio semisaturado:

$$F = \frac{k_p}{\eta} \cdot \frac{d_{pw}}{d_x} \qquad (3.3)$$

donde:

F = succión capilar

$\frac{d_{pw}}{d_x}$ = gradiente de presión de vapor de agua ($N/m^2$)

$k_p$ = coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (kg/m)

$\eta$ = viscosidad ($Ns/m^2$) (característica del fluído)

En general, este mecanismo es el que provoca la entrada del agua en estado líquido desde el exterior, producto del contacto entre la superficie del concreto y cualquier cause de agua. Si esta agua lleva disuelta sales indeseables, provocan reacciones destructivas en su estructura.

### 3.9.3 Difusión

La difusión es la transferencia de moléculas libres o iones en la solución acuosa de los poros, generada por la existencia de su gradiente de concentración.

La velocidad de transferencia de masa a través de la unidad de área cuando el proceso se ha estabilizado, está definido por la "primera Ley de Fick", expresada por:

$$F = -D \cdot \frac{d_c}{d_x} \qquad (3.4)$$

donde:

F = flujo de masa ($g/m^2 . S$)

D = coeficiente de difusión ($m^2/s$)

c = concentración ($g/m^3$)

x = distancia (m)

### 3.9.4 Absorción y Desorción

La absorción no es más que la fijación de las moléculas de un líquido o gas sobre la superficie de un sólido como consecuencia de la actuación de fuerzas de tipo Van der Waals, lo que origina la formación de monocapas o de multicapas.

La liberación de las partículas previamente absorbidas por una superficie, proceso inverso a la absorción, se denomina desorción.

### 3.9.5 Migración

La migración es el transporte de iones mediante un electrolito, como consecuencia de la acción de su campo eléctrico. La migración genera la aparición de diferencias entre las concentraciones de iones existentes en una solución homogénea, apareciendo difusiones en el sentido de los gradientes de concentración.

# Capítulo 4

# LA DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO. SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES QUE SE LE EXIGEN

## 4.1 La dosificación del concreto

## 4.2 Definición.

La dosificación del concreto de cemento Portland es el proceso por el cual se logran las mejores proporciones de los materiales componentes de éste.

Las proporciones óptimas de los materiales componentes del concreto, podrán expresarse en masa o en volumen siendo más exacto para las cualidades finales de éste, emplear la medición en masa seca de sus materiales constituyentes.

El desarrollo y las necesidades han obligado el uso de diferentes tipos de cementos, puros o con adiciones, agregados de diferentes orígenes, naturales o logrado por trituración de rocas, agua a la cual se le añaden aditivos con diferentes objetivos a lograr en el concreto, en estado fresco o endurecido, así como adiciones y pigmentos con fines bien definidos.

Múltiples métodos o procedimientos para dosificar el concreto se han creado en diferentes países a partir de los planteamientos hechos por Feret en 1892.

Cada investigador ha procurado hacer intervenir en sus ecuaciones o procedimientos, los múltiples factores influyentes en la calidad, en su estado plástico y endurecido de éste, partiendo

# Capítulo 4

# LA DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO. SU INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES QUE SE LE EXIGEN

## 4.1 La dosificación del concreto

## 4.2 Definición.

La dosificación del concreto de cemento Portland es el proceso por el cual se logran las mejores proporciones de los materiales componentes de éste.

Las proporciones óptimas de los materiales componentes del concreto, podrán expresarse en masa o en volumen siendo más exacto para las cualidades finales de éste, emplear la medición en masa seca de sus materiales constituyentes.

El desarrollo y las necesidades han obligado el uso de diferentes tipos de cementos, puros o con adiciones, agregados de diferentes orígenes, naturales o logrado por trituración de rocas, agua a la cual se le añaden aditivos con diferentes objetivos a lograr en el concreto, en estado fresco o endurecido, así como adiciones y pigmentos con fines bien definidos.

Múltiples métodos o procedimientos para dosificar el concreto se han creado en diferentes países a partir de los planteamientos hechos por Feret en 1892.

Cada investigador ha procurado hacer intervenir en sus ecuaciones o procedimientos, los múltiples factores influyentes en la calidad, en su estado plástico y endurecido de éste, partiendo

de la relación a/c, calidad del cemento, temperatura ambiente, tipos de agregados, medios tecnológicos de producción etc.

También los investigadores han tenido en cuenta, los factores influyentes del medio en que usaran el concreto y han condicionado a las cualidades de los materiales componentes disponible, el proporcionamiento de éstos.

Hay muchos lugares que han tomado y aplicado métodos elaborados por otros países, cuyos materiales, clima y nivel tecnológico difiere de sus países, generando diferencias substanciales en los resultados técnicos y económicos en los concretos obtenidos.

La dosificación de una mezcla de concreto debe tener como principios básicos el proporcionar la garantía de la resistencia mecánica de éste, en estado endurecido y una adecuada consistencia, docilidad y homogenidad que permita su trabajabilidad en el proceso de colocación.

En el mundo actual se le exige al concreto no sólo las anteriores cualidades, sino que debe ser también durable y no sufrir deformaciones.

## 4.3 Principales cualidades que se le exigen al concreto, a considerar en el proceso de dosificación:

### 4.3.1 Resistencia mecánica

Es el parámetro primero que exigen los usuarios del concreto, ya que es el que garantiza la estabilidad de la estructura diseñada con este material. Esta se mide mediante probetas cilíndricas normalizadas.

La resistencia a la compresión es la más utilizada para las estructuras en general, mientras que la resistencia a flexión es exigida para pavimentos de concreto. Este es el parámetro principal para la dosificación del concreto.

La fabricación de las probetas o especímenes para medir la resistencia a compresión y a flexión se realiza en la mayor parte de los países de América, según la Norma C-39 de la ASTM para la compresión y por la Norma C–78 de la ASTM para la prueba a flexión.

### 4.3.2 Consistencia de la mezcla

La consistencia del concreto es la propiedad más significativa de éste en estado fresco y al mismo tiempo, un factor que influye en sus propiedades cuando endurece. Es indicativo de la trabajabilidad de las mezclas misma que será tenida en cuenta:

a) la exigencia del proyecto estructural (forma y tamaños de las secciones, cantidad de acero etc.) que exige el proyecto arquitectónico.

b) los equipos que serán empleados para su colocación en obra (hombres, cubos, bombas, bandas transportadoras, carretillas etc.

c) la calidad de terminación que exige la superficie del concreto de la obra.

d) deben tenerse en cuenta las características climáticas ambientales que rodean la obra (temperatura, viento, intensidad del sol, humedad etc).

### 4.3.3 La durabilidad del concreto

Es una de las exigencias más significativas en una estructura, pues garantiza la VIDA ÚTIL de las construcciones sin la realización de reparaciones capitales, que aumenten el costo de su amortización.

La durabilidad depende de factores propios del concreto, como su porosidad, la relación a/c, el tipo de cemento, la compactación a que fue sometido, el recubrimiento de las armaduras de acero y otros factores.

Depende también de factores externos a que está sometida la construcción, tales como la humedad relativa, salinidad, lluvias ácidas, la producción intensiva del anhídrido carbónico, la lluvia, así como la naturaleza de las solicitaciones mecánicas a que son sometidas.

La durabilidad está considerada como una acción muy compleja que depende de muchos factores, razón por la cual no existe un método unívoco para medirla. No obstante existen especificaciones de exigencias cuya aplicación garantiza una determinada durabilidad de las construcciones, en dependencia del medio climático a que está sometido, definiendo exigencias de relación agua/cemento, resistencia, consumo de cemento y porosidad del concreto, donde lo determinante es definir la VIDA ÚTIL de la construcción y de sus elementos estructurales componentes.

### 4.3.4 Deformaciones del concreto

Las *deformaciones* del concreto pueden ser generadas por la contracción hidráulica, la cual produce una deformación inicial o inmediata y fundamentalmente las deformaciones lentas, denominadas como fluencia del concreto.

Estas deformaciones en el concreto pueden tener efectos muy negativos, al accionar fuerzas por esta razón, sobre otros elementos constructivos eslabonados con la estructura de concreto deformada (pisos, paredes, escaleras rodantes etc).

Por estos motivos, este comportamiento tan negativo exige ser tenido en cuenta desde la dosificación del concreto.

Existen normas y procedimientos para medir las deformaciones en el concreto.

## 4.4 Exigencias al concreto de hoy y del futuro

El alto desarrollo alcanzado en las cada vez más exigentes construcciones que se realizan en el mundo, ha llevado a los especialistas a la creación de diferentes tipos de concretos que satisfagan con su dosificación dichas exigencias, tal es el caso de los concretos de alta resistencia, concretos de alto desempeño, concretos autocompactables, concretos con alto contenido de puzolana, concretos sustentables y muchos más.

Pero como expresa el Prof Paulo Helene, es muy común constatar que ciertos profesionales inseguros que relegan sus conocimientos básicos, fundamentales e inmutables de tecnología del concreto, en busca de recetas nuevas y mágicas que infelizmente, no siempre dan buenos resultados. Lamentablemente los hay que por omisión o ignorancia no utilizan el concreto con las propiedades requeridas y comprometen la seguridad, su durabilidad, las deformaciones y el costo futuro de su mantenimiento.

Los estudios de la dosificación del concreto tienen un alto fundamento científico y tecnológico, los cuales exigen siempre una actividad experimental en el laboratorio y la obra, confiriéndole a éste los beneficios que se esperan reporte.

# Capítulo 5

# MÉTODO PARA DOSIFICAR MEZCLA DE CONCRETO CON BAJA CONSISTENCIA

## 5.1. Antecedentes

Las condiciones tecnológicas de muchos países ocasionan, en la producción de los concretos, un consumo excesivo de cemento lo que se manifiesta no sólo en la economía de la producción sino también en la afectación de sus propiedades mecánicas más importantes. Además de otros factores, este estado desfavorable lo origina una inadecuada granulometría y la forma irregular de los agregados gruesos los cuales contienen una gran cantidad de partículas planas y alargadas, y desde el punto de vista de los reglamentos tecnológicos generales podemos considerarlos como altamente negativos.

De esta problemática no se han ocupado muchos autores, y sus trabajos resultan contradictorios en gran medida, a la vez que no posibilitan formular conclusiones unívocas.

Desde el punto de vista de la composición óptima de los agregados no se le da toda la atención a la influencia de la forma de la partícula y se parte sólo de su composición granulométrica.

La investigación realizada con los agregados de Cuba y con los de diferentes países de América y Europa, que tienen granulometría inadecuada o con contenidos del 16 al 31% de partículas irregulares caracterizan la forma de los agregados, lo que demostró en todos los casos la influencia de ambas irregularidades, en el porcentaje de vacío de la mezcla que deseamos

obtener manteniendo la consistencia y la energía de compactación constante. También quedó demostrada la influencia de ambos factores en la resistencia a compresión y eventualmente en las dosis de cemento, si consideramos constante la resistencia.

Esta verificación posibilitó una nueva forma de combinar los agregados para la producción de los concretos, lo que en la práctica representa un significativo ahorro de cemento y un mejoramiento de sus propiedades en estado plástico y endurecido.

Otra dificultad presentada en el diseño de las mezclas de concreto es que, los que utilizan en las producciones de concretos, relación agua/cemento menores que 0.40 no es válida la ecuación de Bolomey como consecuencia del exceso de pasta de cemento, lo que genera un descenso de la resistencia a compresión de éstos.

Mediante una gran cantidad de cuidadosas investigaciones científicas se logró modificar la ecuación de Bolomey, la cual es la más difundida internacionalmente, ampliándola con la determinación previa de la característica "A" de los agregados y no prefijándola empíricamente, así como la inclusión de la consistencia de la mezcla de concreto de forma directa, la cual, en el caso de las mezclas de baja relación agua/cemento, se manifiesta significativamente y cuya influencia no es considerada en las ecuaciones hasta ahora utilizadas, o sólo de manera indirecta.

El nuevo método está elaborado de una forma asequible a los técnicos que trabajan en la producción y por lo mismo posibilita en la práctica el aprovechamiento de los resultados de esta investigación.

En la actualidad existen en la literatura mundial muchos métodos analíticos, así como otros de carácter práctico, para determinar la composición de las mezclas de concreto. El hecho de que un gran número de autores se haya ocupado de esta problemática, esforzándose por expresar cada vez más mediante nuevas formas, las relaciones básicas que sirven para determinar la influencia que ejercen los distintos componentes del concreto en sus propiedades físico-

mecánicas, nos demuestra que no se ha logrado todavía obtener la solución definitiva de dicha problemática y que tampoco se han alcanzado crear tales relaciones para su posible generalización, al efecto de servir adecuadamente a la práctica técnica de todas las condiciones específicas. Razón por la cual creamos un método que no prefija condiciones, sino que para cada caso específico se determinará la característica de los agregados disponibles, y de acuerdo a la tecnología de producción, calidad del cemento, transporte y colocación del concreto que se posea, diseñar la mezcla del concreto exigido.

Asimismo, una serie de métodos apoyados en experiencias obtenidas por muchos años y en una cantidad considerable de ensayos de laboratorio carecen, no obstante de los datos precisos sobre las condiciones locales (bajo los cuales se desarrollaron los trabajos), y no permite establecer una generalización de la aplicación de sus cálculos.

Otro inconveniente de la mayoría de las ecuaciones para el cálculo de la resistencia del concreto, empleada actualmente consiste en que no tienen en cuenta la influencia de la consistencia de la mezcla de concreto, cuando ésta es de gran importancia.

Si se analizan las características de los materiales de diversos países utilizados para la producción del concreto, la mayor diferencia de los requerimientos tecnológicos lo manifiesta el agregado en cuanto a lo desfavorable de su forma.

Como en muchos países no existen agregados de calidad conveniente, procedimos al estudio de su influencia en las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de concreto y de los concretos endurecidos.

Hasta el presente no muchos autores se han dedicado al estudio de esta problemática al considerar las conclusiones de estos trabajos. Observamos que no hay una coincidencia común.

A las opiniones de FERET y KAPLAN, que atribuyen a la forma de la grava (agregado grueso) una singular importancia, se oponen los criterios de WALKERS, GOLDBECK,

GORDON, BEREZIN y GALAKTINOV, los cuales no le confieren ninguna influencia o sólo en una medida insignificante.

La disparidad de opiniones de los distintos autores es posible explicarla por las influencias secundarias que evidentemente no siempre se logran eliminar por diferentes criterios respecto a la conveniencia o inconveniencia de las gravas, las condiciones locales las cuales no se pueden generalizar o aplicar, y también por el enfoque peculiar hacia la problemática al formular las conclusiones.

En resumen, se puede constatar que de las opiniones señaladas no es posible deducir una conclusión única, con efectiva aplicación práctica. Esto nos indujo a la realización de nuevas investigaciones que nos permitieran conocer la verdadera influencia de la forma de los agregados en las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido y que tuviesen efectiva aplicación práctica en cualquier país.

Además de la influencia de la forma de los agregados que será motivo de estudios e investigaciones, realizamos un cuidadoso análisis de los factores que la mayor parte de los autores contemporáneos incluían en sus ecuaciones para el cálculo de la resistencia a compresión del concreto y hemos ampliado la investigación que nos permitió introducir otros factores determinantes en la resistencia y durabilidad del concreto.

Los principales autores contemporáneos estudiados son:

Feret:

$$R_h = N\left(\frac{c}{1000 - g}\right)^2 = N\left(\frac{c}{c + a + z}\right)^2 = N\left(\frac{1}{1 + w_0}\right)^2 \qquad (5.1)$$

$$c + a + g + z = 1000 \text{ donde } 1000 - g = c + a + z$$

Abrams:

$$R_h = \frac{A}{B^{1,5w}} \qquad (5.2)$$

Rotfuchs: $$R_h = A_g \cdot R_c \left(\frac{c}{a+z-20} - 0{,}50\right) \quad (5.3)$$

Gost: $$R_h = B_g \cdot R_c \left(\frac{1}{w} - 0{,}5\right) \quad (5.4)$$

Graf: $$R_h = \frac{R_c}{a \cdot w^2} \quad (5.5)$$

Hummel: $$R_h = R_c^x \sqrt{\frac{1}{w}} \quad (5.6)$$

Lyse: $$R_h = 16{,}4 \cdot \frac{1}{w} - 10 \quad (5.7)$$

donde:

$R_h$ : Resistencia del concreto a la compresión, ensayada en cubos de 20 cm de lado a los 28 días, suponiendo una compactación total de Hb = 0.98 hasta 0.99....en MPa.

c, g, a, z - volumen absoluto de cemento, agregados, agua y poros en $l/m^3$ de concreto.

C, a– dosis en masa de cemento y agua en $Kg/m^3$ de concreto.

$R_c$ - resistencia del cemento en cubos de 7.07 cm de lado, en MPa.

N - coeficiente cuyo valor varía de 180 hasta 200 en MPa.

w - relación agua cemento en peso.

$w_o$ - relación agua cemento en volumen

A - resistencia base .....81.5 hasta 98.5 en MPa.

B - constante dependiente de la calidad del cemento y del tiempo de fraguado (9 hasta 3.5).

$A_g$ , $B_g$ - coeficientes que expresan la calidad de los agregados

valores- $A_g$ -entre 0.67 y 0.84 Bg -entre 0.50 y 0.55

a – coeficiente determinado experimentalmente.

x – exponente que expresa la influencia del método de ejecución de los ensayos de resistencia del cemento (0.78 eventualmente 0.82).

Obsérvese que en ninguna de estas ecuaciones, aparece la influencia de la consistencia en la resistencia a compresión del concreto lo cual nos indujo a la realización de investigaciones de sus efectos y consecuentemente tenerla en cuenta.

Dutron: $$R_h = Q\left(\frac{c}{v} - Q'\right) \tag{5.8}$$

Bollinger: $$R_h = \alpha \cdot \rho_\kappa \cdot R_c \left(\frac{c}{v}\right)^{2/3} \tag{5.9}$$

Ros: $$R_{h,nd} = R_h \cdot \frac{a \cdot n^{2/3}}{b + n^{2/3}} \tag{5.10}$$

Bolomey: $$R_h = R_c \cdot A_g \left(\frac{1}{w} - 0{,}50\right) \tag{5.11}$$

donde:

$R_{h,nd}$ - resistencia del concreto a la compresión después de "n" días de endurecimiento a temperatura normal en MPa.

C, c, a, v – ver los anteriores.

Q , Q' - coeficientes dependientes de la clase de cemento, agregados y la consistencia de la mezcla de concreto.

$\alpha$, b – coeficiente dependiente de la clase de cemento y consistencia de la mezcla de concreto.

n -coeficiente dependiente de la plasticidad de la pasta normal de cemento y la consistencia de la mezcla de concreto.

$\rho_k$ - peso volumétrico de los granos de los agregados en $Kg/m^3$.

Obsérvese que en estas últimas ecuaciones se hace intervenir la consistencia del concreto en la resistencia de éste, pero incluida en coeficientes que representan varias dependencias, lo cual no permite precisar la magnitud de la influencia de cada una de ellas.

Además de éstas universalmente conocidas ecuaciones se estudiaron y comprobaron otros métodos empíricos internacionalmente conocidos y que se aplican en muchos países, pero que también adolecen de iguales imprecisiones anteriormente mencionadas.

Los objetivos fundamentales de la investigación estuvieron encaminados en la siguiente dirección:

a) No elaborar principios de aplicación general, sino crear una metodología para realizar las investigaciones necesarias que tengan en cuenta las condiciones propias de cada lugar y los recursos materiales de que se disponen, para lograr los objetivos antes señalados.

b) Obtener concretos más compactos y menos porosos que garanticen la protección del acero de refuerzo de la agresión de la brisa marina u otro ambiente agresivo que lo circunde.

c) Elaborar un método capaz de garantizar en la práctica una mayor precisión del cálculo de las dosis de cemento.

d) Lograr menor consumo de cemento con las condiciones tecnológicas que se posean sin requerir nuevas inversiones en tecnologías.

En el proceso de aplicación de este método en distintos países hemos comprobado que éste es válido, para cualquier lugar que por escasez o carencia de grava de calidad, están obligados a recurrir al empleo de materiales con requisitos tecnológicos que no cumplen especificaciones convencionales y, además emplean con frecuencia mezclas de concreto de baja consistencia.

## 5.2 Estudios e Investigaciones

A diferencia de estudios anteriores, no consideramos oportuno utilizar agregados con distintas proporciones de granos adecuados desde el punto de vista de su forma, lo que sin duda es el método exacto, que facilita extraer conclusiones más generalizadas, pero sin posibilidades de aplicación práctica, porque es imposible hacer una clasificación exacta del agregado. Por esto trabajamos con materiales naturales con distintas características, de manera que las conclusiones pudieran tener aplicación práctica concreta.

Para verificar las proporciones óptimas de arena y grava, comparamos los resultados de los métodos clásicos de Rothfuchs y el módulo de Finura con el método de la determinación experimental de vacíos mínimos, en mezclas de grava. La comprobación se llevó a cabo con los agregados de distintos países donde la proporción de granos alargados y planos en grava gruesa fluctúa entre 16 y 31%.

La influencia del agregado grueso inadecuado por su forma en las propiedades de las mezclas de concreto y del concreto endurecido, se comprobó desde 3 aspectos: la trabajabilidad

de la mezcla, la influencia en la compacidad en estado plástico y endurecido y la influencia en su resistencia a compresión.

Observamos, asimismo, la influencia del coeficiente de cemento (c/a) en la resistencia del concreto a la compresión, sobre todo en el entorno, donde, a causa del exceso de la pasta de cemento, disminuye la resistencia, en contraposición con lo expresado en la ecuación de Bolomey.

También quedó demostrada la influencia de la consistencia de la mezcla del concreto en la resistencia a la compresión de éste, a los 28 días, la cual no se había definido hasta ahora como factor independiente.

A pesar de la base teórica de todas las pruebas comprobatorias, de su verificación y de las dependencias de ellas deducidas, siempre se persiguió la posibilidad de la inmediata utilización práctica de los resultados. Por ello fue necesario seleccionar los métodos experimentales de forma tal, que por ejemplo las mediciones de la trabajabilidad de las mezclas, la resistencia del concreto, etc., se correspondieran con las Normas más difundidas internacionalmente. Por esta causa, para la medición de la trabajabilidad se utilizó el método de revenimiento por el cono de Abrams, en lugar del mejor método, que es por el consistómetro VeBe, y se determinó la resistencia a la compresión en los cilindros de 15 cm de diámetro con 30 cm de altura, en lugar de cubos.

Otros procedimientos solamente complicarían y aplazarían el aprovechamiento práctico de los nuevos conocimientos.

## 5.3 Nuevos conocimientos aportados por la investigación

Por medio de un gran número de pruebas superiores a las 20 000, y mediciones realizadas en los laboratorios y en plantas de premezclado de varios países, logramos comprobar en primer lugar que en mezclas de grava con una proporción considerable de granos inadecuados (16 hasta 31% del peso), no puede determinarse la proporción óptima de arena y grava, basándonos en los métodos convencionales recomendados y empleados habitualmente.

Las pruebas demostraron también que la grava que tiene una proporción mayor de granos inadecuados por su forma requiere, al compararlo con los métodos convencionales una cantidad sustancialmente mayor de arena, a efecto de llenar los espacios huecos mínimos.

Otra comprobación fue que una serie de materiales (que por su granulometría facilitaron según los métodos convencionales, las proporciones siempre más favorables entre los agregados fino y grueso, por ejemplo 34:66), arrojaron en los ensayos experimentales los resultados menos favorables, lo que se pudo comprobar en dependencia de la proporción de granos inadecuados, cuando se alcanzó la óptima con las proporciones de 45:55 y 50:50.

De estos ensayos se logró que para determinar la proporción óptima entre la arena y el agregado grueso de formas inadecuadas, resulta decisivo el factor de la forma, por lo que no es correcto emplear el método de proporciones directivas de las diferentes fracciones de la grava (la llamada *curva ideal granulométrica*) que se utiliza en la mayoría de los países con la consistencia constante de la mezcla de concreto (revenimiento de 7 hasta 8 cm) y en la solidificación constante se manifestó la influencia de la mayor proporción de granos de formas inadecuadas, es decir, indirectamente en la trabajabilidad de la mezcla de concreto, donde sirvió de indicador la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia requerida de 214 hasta 240 L/m$^3$ y directamente en la resistencia del concreto a la compresión.

La elevación de la proporción de granos de formas inadecuadas de 16 a 31% requirió aumentar la cantidad de agua en 26 L/m$^3$, hecho que en la dosis constante de cemento significó el aumento del coeficiente de agua (a/c) de 0.39 a 0.44 y el descenso de la resistencia a la compresión a los 28 días, de 40.9 a 34.7 MPa.

Esta comprobación facilitó hacer una nueva clasificación de las gravas, que desde el punto de vista de la composición granulométrica habían sido consideradas equivalentes, creando así las premisas para un significativo ahorro de cemento.

Por la definición matemática del coeficiente de Bolomey, que expresa la influencia de la calidad de la grava en la resistencia del concreto, se comprobó que el valor del referido coeficiente resultó prácticamente igual para todos los tipos de grava con diferentes propiedades, es decir, de 0.49 hasta 0.51, siendo el más frecuente 0.50.

De esta forma se logró comprobar que para el coeficiente de agua (a/c) inferior a 0.40 la ecuación de Bolomey ya no es totalmente exacta. En este entorno se destacó de modo significativo la influencia de la consistencia de la mezcla de concreto y para un valor constante de ella, la cantidad de pasta de cemento necesaria para lograr dicha consistencia.

Estas influencias que autores clásicos como Bolomey y otros no tomaron en consideración en sus ecuaciones para el diseño de la composición de la mezcla y para el cálculo de la resistencia del concreto, se contempla en el nuevo diseño de la composición de mezclas de concreto que se basa en el uso de grava inadecuada por su forma, lo cual es necesario tomar en cuenta en las condiciones de cualquier país. El nuevo diseño de la composición para las mezclas de concreto, parte de la ***ecuación modificada*** de Bolomey:

$$R_h = R_c \cdot A \cdot R' \qquad (5.12)$$

$R_h$: resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)

$R_c$ : resistencia a compresión del cemento a los 28 días (MPa)

$A$ : coeficiente que expresa la influencia de la calidad de la grava

$R'$ : miembro que expresa la influencia de la relación agua/cemento y de la trabajabilidad de la mezcla de concreto.

Los valores $R_c$ fueron determinados sobre la base de las normas, el valor de $A$ se previó fuera de 0.50 acorde con los resultados anteriores.

El valor del miembro $R'$ se determinó matemáticamente del promedio de los resultados de la resistencia de 20 tipos de mezcla de concreto de diferentes composiciones, con relación cemento/agua $w^{-1}$ igual a 1.5; 2.0; 2.5; y 3.0 y con la trabajabilidad expresada por el revenimiento en el cono de Abrams, $A_s$, igual a 6, 10, 14 cm.

Se comprobó después de múltiples ensayos y complejas operaciones matemáticas con concretos elaborados con una cantidad de grava de forma inadecuada, se altera el valor $R'$ para la resistencia a la compresión después de los 28 días, en dependencia de la relación cemento/agua según la ecuación:

$$R' = R'_{1.0} + K \log w^{-1} \qquad (5.13)$$

$R'$: miembro de la ecuación (5.12) que expresa la influencia de la relación cemento/agua y de la consistencia de la mezcla, en la resistencia del concreto.

$R'_{1.0}$: valor del miembro $R'$ para la relación cemento/agua $w^{-1}$ igual a 1.0.

$K$ : directriz de las líneas rectas en el sistema semilogarítmico que cortan los valores $R'$ de distintos coeficientes de cemento (c/a) su valor, que crece con la rigidez de la mezcla de concreto, expresa la influencia de la consistencia en $R'$.

Además se deriva que en dependencia de la trabajabilidad (consistencia) $A_s$, dada por el revenimiento en el cono, cambia $K$ de la manera siguiente:

$$K = K_0 + q \cdot A_s \tag{5.14}$$

$K$ = influencia de la consistencia en $R'$ y $R_h$

$K_0$ = valor de $K$ para $A_s$ igual a cero cm

$q \cdot$ = directriz de la recta del cambio de $K$ en dependencia de $A_s$

y también el valor:

$$R'_{1.0} = \ln R'_{1.0\,(0)} + 1 \cdot A_s \tag{5.15}$$

$R'_{1.0\,(0)}$ = valor $R'_{1.0}$ para la consistencia $A_s$ igual a cero cm

1 = directriz de la recta del cambio $R'_{1.0}$ en el sistema semilogarítmico.

Puesto que se logró derivar que la relación vale:

$$K = 4{,}6259 - 0{,}06 \cdot A_s \tag{5.16}$$

$$R'_{1.0} = e^{-1{,}3125 + 0{,}0283\,.\,A_s} \tag{5.17}$$

La nueva relación básica (5.12) para el cálculo de la resistencia del concreto, después de sustituir 5.16 y 5.17 en 5.13 y posteriormente también en 5.12 y simplificada para el empleo práctico, se expresa de la manera siguiente:

$$R_h = R_c \cdot A \left(M_1 \operatorname{long} w^{-1} + M_2\right) \tag{5.18}$$

Donde los valores de $M_1$ y $M_2$, dependientes de la consistencia de la mezcla del concreto $A_s$, fueron calculados con fines prácticos para los distintos valores de $A_s$, los cuales se relacionan en la tabla 1, los valores del $long\ w^{-1}$ son equivalentes a V para diferentes $w$, se muestran en la tabla 2 quedando definida la ecuación de la forma siguiente:

$$R_h = R_c \cdot A\left(M_1 \cdot V + M_2\right) \qquad (5.19)$$

El nuevo procedimiento matemático permitió precisar notablemente la determinación de las resistencias de concretos de composiciones conocidas y diseñar nuevas composiciones de mezclas de concreto para las resistencias solicitadas, de tal manera, que a diferencia de las formas de empleo tradicionales, tomamos en consideración la influencia de la trabajabilidad (consistencia), es decir, indirectamente la cantidad de pasta de cemento.

El nuevo procedimiento, según los cálculos de verificación y su aplicación, resulta mucho más confiable que los métodos tradicionales y sus resultados coinciden con los alcanzados en la práctica.

Independientemente de las condiciones específicas de cada país, el método es posible utilizarlo en todos los lugares donde las condiciones obligan a utilizar agregados con una proporción excesiva de granos inadecuados por su forma o no tienen una granulometría adecuada. Además asegura, en cualquier caso la determinación exacta de la característica de forma de los agregados disponibles y su mejor aprovechamiento, así como el empleo de la consistencia como factor independiente, por su influencia en la resistencia a la compresión del concreto.

## 5.4 Conclusiones para la práctica y el desarrollo ulterior de la ciencia

La temática de las investigaciones realizadas, tuvo su origen en las necesidades urgentes del desarrollo económico de los países, que exige un creciente volumen de construcciones. Para lograrlo, la industria de la construcción no tiene otra alternativa que utilizar los agregados disponibles y tratar de ahorrar al máximo el cemento, lo cual es válido para cualquier país.

Los resultados confirman el hecho de que ni las mejores experiencias cualquiera que sea su procedencia, deben llegarse a su aplicación sin un previo enfoque crítico, que evite el peligro de alcanzar resultados negativos, lo cual es extensivo a los métodos de diseño de las mezclas de concretos.

La aplicación de los resultados mundialmente reconocidos de Bolomey a las condiciones específicas de los países donde se utilizan, no puede concretarse sin un análisis profundo y una valoración de:

- Las necesidades y posibilidades reales de cada país.
- El dominio científico–técnico de la problemática estudiada.

Por esta causa, ensayamos materiales, es decir, agregados y cemento, con los cuales cuenta la industria de la construcción, sin que tuvieran que ser sometidos a un exigente tratamiento previo. De antemano excluimos conscientemente las tendencias de alcanzar resultados ideales.

Asimismo, se buscaron soluciones que fueran fácilmente asimilables incluso para los técnicos medios, que laboran tanto en las plantas de concreto premezclado, en las fábricas de elementos prefabricados, así como en las propias obras de construcción.

A partir de los aspectos teóricos y prácticos, se ha logrado un procedimiento de significación para la economía de cualquier país.

La calidad del concreto que se logra para garantizar su durabilidad es muy alto, así como el ahorro de cemento que se alcanza es de 15% y en algunos casos es mayor, en relacion con los consumos exigidos por los otros métodos, sin incluir el ahorro, que traería aparejado la disminución del consumo energético en la fabricación del cemento, y el aumento de la VIDA ÚTIL de las construcciones donde se aplique.

Este significativo efecto económico general ha sido posible alcanzarlo por la razón de que en ningún país se había prestado una atención especial al aprovechamiento de los agregados con granos y granulometría de forma inadecuada para los fines de la producción de concretos; además, la mayoría de las normas en todos los países contempla altas exigencias con respecto a la grava que no se puede utilizar en algunas zonas, sin generar excesivos costos de transportación, etc. De esta forma, no son aplicables sin previo reajuste, las ecuaciones de cálculo que surgieron de las propiedades idealizadas de la grava. Todas estas circunstancias convergían en nuestro país hacia la elaboración de la composición de mezcla de concreto sobre bases no científicas, que han tenido su origen en las relaciones clásicas actuales de Bolomey u otros autores.

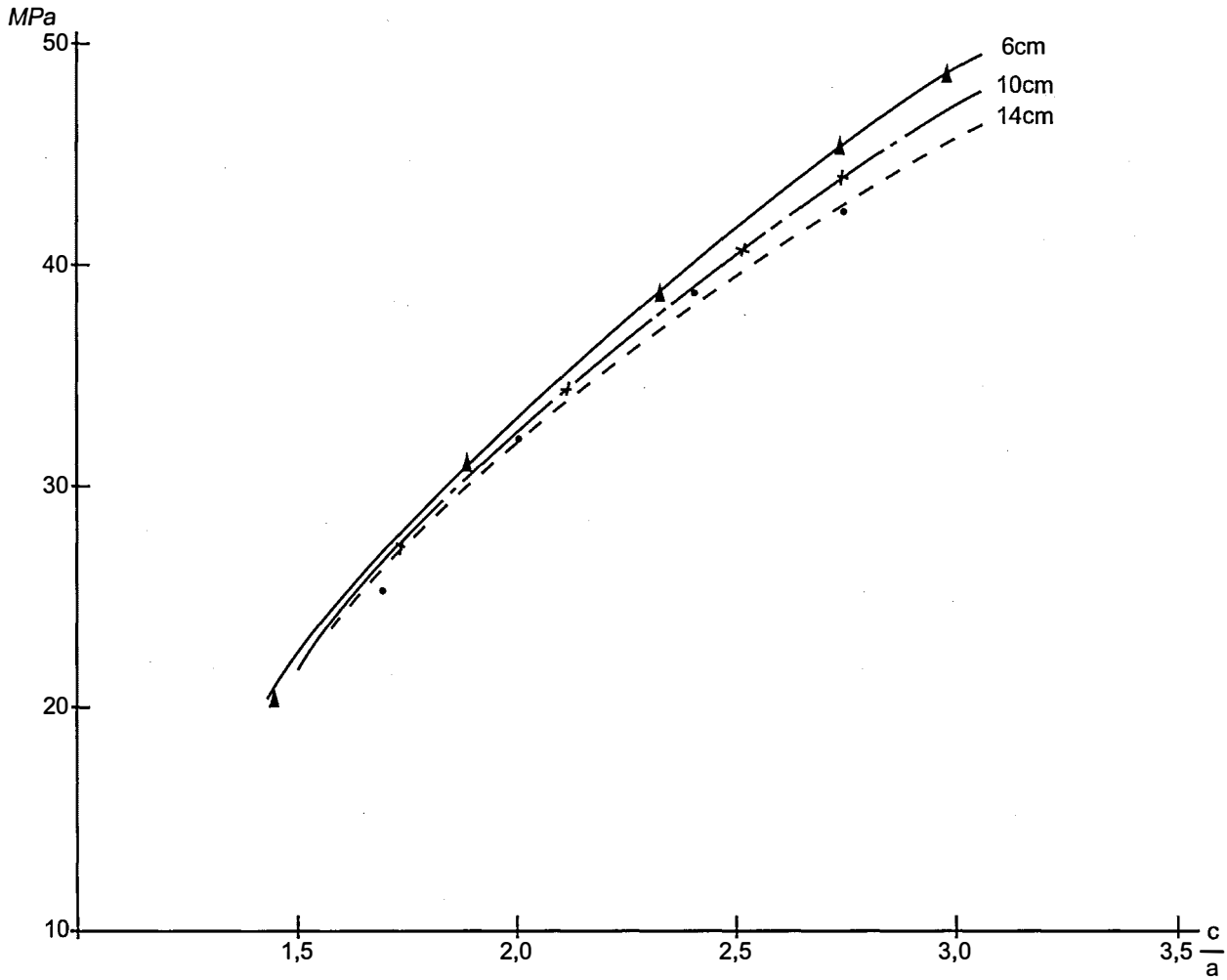



**Fig. 5.1 Influencia de la consistencia del concreto en su resistencia a la compresión**

En realidad, los componentes de las mezclas de concreto se han dosificado de acuerdo con las experiencias por estimación y utilizando siempre cantidades más elevadas de cemento. La mayoría de los técnicos de la construcción no se percatan de que las dosis excesivas de cemento no conducen a la mejora del concreto, sino al empeoramiento de las propiedades físico-mecánicas de éste, lo que ocasiona contracciones, deformaciones posteriores en las estructuras, porosidad y por ende disminuye su durabilidad.

Esta situación es más grave donde se utilizan en gran medida las construcciones y elementos pretensados, fabricados con mezclas de concreto con un coeficiente de (a /c) inferior a 0.40, es decir, el valor en el cual, al utilizar grava con granos de formas inadecuadas en cantidades que oscilan entre 16 y 31%, ya no es válida, según se comprobó por la relación de Bolomey y el exceso de las dosis de cemento no ocasiona el aumento, sino el descenso de la resistencia a la compresión del concreto.

Además de los beneficios de orden económico y social, el nuevo método representa un aporte al ulterior desarrollo de la rama científica en este campo, porque:

a) se comprobó que al utilizar grava de granos inadecuados, desde el punto de vista de la forma, en cantidad de 16 a 31% del peso total del lote (conservando constantes la trabajabilidad de las mezclas, la energía de compactación y las dosis de cemento), la influencia decisiva en la resistencia no la tiene la granulometría, sino las características de las formas de los granos de la grava.

b) en las condiciones señaladas en el punto a), con el requisito de la resistencia constante del concreto, la característica de la forma del grano de la grava, ejerce sin embargo, una influencia mucho mayor en el consumo de cemento, que su granulometría.

c) al utilizar agregados gruesos con una cantidad excesiva de granos con formas inadecuadas (tipo escama o aguja), no es posible emplear los métodos clásicos granulométricos para la determinación de la proporción óptima entre la grava y la arena, porque éstas, arrojan en la mayoría de los casos resultados completamente diferentes a los experimentales.

d) a partir de lo señalado en los puntos a) y c), procedimos a la ejecución de una clasificación nueva de las gravas destinadas a la fabricación del concreto, sobre la base de los criterios de obtener la mínima cantidad de vacío en la mezcla de ellas, después de la solidificación con una trabajabilidad de la mezcla de 7 hasta 8 cm de revenimiento en el cono de Abrams, para lograr la máxima resistencia y el mínimo consumo de cemento.

e) se ha comprobado con la aplicación de estos principios, que se logran concretos de una menor porosidad y permeabilidad que por otros métodos.

f) no es difícil comprobar que la relación de Bolomey para el cálculo de la resistencia a la compresión del concreto y para el diseño de su composición, que generalmente se recomienda, no resulta económica ni aplicable para las mezclas con el coeficiente de agua (a/c) inferior a 0.40, particularmente por la razón de que no expresa la influencia del exceso de la pasta de cemento, en caso de mezclas poco consistentes o líquidas, ya sea por ejemplo de gravillas con granos inadecuados o por utilizar un proceso de compactación poco eficiente.

g) con la ejecución de ensayos de 20 mezclas de concreto de diferentes consistencias con 4 valores constantes del coeficiente de cemento, se hallaron nuevas regulaciones con respecto a la resistencia del concreto, en dependencia de la trabajabilidad de las mezclas.

h) sobre la base de las regulaciones experimentales comprobada según el punto g, se propuso una nueva ecuación para los cálculos de las resistencias del concreto y el diseño de su composición, tomando en consideración la influencia de la consistencia (exceso de la pasta de cemento) en la resistencia y en la durabilidad.

Las nuevas relaciones están elaboradas de forma tal, que resultan comprensibles no solamente a los ingenieros, sino también a los técnicos de nivel medio que trabajan tanto en las plantas productoras de concreto, como en las obras de construcción. De esta manera, ha sido posible aplicar y aprovechar los resultados en la práctica de la producción.

Los resultados de estos trabajos se han aplicado primeramente en Cuba, donde está generando un efecto económico considerable, así como son conocidos en todos los países de América, parte de Europa, Asia y África. Además, el nuevo método ha sido beneficioso al aplicarse en los países donde las regulaciones técnicas y materiales son análogas.

## 5.5 Método para el diseño de mezclas de concreto basado en la determinación correcta de las características de los agregados

Para determinar la composición óptima de un concreto hay que realizar ensayos de laboratorio, cuyos procedimientos son los siguientes:

a) Determinar por el método experimental la relación óptima de la mezcla de arena y agregados gruesos.

b) Determinar la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia requerida de la mezcla de concreto.

c) Determinar la cantidad de cemento justamente necesaria para obtener una resistencia exigida.

d) Determinar la característica A de la grava.

### 5.5.1 Determinación de la relación óptima de los agregados gruesos y finos

Hemos comprobado que el factor de la forma de los agregados gruesos es decisivo y más fuerte que el factor de la granulometría, por lo que no es posible determinar la relación óptima de los agregados gruesos y finos por los métodos basados en la granulometría ideal.

El método más preciso es el experimental, que se basa en la determinación del porcentaje de vacío de la mezcla de los agregados finos y gruesos.

El porcentaje de vacío y la superficie específica mínimos de la mezcla de agregados, señalará la composición óptima, la cual requerirá una cantidad mínima de cemento.

Para determinar el porcentaje de vacío y la superficie específica mínimos, hay que ensayar las mezcla de los agregados con las proporciones en peso de arena y grava siguientes:

35:65 / 40:60 / 45:55 / 50:50 / 55:45.

Como primer paso, hay que determinar por método normalizado el peso unitario compactado de la mezcla de los áridos ($PUC_m$), norma ASTM C-29-78 de cada una de las mezclas anteriormente expresadas.

Los ensayos se realizarán por el mismo procedimiento normalizado que se emplea para determinar el peso unitario compactado de la arena o los agregados gruesos. Sólo hay que tener en cuenta que es necesario trabajar con los materiales secos y bien mezclados. Después determinamos el peso específico corriente de la mezcla de los agregados también con los materiales secos. Para obtenerlo, tenemos que definir el peso específico de la arena y el agregado grueso que estamos ensayando. El peso específico corriente de la mezcla de los agregados lo determinamos matemáticamente por medio de la ecuación:

$$PEC_m = \frac{PEC_a \cdot \%A + PEC_g \cdot \%G}{100} \qquad (1.8)$$

donde:

$PEC_m$ : peso específico corriente o aparente de la mezcla de los agregados

$PEC_a$ : peso específico corriente o aparente de la arena

$\%A$ : porcentaje de la arena en la mezcla

$PEC_g$ : peso específico corriente o aparente de la grava

$\%G$ : porcentaje de la grava en la mezcla

### 5.5.2 Ejemplo de cálculo

En nuestro caso determinamos el peso específico corriente de la arena, $PEC_a = 2260$ Kg /m$^3$ y el peso específico corriente de la grava, $PEC_g = 2640$ Kg / m$^3$. El peso específico corriente de la mezcla de los agregados, en proporciones de 35% de arena y 65% de grava será:

$$PECm = \frac{PECa \cdot \%A + PECg \cdot \%G}{100}$$

$$= \frac{2620 \cdot 35 + 2640 \cdot 65}{100} = 2633 \text{ Kg/m}^3$$

La misma mezcla de agregados, en proporciones de 40% de arena y 60% de grava, tendrá un peso específico corriente de:

$$PEC_m = \frac{2640 \cdot 40 + 2640 \cdot 60}{100} = 2632 \text{ Kg/m}^3$$

Por este método calcularemos el $PEC_m$ para todas las relaciones restantes de arena y grava (A:G = 45:55, 50:50, 55:45 y 60:40).

Sobre la base del peso específico corriente de la mezcla de agregados y el peso unitario compactado de ella, podemos determinar el porcentaje de vacío de la mezcla de los agregados:

$$\text{Porcentaje de Vacío} = \frac{PEC_m - PUC_m}{PEC_m} \cdot 100 \qquad (1.9)$$

Cuando determinemos el porcentaje de vacío para todas las combinaciones de arena y agregados gruesos, elegimos la combinación que tenga el porcentaje menor, como la óptima para la composición del concreto.

En el caso que se utilicen dos tipos de agregados gruesos, por ejemplo gravilla (de 6,35 hasta 19 mm) y grava (12,7 hasta 38 mm), hay que determinar primero el porcentaje de vacío mínimo de la mezcla de los dos tipos de agregados gruesos a utilizar, y determinada la mezcla óptima de dichos agregados ésta será la que se mezclará con la arena en las seis proporciones mencionadas, y después se halla el porcentaje mínimo de vacío de la mezcla de los agregados gruesos y finos.

### 5.5.3 Determinación de la cantidad de agua necesaria para la consistencia requerida

Para determinar la cantidad de agua necesaria, elaboramos una mezcla de concreto con la trabajabilidad que necesitamos, por ejemplo, con un revenimiento de 6 cm medido en el cono de Abrams. El diseño de la mezcla lo haremos de la forma siguiente:

a) Proporción entre los agregados gruesos y finos. La fijamos sobre la base de la composición óptima determinada, según se explicó en el epígrafe anterior.

b) Cantidad de cemento. La determinamos inicialmente sobre la base de las experiencias, de manera que esté relacionada, aproximadamente, con la resistencia requerida del concreto.

c) Cantidad de agua. La fijamos como elemento de referencia, también según la experiencia.

Con estos datos calculamos la cantidad necesaria de los materiales para elaborar seis probetas cilíndricas.

Para determinar exactamente la cantidad de agua, ponemos en una bandeja de metal con dimensiones apropiadas para mezclar a mano los componentes de la mezcla, en la que primero se ponen los agregados mezclándose hasta homogenizarlos, después se coloca el cemento y se mezcla hasta que la mezcla tenga un color uniforme y finalmente se coloca una cantidad de agua menor que la prefijada, y se determina su consistencia, revenimiento en el cono de Abrams (y nos da por ejemplo 2 cm), después hacemos una nueva mezcla (de igual forma) con una mayor cantidad de agua y medimos nuevamente el revenimiento (por ejemplo 4 cm), y así se repite el ensayo, auxiliados por el cono de Abrams, hasta que por aproximación determinamos la cantidad total de agua necesaria para lograr el revenimiento necesario. Esta cantidad de agua debe ser corregida de acuerdo con la humedad superficial de la arena.

Además de determinar la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia requerida, con esta misma mezcla elaboramos seis probetas y determinamos la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. Como estos datos nos van a servir para la determinación del coeficiente A del agregado grueso, tenemos que repetir el ensayo no menos de tres veces, para asegurar la exactitud de los resultados. En este caso, hay que tener en cuenta la alta precisión exigida de los trabajos de laboratorio, porque una vez determinada la característica A de las gravas, podemos diseñar todos los tipos de mezclas de concreto que utilizaremos, con ella.

Es necesario y determinante hacer todos los ensayos normalizados a los agregados y al cemento que se utilicen.

### 5.5.4 Determinación de la característica "A" del agregado grueso

Para determinar la característica A del agregado grueso utilizamos los datos de los ensayos ya realizados, según los párrafos antecedentes, a saber la resistencia a la compresión promedio del concreto a los 28 días, obtenida sobre la base de nueve probetas (tres ensayos), y la resistencia a la compresión a los 28 días del cemento empleado.

La característica del agregado la determinamos por la ecuación siguiente:

$$A = \frac{R_h}{R_c(M_1 \cdot V + M_2)} \tag{1.10}$$

donde:

$A$ : característica del agregado grueso

$R_c$: resistencia del cemento utilizado a la compresión, en MPa

$M_1$ y $M_2$: valores dependientes de la consistencia del concreto

$V$ : valor dependiente de la relación agua-cemento

$R_h$: resistencia obtenida del concreto de prueba

Los valores $M_1$ y $M_2$ se toman de la Tabla 1, con relación al revenimiento de la mezcla del concreto determinada en los ensayos.

El valor $V$ se toma de la Tabla 2, según la relación agua/cemento (w), cuyo valor determinamos conforme con las cantidades de cemento y de agua que utilizamos en los ensayos.

### 5.5.5 Determinación de la cantidad de cemento

En el caso de los ensayos explicados con anterioridad, se utilizó una cantidad de cemento aproximada, según la experiencia, ahora podemos determinarla exactamente por la ecuación siguiente:

$$V = \frac{\frac{R_h}{R_c \cdot A} - M_2}{M_1} \tag{1.11}$$

donde:

$V$ : valor dependiente de la relación agua/cemento

$R_h$ : resistencia del concreto a la compresión que queremos obtener, MPa

$R_c$: resistencia del cemento a la compresión, en MPa (el que estamos utilizando)

$M_1$ y $M_2$ : valores dependientes de la consistencia del concreto

$A$ : característica del agregado utilizado

Los valores $M_1$ y $M_2$ se toman de la Tabla 1. La pareja de valores $M_1$ y $M_2$ corresponden a un sólo valor del revenimiento $A_s$, medido en centímetros, por el método del cono de Abrams.

Determinamos el valor $V$, de la Tabla 2 tomamos el valor de la relación agua/cemento $w$, que le corresponda y sea la adecuada. Entonces, la cantidad de cemento se determina por la ecuación:

$$c = \frac{a}{w} \tag{1.12}$$

donde:

$c$: cantidad de cemento, en kilogramo

$a$: cantidad de agua en litro

$w$: relación agua/cemento tomada de la Tabla 2

Con los datos obtenidos (composición óptima de los agregados gruesos y finos, cantidad de agua para obtener la consistencia requerida, característica A del agregado y cantidad de cemento para obtener la resistencia requerida del concreto), establecemos la composición óptima de la mezcla del concreto y la comprobamos con seis probetas cilíndricas, y determinamos la resistencia del concreto a la compresión a los 7 y 28 días, que debe dar un valor muy aproximado al valor supuesto en la ecuación 1. 11.

## 5.6 Recomendaciones

Durante los ensayos se recomienda trabajar siempre con los mismos tipos de agregados y mantenerlos todo el tiempo bien homogeneizados, e insistimos en que todos los ensayos de laboratorio para determinar la dosificación óptima deben realizarse con los agregados totalmente secos.

Las variaciones de las propiedades de los agregados, sobre todo el porcentaje de partículas planas y alargadas, pueden influir notablemente en la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia requerida de la mezcla del concreto, lo que consecuentemente influye en la relación agua/cemento y en la resistencia resultante del concreto.

La humedad de la arena tiene también una influencia notable (la cual puede ser positiva o negativa) y para los ensayos es necesario determinarla con precisión y hacer las correcciones correspondientes de la cantidad total de agua requerida. Para la determinación de la relación óptima de los agregados gruesos y finos, hay que trabajar con los agregados secos. Con la arena húmeda no se pueden obtener resultados correctos, porque cambia demasiado su volumen.

Por último, es necesario tener presente la notable influencia que en la resistencia resultante del concreto tiene la resistencia a la compresión del cemento, la cual debemos tener bien definida para obtener un valor exacto de la característica A del agregado y poder después comprobarla con la resistencia resultante de dicho concreto. Por esta razón hay que tomar la muestra de cemento para determinar su resistencia, el mismo día que se realiza la determinación del agua necesaria para obtener la consistencia requerida. También el día que se determina la característica A del agregado, debemos utilizar en los cálculos, la resistencia real del cemento empleado, obtenida en los ensayos de laboratorio.

Es lógico que en la práctica al no poder mantener constante la característica del cemento y no conocer todas sus propiedades en el momento de su empleo, obtengamos discrepancias mayores que en el laboratorio, sin embargo, para el trabajo de investigación cuyo objetivo es determinar la característica A del agregado hay que mantener la más alta precisión en los ensayos. Los valores de A caracterizan las propiedades del agregado en el nuevo método de diseño de las mezclas de concreto, hay que determinarlos para todos los tipos de agregados gruesos que se utilizan para elaborar concretos, lo que posibilitará a partir de sus resultados, un mejor aprovechamiento de los materiales y una consecuente economía de cemento.

**Tabla 5.1**

| REVENIMIENTO (cm) | VALOR M | REVENIMIENTO (cm) | VALOR M |
|---|---|---|---|
| $A_s$ 3 | $\frac{M_1\ 4{,}4447}{M_2\ 0{,}2930}$ | $A_s$ 10 | $\frac{M_1\ 4{,}0219}{M_2\ 0{,}3572}$ |
| $A_s$ 4 | $\frac{M_1\ 4{,}3843}{M_2\ 0{,}3014}$ | $A_s$ 11 | $\frac{M_1\ 3{,}9615}{M_2\ 0{,}3674}$ |
| $A_s$ 5 | $\frac{M_1\ 4{,}3239}{M_2\ 0{,}3101}$ | $A_s$ 12 | $\frac{M_1\ 3{,}9011}{M_2\ 0{,}3780}$ |
| $A_s$ 6 | $\frac{M_1\ 4{,}2635}{M_2\ 0{,}3189}$ | $A_s$ 13 | $\frac{M_1\ 3{,}8407}{M_2\ 0{,}3888}$ |
| $A_s$ 7 | $\frac{M_1\ 4{,}2031}{M_2\ 0{,}3281}$ | $A_s$ 14 | $\frac{M_1\ 3{,}7803}{M_2\ 0{,}4000}$ |
| $A_s$ 8 | $\frac{M_1\ 4{,}1427}{M_2\ 0{,}3375}$ | $A_s$ 15 | $\frac{M_1\ 3{,}7199}{M_2\ 0{,}4115}$ |
| $A_s$ 9 | $\frac{M_1\ 4{,}0823}{M_2\ 0{,}3472}$ | $A_s$ 16 | $\frac{M_1\ 3{,}6595}{M_2\ 0{,}4233}$ |

*Nota*: En el caso de necesitarse una menor consistencia, o sea, un mayor revenimiento del concreto medido en el cono de Abrams, se parte de un revenimiento dado y se logra el aumento de éste mediante el uso de aditivos químicos conociéndose la acción del mismo sobre la mezcla, realizando las pruebas correspondientes.

**Tabla 5.2**

| | | w | VALOR V | w | VALOR V | w | VALOR V | w | VALOR V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,30 | 0,5229 | 0,40 | 0,3979 | 0,50 | 0,3010 | 0,60 | 0,2218 | 0,70 | 0,1549 |
| 0,31 | 0,5086 | 0,41 | 0,3872 | 0,51 | 0,2924 | 0,61 | 0,2147 | 0,71 | 0,1487 |
| 0,32 | 0,4946 | 0,42 | 0,3768 | 0,52 | 0,2840 | 0,62 | 0,2076 | 0,72 | 0,1427 |
| 0,33 | 0,4815 | 0,43 | 0,3665 | 0,53 | 0,2757 | 0,63 | 0,2007 | 0,73 | 0,1367 |
| 0,34 | 0,4685 | 0,44 | 0,3565 | 0,54 | 0,2676 | 0,64 | 0,1938 | 0,74 | 0,1308 |
| 0,35 | 0,4559 | 0,45 | 0,3468 | 0,55 | 0,2596 | 0,65 | 0,1870 | 0,75 | 0,1249 |
| 0,36 | 0,4437 | 0,46 | 0,3372 | 0,56 | 0,2518 | 0,66 | 0,1805 | 0,76 | 0,1192 |
| 0,37 | 0,4318 | 0,47 | 0,3279 | 0,57 | 0,2441 | 0,67 | 0,1739 | 0,77 | 0,1135 |
| 0,38 | 0,4202 | 0,48 | 0,3186 | 0,58 | 0,2366 | 0,68 | 0,1675 | 0,78 | 0,1079 |
| 0,39 | 0,4089 | 0,49 | 0,3098 | 0,59 | 0,2291 | 0,69 | 0,1612 | 0,79 | 0,1024 |

# ENSAYOS QUE SE DEBEN REALIZAR PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DOSIFICACIÓN DE O'REILLY

## 1. Determinación de la relación óptima de los agregados gruesos y finos

1.1 Tipo de ensayos: Peso unitario compactado.

| Tipos de agregados | Cantera | | Codificación |
|---|---|---|---|
| I Arena | | | |
| II Grava | | | |
| **Proporción de los agregados I y II** | **Peso Total** | **Peso de la muestra** | **Peso unitario compactado** |
| 35:65<br>40:60<br>45:55<br>50:50<br>55:45<br>60:40 | | | |

Fecha de ejecución del ensayo

1.2 Tipo de ensayos: Peso específico corriente de la mezcla y el Porcentaje de huecos.

| Tipos de agregados | Cantera | | Codificación |
|---|---|---|---|
| I Arena | | | |
| II Grava | | | |
| **Proporción de los agregados I y II** | **Peso específico corriente de la mezcla = A** | **Peso unitario compactado de la mezcla = B** | **Porcentaje de huecos** |
| 1<br>2<br>3<br>4<br>5<br>6 | | | |

Fecha de ejecución del ensayo:

**Determinación de la cantidad de agua para un concreto de $R_h$____ Kg/cm$^2$ con $A_s$ ____ cm, al emplear arena de _____ gravilla de _____.**

| | Proporción óptima A:G % | Cantidad de cemento Kg | Cantidad de agua L | Humedad de la arena % | $R_h$ 7 días Kg/cm$^2$ | $R_h$ 28 días Kg/cm$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |

**Determinación de la característica "A" del agregado grueso**

| $R_{h\,28}$ Kg/cm$^2$ | $R_c$ Kg/cm$^2$ | $A_s$ cm | $M_1$ | $M_2$ | Cantidad de agua L | Cantidad de cemento Kg | a/c | Valor de "A" |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

**Determinación de la cantidad de cemento**

| $Rh_{28}$ Kg/cm$^2$ | $R_c$ Kg/cm$^2$ | $M_1$ | $M_2$ | "A" | V | a/c | Agua L | Cemento Kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

## 5.7 Vacío, superficie específica y otros factores que influyen en las mezclas de los agregados

Los valores del porcentaje de vacío obtenidos de los ensayos realizados pueden expresarse gráficamente, lo que nos posibilita la determinación más adecuada del valor mínimo, la eliminación de los valores inexactos y establecer relaciones con otros factores importantes del concreto.

Para confeccionar los gráficos, las diferentes proporciones de las mezclas de los agregados se colocan en el eje de las abscisa y sus correspondientes porcentajes de vacío resultantes en los ensayos en el eje de las coordenadas. Unimos los puntos obtenidos y se forma una curva del transcurso probable del porcentaje de vacío, como se representa en los gráficos de las Figs. 5.2 y 5.3.

El punto mínimo del porcentaje de vacío como factor determinante para la mezcla óptima de los agregados es muy significativo, cuando tratamos de determinar la relación mutua entre los agregados gruesos y la arena Fig.5.3.

Sin embargo, si determinamos por el mismo método la composición óptima entre los agregados gruesos (que debe determinarse, en los casos que lo requieran, antes de hacer las mezclas con la arena), los resultados ya no son tan significativos y la determinación de la composición óptima requiere ciertos conocimientos teóricos y alguna experiencia práctica.

Con el ejemplo siguiente deseamos explicar, en forma sencilla, la complejidad de esta problemática, a la vez que se plantea la solución aplicable de forma fácil.

En los gráficos de las Figs. 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 están representados los resultados de los ensayos ejecutados con los agregados de la cantera "Dragón Camoa" de la Habana. Se investigó

la composición óptima de la mezcla de tres agregados: grava de 38 mm, gravilla de 19.1 mm y arena de 4.76 mm.

*Primer paso.* Elaboramos las mezclas de grava y gravilla para todas las relaciones mutuas (a partir de 90% de grava), disminuyendo gradualmente 5% de grava y añadiéndosele de gravilla hasta obtener 100% de esta última Fig. 5.2. Obsérvese que en la relación 40% de gravilla y 60% de grava el descenso del porcentaje de vacío es significativo, mientras que a partir de 40% de gravilla hasta 70% de ésta en la mezcla el descenso es muy pequeño, (el porcentaje de vacío disminuye sólo en 0.5), y a partir de 70% hasta 100% de gravilla, el porcentaje de vacío vuelve a crecer.

Como se sabe, con el aumento de los agregados de menor dimensión, crece también la superficie específica de la mezcla de los agregados y aumenta la exigencia de la cantidad de pasta de cemento necesaria para envolver la superficie total de las partículas. Por esta causa, elegimos como relación óptima, la de 40% gravilla y 60% de grava (punto 1 en el gráfico de la Fig. 5.2), y no la relación de 70% de gravilla y 30% de grava (punto 2), la cual tiene el porcentaje mínimo de vacío.

Estas mezclas de agregados gruesos ensayadas fueron empaquetadas en sacos de papel y debidamente almacenadas para aprovecharlas en los ensayos posteriores.

*Segundo paso.* Investigamos la cantidad óptima de arena, al mezclar ésta en varias proporciones con la mezcla de los agregados gruesos, compuesta de 40% de gravilla y 60% de grava. Los resultados fueron muy significativos, como se muestra en el gráfico de la Fig. 5.3, donde el punto óptimo de la relación fue 45% de arena y 55% de la mezcla de los agregados gruesos. Para los ensayos posteriores, utilizamos siempre como constante 45% de arena.

*Tercer paso.* Para comprobar si la composición de los agregados gruesos obtenida era la óptima, realizamos otra serie de ensayos, los cuales consistieron en mantener constantes las cantidades de arena, cemento y agua, e hicimos mezclas con las diferentes proporciones de los agregados gruesos ya señaladas, y a éstas se les determinó primero la consistencia (revenimiento) por el cono de Abrams y con ellas se trazó el gráfico de la Fig. 5.4.

Estas mismas mezclas se colocaron en moldes normalizados, para obtener la resistencia a la compresión a los 28 días, y con estos resultados se trazó el gráfico de la Fig. 5.5.

Repetimos que para la realización de estos ensayos se utilizaron los agregados gruesos combinados del primer ensayo, a los que sólo se le añadió una cantidad constante de arena, agua y cemento.

La relación óptima entre la gravilla y la grava fue elegida según los requisitos básicos que exigen los concretos, o sea, que se cumpla:

a) Que el concreto sea lo más compacto posible; esto se logra con la máxima cantidad de agregados y el porcentaje mínimo de vacío. La máxima compacidad asegura las mejores propiedades mecánicas del concreto, incluso la impermeabilidad, lo cual debe lograrse con la mínima cantidad de pasta de cemento.

b) Que la mezcla de concreto tenga la mejor trabajabilidad posible, en las condiciones dadas.

c) Que el concreto ofrezca la máxima resistencia a la compresión, en las condiciones dadas.

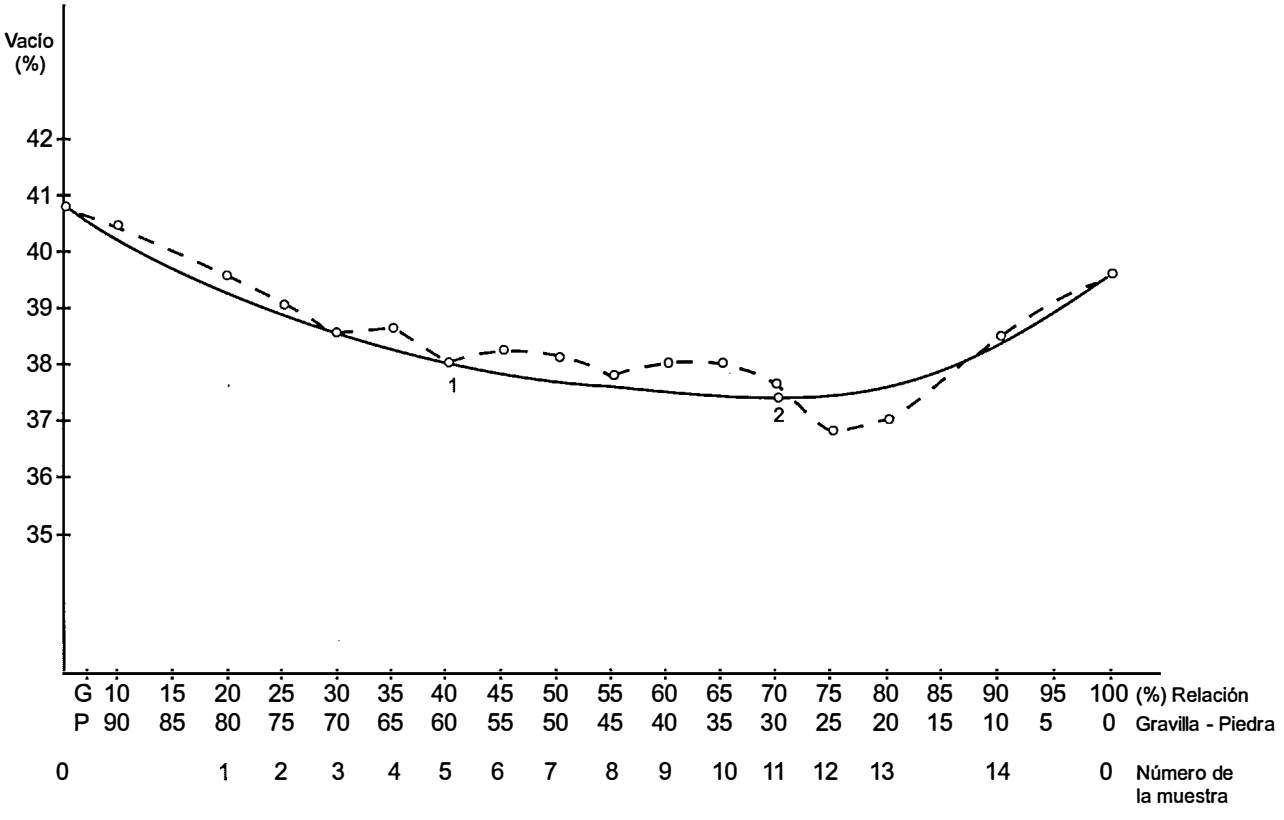



**Fig. 5.2. Relación entre la composición de los agregados gruesos y el porcentaje de vacío. Método O'Reilly**

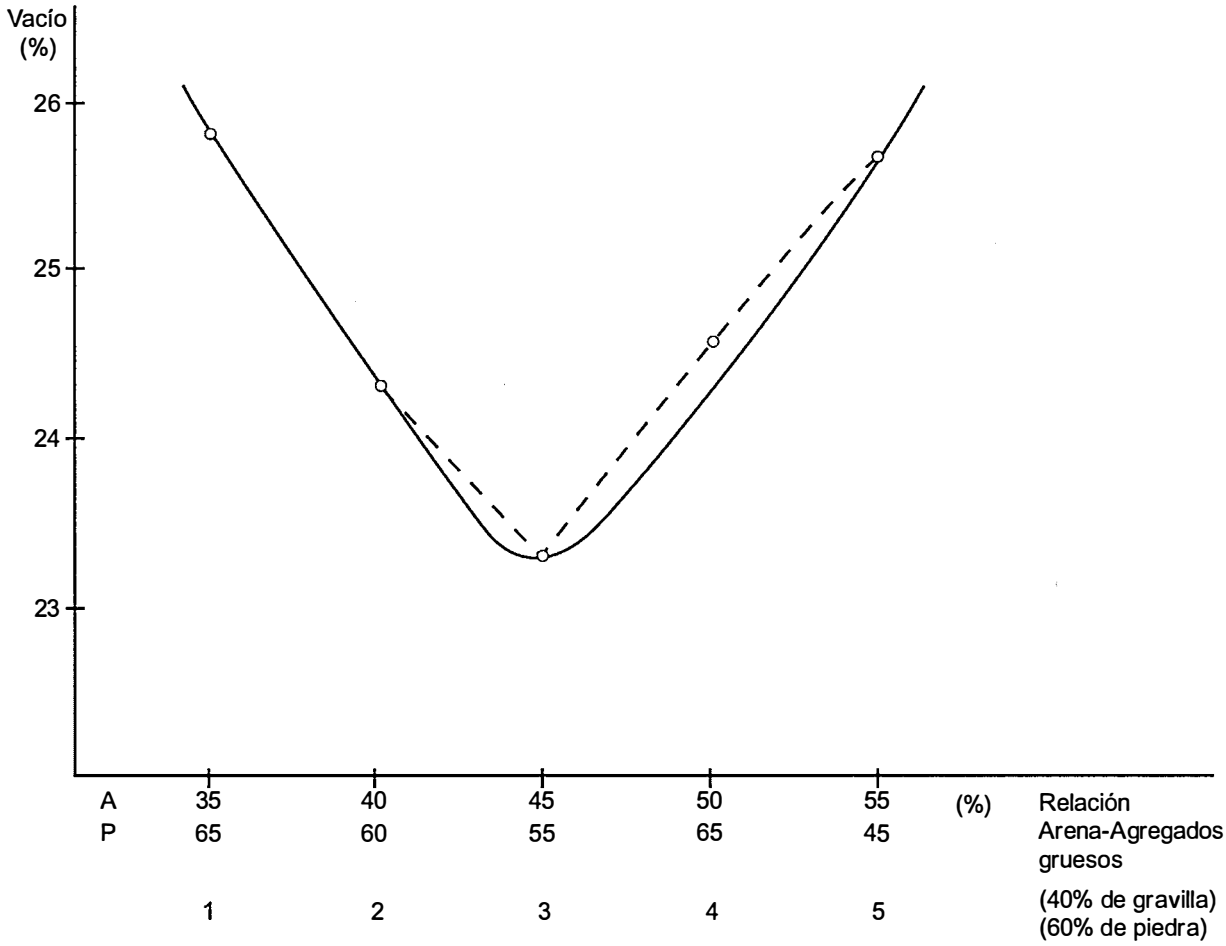



**Fig. 5.3. Relación entre la composición de los agregados gruesos y finos, y el porcentaje de Vacío. Método O'Reilly**

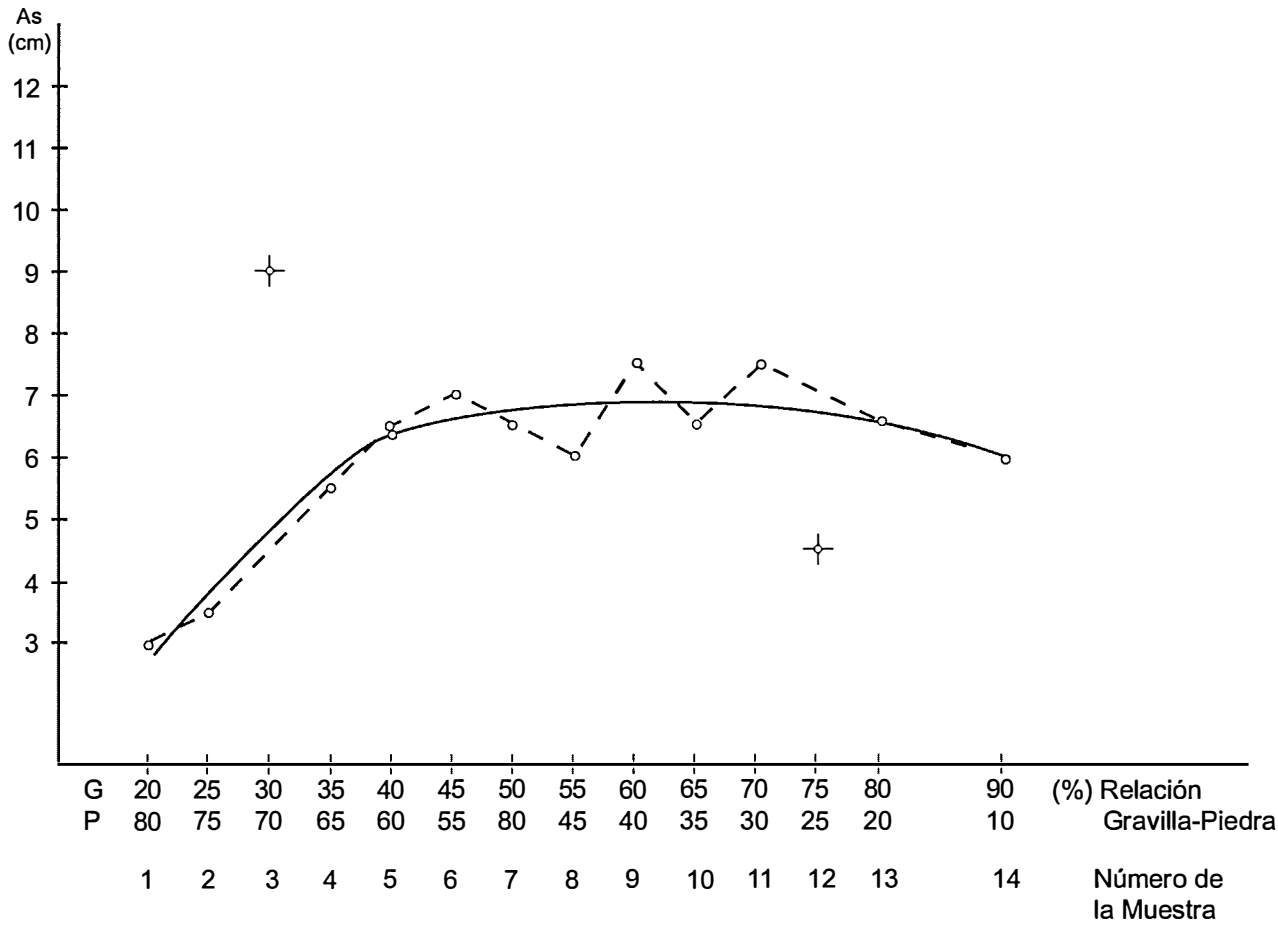



**Fig. 5.4 Relación entre la composición de los agregados gruesos y la trabajabilidad del concreto fresco. Método O'Reilly**

Por los resultados de los ensayos de comprobación realizados y que están expresados en los gráficos de las Figs. 5.4 y 5.5, podemos deducir que la relación de 40% de gravilla y 60% de grava, es la óptima ***para esta cantera***, porque:

a) La trabajabilidad de la mezcla de concreto (Fig. 5.4) crece hasta la cantidad de 40% de gravilla (punto 1) y se mantienen constante hasta la cantidad de 80% de ella (punto 2).

b) La resistencia a la compresión a los 28 días (Fig. 5.5), con el aumento de la superficie específica de la mezcla de agregados, disminuye poco hasta el valor de 40% de gravilla, o sea, sólo en 0.5 MPa (punto 1); sin embargo, con 80% de gravilla (punto 2), el descenso de la resistencia es de 3.2 MPa.

Una cantidad de gravilla menor que 40% influye negativamente en la trabajabilidad de la mezcla de concreto y para alcanzar la óptima (en nuestro caso 7 cm de revenimiento medido en el cono de Abrams), tendríamos que aumentar la cantidad de agua y para lograr la misma resistencia del concreto, aumentar también la cantidad de cemento para mantener la misma relación agua/cemento. Y a la inversa, si aumentamos la cantidad de gravilla por encima de 40%, crece la superficie específica de la mezcla de los agregados, de forma tal que se produce un descenso notable de la resistencia del concreto.

Es evidente (como se manifiesta en este ejemplo), que no sólo se puede aplicar mecánicamente la regla sobre el porcentaje mínimo de vacío en las mezclas de los agregados, sino que también hay que tener en cuenta los otros factores, no menos importantes, que influyen en la calidad del concreto. En este caso la relación 70:30 de la gravilla y la grava, no es la composición óptima, por haberse obtenido el mínimo de vacío sino la relación 40:60 que resulta óptima para todas las exigencias necesarias del concreto.

Para la aplicación práctica del método, podemos confirmar que para lograr las propiedades óptimas del concreto desde el punto de vista de la composición de los agregados, es decisiva la cantidad de arena para la cual la determinación del porcentaje de vacío mínimo es bastante exacto.

En el caso de la determinación de la relación entre los agregados gruesos, no es bueno aumentar la cantidad de la fracción menor una vez que lleguemos al punto a partir del cual el porcentaje de vacío no disminuye (punto 1 en el gráfico de la Fig. 5.2).

Recomendamos que sólo en los casos importantes se realice esta investigación y se elija la composición óptima sobre la base de los gráficos construidos; o sea, para cada una de las mezclas de los agregados gruesos a los cuales les hemos determinado el porcentaje mínimo de vacío, se determine también la trabajabilidad de la mezcla y la resistencia del concreto, utilizando cantidades constantes de arena, agua y cemento, para así lograr que la composición final sea óptima, según todos los aspectos investigados.

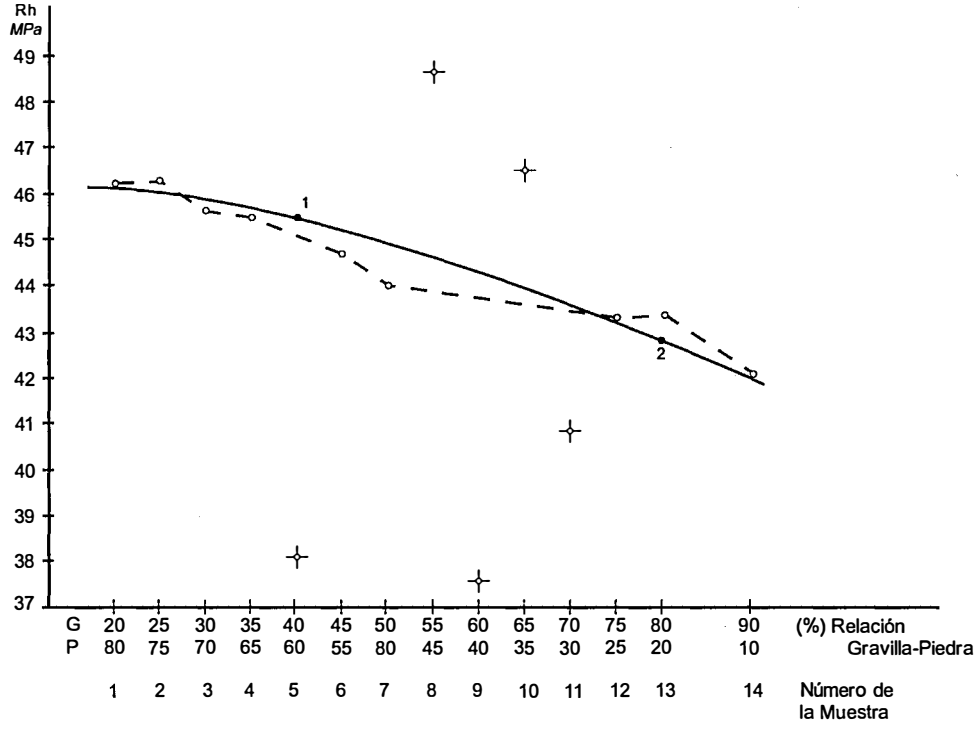



**Fig. 5.5 Relación entre la resistencia del concreto y la composición de los agregados. Método O'Reilly**

## 5.8 Ejemplo del Método para Dosificar Mezclas de Concreto

**Primer paso:** Se determina el PEC y el PUC de la arena y la grava que se han secado en la estufa.

**Segundo paso:** Determinar el Peso Unitario Compactado de las mezclas secas de arena y grava en las proporciones: 35:65,40:60,45:55,..... 60:40

**Tercer paso:** Se calcula el peso Específico Corriente de cada mezcla anterior mediante:

$$PEC_m = \frac{PCE_a \cdot \%A + PEC_g \cdot \%G}{100}$$

**Cuarto paso:** Se calcula el % de vacío de cada mezcla anterior:

$$\%V = \frac{PEC_m - PUC_m}{PEC_m} \cdot 100$$

**Quinto paso:** Con la mezcla óptima de agregados, que es la que posee el menor vacío se fabrican 20 L de mezclas de concreto de una consistencia y resistencia deseada, colocando la cantidad de cemento y agua acostumbrada y con ello:

a) Queda determinada la cantidad de agua por tanteo para un $A_s$ requerido.

b) Se fabrican 18 testigos de prueba para romper a los 28 días con la a/c obtenida.

c) Al mismo tiempo se determina la resistencia $R_c$ del cemento usado, a los 28 días.

**Sexto paso:** Con los datos anteriormente obtenidos se calcula la característica "A" de la grava usada, mediante:

$$A = \frac{R_h}{R_c(M_1 \cdot V + M_2)}$$

donde:

$R_h$: resistencia promedio del concreto obtenido de la rotura de las 18 probetas.

$R_c$: resistencia del cemento a los 28 días.

$M_1$ y $M_2$: valores dependientes de la consistencia del concreto.

$V$: valor que depende de a/c

**Séptimo paso:** Con la característica "A" del agregado grueso, se determina la cantidad de cemento necesaria para un concreto de una consistencia y resistencia determinada mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\frac{R_h}{R_c \cdot A} - M_2}{M_1}$$

Los valores $M_1$ y $M_2$ se obtienen de la Tabla 1

**Octavo paso:** Determinado el valor de $V = \frac{a}{c}$ podemos determinar la cantidad de cemento realmente necesaria:

$$c = \frac{a}{V}$$

donde:

"a" es el agua usada en la investigación para obtener un $A_s$ necesario.

**Noveno paso:** Conocida la cantidad de cemento y agua, se determina la cantidad de arena y grava de acuerdo a la proporción de la mezcla óptima. Partiendo de la necesidad de los materiales para 1 $m^3$ de concreto con un 2 ó 3% de aire atrapado.

**Ejemplo**

Determinar la composición gravimétrica de una mezcla de concreto con las características siguientes:

- Resistencia promedio a la compresión a los 28 días: 210 [Kgf/cm$^2$] = 21,0 MPa
- Consistencia medida en el cono de Abrams: 8 cm
- Tamaño máximo del agregado grueso 38,1 mm

**Datos**

Los datos que se deben obtener como resultado de los ensayos de laboratorio de los agregados a usar son los siguientes:

| AGREGADOS | PESO UNITARIO COMPACTADO [kg / m$^3$] | PESO ESPECÍFICO CORRIENTE [kg / m$^3$] |
|---|---|---|
| Arena | 1591 | 2510 |
| Grava (38,1) | 1560 | 2450 |

**Primer paso:** Determinar la relación óptima de la mezcla de los agregados. Se hacen mezclas de los agregados en las proporciones ya señaladas y a cada mezcla se le determina el peso unitario compactado.

| PROPORCIÓN (%) ARENA | GRAVA | PESO UNITARIO COMPACTADO [kg / m$^3$] |
|---|---|---|
| 35 | 65 | 1772 |
| 40 | 60 | 1798 |
| 45 | 55 | 1793 |
| 50 | 50 | 1784 |
| 55 | 45 | 1769 |
| 60 | 40 | 1750 |

Se determina el peso específico corriente de cada una de las mezclas anteriores por:

$$PEC_m = \frac{PEC_a \cdot \%A + PEC_g \cdot \%G}{100}$$

$$PEC_{(35:65)} = \frac{2510 \cdot 35 + 2450 \cdot 65}{100} = 2471$$

$$PEC_{(40:60)} = \frac{2510 \cdot 40 + 2450 \cdot 60}{100} = 2474$$

$$PEC_{(45:55)} = \frac{2510 \cdot 45 + 2450 \cdot 55}{100} = 2477$$

$$PEC_{(50:50)} = \frac{2510 \cdot 50 + 2450 \cdot 50}{100} = 2480$$

$$PEC_{(55:45)} = \frac{2510 \cdot 55 + 2450 \cdot 45}{100} = 2483$$

$$PEC_{(60:40)} = \frac{2510 \cdot 60 + 2450 \cdot 40}{100} = 2486$$

Con la serie de valores obtenidos anteriormente para cada una de las mezclas de los agregados, se determinan los % de vacíos.

$$\%V = \frac{PEC_m - PUC_m}{PEC_m} \cdot 100$$

$$\%V_{(35:65)} = \frac{2471 - 1772}{2471} \cdot 100 = 28{,}28$$

$$\%V_{(40:60)} = \frac{2474 - 1798}{2474} \cdot 100 = 27{,}32$$

$$\%V_{(45;55)} = \frac{2477 - 1793}{2477} \cdot 100 = 27{,}61$$

$$\%V_{(50:50)} = \frac{2480 - 1784}{2480} \cdot 100 = 28{,}06$$

$$\%V_{(55:45)} = \frac{2483 - 1769}{2483} \cdot 100 = 28{,}75$$

$$\%V_{(60:40)} = \frac{2486 - 1750}{2486} \cdot 100 = 29{,}60$$

Tabulando los resultados anteriores podemos observar con facilidad cual es la relación óptima de la mezcla de los agregados.

| PROPORCIÓN (%) ARENA: GRAVA | | PESO ESPECÍFICO CORRIENTE [kg / m$^3$] | PESO UNITARIO COMPACTADO [kg / m$^3$] | VACÍO % |
|---|---|---|---|---|
| 35 | 65 | 2471 | 1772 | 28,28 |
| 40 | 60 | 2474 | 1798 | 27,32 |
| 45 | 55 | 2477 | 1793 | 27,61 |
| 50 | 50 | 2480 | 1784 | 28,06 |
| 55 | 45 | 2483 | 1769 | 28,75 |
| 60 | 40 | 2486 | 1750 | 29,61 |

En este caso la relación óptima es la de 43:57 obtenido por el Soft Wear creado al efecto, con la que se tiene el mayor peso unitario compactado y el menor por ciento de vacío.

**Segundo paso:** Determinación de la cantidad de agua.

En el laboratorio se hace una cantidad de concreto utilizando la mezcla óptima obtenida y una cantidad de cemento igual a la que se acostumbra a usar para una determinada

resistencia. Durante el proceso de preparación se hará un estricto control de la cantidad de agua para obtener la consistencia (revenimiento) señalado.

En este ejemplo suponemos que la cantidad de agua utilizada fue de 175 Kg/m$^3$ y la cantidad de cemento de 350 Kg/m$^3$.

Al mismo tiempo se tienen que efectuar los ensayos generales normalizados al cemento del tipo o lote que se va a utilizar.

Una vez determinada la cantidad de agua requerida para un revenimiento deseado, se fabrican 18 probetas.

A los 28 días se someten las probetas de concreto y las del cemento a la compresión y se analizan estadísticamente los resultados de manera que tendremos los datos necesarios para pasar a la etapa siguiente:

Los datos de este ejemplo son:

Cantidad de agua 175 Kg/m$^3$

Cantidad de cemento 350 Kg/m$^3$

Resistencia a la compresión a los 28 días

Del cemento 370 Kgf /cm$^2$

Del concreto 305 Kgf /cm$^2$ (ver tabla adjunta).

| PROBETA | RESISTENCIA (kgf /cm$^2$) |
|---|---|
| 1 - 2 | 300 |
| 3 – 4 | 307 |
| 5 – 6 | 309 |
| 7 – 8 | 302 |
| 9 – 10 | 308 |
| 11 – 12 | 310 |
| 13 – 14 | 298 |
| 15 – 16 | 305 |
| 17 - 18 | 307 |
| **PROMEDIO** | 305 |

**Tercer paso:** Determinar la característica "A" de los agregados. Utilizamos la ecuación:

$$A = \frac{R_h}{R_c(M_1 \cdot V + M_2)}$$

$R_h$ y $R_c$ son ya conocidos

$M_1$ y $M_2$ se obtienen de la Tabla 1 del Método O'Reilly para los valores de revenimientos deseados. En este caso:

Para revenimiento: 8 cm

$M_1 = 4{,}1427$ y $M_2 = 0{,}3375$

El valor $V$ se obtiene de la relación agua/cemento del concreto experimental. En este caso:

En la Tabla II del Método O'Reilly se obtiene el valor de $V$

$$\text{Relación } \frac{a}{c} = w = \frac{175}{350} = 0{,}5$$

Correspondiéndole a $w = 0{,}50$ el valor de $V = 0{,}3010$

Sustituyendo en la ecuación:

$$A = \frac{305}{370(4{,}1427 \cdot 0{,}3010 + 0{,}3375)}$$

$$A = 0{,}5202$$

En el caso de haber obtenido la característica "A" por el método FÍSICO-MATEMÁTICO se obvia todo este paso y se va directamente del Paso 2 al Paso 4.

**Cuarto paso:** Conocida la característica "A" del agregado y la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia (revenimiento) exigida, podemos calcular la dosificación del concreto deseado.

Aplicando la ecuación siguiente del Método, tendremos que:

$$V = \frac{\frac{R_h}{R_c \cdot A} - M_2}{M_1}$$

donde:

$R_h$: es la resistencia a compresión a los 28 días del concreto que se desea, en este ejemplo 210 kgf/cm$^2$ = 21,0 MPa

A : 0,5202

$R_c$ : 350 kgf/cm$^2$ resistencia del cemento dada por el fabricante

$M_1$ y $M_2$ : dependientes del revenimiento $A_s = 8$ cm necesitado en nuestra obra.

Sustituyendo:

$$V = \frac{\frac{210}{350 \cdot 0{,}5202} - 0{,}3375}{4{,}1427}$$

$$V = 0{,}1969$$

Con este valor de $V$ vamos a la Tabla II y obtenemos el valor de $w$ correspondiente.

Para $V = 0{,}1969$ y $w = 0{,}64$

como:

$$w = \frac{a}{c} \qquad c = \frac{a}{w}$$

La cantidad de cemento necesaria será:

$$c = \frac{175}{0{,}64} = 275 \ \ kg/m^3$$

**Quinto paso:** Conocida la cantidad de agua y cemento necesarias para obtener la resistencia del concreto planificada, podemos calcular la cantidad de arena y grava para 1 $m^3$ de concreto.

Debemos considerar que la suma de los volúmenes absolutos de los materiales componentes es igual 1000 L por lo que:

$$V_c + V_{ag} + V_{ar} + V_{vacío} = 1000\,L$$

$$V_{ar} = 1000 - \left( \frac{C}{\gamma_c} + V_{ag} + V_{vacío} \right)$$

donde:

C : cantidad de cemento en peso

$\gamma_c$ : peso específico del cemento

$V_{ar}$ : volumen de los agregados (arena y grava) en litros

$V_{ag}$ : volumen del agua en litros

$V_{vacío}$ : volumen de poros en litros: se supone que para concretos normales, los poros constituyen el 2%, por el aire atrapado en el proceso de manipulación.

Haciendo una primera sustitución sabiendo que:

$$C = 275\,Kg/m^3$$

$$V_{ag} = 175\,L$$

$$\gamma_c = 3.14$$

$$V_{vacío} = 0{,}02 \cdot (1000) = 20\,L$$

Obtendremos:

$$V_{ar} = 1000 - \left(\frac{275}{3,14} + 175 + 20\right)$$

$$V_{ar} = 717,4\,L$$

El peso de los agregados se determina por:

$$\frac{\%A \cdot P_{ar}}{\gamma_a} + \frac{\%G \cdot P_{ar}}{\gamma_g} = V_{ar}$$

Sabiendo que:

%A : porciento de arena en la mezcla = 43%

%G : porciento de grava en la mezcla = 57%

$\gamma_a$ : peso específico de la arena = 2,51

$\gamma_g$ : peso específico de la grava = 2,45

$V_{ar}$ : Volumen de agregados = 717,4 L

$P_{ar}$ : peso total de los agregados

$$P_{ar} \cdot \left(\frac{0,43}{2,51} + \frac{0,57}{2,45}\right) = 717,4$$

$$P_{ar} = \frac{717,4}{0,4039}$$

$$P_{ar} = 1776\,Kg$$

| DOSIFICACIÓN | EN PESO [KG] | EN VOLUMEN ABSOLUTO [Lt] |
|---|---|---|
| Arena = 1776.0,43 = | 764,0 | 304,0 |
| Grava = 1776.0,57 = | 1012,0 | 413,0 |
| Cemento = | 275,0 | 87,6 |
| Agua = | 175,0 | 175,0 |
| **TOTAL** | **2226,0** | **980,0** |

***Nota***: Se debe hacer una nueva mezcla con esta composición y medir el revenimiento y ajustar la cantidad de agua final. Si es necesario disminuir el agua.

## 5.9 Ejemplo de la aplicación del Método para dosificar Mezclas de concreto de Elevado Desempeño

### 5.9.1 Antecedentes

El concreto de Alto Desempeño, es el concreto cuya resistencia oscila entre 50 y 80 MPa, pero no sólo se le exige alta resistencia, sino también durabilidad.

Con su producción se logran las siguientes propiedades benéficas:

- Mayor resistencia mecánica.
- Mayores resistencias iniciales y menor contracción.
- Muy baja permeabilidad y mayor durabilidad.
- Mejor adherencia a otras superficies de concreto.
- Mayor resistencia a la corrosión y la abrasión.
- Menor exudación y menor segregación en la colocación.
- Menor deformación lenta.

El Concreto de Alto Desempeño se obtiene añadiéndole a la dosificación de concreto común, cantidades apropiadas de Humo de Sílice, o Metakaolín u otro material puzolánico activo el cual una parte contribuye al aumento de su resistencia y otra parte tapona sus poros, proporcionándole impermeabilidad así como el uso de súperplastificantes que permiten disminuir el consumo de agua, reduce considerablemente la relación agua/cemento, lográndose así, porosidades óptimas como garantía de su durabilidad.

### 5.9.2 Ejemplo

1. Se seleccionan los materiales a emplear en la producción del concreto.

2. Se siguen todos los pasos descritos en el acápite 5.8 donde se determina:

   2.1 relación óptima de los agregados (arena y grava) a usar, para lograr el vacío mínimo.

   2.2 determinamos la cantidad de agua para su consistencia exigida.

   2.3 se determina la característica "A" del agregado grueso.

3. Resultados de la primera parte

   3.1 hemos usado agregados calizos triturados (arena y grava) para determinar la posibilidad de producir Concretos de Alto Desempeño, con este tipo de agregados.

   3.2 la relación óptima lograda por el Método de mínimos vacíos fue de 45:55 (arena: grava).

   3.3 la cantidad de agua exigida para 12 cm de revenimientos en el Cono de Abrams fue de 180 litros de agua.

   3.4 se determinó la característica "A" del agregado grueso usado, la cual es igual a 0.5202.

   3.5 se determinó la demanda de los materiales para confeccionar una mezcla de prueba, para una resistencia superior a 70 MPa.

   - Cemento: 500 Kg
   - Agua: 150 Kg (se disminuyó la antes determinada, por el uso del superplastificante).
   - Aditivo: 5 $l/m^3$ = 1.2 % del peso del cemento, observándose una consistencia de 12 cm en el Cono de Abrams).
   - Relación a/c = 0.3
   - Silica Fume: 40 Kg = 8 % del peso del cemento.

**Cantidad de materiales en Kg para un $m^3$ de concreto.**

| Cemento | Arena | Gravilla | Agua | Aditivos | Silica Fume |
|---|---|---|---|---|---|
| 500 | 767 | 938 | 150 | 5 | 40 |

**Resultados físicos – mecánicos obtenidos de las pruebas al concreto elaborado.**

| CANTIDAD DE CEMENTO | EDAD | No. MUESTRA | RESULTADOS | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | RESISTENCIA MEDIA EN MPa | DESVIACIÓN MPa | POROSIDAD % |
| 500 | 3 días | 26 | 39,3 | 0,43 | 3,1 |
| | | 30 | 33,9 | 1,19 | 3,5 |
| | | 34 | 31,8 | 0,63 | 4,2 |
| | 7 días | 27 | 54,8 | 0,75 | 5,2 |
| | | 31 | 54,3 | 0,63 | 5,2 |
| | | 35 | 50,8 | 0,63 | 5,8 |
| | 28 días | 28 | 71,2 | 0,70 | 7,2 |
| | | 38 | 75,2 | 0,33 | 6,7 |
| | | 42 | 77,7 | 0,63 | 6,5 |
| | | 46 | 72,6 | 0,38 | 7 |
| | | 39 | 71,4 | 0,33 | 7,1 |
| | | 40 | 75,2 | 0,66 | 6,8 |
| | 56 días | 29 | 85,2 | 0,70 | 8,1 |
| | | 32 | 86,2 | 0,65 | 8,2 |
| | | 36 | 84,7 | 0,68 | 8,2 |
| | | 3 | 8[illegible],2 | 0,71 | 8,3 |
| | | 1 | 8[illegible],6 | 0,35 | 8,5 |
| | | 44 | [illegible]6,7 | 0,68 | 8,7 |

**Capilaridad del concreto endurecido obtenido de las pruebas realizadas a éste, en diferentes edades.**

| CANTIDAD DE CEMENTO | días | CAPILARIDAD | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN m ($s/m^2$) | | COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR k ($kg/m^2s^{-1/2}$) | | POROSIDAD EFECTIVA $€_e$ ($kg/m^3$) | |
| | | MEDIA | DESVIACIÓN | MEDIA | DESVIACIÓN | MEDIA | DESVIACIÓN |
| 500 | 3 días | 962137290 | 5239390 | 435 | 20,2 | 0,059 | 0,005 |
| | | 656689170 | 4763520 | 470 | 24,8 | 0,052 | 0,005 |
| | 7 días | 1177281400 | 755926 | 361 | 8,14 | 0,045 | 0,002 |
| | | 1030877300 | 1281114 | 336 | 7,44 | 0,048 | 0,002 |
| | 28 días | 1977281400 | 3918841 | 240 | 13,7 | 0,019 | 0,001 |
| | | 1930877300 | 6746787 | 201 | 29,6 | 0,012 | 0,003 |
| | | 1920428148 | 1471603 | 223 | 15,6 | 0,015 | 0,002 |
| | | 1912702560 | 1323063 | 265 | 81 | 0,018 | 0,001 |
| | 56 días | 2435496400 | 4377056 | 285 | 14,5 | 0,021 | 0,002 |
| | | 2389092300 | 7205002 | 246 | 31,2 | 0,015 | 0,001 |
| | | 2378643148 | 1929818 | 268 | 16,4 | 0,018 | 0,005 |
| | | 2370917560 | 1781278 | 310 | 82 | 0,023 | 0,005 |

**Resultados de la determinación de la penetración de cloruros en %, en relación al peso total de la muestra, al someter éstas en la cámara de ensayo acelerado de Niebla Salina.**

| Muestra | Profundidad de penetración en mm | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 1 | 0,25 | 0,22 | 0,12 | 0,05 | 0,00 |
| 2 | 0,22 | 0,18 | 0,17 | 0,04 | 0,00 |
| 3 | 0,22 | 0,20 | 0,15 | 0,01 | 0,03 |
| Media | 0,23 | 0,20 | 0,15 | 0,03 | 0,01 |

Recomiendo, con los datos mostrados de los resultados obtenidos al ser sometidos el concreto a diferentes pruebas se podrán tomar las decisiones correspondientes, de cómo producir un Concreto de Altas Prestaciones que satisfaga las exigencias técnico-económicas de la obra donde se usara.

Estas investigaciones fueron realizadas por el laboratorio de Ensayos de Materiales de la Empresa Constructora de Ciego de Ávila en Cuba, con la finalidad de determinar la posibilidad de uso de este concreto en los puentes del pedraplen Turiguano Cayo-Coco, los cuales están sometidos a una fuerte brisa marina.

Quedó demostrado y así se están empleando los Concretos de Altas Prestaciones en los puentes de dicho pedraplen, confeccionados con agregados calizos triturados de buena calidad.

# Capítulo 6

# Método físico-matemático para determinar la característica "A" de los agregados gruesos para concretos

## 6.1 Antecedentes

Los estudios realizados por varios autores concuerdan en que el procedimiento de elaboración de las mezclas de concreto está en dependencia de la característica de forma de los agregados y de su superficie. Esto significa que depende de su trituración, rugosidad, lisura, etc.

El aprovechamiento práctico de estos conocimientos se dificulta, porque la medida de esta influencia en el procedimiento de elaboración de las mezclas de concreto no se ha determinado cuantitativamente y, además, la mayoría de estas características no se pueden expresar con exactitud, como por ejemplo, la rugosidad o la lisura de la superficie.

Además, los agregados son materiales heterogéneos y sus características se pueden hallar con un grado determinado de probabilidad. El objetivo de estudio es analizar sí la selección apropiada de la característica de forma de los agregados influye realmente en el procedimiento de elaboración de las mezclas de concreto, y sí resulta positivo determinar cuantitativamente esta influencia. Los resultados podrían contribuir a economizar los proyectos de composición de mezclas de concreto, sobre todo, desde el punto de vista del consumo de cemento y, a la vez, se lograría una compactación más eficaz de las mezclas con agregados de formas poco apropiadas.

Los resultados también podrían servir para seleccionar el tratamiento adecuado de los agregados, principalmente en la trituración, y los tipos de trituradoras que lograrían las características de formas más apropiadas.

Los métodos y equipos de medición actuales no proporcionan la posibilidad objetiva de comprobar el carácter de la superficie de los granos de los agregados, es decir, el grado de su rugosidad o lisura. Este estudio está encaminado a determinar la influencia de la característica de forma de los granos de los agregados y, consecuentemente, del conjunto de éstos sobre el procedimiento de la elaboración de la consistencia de las mezclas de concreto.

Con este objetivo se seleccionaron varios métodos de comprobación de la característica de forma de los agregados, de tal modo, que expresaran las principales particularidades en forma óptima y objetiva (excepto el grado de rugosidad superficial). Es posible que dichos métodos sirvan para comprobar la influencia sobre la consistencia de las mezclas de concreto y expresarla matemáticamente.

Una definición precisa de la forma de los materiales granulares y la existencia de métodos simples para medirlos, deben permitirnos un mejor control de la producción de arenas y gravas por trituración.

Las propiedades mecánicas de las arenas y de las gravas, especialmente su ángulo de rozamiento interno y su compresibilidad, dependen de los contactos intergranulares y, por consiguiente, de la forma de los granos.

Para definir la forma de un sólido, es necesario describir la superficie que la limita exteriormente. Para geometrías simples basta con un número finito de parámetros: ángulos y relaciones de longitud. Por el contrario, para un sólido cualquiera, es necesario una infinidad de parámetros.

En la práctica se tiende a ofrecer una descripción aproximada de la forma, con la ayuda de un número finito de esos parámetros. De esta manera se obtiene según el país, las disciplinas y los autores, una gran diversidad de definiciones, normas y hábitos, de acuerdo con la selección, medición y utilización de esos parámetros en número finito.

Estas dificultades que hemos mencionado, han hecho que varios autores propongan métodos indirectos, cuyos principios plantean que la forma de los granos tiene influencia sobre las propiedades de un conjunto de éstos, por tanto, basta medir una de estas propiedades siguiendo un procedimiento normalizado para evaluar, de modo indirecto, la forma media de los granos del conjunto.

Tales métodos presentan un inconveniente fundamental, ya que la forma de los granos no es el único parámetro que interviene en las propiedades mecánicas de un material granular y una medición indirecta sólo reproducirá el efecto combinado de varios factores.

Es importante agrupar esos parámetros en dos categorías: los que permitan medir la forma global y los que midan angulosidad; se puede añadir una tercera categoría, relativa al estado de la superficie del grano.

De todos los coeficientes existentes, sólo algunos han sido objeto de normas o recomendaciones oficiales en diferentes países:

En Francia la norma AFNOR 18-301 "Agregados pesados para concretos de construcción", define el coeficiente volumétrico C, en otras aparecen las definiciones de índice de aplanamiento $(Ap)$ , propuesto por Cailleux.

- En Gran Bretaña la norma BS-812 utiliza los coeficientes de aplanamiento P y alargamiento q, y a partir de ellos se definen los índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados.
- En Bélgica, la norma NBN-329 define el índice de forma por la relación e/l.
- En Checoslovaquia, Riha y Stork, introducen varias posibilidades para determinar la característica de forma de los granos y del conjunto de ellos con los factores siguientes:

a) Índice de Forma ($\beta$)

b) Coeficiente de volumen (Os)

c) Índice de planicidad (ip), según Cailleux

d) Índice de forma de los granos, según la norma Checoslovaca CSN 721172.

T.C Powers considera el método introducido por Wadell, como uno de los más aceptables para expresar la característica de forma de los agregados. Según él, las propiedades de forma de los agregados se pueden caracterizar por dos factores:

a) Factor de esfericidad, $\psi$, eventualmente, $\phi$

b) Factor de redondez, P*

Wadel define la denominada esfericidad estereométrica $\psi$ como la relación entre el área superficial (s) de una esfera del mismo volumen que la que tiene el grano medido, y el área superficial del grano investigado (S):

$$\psi = \frac{s}{S} m^2 \cdot m^{-2} \qquad (6.1)$$

Pero para realizar una valoración en la práctica Wadell utiliza el factor denominado por él *esfericidad plana,* de una sección transversal a:

$$\phi = \frac{d}{D} m \cdot m^{-1} \qquad (6.2)$$

donde:

d : diámetro del círculo de igual superficie que la que tiene la sección del grano investigado, en metro.

D : diámetro del círculo circunscrito con la máxima longitud en metro.

Schaffner, por investigaciones realizadas, mantiene el factor de esfericidad plana ($\phi$), porque investigó que al medir este valor *n* veces en un mínimo de 20 granos de una misma fracción de un agregado, al determinar sus promedios matemáticos, las diferencias de los valores de $\phi$, promediados con una mayor cantidad de mediciones hasta $n = 100$, son tan pequeñas, que la cantidad de 20 mediciones (20 granos) se puede considerar como suficiente. Esta cantidad de mediciones facilita sustituir para fines prácticos la esfericidad estereométrica por la esfericidad plana.

La determinación del factor de forma $\phi$, o del valor inverso $\phi^{-1}$ tiene para nosotros una gran utilización.

Los valores de $\phi$ se determinan, según Schaffner, de la forma siguiente:

1. Se hace una fotografía de 20 granos como mínimo, de cada fracción del agregado a investigar.
2. La fotografía se amplía a consideración del investigador, desde 10 hasta 50 *mm* y se calca el contorno de los granos sobre un papel transparente.
3. Los valores $d_1$ y $D_1$ hasta $d_n$ y $D_n$ se determinan, para cada grano, utilizando el calibrador evaluador formado por varios círculos, concéntricos y con un escalonamiento de 1 hasta 2 *mm* entre los diámetros escalonados.

*4.* De los cocientes $d_1 : D_1$ hasta $d_n : D_n$ se determinan los valores de $\phi_1$, hasta $\phi_n$ para cada grano y se determina el valor de $\phi$ como el promedio aritmético de $\phi_1$ hasta $\phi_n$:

$$\phi = \frac{\phi_1 + \phi_2 + \ldots \phi_n}{n} \qquad (6.3)$$

No obstante, para este valor promedio aritmético, se recomienda determinar el factor de esfericidad $\phi$, fotografiando los veinte granos en dos planos, primero según el eje *ab* y después según el eje *bc,* que resultará, de girar la partícula $90^0$ respecto al eje *ab*, con el fin de tener una representación promedio de cada grano; a continuación se determina el valor resultante como el promedio de los dos anteriores, o sea:

$$\phi_n = \frac{\phi_{ab} + \phi_{bc}}{2} \qquad (6.4)$$

El valor inverso de la esfericidad se puede denominar $\phi^{-1}$. Wadel y Schaffner la consideran y la denominan *alargamiento de los granos de los agregados.*

Wadel expresa el coeficiente de redondez $(P*)$ como:

$$P* = \frac{\frac{\sum_{n}^{1} r}{R}}{n} \qquad (6.5)$$

donde:

$r$: radio de redondez de las aristas en el plano de la sección de los granos en (milímetros)

$R$: radio mayor del círculo inscripto en la sección transversal del grano en (milímetros)

$n$: cantidad de aristas en la sección del grano, en los cuales $r < R$ las aristas de redondez $r \geq R$ no se consideran).

Schaffner, según sus experiencias, recomendó ajustar, con la utilización de los valores de $P^*$, este coeficiente y pasarlo al coeficiente de redondez $P$, cuyo valor se determina por la ecuación:

$$P = \frac{1 + \frac{\sum_{n}^{1} r}{R}}{1 + n} \qquad (6.6)$$

Por considerar adecuado el cambio propuesto por Schaffner, nosotros, en lo sucesivo, expresaremos el coeficiente de redondez $P$, según la ecuación 6.6.

Los valores del coeficiente $P$ se determinan simultáneamente con los valores del coeficiente $\phi$, por un procedimiento similar:

1. Para determinar $P$ se utilizan las mismas fotografías ampliadas de los 20 granos de cada fracción del agregado investigado y se les determinan los valores de $\phi$.
2. Con la utilización del mismo calibrador creado con el sistema de círculos concéntricos y del contorno de los granos calcados sobre un papel transparente, se determina la cantidad de $n$ *aristas redondeadas*, en las que $r < R$ y para cada una de estas aristas se determina el radio $(r)$ de redondez. Después se determina el radio máximo $(R)$ del círculo inscripto de la sección del grano.
3. En la ecuación 6.6 se sustituyen los valores obtenidos de $r_1$ hasta $r_n$ de $R$ y $n$ y así se determinan los valores de $P_1$ hasta $P_n$ para cada uno de los granos investigados. El valor de $P$ resultante de la fracción correspondiente del agregado, es el promedio aritmético $P_1$ hasta $P_n$.

$$P = \frac{P_1 + P_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots P_n}{n} \qquad (6.7)$$

Para determinar los valores de $P$, recomendamos el empleo de la fotografía en los planos ab y bc, y seguir el mismo procedimiento para la determinación de $\phi$, en este caso:

$$P_n = \frac{P_{ab} + P_{bc}}{2} \tag{6.8}$$

El valor inverso de la redondez, $P^{-1}$, es denominado por Wadell y Schaffner como *angulosidad de los agregados.*

Una desventaja del procedimiento Wadell-Schaffner, es que la metodología para determinar el factor $\phi$, de la esfericidad plana, no tiene en cuenta suficientemente la planicidad de algunos granos, lo cual constituye una ventaja para los agregados que contienen granos planos o escamosos.

## 6.2 Estudios e Investigaciones

En los estudios que realizamos para determinar la influencia de la característica de forma de los agregados sobre la consistencia de las mezclas de concreto, utilizamos, también como característica de forma de los agregados, la representada por el coeficiente de alargamiento ($L$) y de angulosidad ($G$) de los agregados analizados. De los resultados de dichos estudios se evidencia que con la utilización de los coeficientes $L$ y $G$, se pueden determinar las dosis de pc para diferentes $w$ y $KO$, así como la consistencia de las mezclas de concreto para determinada $w$ y la dosis de pasta de cemento, pc. El principal aporte de este estudio fue que pudimos cuantificar la influencia de las características $L$ y $G$, con lo que adquirimos mejores conocimientos de la influencia de la característica de forma de los agregados sobre las propiedades reológicas de las mezclas de concreto.

Y más importante aún, pudimos comprobar la posibilidad de influir en el proceso tecnológico de la trituración de los agregados para obtener los valores de L y G más convenientes.

Todo ese estudio se hizo a partir del nuevo método para el diseño de la composición de mezclas de concreto, con plasticidades comprendidas entre 5 y 80 s VeBe.

Con este trabajo investigamos la influencia de la característica de forma de los agregados triturados sobre la resistencia de los concretos, pero utilizando mezclas plásticas, y establecimos la dependencia de la esfericidad ($\phi$), y la redondez ($P$) de los agregados, con la característica A de ellos y, a su vez, la influencia de ésta sobre la resistencia del concreto que con ello se elabore.

## 6.3 Influencia de la característica de forma de los agregados triturados sobre la resistencia de los concretos

En la realización de los ensayos para determinar la influencia de la característica de forma de los agregados sobre la resistencia del concreto, pudimos determinar que para los agregados triturados gruesos y de forma irregular, el factor de la forma es decisivo y es más fuerte que el factor de la granulometría, por lo que no es posible utilizar los métodos clásicos, hasta ahora empleados, ya que se basan en la determinación de las relaciones recomendables de las fracciones de los agregados (o sea, la curva granulométrica ideal).

Los agregados gruesos de forma irregular requieren una cantidad de arena mucho mayor de la que se obtiene por el método basado en la granulometría óptima y, consecuentemente, una mayor cantidad de agua.

El método experimental demostró que para la composición óptima de los agregados influye básicamente en nuestro caso, la forma de los agregados gruesos.

Acorde con los ensayos realizados, clasificamos los agregados gruesos por sus porcentajes de partículas planas y alargadas, como se expresa, en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1**

| Tipo de agregado | Camoa I | Jamaica | Dragón Camoa | H. Cubano | Moderna | Somorrostro |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Partículas planas y alargadas (%) | 30 | 28 | 17 | 31 | 23 | 16 |
| Clasificación según el método experimental | II | II | I | II | I | I |

Los resultados de la investigación realizada con los materiales expuestos en la Tabla 6.1, con el fin de determinar la influencia de su característica de forma sobre la resistencia del concreto, se ofrecen en las Tablas 6.2 y 6.3.

Para obtener la trabajabilidad requerida más comúnmente utilizada y medida en el cono de Abrams, de $A_s$ = 6 a 8 cm, de acuerdo con los tipos de agregados gruesos, el consumo de agua se expresa en la Tabla 6.2

**Tabla 6.2**

| Agregados del grupo I | Cantidad de agua en L/m$^3$ de concreto |
|---|---|
| Dragón Camoa | 214,0 |
| Somorrostro | 220,0 |
| La Moderna | 225,0 |
| **Agregados del grupo II** | **Cantidad de agua en L/m$^3$ de concreto** |
| Camoa I | 224,0 |
| Concreto Cubano | 240,0 |
| Jamaica | 234,0 |

Las resistencias a la compresión obtenidas de estas mezclas de concretos fueron las que se muestran en la Tabla 6.3.

**Tabla 6.3**

| Agregados del grupo I | Resistencia en MPa 3 días | 7 días | 28 días |
|---|---|---|---|
| Dragón Camoa | 28,3 | 36,0 | 40,9 |
| Somorrostro | 25,7 | 32,9 | 39,3 |
| La Moderna | 25,5 | 31,9 | 38,1 |
| **Agregados del grupo II** | **Resistencia en MPa 3 días** | **7 días** | **28 días** |
| Camoa I | 23,0 | 28,7 | 37,4 |
| Concreto Cubano | 24,3 | 30,8 | 34,7 |
| Jamaica | 22,5 | 28,9 | 34,7 |

Si observamos los resultados de las investigaciones, expresados en las Tablas 6.2 y 6.3 se demuestra la notable influencia de la forma irregular de los agregados sobre la trabajabilidad de las mezclas de concreto, o sea, de la cantidad de agua necesaria para garantizar la consistencia requerida, y de ahí la significativa influencia de la característica de forma de los agregados sobre los consumos de cemento y la resistencia a la compresión del concreto. La extensión de estos ensayos fue elegida con respecto a las mezclas de concreto que actualmente se emplean en la producción de los elementos prefabricados y en obras, de tal manera, que cubre todas las alternativas existentes en la práctica, incluso la de los valores extremos de trabajabilidad medidos en el cono de Abrams de $A_s$ = 12 cm hasta $A_s$ = 14 cm. En total fueron ensayados 20 tipos de mezclas de concreto; los ensayos se repitieron 5 veces y, después de eliminados los valores extremos, fueron tomados los valores promedios. Este proceso se llevó a cabo con los materiales de seis canteras de la provincia La Habana.

## 6.4 Influencia de la característica A de los agregados triturados sobre la resistencia del concreto endurecido

Hemos creado un nuevo método para determinar la característica A de los agregados y su influencia sobre la resistencia del concreto endurecido, mediante el establecimiento de las relaciones que existen entre las características A de un agregado determinada por nuestro "Método de dosificar mezclas de concreto" y los valores de la esfericidad y redondez de dichos agregados, aportados por el método Wadell – Schaffner, modificado por las nuevas experiencias logradas, ya que uno de los inconvenientes del método antes mencionado, es que le permite al que lo aplica ciertas libertades que no están precisadas en él, lo que no permite hacer comparaciones entre la aplicación hecha por diferentes personas sobre un mismo agregado. También otro de los inconvenientes es el empleo de un calibrador confeccionado en papel transparente que no posibilita lograr una alta precisión en las mediciones.

Con el fin de limitar al máximo estas imprecisiones y poder hacer comparaciones entre las mediciones que se realicen sobre los agregados, hemos establecido una serie de principios que normalizan la ejecución del trabajo, introduciéndole variaciones al método, en razón de las experiencias proporcionadas por las mediciones realizadas en los agregados de más de 35 canteras de nuestro país.

Para realizar esta investigación, utilizamos primeramente 6 tipos de agregados de diferentes canteras de la zona 1 de la provincia de La Habana, y con el fin de obtener una alta precisión en la determinación de los factores, $\phi$ y $P$, los calculamos por dos procedimientos:

1. Seleccionamos 20 granos del agregado a investigar, que tenían cantidades proporcionales de las fracciones que los componían, y se les hizo la medición en dos

posiciones, lo que equivale a determinar los factores de 40 mediciones en cada agregado.

2. Se tamizaron cada uno de estos agregados, se separaron en fracciones y se tomaron 20 granos de cada una de esas fracciones, se fotografiaron en dos posiciones y los valores promedio resultantes fueron de 120 o 160 mediciones para cada agregado, en dependencia del número de fracciones.

## 6.5 Método para obtener la característica A de los agregados gruesos

El nuevo método para la obtención de la característica de forma de los agregados seleccionados, por los dos procedimientos antes mencionados, fue el siguiente:

1. Se seleccionaron 20 partículas del agregado a investigar las cuales debían tener cantidades proporcionales de las fracciones que la componían o correspondieran a una fracción.
2. Para ser fotografiadas, las 20 partículas se colocaron en dos posiciones, según los ejes ab y bc (sólo girando $90^0$ uno respecto al otro) sobre un papel negro, que al ser iluminado definió correctamente los contornos de cada grano.
3. La cámara con que se tomó la foto, fue de película con formato de 35 mm y un lente normal. Los 20 granos del agregado se colocaron sobre un papel negro de 18 x 27 cm. Al tomarse la foto, el formato de la película abarco toda el área del papel negro.
4. Las fotos se ampliaron en papel mate, con un formato de 16 x 24 cm, y la ampliadora se colocó a una altura tal, que la película abarcó todo el papel de grabado, sobre esta foto realizamos los pasos del número 5 en adelante. En caso de no poseer papel mate,

los contornos de los granos se dibujan sobre un papel transparente o una lámina de acetato y de ésta sacamos copias, sobre las cuales se trabaja.

5. Con una plantilla de círculos o circúlera de plástico transparente, donde los círculos aumentan su diámetro, de milímetro en milímetro, desde uno hasta 35, se determinaron los diámetros y radios correspondientes a cada grano, utilizando un portaminas con creyón de 0.5 mm. En el caso de los granos con una dimensión mayor de 35 mm, se empleó regla y compás para hallar los datos necesarios.
6. La determinación del área de un grano equivalente a una circunferencia, se realizó al superponer la plantilla sobre la fotografía del grano y se tuvo en cuenta que el área del grano que quedaba fuera de la circunferencia, por no estar cubierta, se compensaba con el área de la circunferencia que no estaba cubierta por el grano.
7. Los círculos de redondez de las aristas de cada grano fueron lo más grande posible, y así se evitaron las superposiciones de las circunferencias de las aristas del contorno, ya que los radios de redondez no pueden ser mayores que el de la circunferencia inscripta.
8. Los valores de $\phi$ y P pueden ser determinados por el promedio de los valores obtenidos por tres fotos de cada posición, elaboradas por una misma persona.

**Fig. 6.1 Cantera Dragón Camoa (Posición 1)**

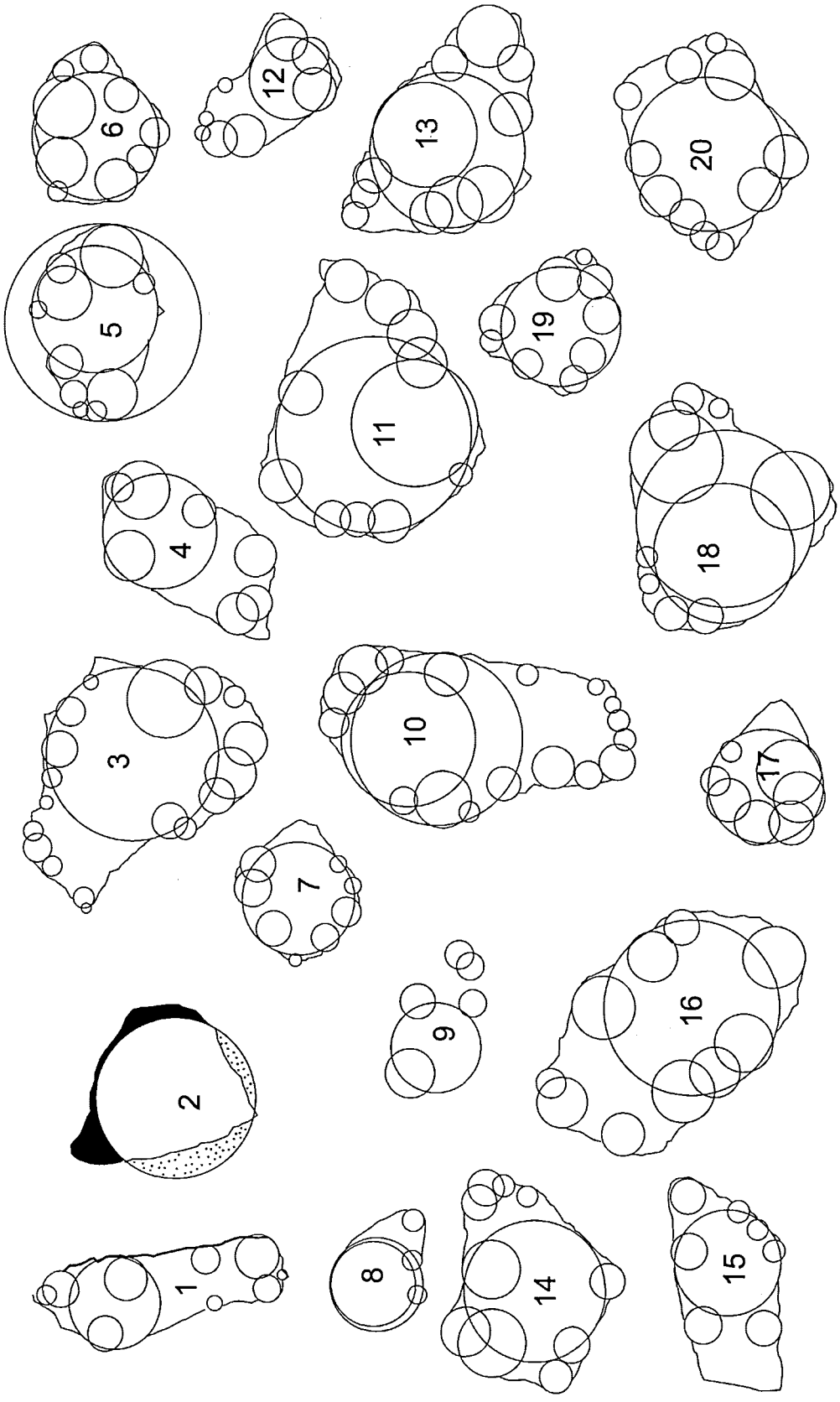
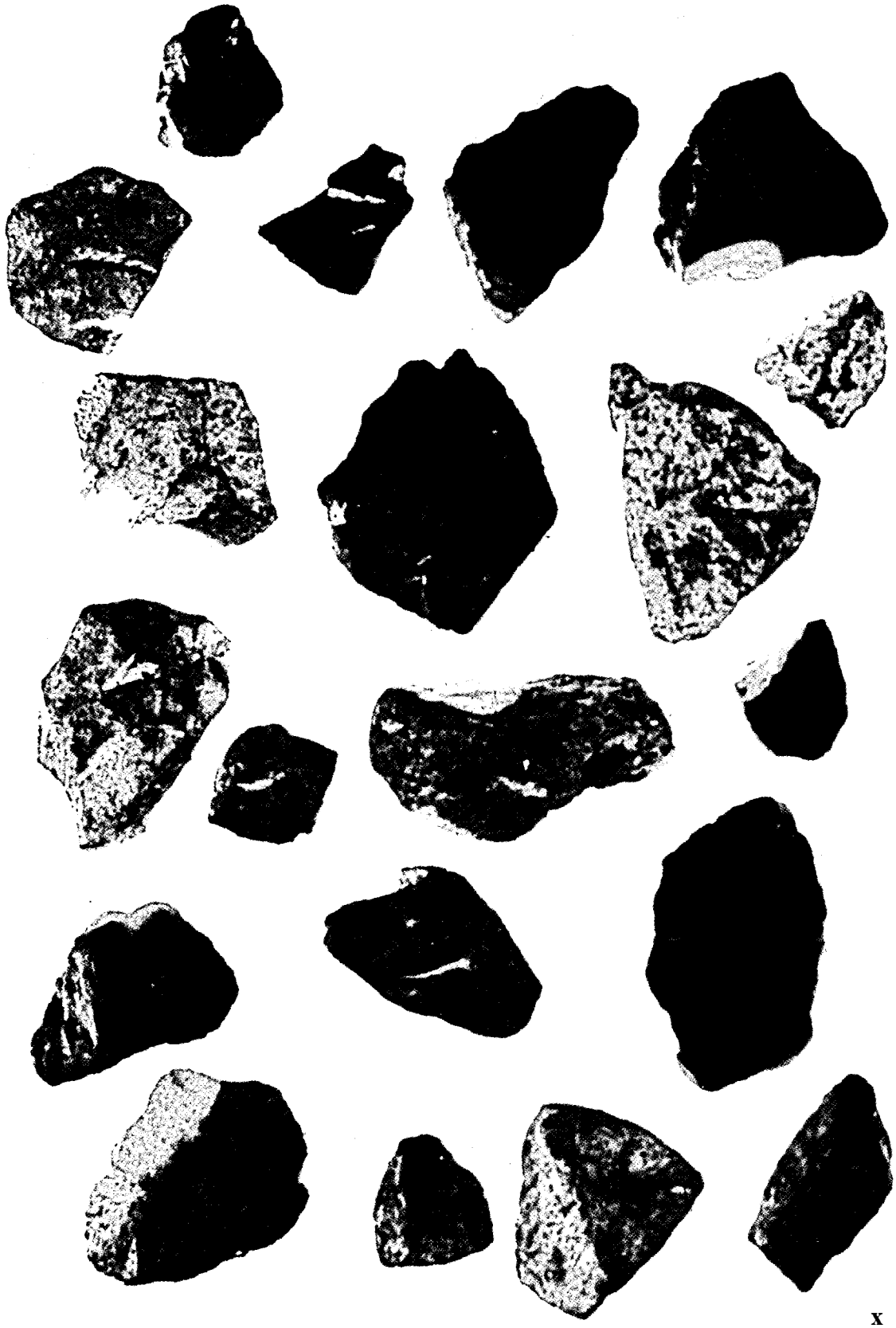



**Fig. 6.2 Cantera Dragón Camoa (Posición 1)**

## Tabla 6.4 Determinación de las características de formas $\phi$ y P

**Tipo agregado: Grava Cantera: Dragón Camoa Posición: 1**

| Grano No, | R | $r_1$ | $r_2$ | $r_3$ | $r_4$ | $r_5$ | $r_6$ | $r_7$ | $r_8$ | $r_9$ | $r_{10}$ | $\sum_i^1 ri$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $r_{11}$ | $r_{12}$ | $r_{13}$ | $r_{14}$ | $r_{15}$ | $r_{16}$ | $r_{17}$ | $r_{18}$ | $r_{19}$ | $r_{20}$ | | | | | | |
| 1 | 6,5 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | | 18,0 | 10 | 22 | 36 | 0,6111 | 0,3769 |
| 2 | 9,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | | | 21,0 | 9 | 22 | 28 | 0,7857 | 0,3704 |
| 3 | 12,5 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 37,5 | 19 | 31 | 40 | 0,7750 | 0,2105 |
| | | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | | | | | | | | |
| 4 | 8,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | | | | | 20,5 | 8 | 23 | 33 | 0,6969 | 0,4453 |
| 5 | 9,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 23,5 | 11 | 22 | 28 | 0,7857 | 0,3283 |
| 6 | 9,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,5 | | 22,5 | 10 | 20 | 24 | 0,8333 | 0,3500 |
| 7 | 8,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | | | 14,5 | 9 | 18 | 21 | 0,8571 | 0,3125 |
| 8 | 6,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 6,0 | | | | | | 11,0 | 6 | 15 | 19 | 0,7894 | 0,4487 |
| 9 | 6,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 6,5 | | | | | 18,5 | 7 | 18 | 24 | 0,7500 | 0,5494 |
| 10 | 12,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 47,0 | 19 | 33 | 46 | 0,7174 | 0,2588 |
| | | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 9,5 | | | | | | | | |
| 11 | 14,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 37,5 | 12 | 33 | 42 | 0,7857 | 0,2989 |
| | | 9,0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 6,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | | | 17,0 | 9 | 18 | 24 | 0,7500 | 0,4259 |
| 13 | 11,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 40,5 | 13 | 28 | 39 | 0,7179 | 0,3601 |
| | | 4,5 | 7,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 10,0 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 5,0 | 28,0 | 11 | 26 | 34 | 0,7647 | 0,3454 |
| 15 | 7,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | | | | 14,5 | 8 | 22 | 34 | 0,6470 | 0,3666 |
| 16 | 12,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 35,5 | 11 | 34 | 45 | 0,7555 | 0,3491 |
| 17 | 8,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,5 | | | | 20,5 | 8 | 18 | 21 | 0,8571 | 0,4453 |
| 18 | 12,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 5,5 | 6,5 | 10,0 | | 33,5 | 10 | 31 | 36 | 0,8611 | 0,3680 |
| 19 | 8,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | | 19,5 | 10 | 22 | 30 | 0,8636 | 0,3294 |
| 20 | 11,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 27,5 | 12 | 26 | 33 | 0,7879 | 0,2916 |
| | | 3,5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | 0,7696 | 0,3613 |



x

**Fig. 6.3 Cantera Dragón Camoa (Posición 2)**

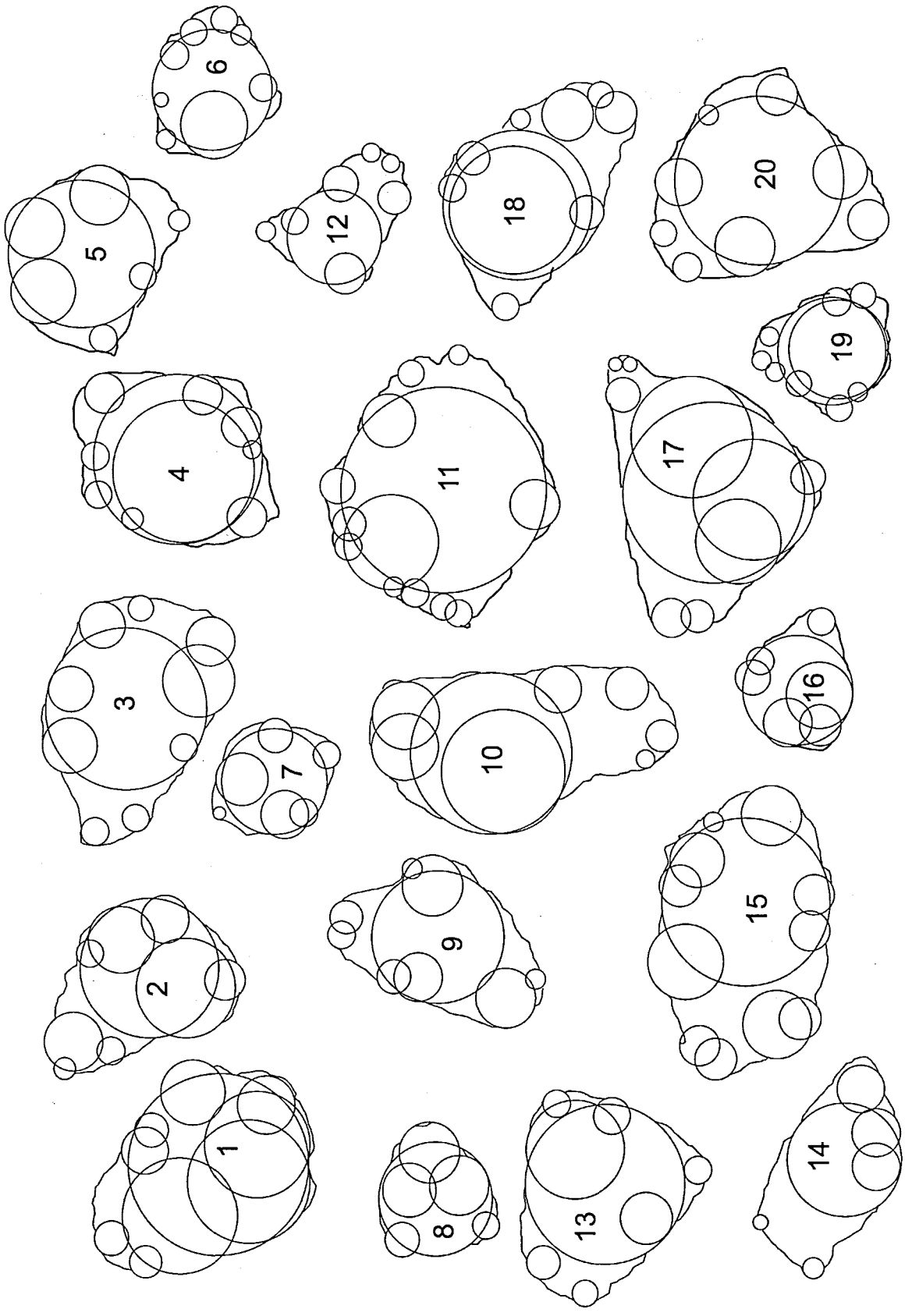



**Fig. 6.4 Cantera Dragón Camoa (Posición 2)**

**Tabla 6.5 Determinación de las características de formas $\phi$ y P**

**Tipo de agregado: Grava Cantera Dragón Camoa Posición: 2**

| Grano No, | R | $r_1$ / $r_{11}$ | $r_2$ / $r_{12}$ | $r_3$ / $r_{13}$ | $r_4$ / $r_{14}$ | $r_5$ / $r_{15}$ | $r_6$ / $r_{16}$ | $r_7$ / $r_{17}$ | $r_8$ / $r_{18}$ | $r_9$ / $r_{19}$ | $r_{10}$ / $r_{20}$ | $\sum_i^i r_i$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 13,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 | 5,5 | 8,5 | 8,5 | 9,0 | | 46,0 | 10 | 32 | 38 | 0,8421 | 0,4407 |
| 2 | 10,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 4,5 | 5,5 | 7,5 | | | 29,0 | 9 | 26 | 34 | 0,7647 | 0,4180 |
| 3 | 12,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 5,5 | | 28,0 | 10 | 31 | 40 | 0,7750 | 0,3333 |
| 4 | 12,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 10,5 | | 29,5 | 10 | 29 | 35 | 0,8286 | 0,3360 |
| 5 | 11,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 4,5 | 4,5 | 5,0 | | | | | 19,5 | 7 | 26 | 30 | 0,8666 | 0,3961 |
| 6 | 9,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 5,0 | | | 17,0 | 9 | 20 | 24 | 0,8333 | 0,3210 |
| 7 | 8,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | | | | | 15,0 | 7 | 18 | 22 | 0,8182 | 0,4107 |
| 8 | 8,5 | 2,0 | 2,5 | 4,0 | 4,5 | 4,5 | | | | | | 17,5 | 6 | 19 | 22 | 0,8636 | 0,5098 |
| 9 | 10,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 | 4,5 | | | 22,5 | 9 | 26 | 35 | 0,7428 | 0,3511 |
| 10 | 10,0 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 5,0 | 5,0 | 9,0 | | | | 29,5 | 8 | 33 | 41 | 0,8449 | 0,4323 |
| 11 | 15,5 | 1,5 / 4,0 | 1,5 / 7,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 32,5 | 13 | 35 | 43 | 0,8139 | 0,2382 |
| 12 | 7,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 3,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | | | | 14,5 | 8 | 19 | 25 | 0,7600 | 0,3839 |
| 13 | 12,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 4,0 | 7,5 | | | | 22,5 | 8 | 28 | 34 | 0,8235 | 0,3594 |
| 14 | 8,5 | 1,0 | 1,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | | | | | | 13,5 | 6 | 23 | 34 | 0,6764 | 0,4215 |
| 15 | 13,0 | 1,5 / 5,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | 3,5 | 38,5 | 12 | 34 | 45 | 0,7555 | 0,3301 |
| 16 | 8,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 2,5 | 5,0 | | | | | 38,5 | 12 | 34 | 45 | 0,7555 | 0,3301 |
| 17 | 13,5 | 1,0 | 1,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 6,5 | 9,0 | 9,0 | | 37,0 | 10 | 33 | 43 | 0,7676 | 0,3741 |
| 18 | 11,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 10,0 | | 29,5 | 10 | 29 | 40 | 0,7250 | 0,3682 |
| 19 | 8,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 7,5 | | 21,5 | 10 | 19 | 22 | 0,8636 | 0,3687 |
| 20 | 13,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | | | 23,5 | 9 | 31 | 36 | 0,8611 | 0,3120 |
| | | | | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | 0,8022 | 0,3780 |

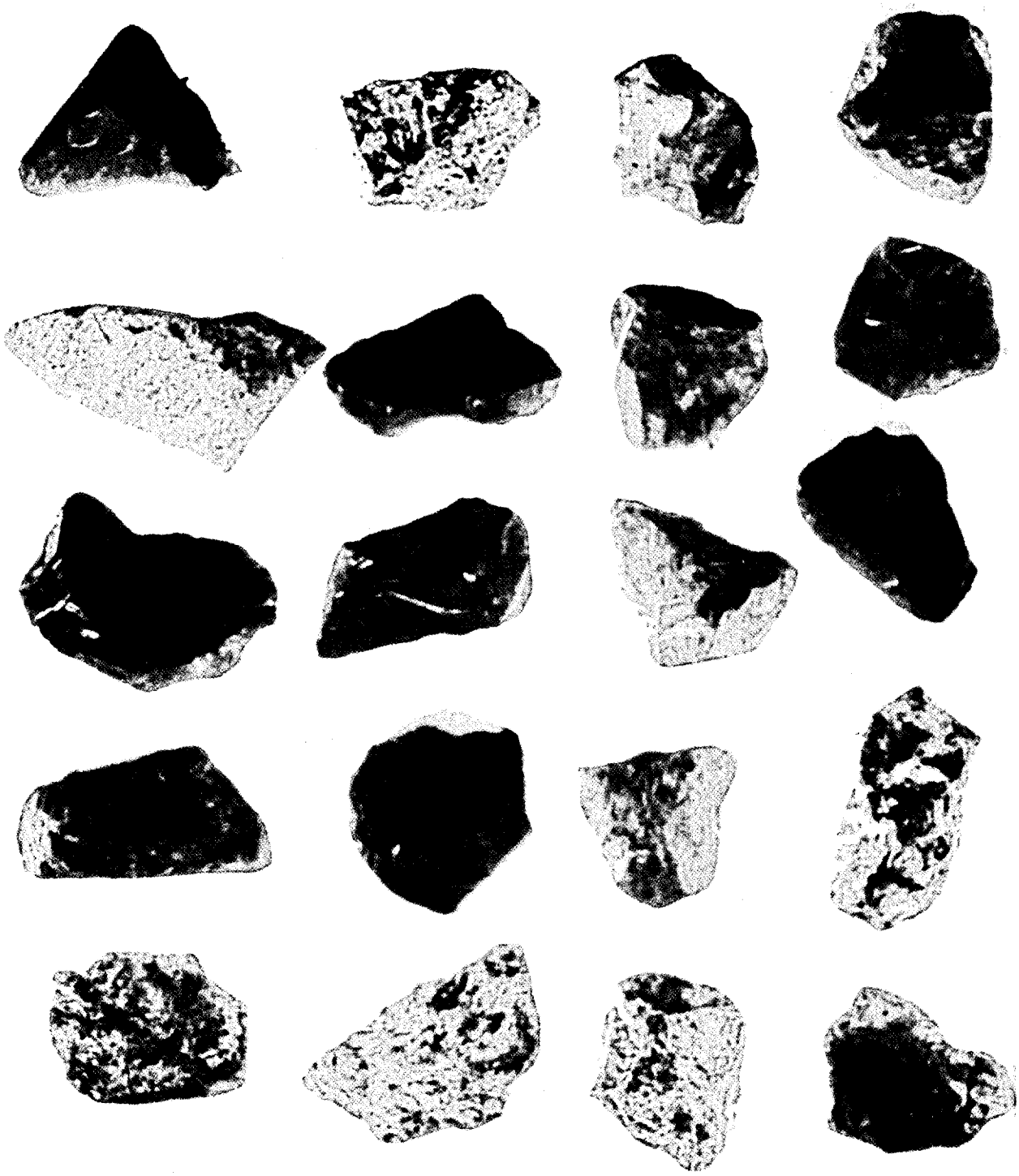


**Fig. 6.5 Dragón Camoa 38.1 (Posición 1)**

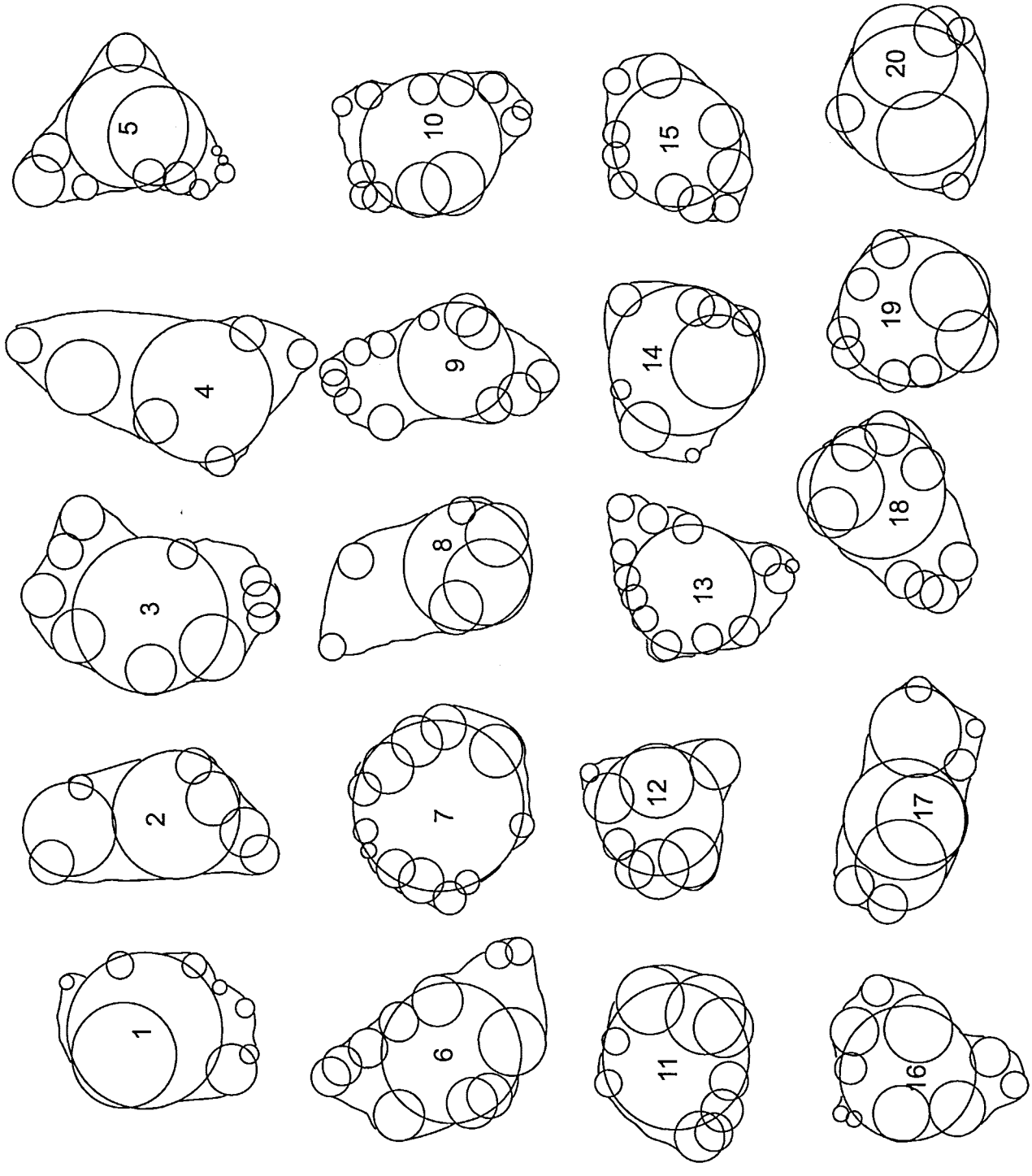



**Fig.6.6. Dragón Camoa 38.1 (Posición 1)**

## Tabla 6.6. Determinación de las características de formas $\phi$ y P

**Tipo de agregado: Grava 38.1 Cantera: Dragón Camoa Posición: 1**

| Grano No, | R | $r_1$ | $r_2$ | $r_3$ | $r_4$ | $r_5$ | $r_6$ | $r_7$ | $r_8$ | $r_9$ | $r_{10}$ | $\sum_i^i r_i$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $r_{11}$ | $r_{12}$ | $r_{13}$ | $r_{14}$ | $r_{15}$ | $r_{16}$ | $r_{17}$ | $r_{18}$ | $r_{19}$ | $r_{20}$ | | | | | | |
| 1 | 13,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 4,0 | 8,5 | | | 21,5 | 9 | 29 | 3 | 0,8055 | 0,3022 |
| 2 | 10,5 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 7,5 | | | | 21,5 | 8 | 30 | 42 | 0,7143 | 0,4524 |
| 3 | 12,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,5 | 34,5 | 11 | 34 | 42 | 0,8095 | 0,3418 |
| 4 | 11,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 6,0 | | | | | 20,5 | 7 | 34 | 52 | 0,6346 | 0,3975 |
| 5 | 10,0 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 29,0 | 12 | 29 | 36 | 0,8055 | 0,3250 |
| | | 8,0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 11,5 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 37,0 | 12 | 32 | 43 | 0,7442 | 0,3415 |
| | | 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 14,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 34,5 | 13 | 31 | 43 | 0,9117 | 0,2664 |
| | | 4,0 | 4,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 10,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,5 | 5,0 | 7,0 | | | | | 23,5 | 7 | 29 | 40 | 0,7250 | 0,4626 |
| 9 | 9,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 30,5 | 13 | 29 | 39 | 0,7436 | 0,3234 |
| | | 3,5 | 3,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 11,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 31,5 | 13 | 28 | 34 | 0,8235 | 0,3875 |
| | | 4,5 | 5,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 12,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 5,0 | 5,5 | 6,5 | | 34,5 | 10 | 29 | 34 | 0,8529 | 0,875 |
| 12 | 10,5 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | 5,0 | 6,5 | | | 31,0 | 9 | 26 | 31 | 0,8387 | 0,4391 |
| 13 | 10,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 28,0 | 14 | 28 | 34 | 0,8235 | 0,2619 |
| | | 2,5 | 2,5 | 2,5 | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 12,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,5 | 7,5 | | | 24,5 | 9 | 28 | 32 | 0,8750 | 0,3379 |
| 15 | 10,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 26,5 | 11 | 26 | 32 | 0,8125 | 0,3203 |
| 16 | 11,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | 4,5 | 5,5 | 31,5 | 11 | 28 | 34 | 0,8235 | 0,3512 |
| 17 | 10,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 3,0 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | | | 34,5 | 9 | 30 | 41 | 0,7317 | 0,4944 |
| 18 | 11,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,0 | 4,0 | 7,0 | | 33,5 | 10 | 29 | 35 | 0,8286 | 0,4045 |
| 19 | 12,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 5,0 | 6,5 | | | 27,0 | 9 | 27 | 30 | 0,9000 | 0,3611 |
| 20 | 12,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 8,0 | 8,5 | | | | | 27,5 | 7 | 30 | 34 | 0,8823 | 0,4702 |
| | | | | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | 0,8043 | 0,3669 |

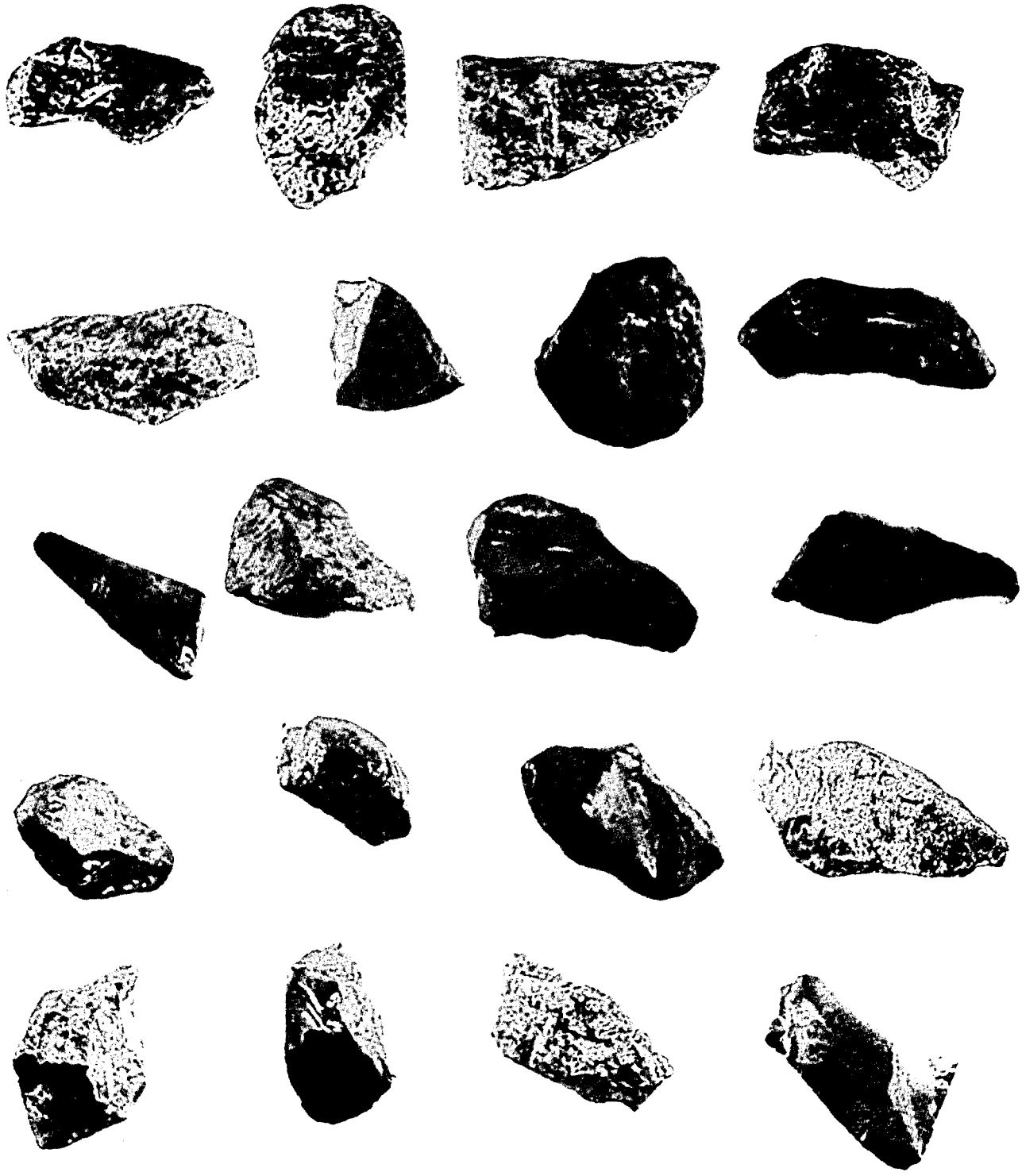


**Fig. 6.7 Dragón Camoa 38.1 (Posición 2)**

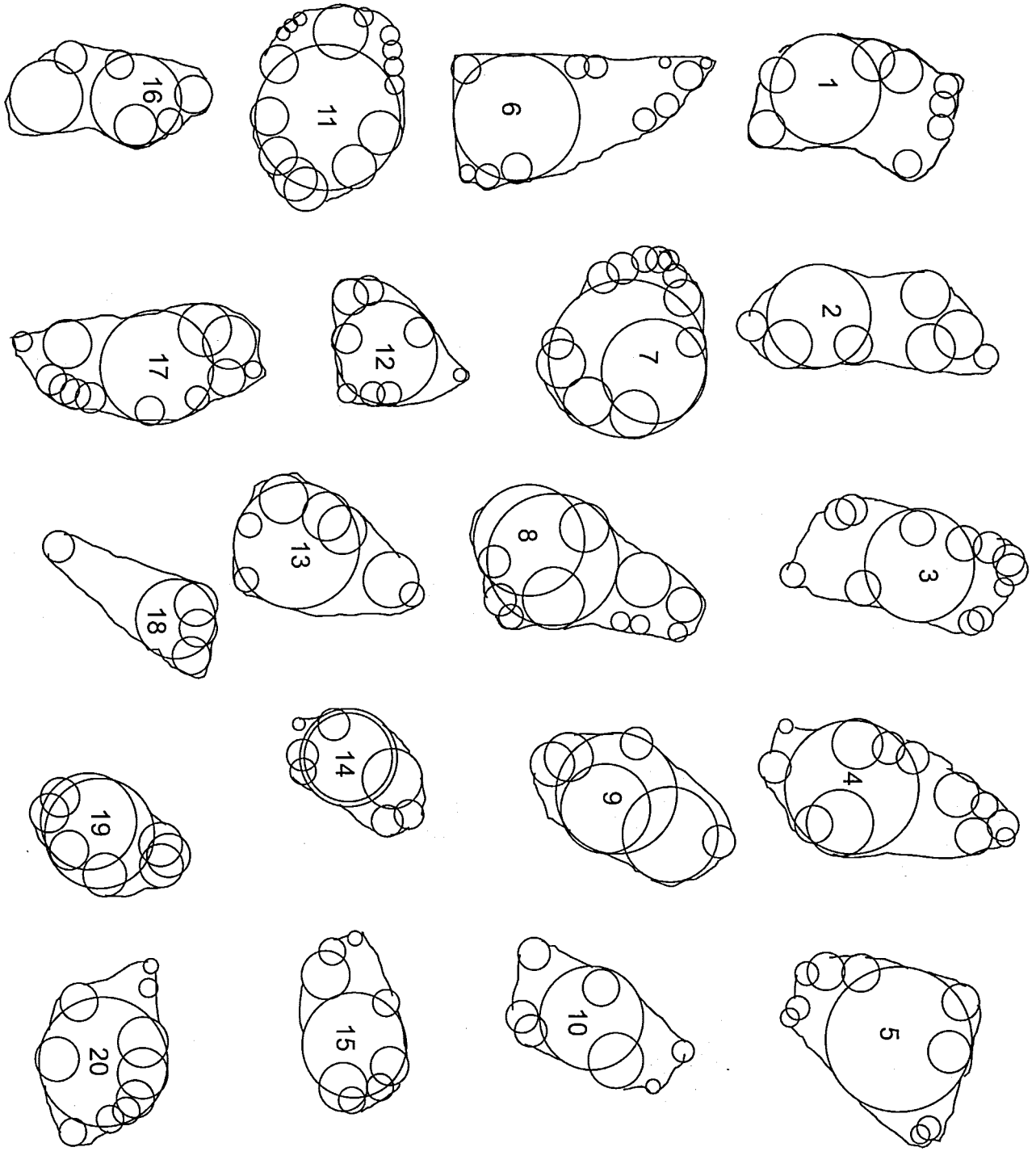



**Fig. 6.8 Dragón Camoa 38.1 (Posición 2)**

## Tabla 6.7 Determinación de las características de formas $\phi$ y P

**Tipo de agregado: Grava 38.1 Cantera: Dragón Camoa Posición: 2**

| Grano No, | R | $r_1$ / $r_{11}$ | $r_2$ / $r_{12}$ | $r_3$ / $r_{13}$ | $r_4$ / $r_{14}$ | $r_5$ / $r_{15}$ | $r_6$ / $r_{16}$ | $r_7$ / $r_{17}$ | $r_8$ / $r_{18}$ | $r_9$ / $r_{19}$ | $r_{10}$ / $r_{20}$ | $\sum_i^1 ri$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9.5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3.0 | 3.0 | 3,5 | 3,5 | 9,5 | | 31,0 | 10 | 28 | 36 | 0,7777 | 0,4263 |
| 2 | 8.5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 8.5 | | | 32,0 | 9 | 27 | 44 | 0,6136 | 0,5294 |
| 3 | 9.0 | 1.5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3.0 | 2,9 | 13 | 28 | 41 | 0,6829 | 0,3247 |
| | | 3.0 | 3.0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 11.0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3.0 | 3.5 | 33,5 | 13 | 30 | 44 | 0,6818 | 0,3112 |
| | | 4.0 | 5.5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 12.0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | | 21,5 | 10 | 30 | 37 | 0,8108 | 0,2791 |
| 6 | 10.5 | 1.0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 21,0 | 12 | 30 | 47 | 0,6383 | 0,2500 |
| | | 2.5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 13.0 | 1.5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 14 | 7 | 33 | 22 | 0,8788 | 0,2967 |
| | | 4,0 | 4,0 | 8,5 | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 11.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3.0 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 37,0 | 12 | 29 | 41 | 0,7073 | 0,3636 |
| | | 9.0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 10,0 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 7,5 | 8,0 | | | | | 28,0 | 7 | 27 | 37 | 0,7297 | 0,5428 |
| 10 | 8.5 | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,5 | | | | 17,5 | 8 | 24 | 34 | 0,7059 | 0,3823 |
| 11 | 12.0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 3,0 | 3,0 | 38,0 | 17 | 30 | 35 | 0,8571 | 0,2451 |
| | | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,5 | | | | | | | | | | |
| 12 | 8.5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | | | 17,0 | 9 | 21 | 27 | 0,7777 | 0,3333 |
| 13 | 10.5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | | | | 22,5 | 8 | 26 | 34 | 0,7647 | 0,3928 |
| 14 | 8,5 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 5,0 | 7,5 | | | 25,5 | 9 | 21 | 27 | 0,7777 | 0,4236 |
| 15 | 8.5 | 1,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | 3,5 | 20,5 | 9 | 23 | 31 | 0,7419 | 0,3791 |
| 16 | 7.5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 6,0 | | | | | 18,5 | 7 | 24 | 34 | 0,7059 | 0,4952 |
| 17 | 9.5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 33,5 | 13 | 27 | 42 | 0,6428 | 0,3482 |
| | | 4,5 | 4,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 6.5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | | | | | | | 12,0 | 5 | 35 | 40 | 0,6000 | 0,5692 |
| 19 | 9.0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 8,5 | | | 31,5 | 9 | 22 | 28 | 0,7857 | 0,5000 |
| 20 | 10.5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 26,0 | 11 | 25 | 34 | 0,7353 | 0,3160 |
| | | | | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | 0,7308 | 0,3859 |

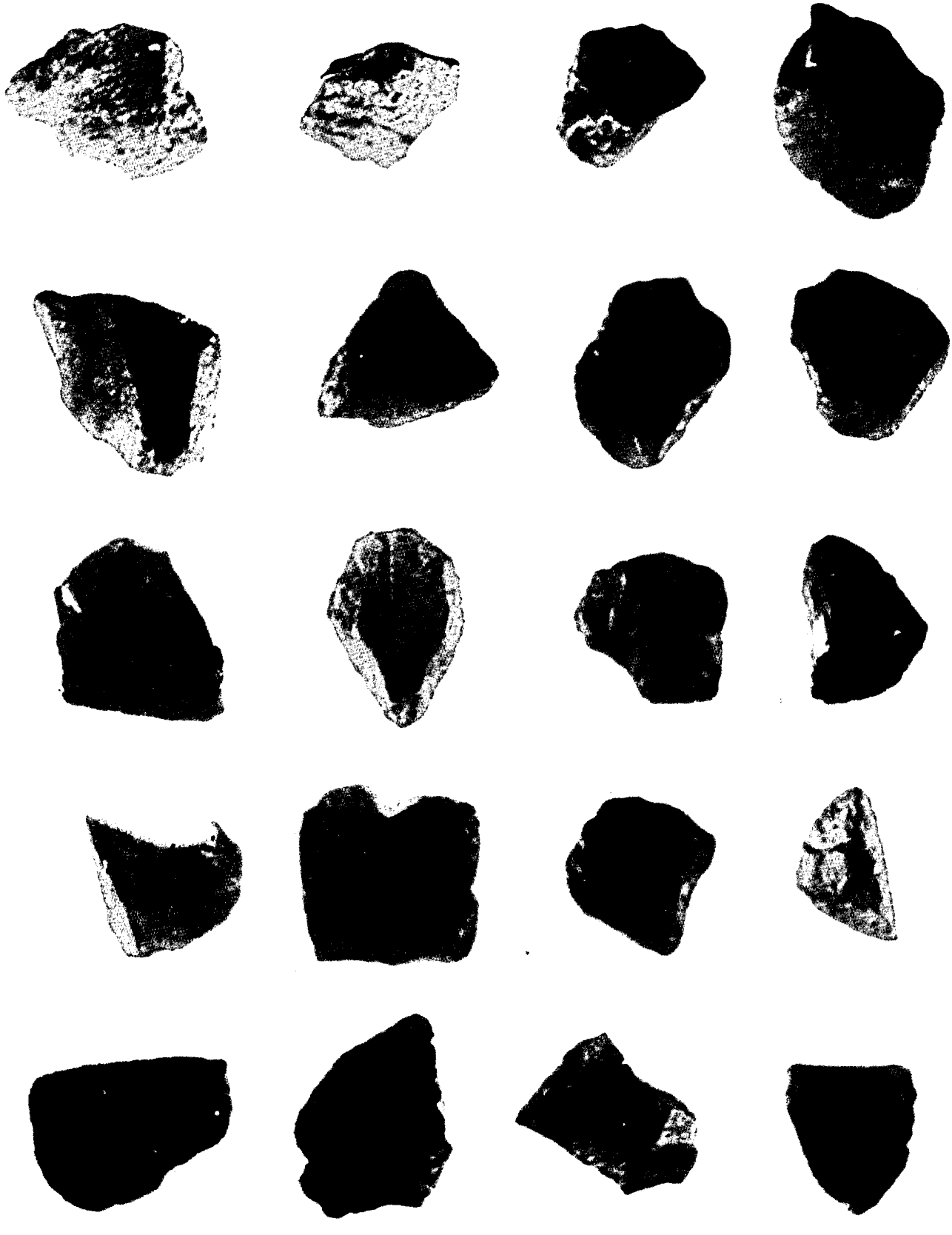


**Fig. 6.9 Dragón Camoa 25.4 (Posición 1)**

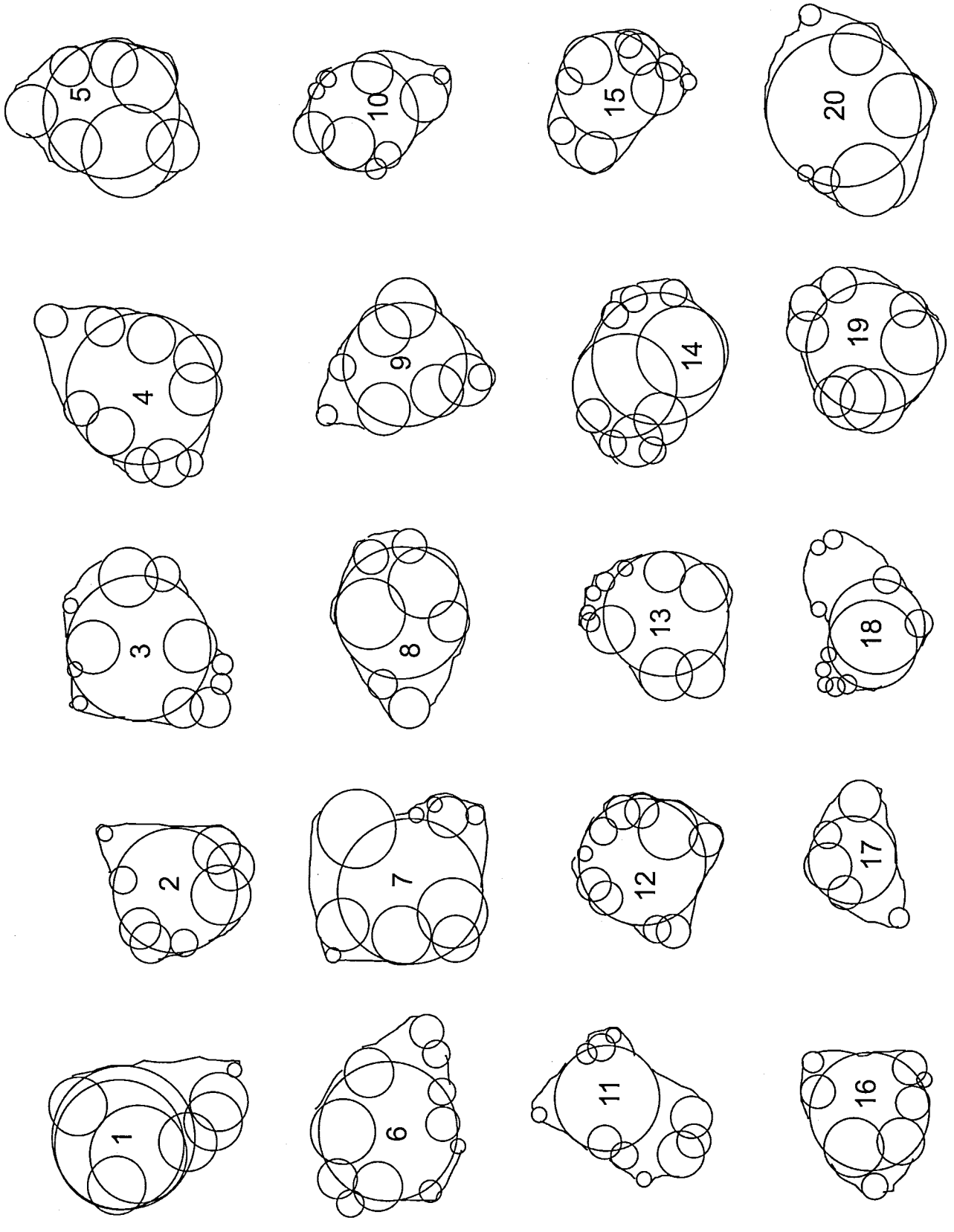



**Fig. 6.10 Dragón Camoa 25.4 (Posición 1)**

## Tabla 6.8 Determinación de las características de formas $\phi$ y P

**Tipo agregado: Grava 25.4 Cantera: Dragón Camoa Posición: 1**

| Grano No, | R | $r_1$ / $r_{11}$ | $r_2$ / $r_{12}$ | $r_3$ / $r_{13}$ | $r_4$ / $r_{14}$ | $r_5$ / $r_{15}$ | $r_6$ / $r_{16}$ | $r_7$ / $r_{17}$ | $r_8$ / $r_{18}$ | $r_9$ / $r_{19}$ | $r_{10}$ / $r_{20}$ | $\sum_i^1 ri$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 11,0 | 1,0 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 2,0 | 7,5 | 10,0 | | | 41,0 | 9 | 27 | 33 | 0,8182 | 0,5252 |
| 2 | 9,5 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 4,5 | | | 22,5 | 9 | 22 | 27 | 0,8148 | 0,3742 |
| 3 | 11,0 | 1,0 / 4,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 27,0 | 12 | 27 | 32 | 0,8437 | 0,2879 |
| 4 | 11,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 30,5 | 11 | 27 | 35 | 0,7714 | 0,3320 |
| 5 | 10,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | 7,0 | | | | 30,5 | 8 | 26 | 31 | 0,8387 | 0,4881 |
| 6 | 10,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 5,0 | 26,0 | 11 | 26 | 34 | 0,7647 | 0,3160 |
| 7 | 11,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,5 | 6,0 | 31,0 | 11 | 29 | 33 | 0,8788 | 0,3471 |
| 8 | 10,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 5,5 | 5,5 | | | | 24,0 | 8 | 34 | 30 | 0,8000 | 0,4250 |
| 9 | 9,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | | | 26,0 | 9 | 23 | 30 | 0,7666 | 0,4152 |
| 10 | 8,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | | 20,0 | 10 | 20 | 26 | 0,7692 | 0,3353 |
| 11 | 8,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 20,0 | 11 | 23 | 26 | 0,8292 | 0,3182 |
| 12 | 9,5 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 4,5 | 24,5 | 11 | 21 | 25 | 0,8400 | 0,3253 |
| 13 | 9,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 23,5 | 11 | 22 | 26 | 0,8461 | 0,3158 |
| 14 | 10,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 4,0 | 4,0 | 7,0 | 8,0 | 35,5 | 11 | 25 | 30 | 0,8333 | 0,4136 |
| 15 | 8,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | | 22,5 | 10 | 20 | 24 | 0,8333 | 0,3812 |
| 16 | 9,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 | | | 20,0 | 9 | 21 | 26 | 0,8077 | 0,3580 |
| 17 | 6,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | | | | | | 12,5 | 6 | 24 | 41 | 0,7500 | 0,4872 |
| 18 | 7,0 | 1,0 / 6,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 20,0 | 12 | 21 | 26 | 0,8077 | 0,3214 |
| 19 | 10,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | | | 28,5 | 9 | 24 | 27 | 0,8888 | 0,4278 |
| 20 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 4,0 | 5,0 | 5,5 | 11,5 | | | | 30,5 | 8 | 28 | 34 | 0,8235 | 0,4565 |
| | | | | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | 0,8235 | 0,4565 |

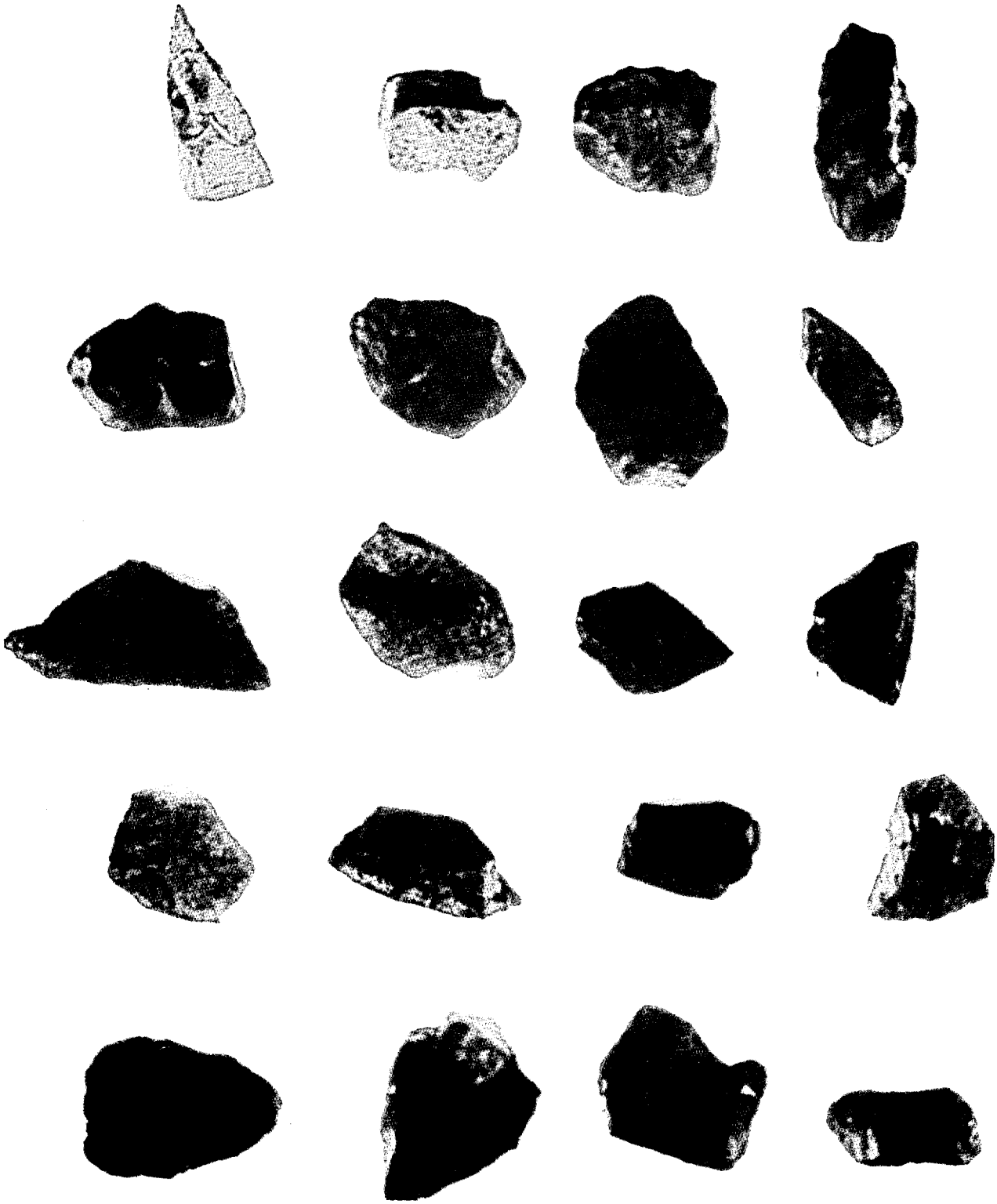


**Fig. 6.11 Dragón Camoa 25.4 (Posición 2)**

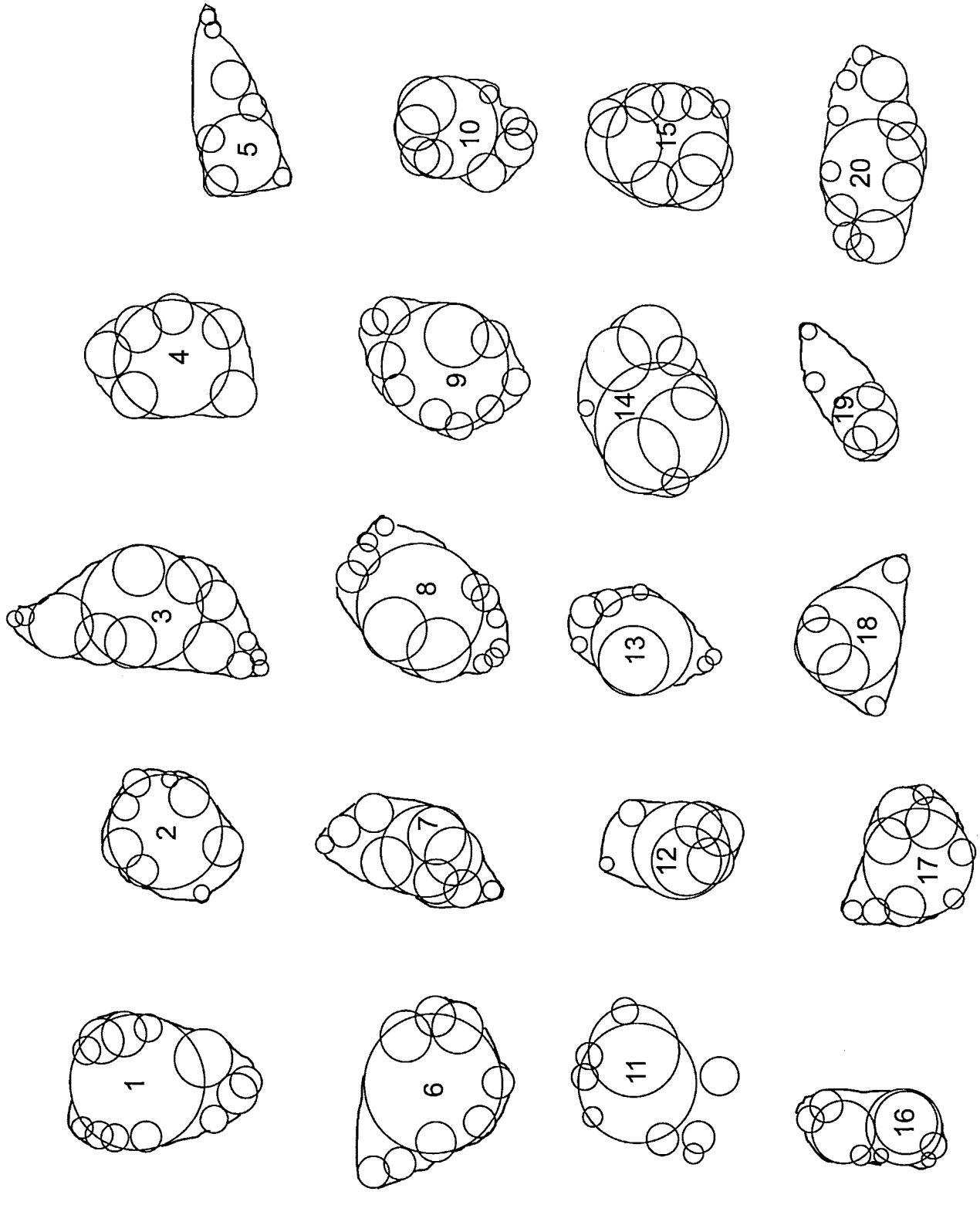



**Fig. 6.12 Dragón Camoa 25.4 (Posición 2)**

## Tabla 6.9 Determinación de las características de formas $\phi$ y P

**Tipo agregado: Grava 25.4 Cantera: Dragón Camoa Posición: 2**

| Grano No, | R | $r_1$ / $r_{11}$ | $r_2$ / $r_{12}$ | $r_3$ / $r_{13}$ | $r_4$ / $r_{14}$ | $r_5$ / $r_{15}$ | $r_6$ / $r_{16}$ | $r_7$ / $r_{17}$ | $r_8$ / $r_{18}$ | $r_9$ / $r_{19}$ | $r_{10}$ / $r_{20}$ | $\sum_i^1 ri$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 10,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 31,0 | 13 | 26 | 32 | 0,8125 | 0,3004 |
| | | 3,5 | 4,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 9,0 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | | | 17,5 | 9 | 21 | 24 | 0,8750 | 0,3271 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 9,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 35,5 | 14 | 27 | 42 | 0,6428 | 0,3383 |
| | | 4,0 | 4,0 | 5,0 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 9,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | | | | | 20,0 | 7 | 23 | 28 | 0,8214 | 0,4603 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 6,0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | | | 13,5 | 9 | 20 | 32 | 0,6250 | 0,3611 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 11,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | | | 24,0 | 9 | 26 | 34 | 0,7647 | 0,3535 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 7,0 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 4,5 | | 28,0 | 10 | 21 | 31 | 0,6774 | 0,5000 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 10,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 28,0 | 13 | 25 | 31 | 0,8064 | 0,2923 |
| | | 5,0 | 5,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 10,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 27,0 | 11 | 24 | 29 | 0,8276 | 0,3363 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 8,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,5 | | 26,0 | 10 | 20 | 23 | 0,8695 | 0,4250 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 9,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 7,0 | | 24,0 | 10 | 25 | 29 | 0,8620 | 0,3526 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 7,5 | 1,0 | 2,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 5,5 | | | | | 19,0 | 7 | 19 | 23 | 0,8261 | 0,5047 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 8,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 5,5 | | | | 14,0 | 8 | 19 | 25 | 0,7600 | 0,3437 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 10,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 3,5 | 5,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | | | 32,5 | 9 | 26 | 31 | 0,8387 | 0,4550 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 9,5 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 6,0 | | 31,0 | 10 | 23 | 25 | 0,9200 | 0,4263 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 6,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 5,0 | 5,0 | | | 20,0 | 9 | 18 | 24 | 0,7500 | 0,4815 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 8,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 5,5 | 4,0 | 4,0 | | 23,0 | 10 | 21 | 25 | 0,8400 | 0,3706 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 8,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 4,0 | 4,5 | | | | | | 14,0 | 6 | 20 | 26 | 0,7692 | 0,4583 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 5,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | | | | | | 10,5 | 6 | 16 | 24 | 0,6666 | 0,5166 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 8,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 29,0 | 13 | 24 | 34 | 0,7059 | 0,3557 |
| | | 3,5 | 4,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | | | | 0,7830 | 0,3981 |

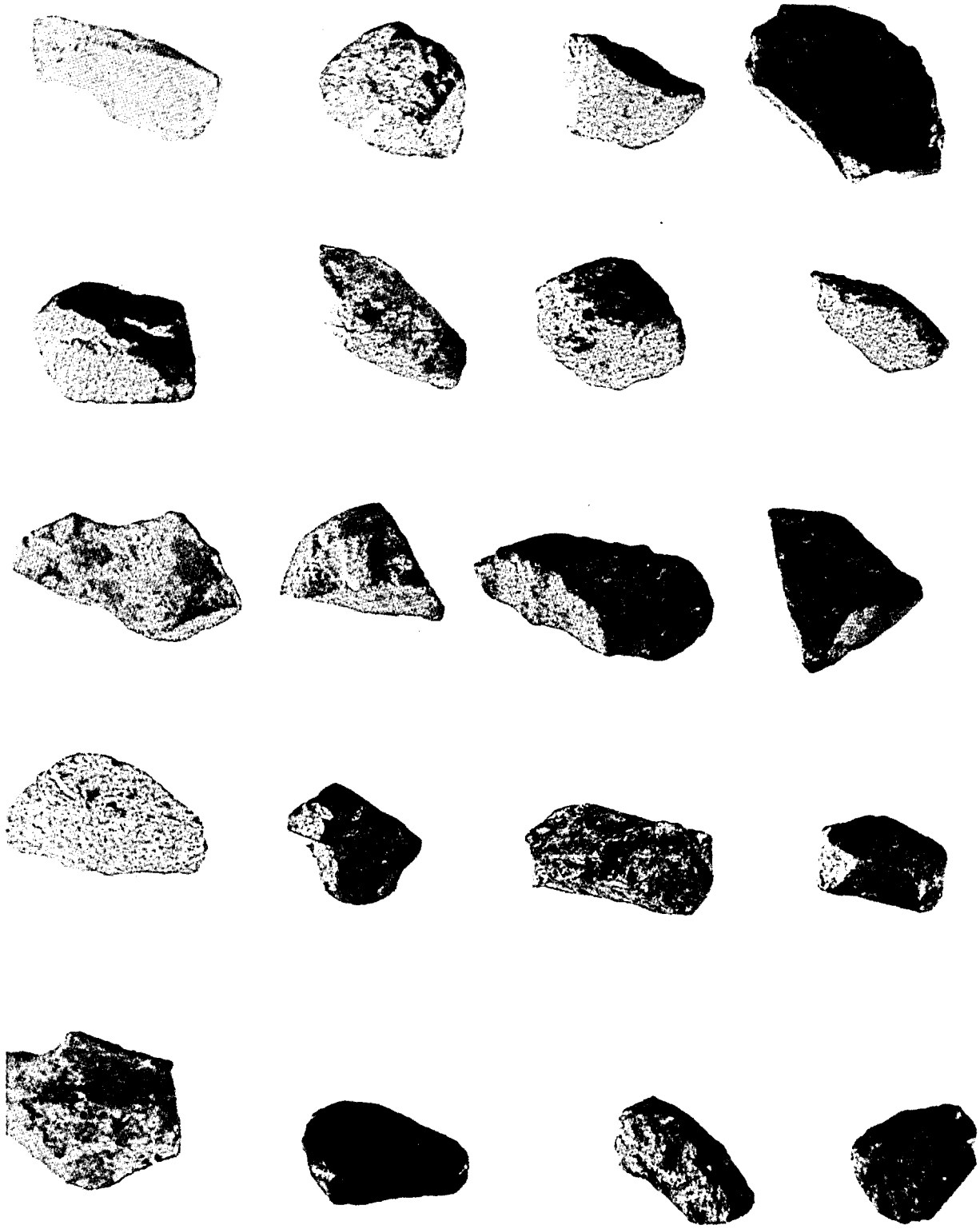


**Fig. 6.13 Dragón Camoa 19.1 (Posición 1)**

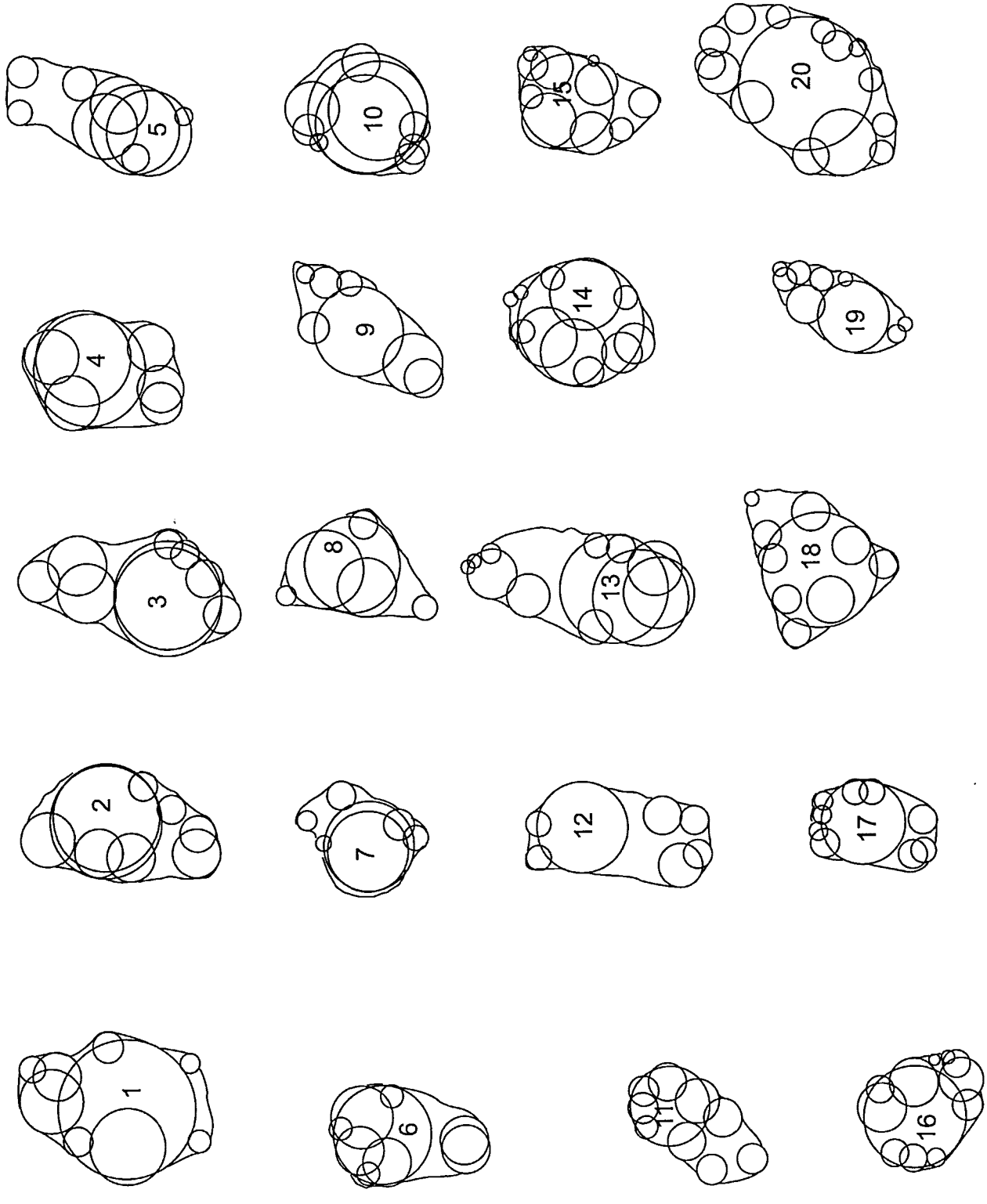



**Fig. 6.14 Dragón Camoa 19.1 (Posición 1)**

## Tabla 6.10 Determinación de las características de formas $\phi$ y P

**Tipo agregado: Grava 19.1 Cantera: Dragón Camoa Posición: 1**

| Grano No, | R | $r_1$ | $r_2$ | $r_3$ | $r_4$ | $r_5$ | $r_6$ | $r_7$ | $r_8$ | $r_9$ | $r_{10}$ | $\sum_i^i r_i$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $r_{11}$ | $r_{12}$ | $r_{13}$ | $r_{14}$ | $r_{15}$ | $r_{16}$ | $r_{17}$ | $r_{18}$ | $r_{19}$ | $r_{20}$ | | | | | | |
| 1 | 11,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 4,0 | 3,5 | 6,5 | | | 24,5 | 9 | 28 | 35 | 0,8000 | 0,3478 |
| 2 | 9,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 3,0 | 4,0 | 4,5 | 9,0 | | 36,0 | 10 | 27 | 39 | 0,7353 | 0,4789 |
| 3 | 9,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 5,0 | 5,0 | 9,0 | | | 33,5 | 9 | 24 | 29 | 0,6923 | 0,5029 |
| 4 | 9,5 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | 4,5 | 8,0 | | | | | 28,5 | 7 | 24 | 29 | 0,8276 | 0,35714 |
| 5 | 7,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 5,0 | 5,5 | 7,0 | | | 29,0 | 9 | 23 | 33 | 0,6969 | 0,5407 |
| 6 | 8,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | | | 27,0 | 9 | 21 | 28 | 0,7500 | 0,4640 |
| 7 | 7,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 7,0 | | | | | 16,5 | 7 | 19 | 23 | 0,8261 | 0,4571 |
| 8 | 8,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 5,0 | 6,5 | | | | | | 17,5 | 6 | 21 | 28 | 0,7500 | 0,5312 |
| 9 | 7,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 5,5 | 7,5 | | | | 24,5 | 8 | 22 | 32 | 0,6875 | 0,5333 |
| 10 | 10,0 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 4,5 | 8,5 | 8,5 | | 36,0 | 10 | 23 | 26 | 0,8846 | 0,4600 |
| 11 | 6,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | | 24,5 | 10 | 20 | 27 | 0,7407 | 0,4769 |
| 12 | 7,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 7,5 | | | | 23,0 | 8 | 24 | 32 | 0,7500 | 0,5083 |
| 13 | 9,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,5 | 6,0 | 37,5 | 12 | 27 | 40 | 0,6750 | 0,4305 |
| 14 | 10,5 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 5,0 | 5,5 | 34,5 | 12 | 23 | .27 | 0,8518 | 0,3571 |
| | | 6,0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 8,0 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,5 | 25,5 | 11 | 20 | 25 | 0,8000 | 0,3807 |
| 16 | 9,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 25,5 | 12 | 20 | 22 | 0,9090 | 0,3333 |
| 17 | 7,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | | 10,0 | 10 | 18 | 22 | 0,8182 | 0,3571 |
| 18 | 7,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,5 | | 23,5 | 10 | 24 | 31 | 0,7742 | 0,3473 |
| 19 | 10,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | | | 10 | 9 | 18 | 26 | 0,6923 | 0,4000 |
| 20 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 37,5 | 15 | 30 | 39 | 0,7692 | 0,2939 |
| | | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | | | | 0,7715 | 0,4386 |

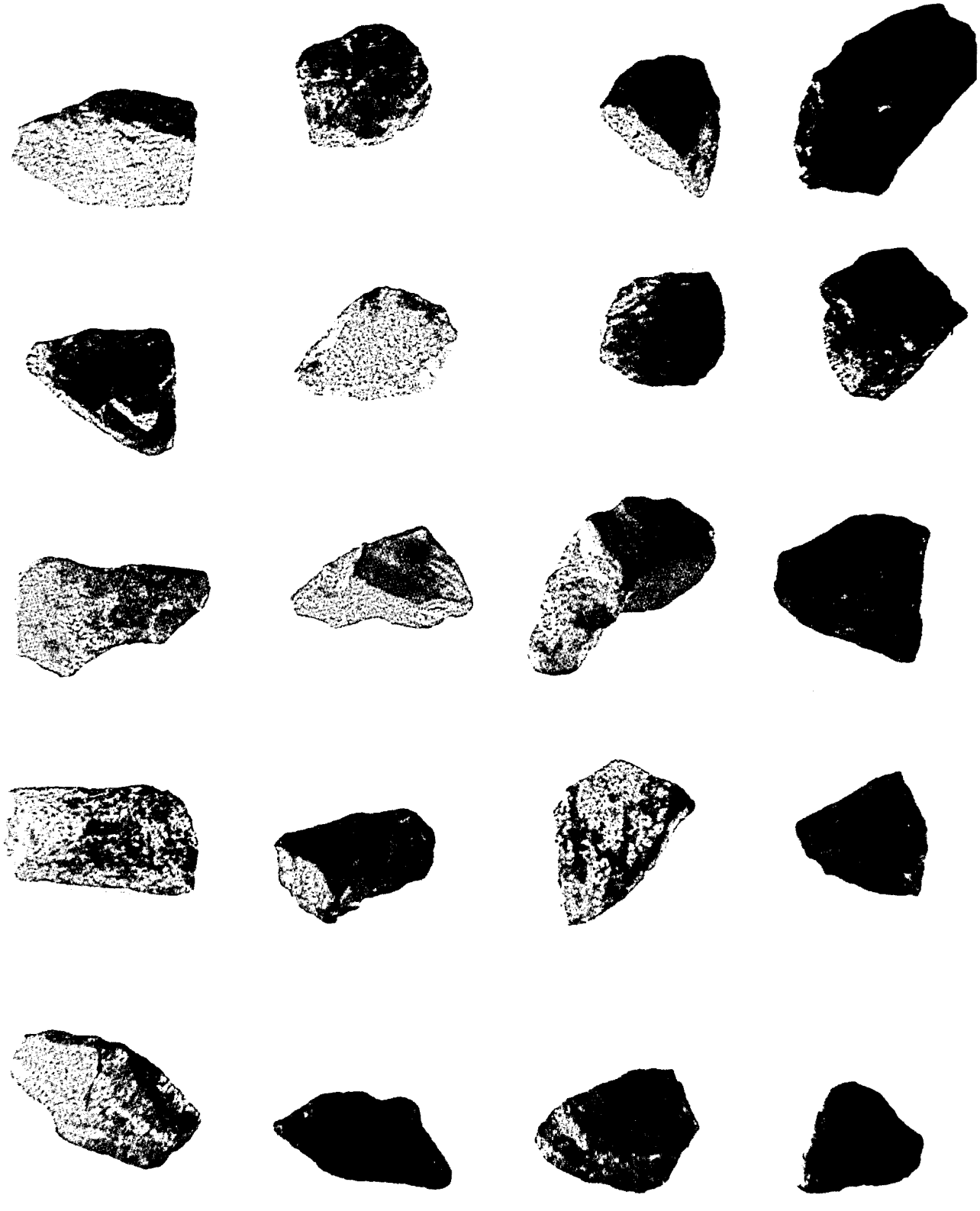


**Fig. 6.15 Dragón Camoa 19.1 (Posición 2)**

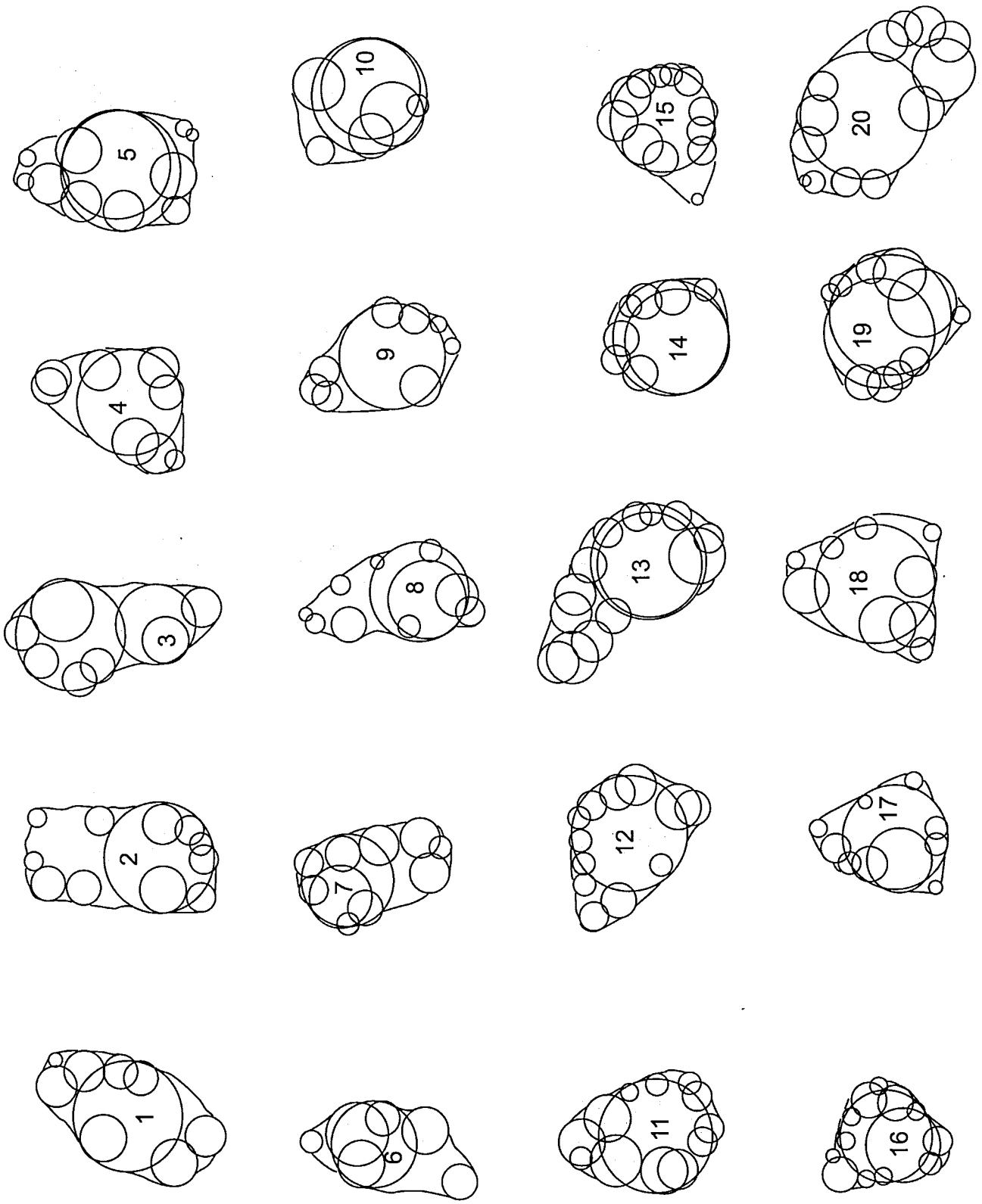



**Fig. 6.16 Dragón Camoa 19.1 (Posición 2)**

## Tabla 6.11 Determinación de las características de formas $\phi$ y P

**Tipo agregado: Grava 19.1 Cantera: Dragón Camoa Posición: 2**

| Grano No, | R | $r_1$ / $r_{11}$ | $r_2$ / $r_{12}$ | $r_3$ / $r_{13}$ | $r_4$ / $r_{14}$ | $r_5$ / $r_{15}$ | $r_6$ / $r_{16}$ | $r_7$ / $r_{17}$ | $r_8$ / $r_{18}$ | $r_9$ / $r_{19}$ | $r_{10}$ / $r_{20}$ | $\sum_i^i ri$ | n+1 | de | De | $\phi$ | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 9,5 | 1,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | | | 25,5 | 9 | 26 | 35 | 0,7428 | 0,4093 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 9,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 28,5 | 12 | 27 | 36 | 0,7500 | 0,3333 |
| | | 4,0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 9,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 5.5 | 7,0 | | | 32,0 | 9 | 39 | 42 | 0,6666 | 0,4854 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 9,0 | 1,5 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | | | 25,0 | 9 | 23 | 31 | 0,7419 | 0,4197 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 10,5 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 36,0 | 12 | 26 | 34 | 0,7647 | 0,3690 |
| | | 9,5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 7,5 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 5,5 | | | | | 21,5 | 7 | 22 | 33 | 0,6666 | 0,5524 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 8,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 5,5 | 31,0 | 11 | 22 | 28 | 0,7857 | 0,4432 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 8,5 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 7,5 | 25,5 | 11 | 22 | 32 | 0,6875 | 0,3636 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 9,5 | 1,5 | 1,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | | | 19,0 | 9 | 23 | 30 | 0,7666 | 0,3333 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 10,0 | 2,0 | 2,5 | 4,0 | 4,5 | 5,5 | 8,5 | | | | | 27,0 | 7 | 22 | 25 | 0,8800 | 0,5286 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 10,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 35,0 | 13 | 23 | 29 | 0,7931 | 0,3461 |
| | | 4,0 | 4,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 10,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 31,5 | 25 | 19 | 32 | 0,7812 | 0,3192 |
| | | 3,5 | 4,0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 10,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 50,5 | 15 | 28 | 41 | 0,6829 | 0,4033 |
| | | 3,5 | 4,5 | 5,0 | 9,0 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 10,0 | 3,5 | 3,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 9,0 | | | 27,5 | 9 | 22 | 25 | 0,8800 | 0,4166 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 9,0 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 31,5 | 13 | 21 | 26 | 0,8077 | 0,3461 |
| | | 3,5 | 3,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 8,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 30,0 | 14 | 20 | 24 | 0,8333 | 0,3393 |
| | | 3,0 | 3,0 | 6,5 | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 9,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 5,5 | 22,0 | 11 | 21 | 27 | 0,7777 | 0,3131 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 10,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | | 25,5 | 10 | 26 | 31 | 0,8387 | 0,3428 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 10,5 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 4,5 | 6,0 | 38,5 | 12 | 25 | 28 | 0,8928 | 0,3889 |
| | | 9,5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 11,0 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 40,0 | 14 | 31 | 40 | 0,7750 | 0,3311 |
| | | 3,5 | 4,0 | 5,5 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | VALORES PROMEDIOS | 0,7758 | 0,3892 |

En la Tabla 6.12 se relacionan los valores de la característica A de los agregados de la cantera Dragón Camoa, realizada por los procedimientos siguientes:

a) Utilizando 20 granos con cantidades proporcionales de cada fracción que componía el mismo agregado.

b) Determinando los valores de $\phi$ y P de 20 granos de cada fracción que componía el mismo agregado.

El valor de A medido por el primer procedimiento, es igual a 0,5155, mientras que por el segundo, es de 0,5166. La diferencia entre ambos procedimientos es de 0,0011, lo que equivale a 0.2 %. Esto resulta despreciable, por tanto, se puede establecer como procedimiento la selección de 20 granos de un agregado, en el cual se represente, proporcionalmente, cada fracción.

**Tabla 6.12**

| Método | Factor $\phi$ en dos planos | Factores $\phi$ promedio | Factor P en dos planos | Factor P promedio | Coeficiente A |
|---|---|---|---|---|---|
| a | 0,77 / 0,80 | 0,7850 | 0,36 / 0,38 | 0,3700 | 0,5155 |
| Fracción 38,1 | 0,80 / 0,73 | 0,7650 | 0,36 / 0,39 | 0,3750 | 0,5140 |
| Fracción 25,4 | 0,81 / 0,78 | 0,7950 | 0,38 / 0,40 | 0,3900 | 0,5185 |
| Fracción 19,1 | 0,77 / 0,77 | 0,7700 | 0,42 / 0,39 | 0,4050 | 0,5175 |

En la Tabla 6.14 se ofrece el resumen de los valores de la característica A de los agregados de las seis canteras seleccionadas, realizados por los dos procedimientos. $A_1$ es

la característica de cada agregado, determinada por ensayos en el laboratorio. Después de un minucioso proceso matemático, logramos hallar el coeficiente A en dependencia de los factores $\phi$ (esfericidad) y P (redondez), y que se expresa de la forma siguiente:

$$A = \frac{(P + \phi) + 4}{10} \qquad (6.9)$$

**Tabla 6.13**

| Agregados | Factor $\phi$ en dos planos | Factores $\phi$ promedio | Factor P en dos planos | Factor P promedio | Coeficiente $A_2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Dragón Camoa | 0,77 / 0,80 | 0,79 | 0,36 / 0,38 | 0,37 | 0,5155 |
| Somorrostro | 0,74 / 0,80 | 0,76 | 0,41 / 0,40 | 0,41 | 0,5098 |
| La Moderna | 0,73 / 0,71 | 0,72 | 0,36 / 0,35 | 0,36 | 0,5020 |
| Camoa I | 0,70 / 0,63 | 0,67 | 0,31 / 0,34 | 0,33 | 0,4941 |
| H. Cubano | 0,72 / 0,69 | 0,71 | 0,29 / 0,31 | 0,30 | 0,4891 |
| Jamaica | 0,64 / 0,72 | 0,68 | 0,30 / 0,24 | 0,27 | 0,4914 |

Por medio de esta ecuación pudimos calcular la característica $A_2$ de los agregados investigados y sus resultados fueron los siguientes:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Dragón Camoa: | $\phi = 0.79$; | $P = 0,37$; | $A_2 = 0,5155$ |
| Somorrostro: | $\phi = 0,76$; | $P = 0,41$; | $A_2 = 0,5098$ |
| La Moderna: | $\phi = 0,72$; | $P = 0,36$; | $A_2 = 0,5020$ |
| Camoa I: | $\phi = 0,67$; | $P = 0,33$; | $A_2 = 0,4941$ |
| Concreto Cubano: | $\phi = 0,71$; | $P = 0,30$; | $A_2 = 0,4891$ |
| Jamaica: | $\phi = 0,68$; | $P = 0,27$; | $A_2 = 0,4914$ |

Comparando los valores $A_1$, determinados por ensayos de laboratorio, y los valores $A_2$, determinados por medio de los factores P y $\phi$, hallamos sus diferencias y el porcentaje de error entre ambos, los cuales se expresan en la Tabla 6.14.

**Tabla 6.14**

| Agregados | $A_1$ | $A_2$ | $\Delta A$ | Porcentaje de error |
|---|---|---|---|---|
| Dragón Camoa | 0,5124 | 0,5155 | - 0,0031 | - 0,6049 |
| Somorrostro | 0,5097 | 0,5098 | - 0,0001 | - 0,0199 |
| La Moderna | 0,5008 | 0,5020 | - 0,0012 | - 0,2391 |
| Camoa I | 0,4928 | 0,4941 | - 0,0013 | - 0,2631 |
| H. Cubano | 0,4938 | 0,4891 | + 0,0047 | + 0,9610* |
| Jamaica | 0,4878 | 0,4914 | - 0,0036 | - 0,7326* |

**Estos errores son los mayores.*

### 6.5.1 Cálculos de control con el agregado de Somorrostro

De los ensayos anteriores obtuvimos los datos siguientes:

Para un concreto de 41.0 MPa, con una plasticidad medida en el cono de Abrams de 8.0 cm, se utilizó un cemento con una resistencia de 39,3 MPa y 214 L de agua. Los agregados tenían una característica $A_2 = 0{,}5098$. A partir de la ecuación simplificada para el cálculo de la cantidad de cemento, podemos obtener con los datos dados dicha cantidad:

$$V = \frac{\dfrac{R_h}{R_c \cdot A_1} - M_2}{M_1} \qquad (6.10)$$

Sustituyendo:

$$V = \frac{\dfrac{41{,}0}{39{,}3 \cdot 0{,}5098} - 0{,}3375}{4{,}1427} = 0{,}4125$$

los valores $M_1$ y $M_2$ se obtienen de la Tabla 5.1 y con V = 0,4125 obtenemos, de la Tabla 5.2, w = 0,386; por lo que:

$$c = \frac{a}{w} = \frac{214}{0,384} = 557,0 \text{ kg de cemento}$$

Determinemos la cantidad de cemento para la característica $A_1$= 0,5097 del mismo agregado, por medio de la ecuación y manteniendo constantes los demás datos:

$$V = \frac{\frac{R_h}{R_c \cdot A_2} - M_2}{M_1} = \frac{\frac{41,0}{39,3 \cdot 0,5097} - 0.3375}{4,1427} = 0,4126$$

Los valores $M_1$ y $M_2$ son los mismos que en él cálculo anterior y con V = 0,4126 obtenemos, de la Tabla 5.2, w = 0,383 y con este valor:

$$c = \frac{a}{w} = \frac{214}{0,383} = 558,7 \text{ kg de cemento}$$

o sea, con $A_1$ = 0,5097 necesitamos 557,0 kg de cemento y con $A_2$ = 0,5098 necesitamos 558,7 kg de cemento, lo que constituye una diferencia de 1,7 kg que equivale a + 0,30%.

### 6.5.2 Cálculos de control con el agregado de Concreto Cubano

De los ensayos anteriores obtuvimos los datos siguientes:

Para un concreto con $R_h$ = 35.2 MPa y una plasticidad medida en el cono de Abrams de 8.0 cm, se utilizó un cemento con una resistencia de 39,2 MPa y 240,0 L de agua. Los agregados tenían una característica $A_2$ = 0,4891.

Por el mismo procedimiento que para los agregados de Somorrostro tendremos, con los datos dados:

$$V = \frac{\frac{R_h}{R_c \cdot A_1} - M_2}{M_1} = \frac{\frac{35,2}{39,3 \cdot 0,4891} - 0,3375}{4,1427} = 0,3607$$

con V = 0,3607 obtenemos, de la Tabla 5.2, w = 0,435 y con este valor:

$$c = \frac{a}{w} = \frac{240}{0,435} = 551,7 \text{ kg de cemento}$$

Determinamos la cantidad de cemento para la característica $A_2$ = 0,4938 del mismo agregado, por medio de la misma ecuación y mantenimiento constantes, los demás datos:

$$V = \frac{\frac{R_h}{R_c \cdot A_2} - M_2}{M_1} = \frac{\frac{35,2}{39,3 \cdot 0,4938} - 0,3375}{4,1427} = 0,3564$$

Los valores $M_1$ y $M_2$ son los mismos que en el cálculo anterior y con V = 0,3564 obtenemos, de la Tabla 5.2 w = 0.440 y con este valor:

$$c = \frac{a}{w} = \frac{240}{0,44} = 545,45 \text{ Kg de cemento}$$

o sea, con $A_1$ = 0,4891 necesitamos 551,7 Kg de cemento y con $A_2$ = 0,4938, 545,5 Kg de cemento, lo que constituye una diferencia de 6,2 Kg, que equivale a – 1,13%.

Por los cálculos de control realizados hemos comprobado que entre el coeficiente $A_1$, determinado sobre la base de los ensayos de laboratorio, y el coeficiente $A_2$ calculado por la determinación de la esfericidad $\phi$ y la redondez P de ambos, hay sólo una pequeña diferencia, positiva o negativa, en los consumos de cemento, lo que demuestra la posibilidad de determinar la resistencia del concreto con gran exactitud, empleando las características de los agregados que

utilizaremos en la mezcla de concreto, sin necesidad de esperar, como mínimo 28 días los resultados de las pruebas de laboratorio que nos permitan obtener $A_1$. Por esta razón, hemos incorporado a nuestra ecuación del "Método de diseño de mezclas de concreto", esta nueva forma de determinar los valores de la característica A, para hallar la resistencia a la compresión del concreto, o sea, la ecuación original es:

$$R_h = R_c \cdot A(4{,}6259 - 0{,}0604 \cdot A_s)\log w^{-1} + e_{exp}(-1{,}3125 + 0{,}283\ As) \qquad (6.11)$$

introduciendo el valor A en función de $\phi$ y P, y simplificando los términos de la ecuación 6.11 tendremos:

$$Rh = \frac{(P+\phi)+4}{10} \cdot Rc(M_1 \cdot V + M_2) \qquad (6.12)$$

donde:

$R_h$: resistencia del concreto a la compresión a los 28 días, en MPa

$R_c$: resistencia del cemento a la compresión a los 28 días, en MPa

w: relación agua / cemento en peso de la mezcla

$A_s$: plasticidad del concreto medida por revenimiento en el cono de Abrams en cm.

V: valor que depende de la relación agua/cemento.

$M_1$ y $M_2$: valores que se determinan en función del revenimiento $A_s$.

De esta manera comprobamos nuevamente la influencia de la forma de los agregados sobre la resistencia del concreto, lo que se hace evidente sí observamos las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3.

La efectividad de la ecuación 6.12 ha quedado confirmada con su aplicación a los agregados de 35 canteras de las 14 provincias de mi país y la de los agregados de la mayor parte de los países Latinoamericanos, a los que se les aplicó la determinación de A en función de $\phi$ y P, a la vez que dicha característica se determinó por ensayos en los laboratorios de cada lugar.

Además de las modificaciones introducidas al método Wadell-Schaffner, expresadas en el desarrollo de este trabajo, comprobamos la alta precisión que se obtiene en la determinación de los valores de $\phi$ y P, cuando se realizan directamente sobre las fotos, las determinaciones de los valores necesarios, sin copiar los contornos de los granos, lo que trae como consecuencia que se introduzcan errores por parte del que lo ejecuta.

***Nota***: En la actualidad, las fotos de las 20 partículas de grava es posible tomarlas con una Cámara Digital e imprimirlas en una Impresora Láser siempre que se respeten las dimensiones de éstas, prefijadas en la Metodología.

## 6.6 Conclusiones

Con la investigación realizada y los resultados de ella, se pone de manifiesto la influencia de la característica de forma de los agregados sobre la plasticidad del concreto fresco y la resistencia de él endurecido.

Mediante esta investigación logramos determinar la característica general A de los agregados, a través de los valores de la esfericidad $\phi$ y redondez P de ellos, con un alto grado de precisión, después de ajustar el procedimiento seguido por Wadell-Schaffner para determinar estos dos valores, con las modificaciones que le hemos introducido. Esto permite no tener que esperar 28 días los resultados de laboratorio para obtener la característica A, tan importante en el consumo de cemento para una resistencia determinada del concreto endurecido.

Además, es evidente la influencia que ejerce la característica de forma de los agregados sobre el consumo de cemento de las mezclas de concreto a diseñar, por lo que se hace necesario intervenir en el proceso tecnológico de la producción de los agregados, de manera tal, que tienda a mejorar su característica de forma, no sólo por su importancia en los aspectos económicos de la producción de concretos, sino también por la influencia que ésta tiene en las propiedades

reológicas de las mezclas de concreto fresco y del concreto endurecido. Así como la demanda de pasta de cemento que exige, la cual tiene una importancia determinante en la porosidad y permeabilidad del concreto y consecuentemente con su durabilidad.

# Capítulo 7

# MÉTODO PARA DOSIFICAR MEZCLAS DE CONCRETO CON ALTA CONSISTENCIA, QUE SE COMPACTAN POR VIBRACIÓN

## 7.1 Antecedentes

La consistencia del concreto es una propiedad de éste en estado fresco y, al mismo tiempo, un factor que influye en sus propiedades cuando endurece. Adquirió verdadera importancia cuando la vieja práctica de elaborar mezclas con consistencia de tierra húmeda, amplió sus limites a la confección de mezclas fluídas, entonces llegó a ser apremiante la medición de la consistencia del concreto.

La consistencia del concreto fresco a emplear dependerá del sistema constructivo que se aplique, de las dimensiones de las secciones estructurales, las cantidades de acero y del método que se utilizará para la puesta en obra de dicho concreto. Una vez seleccionada la consistencia del concreto, de acuerdo con los factores antes citados, se podrá definir el método de compactación más conveniente.

Los métodos de ensayos más utilizados para medir la consistencia y docilidad del concreto son:

**Cono de Abrams.** En realidad este ensayo es una prueba de revenimiento y fue establecido en 1922, en Estados Unidos, por la ASTM. Para hacer esta prueba se utiliza un molde

en forma de tronco de cono sin fondo, la base mayor colocada sobre una superficie lisa y no absorbente, es de 20 cm de diámetro, la base menor, 10 cm y la altura 30. Se llena con concreto en tres capas, cuyos tres volúmenes respectivos son, aproximadamente, la tercera parte del volumen del molde, cada capa se apisona con 25 golpes de una varilla de 16 mm de diámetro y 60 cm de longitud. Se enrasa la cara superior e inmediatamente el molde se levanta con mucho cuidado y suavidad. El tronco de cono de concreto se asienta o desciende, bajo su propio peso, la disminución de altura da la medida de la consistencia del concreto. Este método es muy sencillo y cómodo para utilizarlo a pie de obra.

**Mesa de sacudidas.** Es el verdadero ensayo de fluidez, se utiliza en Alemania, Francia, Suiza y a veces, en Estados Unidos. Se emplea un molde, también en forma de tronco de cono sin fondo, cuya base mayor (B) es de 30 cm de diámetro, ésta se coloca sobre una mesa cuadrada de palastro de 70 u 80 cm de lado, sobre la cual están trazados dos ejes perpendiculares, la base menor (b) mide 20 cm y la altura (h), 15 cm. El cono se llena sin apisonar y por medio de un dispositivo especial, se somete la mesa a fluidez o caídas verticales, después se levanta el molde inmediatamente. En Francia suele aplicarse a la mesa 12 caídas de 12.5 mm, levantándola y dejándola caer en 10 s, los norteamericanos aplican 15 caídas de ½ pulg. (12,7 mm), en Alemania, a veces aplican 10 caídas de 4 cm. Las dimensiones del molde varían también según algunos autores (por ejemplo B = 15 ó 25.5 cm, b = 10 ó 16.5 cm y h=7.50 ó 12.5 cm).

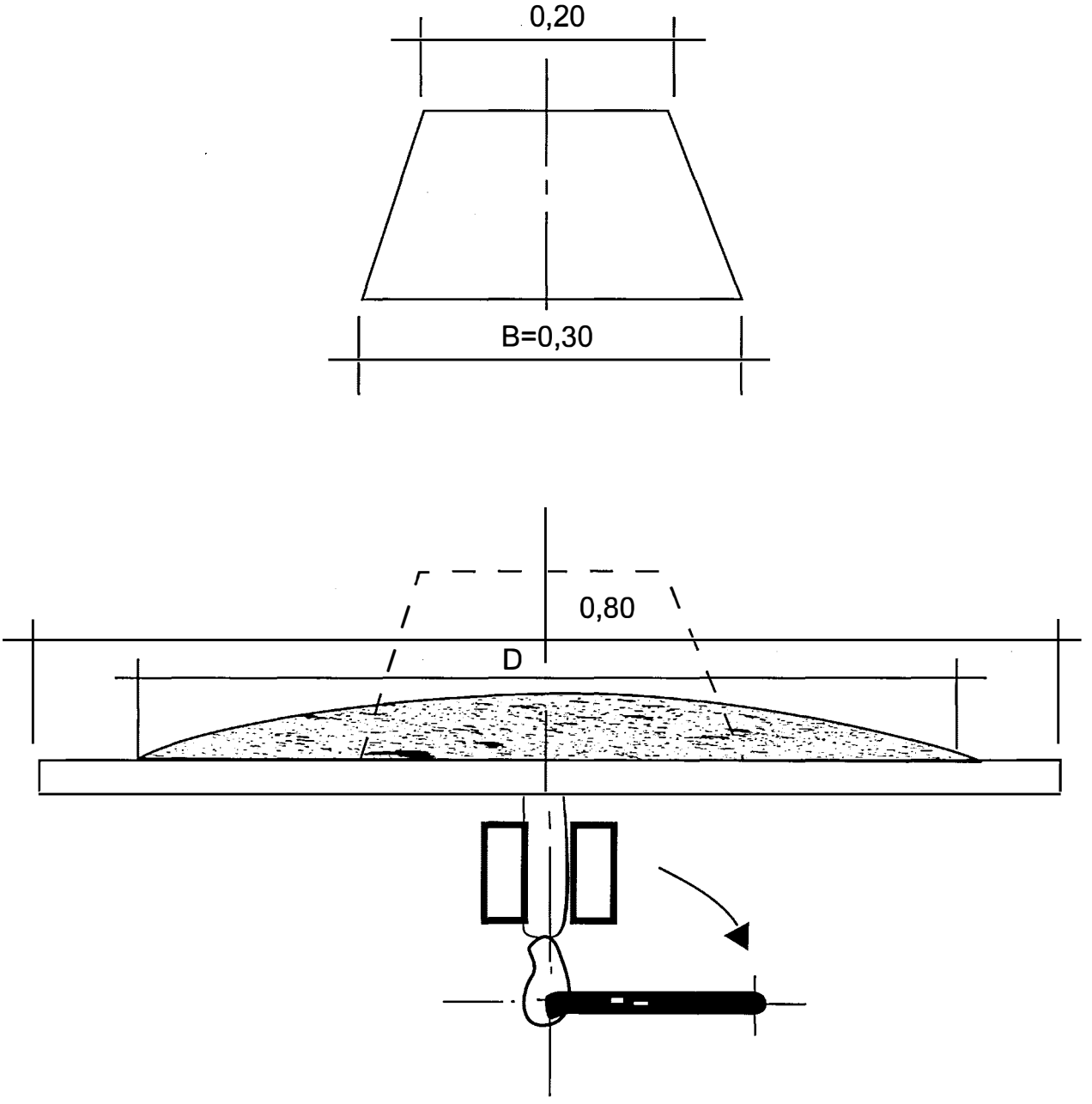



**Fig. 7.1 Mesa de sacudidas**

La masa de concreto se extiende en forma de una torta, cuyo diámetro medio es D. La relación:

$$\frac{D}{B} = \frac{D}{30} = f \text{ mide la fluidez del concreto.}$$

Otras veces, el valor de la fluidez viene dado por D en milímetros o centímetros, pero siempre se mide por el aumento del diámetro que experimenta la masa de concreto.

**Docilímetro.** Este método cae dentro de los ensayos llamados de penetración, como los de Pearson y Hitchoock, Yoshida, Smith y Conehey, Graf, Humn, etc.

Para conseguir las dos finalidades de precisar la cantidad mínima de agua conveniente del mezclado y controlar su constancia durante la ejecución de la obra, como hemos indicado, la mayor importancia está en encontrar un procedimiento práctico y suficientemente seguro que permita medir la consistencia de los concretos. Para ello, se ha partido de la base de que la mayor facilidad con que un concreto penetra en los moldes pasando a través de las armaduras sí las hubiese, y rellenando los huecos debe estar íntimamente relacionada con la mayor o menor facilidad con que ese mismo concreto se deja penetrar por un cuerpo extraño.

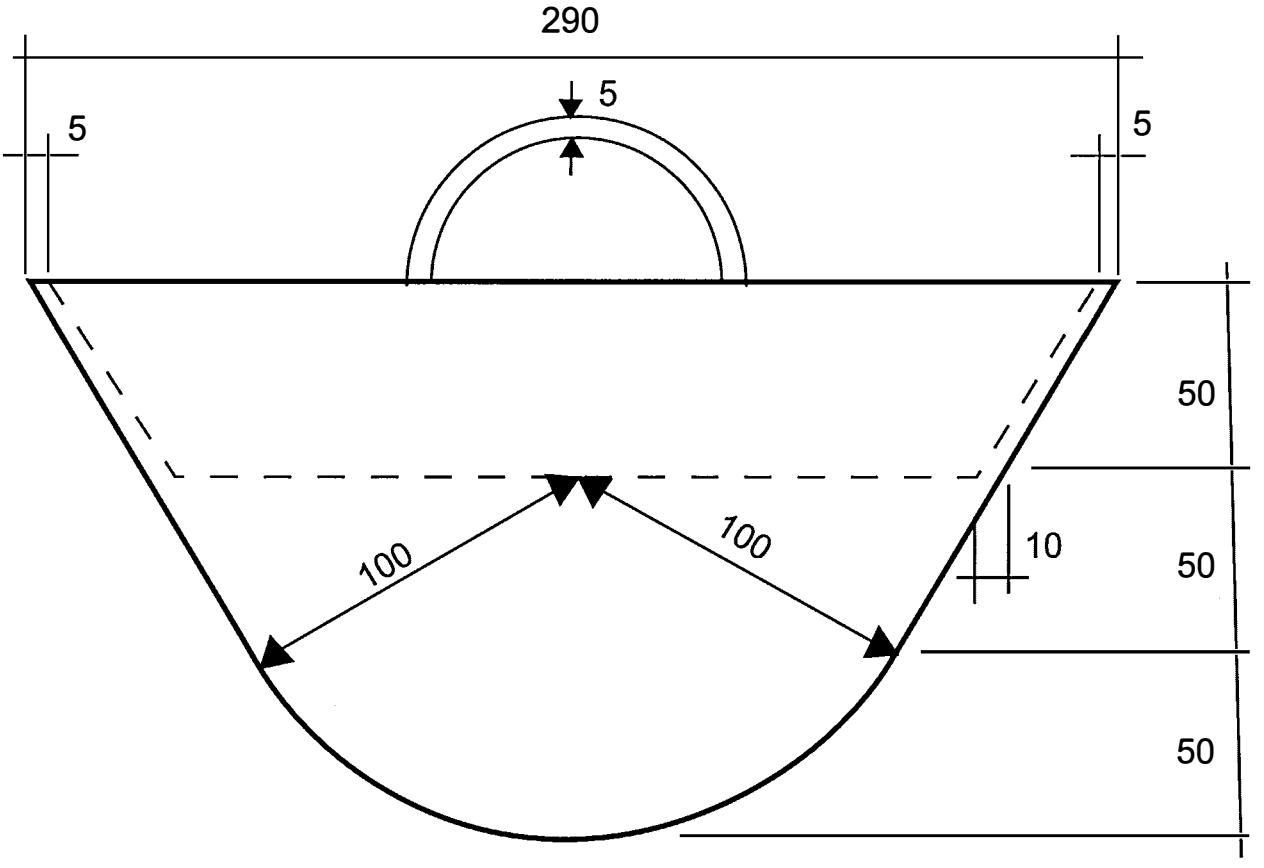



**Fig. 7.2 Docilímetro Irribarren**

Se han efectuado numerosos ensayos con diversos concretos, empleando esferas, semiesferas, tercios de esferas paraboloides y demás formas adecuadas de equilibrio estable, con el fin de determinar la forma, dimensiones y pesos más convenientes para ese cuerpo de prueba, se ha llegado a la conclusión de que el más apropiado y más exacto es el tronco de cono, rematado con el casquete esférico.

La ventaja del Docilímetro sobre los otros instrumentos, es que además de medir la consistencia de los concretos, determina también cuándo a estos concretos les falta la debida trabazón, necesaria para que el agregado no se separe de la pasta.

Otra importante ventaja de este método sobre los demás, consiste en que es el único capaz de determinar, mediante el descenso de la curva de consistencia, cuándo un concreto deja de ser

"trabado", lo que permite, además, fijar en cada caso, el límite peligroso de la fluidez y blandura, a partir del cual el concreto puede desintegrarse por falta de trabazón durante la ejecución de la obra, principalmente por las condiciones más o menos desfavorables del transporte, desde la planta concretera al molde.

**Plasticímetro.** En Francia, M. Faury propuso medir la plasticidad de un concreto por la relación de los pesos específicos aparentes de dos masas obtenidas en dos moldes idénticos, una con ciertas armaduras y la otra sin ellas. El método está bien orientado para obras de concreto armado vibrado. Faury indica que para estimar la plasticidad de colocación de un concreto, hay que utilizar instrumentos que, aunque complejos, sometan al concreto a solicitaciones semejantes a las que resultan de los procedimientos de colocación en obras usuales y le obliguen a deformarse y a moldearse en las mismas condiciones que en obra, para rellenar los cimbras con armaduras.

La vibración debe emplearse sólo en concretos de consistencia adecuada, la mayor eficacia se consigue con una consistencia seca o ligeramente plástica. Es un error vibrar concretos fluidos, porque puede, incluso, no mejorar la calidad del concreto y existe el peligro de segregación.

Para obtener un concreto con gran resistencia, hay que elaborarlo con poca agua, de modo que terminado de amasar, toda ésta quede retenida por capilaridad en la superficie de los agregados y del cemento. La vibración, al liberar dicha agua, produce la licuefacción aparente de la masa, por esta causa es posible el empleo de mezclas secas, aún en los nudos de las estructuras de concreto armado con gran densidad de armaduras, donde corrientemente se emplea un concreto fluido, con la inevitable consecuencia de obtener baja resistencia.

Esta agua liberada se une con la parte fina del agregado y el cemento para formar la pasta aglomerante, que conviene tenga un peso específico elevado, para que garantice el revenimiento

lento de los agregados gruesos. A partir de cierta plasticidad, la vibración no puede aumentar la compacidad del concreto, sólo puede ayudar a su colocación en obra de forma más rápida y regular. Si en estas condiciones la vibración se prolonga, existe el peligro de segregación, pues los agregados gruesos descienden demasiado rápido y el mortero asciende con rapidez, quedando una capa importante de éste en la parte superior.

Si se trata de concretos secos, o sea, con alta consistencia, al vibrarlos se transforman en una masa fluida y viscosa, que adquiere, en muchos aspectos, las propiedades de un líquido pesado, lo que aumenta extraordinariamente la docilidad, desde el punto de vista mecánico. Esta propiedad de la mezcla de concreto de licuarse durante las solicitaciones mecánicas y de nuevo volverse a solidificar en estado de reposo, se denomina ***tixotropía.***

En resumen, se llega a la conclusión de que los efectos de la vibración son tanto más pronunciados, cuanto más alta sea la consistencia del concreto, hasta un límite determinado por la presencia de una cantidad mínima de agua capilar necesaria y de una proporción suficiente de finos, para formar una pasta lubricante adecuada alrededor de los granos de los agregados.

Es conveniente probar o medir en la obra, la consistencia y docilidad del concreto que se va a emplear, acorde con el método de vibración que se utilice.

En caso de concretos secos, no son muy precisas las mediciones que proporcionan los instrumentos corrientes que indican la consistencia o docilidad. El cono de Abrams no da valores de revenimientos sensibles y sólo es posible medir con él hasta cero revenimiento, pues cuando las mezclas tienen una alta consistencia, ésta no es medible por este método o procedimiento. La mesa de fluidez no extiende el concreto uniformemente, sino que desliza de forma desigual y dispersa los elementos más gruesos, por lo que resulta difícil determinar el diámetro medio. El docilímetro se embadurna poco y también es difícil medir el diámetro del círculo. Por ello se han estudiado equipos para medir la consistencia y la docilidad de concretos con alta consistencia, en

este caso describiremos el consistómetro VeBe, que es el más generalizado en todos los países del mundo.

**Consistómetro VeBe.** El consistómetro VeBe ha sido construido según las normas de la "Asociación sueca de fabricantes de cemento", se ideó especialmente para mezclas de concreto que serán vibradas y pretende determinar exacta y numéricamente la consistencia de dicha mezcla, aún en el caso de concretos muy secos. Se fundamenta en determinar el tiempo necesario para transformar un cono truncado de concreto, (cuya consistencia se desea medir) en un cilindro por medio de la vibración.

Este equipo consta de un recipiente cilíndrico, en cuyo interior se coloca un cono de Abrams, dicho recipiente está colocado sobre una pequeña mesa montada sobre resortes y accionada por un vibrador eléctrico que está situado en su parte inferior. El cono se llena en tres etapas, en cada una de ellas se apisona con 25 golpes de una barra cilíndrica de acero. Se enrasa el material en la cara superior y se levanta cuidadosamente el cono. El plato de acrílico está suspendido de una varilla graduada, que se mueve a través de un casquillo guía, dicho plato se coloca encima del cono de concreto, de modo que descanse en su superficie superior. Se inicia la vibración, que se prosigue hasta que el concreto se haya adaptado a la forma de la cubeta cilíndrica, en el momento preciso en que el concreto, debajo del plato acrílico, ha quedado sin huecos visibles, se observa el tiempo transcurrido en segundos (medido por un cronómetro) y dicho tiempo constituye el número de grados de consistencia VeBe.

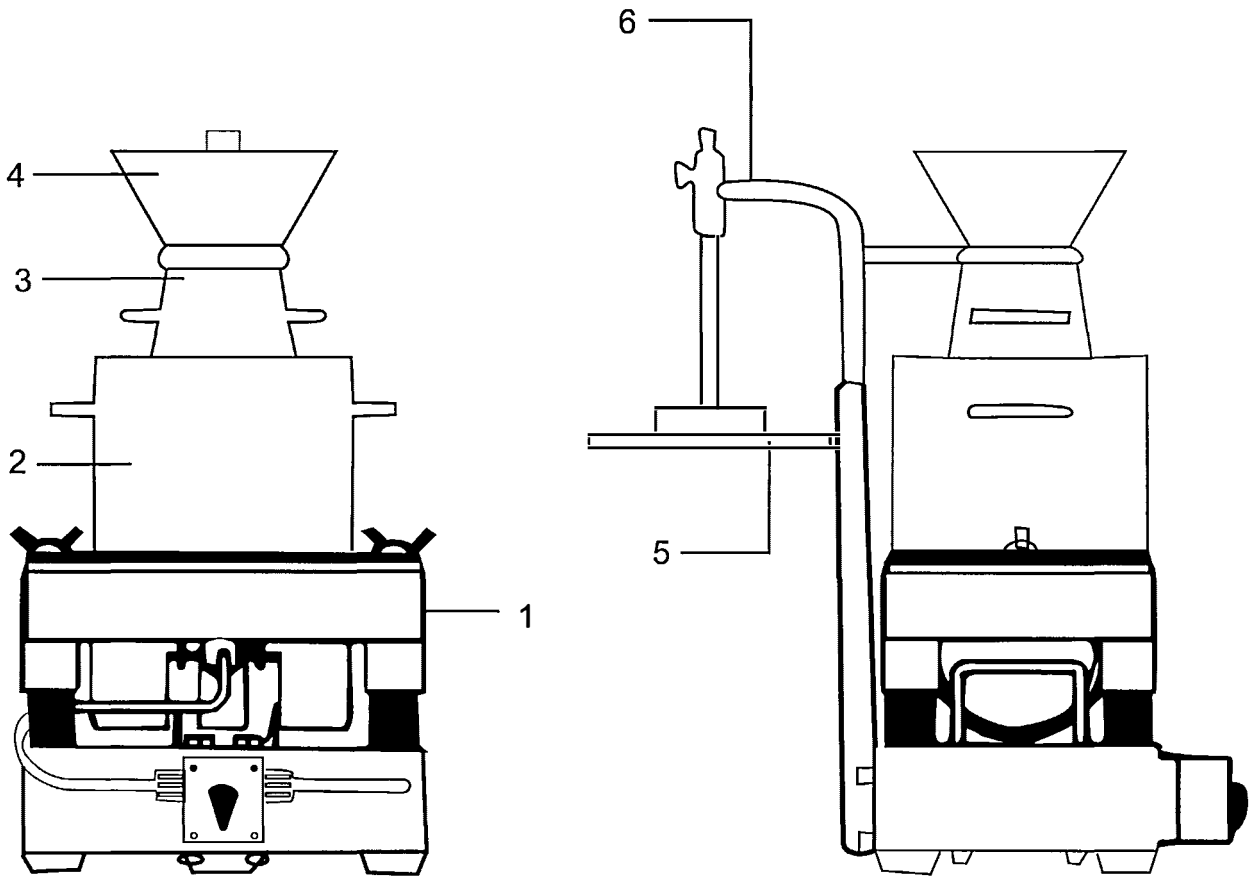



**Fig. 7.3 Consistómetro VeBe:** 1 Mesa vibratoria, 2. Recipiente, 3. Molde cónico, 4. Embudo de relleno, 5. Disco de plástico, 6. Soporte.

De lo expuesto se deduce que es aconsejable el empleo de este método, especialmente adecuado para medir la consistencia del concreto que se vibrará, su empleo se recomienda en plantas de prefabricados y grandes obras.

Es necesario comprobar siempre que el concreto que se va a emplear tenga la consistencia, en correspondencia con los medios de vibración disponibles en plantas u obras.

## 7.2 Concepto de consistencia directiva de las mezclas de concreto

La consistencia de las mezclas de concreto medidas en grados VeBe, como una de las características de las propiedades reológicas de ellas, constituye, hasta cierto punto, un factor subjetivo y convencional que no expresa, en general, las propiedades de las mezclas de concreto, sino más bien en determinadas condiciones. Hasta el momento no se ha determinado otro método más conveniente para clasificar las mezclas de concreto, desde el punto de vista de su compactibilidad.

Por consiguiente, expresamos la compactibilidad de las mezclas de concreto mediante los llamados valores de consistencia directiva, $KO_e$, medidos en segundos, en el consistómetro VeBe, con una frecuencia dada en hertz, una amplitud dada en milímetros en un estado sin carga y una aceleración máxima de vibración, estas especificaciones están en correspondencia con las normas de cada país, incluyendo también el contrapeso del plato de acrílico.

La consistencia directiva $KO_e$ (en adelante la denominaremos sólo como KO) se entiende como el valor de la consistencia, que bajo la discrepancia (dispersiones) de las KO determinadas en las condiciones de la producción, constituye un promedio estadístico de ellas, las cuales se encuentran bajo la influencia de diversos factores, entre los que se localizan: las características de los componentes de las muestras de concreto, la precisión de sus dosificaciones, el tiempo transcurrido desde el mezclado de las mezclas de concreto, la temperatura de los componentes, del ambiente, etcétera.

## 7.3 Diseño de la composición de mezclas de concreto con una consistencia requerida

Según las deducciones de Riha, las cuales se apoyan en el resultado de las mediciones de Krejci, existe una relación entre el tiempo de compactación $\tau_h$ y la consistencia directiva KO de las mezclas de concreto, así como el valor de la aceleración efectiva de la vibración $a_e$, mediante la cual todavía se pueden compactar las mezclas de concreto, si la frecuencia de la vibración estuviera fuera de la zona de resonancia, y se expresa de la forma siguiente:

$$\tau_h = 5{,}6279 \cdot KOa_e^{-1{,}675} \qquad (7.1)$$

A partir de la ecuación 7.1 podemos determinar no sólo el valor $a_e$, indispensable para la compactación de las mezclas de concreto con la consistencia directiva por medio de la vibración.

$$a_e = e_{exp}\left[\ln\left(\tau_h \cdot KO^{-1} \cdot 5{,}6279^{-1}\right)(1{,}675)^{-1}\right] \qquad (7.2)$$

Sino también el valor de la KO directiva de las mezclas de concreto que todavía pueden compactarse en un tiempo $\tau_h$ por medio de la aceleración de la vibración $a_e$.

$$KO = \tau_h \cdot 5{,}6279^{-1} \cdot a_e^{+1{,}675} \qquad (7.3)$$

$$KO = 0{,}1777 \cdot \tau_h \cdot a_e^{1{,}675} \qquad (7.4)$$

La posibilidad del diseño de las composiciones de las mezclas de concreto con una consistencia requerida, ha sido estudiada por diversos investigadores. Sin embargo, los esfuerzos en pos de la generalización de estas soluciones, condujeron a considerables impresiones para los casos concretos, de los cuales se deriva la necesidad de verificaciones y correcciones de los diseños de mezclas, por lo que resulta necesario llevar a cabo, por lo menos, tres mediciones de

las consistencias y algunas veces más, los resultados no tienen una aplicación general, y son válidos sólo para casos particulares.

Por esta causa fue necesario obtener otro método más exacto para el diseño de las composiciones de las mezclas de concreto, para una KO dada, el cual no sólo fuera posible utilizar en los casos particulares, sino también en la generalidad de ellos, y con el que pudiera obtenerse una disminución de la laboriosidad de los ensayos, una reducción del tiempo de su ejecución, así como de los costos de ellos.

La posibilidad de un procedimiento semejante al antes expuesto, está dada por la relación obtenida por Riha para las mezclas de concreto elaboradas con agregados estándar del VUT-Brno, la cual tiene la expresión siguiente:

$$pc = 100 + w^{-1}\left(144 - 21 \ \ln \ KO\right) \qquad (7.5)$$

A partir de la ecuación 7.4, se deriva que la consistencia directiva será:

$$KO = e_{exp}\left[6{,}865 + w\left(4{,}633 - 0{,}0476pc\right)\right] \qquad (7.6)$$

Con la relación anterior se pueden determinar, con una gran precisión, las consistencias directivas dentro de los límites que van desde 5 hasta 40 s VeBe, y para w de 0,35 hasta 0,65; a partir de las cantidades de pc, se pueden determinar las composiciones de las distintas mezclas de concreto. Sin embargo, esta ecuación es válida para aquellas mezclas compuestas por agregados estándar del VUT-Brno y que posean una dimensión máxima de 16 mm. Es decir, al utilizar otros tipos de agregados, se manifestaron desviaciones difíciles de cuantificar, por lo tanto, fue necesario buscar otro procedimiento para el diseño de composiciones de las mezclas de concreto con la consistencia requerida, y que pudiera ser utilizado para cualquier tipo de agregado.

## 7.4 Estudios e Investigaciones

En la búsqueda de un método para el diseño de las mezclas de concreto con una KO específica, se demostró que al utilizar el agregado estándar del VUT-Brno ($D_{máx}$ = 16 mm) para la obtención de KO, para un valor dado de w, si ploteamos los valores resultantes de multiplicar las KO y sus cantidades de pc que contiene 1 $m^3$ de concreto fresco, en los puntos correspondientes de esta KO en el eje horizontal, los puntos A, B, C, D y E que se obtienen, se ordenan, aproximadamente en una línea recta, como se ilustra en la figura 7.4, la cual, sin embargo, no atraviesa el punto de intersección de los ejes y cuya ecuación general se expresa:

$$pc' = pc \cdot KO = p \cdot KO + q \qquad (7.7)$$

Este hallazgo condujo a la idea de utilizar la regularidad mencionada para determinar las composiciones de las mezclas de concreto con una consistencia dada, ya que:

$$pc = p + q \cdot KO^{-1} \qquad (7.8)$$

Pero fue necesario verificar detalladamente la posibilidad de utilizar la nueva relación, así como su exactitud. En busca de una solución precisa, siempre obtuvimos unas relaciones exponenciales, las cuales, para las dosis volumétricas de pasta de cemento, están expresadas por:

$$pc = 229{,}7082 \cdot KO^{-0{,}1049} \cdot w^{-0{,}8305} \cdot KO^{-0{,}0812} \qquad (7.9)$$

Esta relación no es sólo relativamente compleja, sino poco precisa para ciertos valores de w y KO, por esta razón surgió la idea de hacerla lineal para las dosis de pc, esto requirió hallar las causas del por qué esta relación no es lineal, como se puso de manifestó originalmente.

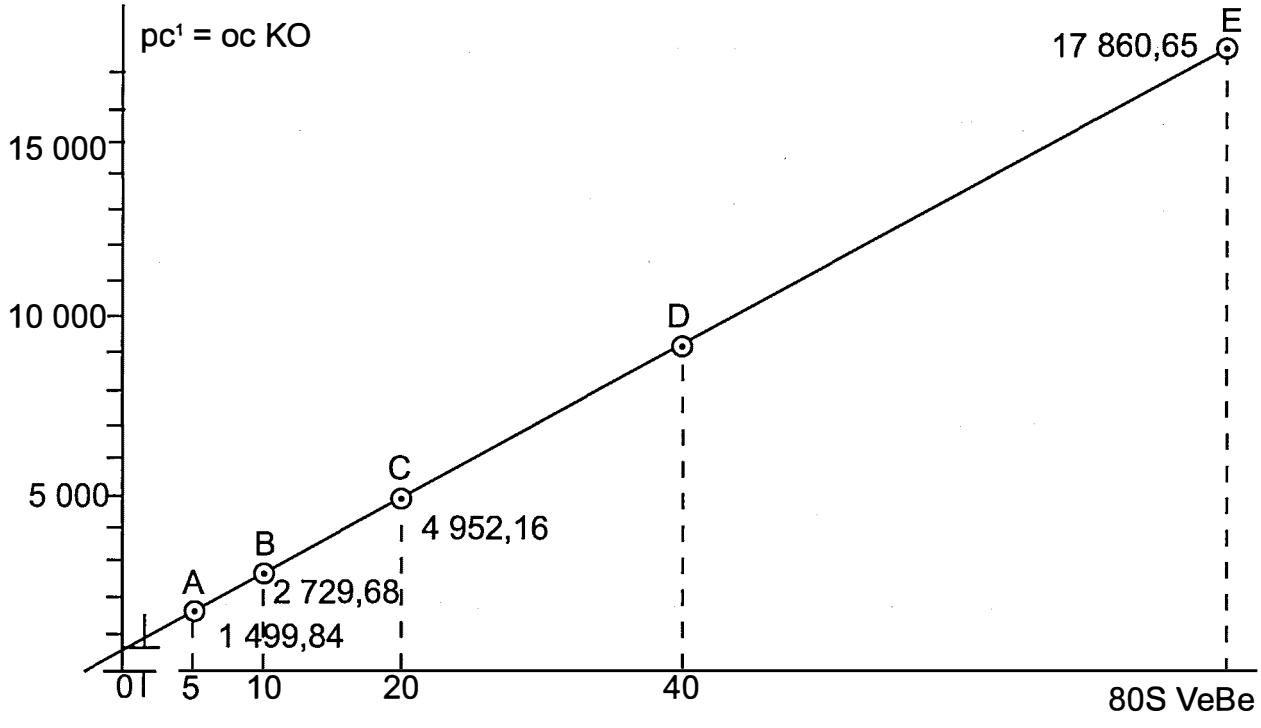



**Fig. 7.4 Relación entre pc' y KO.**

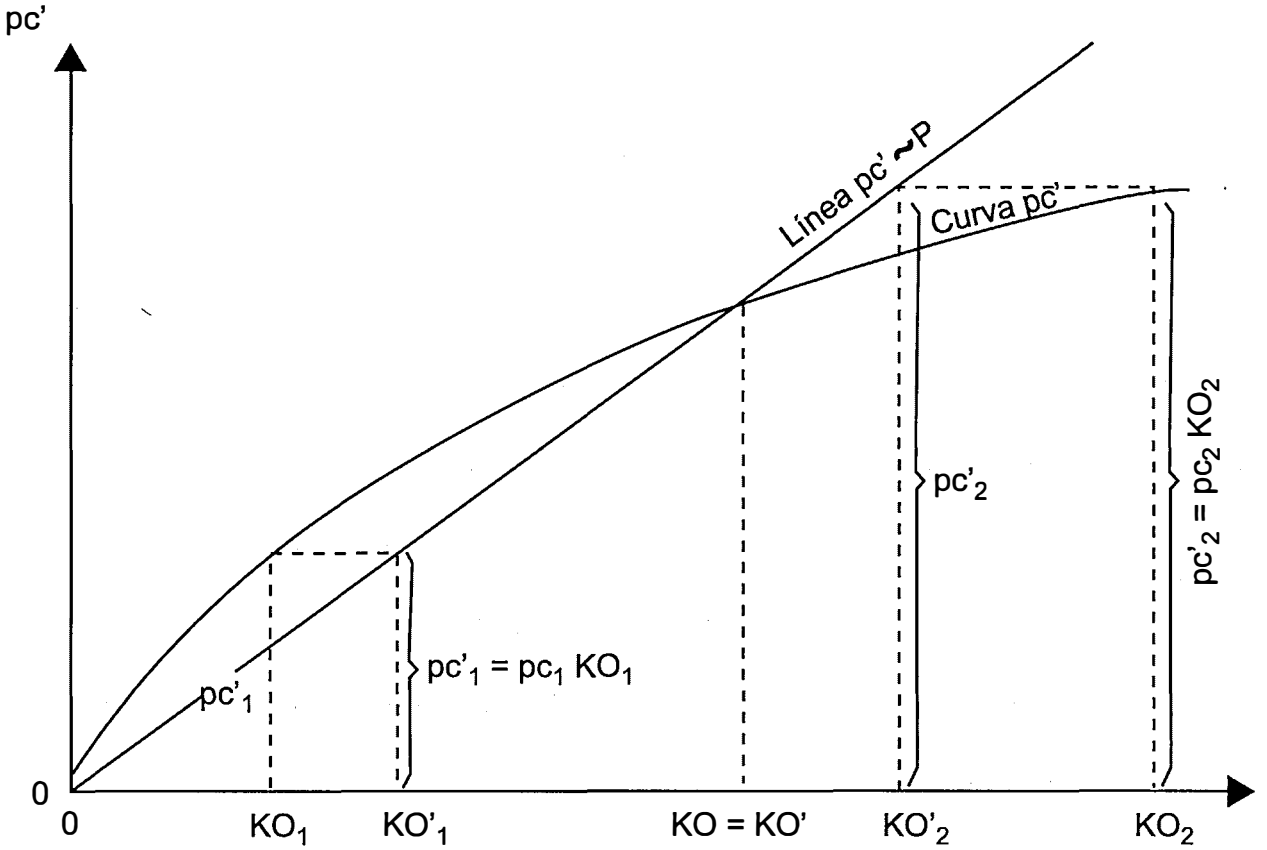



**Fig. 7.5 Esquema de linealización de la curva pc' dada por la relación 7.8**

Como una de las causas principales de que la relación 7.9 no es lineal, podemos considerar el hecho de que las mezclas de concreto con todas las consistencias son compactadas durante la medición en el consistómetro VeBe, prácticamente con una aceleración máxima constante de la vibración a = 3,50 g y cuyo valor efectivo es:

$$a_e = \frac{a}{\sqrt{2}} = 2{,}4759g$$

Sin embargo, el valor de $a_e$ = 2,4759 g basta para la deformación del cono trunco y la compactación de la mezcla en el consistómetro VeBe, en un tiempo $\tau_h = KO$, sólo para las mezclas de concreto con una consistencia $KO = KO'$.

Si suponemos que la causa principal de que la relación 7.9 no sea lineal, es la aceleración constante utilizada $a_e$ = 2,4759 g, de ello se deriva que para las mezclas de concreto con un KO mayor, será necesario un tiempo mayor para compactarla, por lo tanto, KO > KO', siendo KO' la consistencia o, eventualmente el tiempo de compactación correspondiente a la aceleración efectiva de la vibración $a_e$ para la cual sería válido que cuando KO = KO', $a'_e > a_e$.

Por el contrario, para las mezclas de concreto con una KO < KO' bastaría la aceleración efectiva $a'_e < a_e$ para la compactación de la mezcla durante un tiempo $\tau_h = KO \neq KO'$. Si la hipótesis anterior justificara esto, podría conducirnos ha hacer lineal la ecuación 7.9 (figura. 7.5), para la cual debemos plotear los valores de pc', que es igual a $pc \cdot KO$, en el eje de las ordenadas, pero a partir del punto de la consistencia ficticia KO', obtenida por cálculo, y no de la consistencia KO realmente determinada, ambas en el eje de las abscisas. Entonces, el problema se reduciría a hallar la forma para determinar los valores correspondientes de $a'_e$, para los valores dados de KO, y a partir de ellos deducir los valores de KO'.

Después de un gran número de mediciones en el laboratorio y elaboraciones matemáticas, obtuvimos las ecuaciones siguientes, con las cuales, a su vez, elaboramos el método que nos permite determinar la composición de una mezcla de concreto de una KO dada y de una w requerida el cual se describe al final de esta parte, con un ejemplo concreto de la práctica diaria.

La consistencia ficticia, en función de la consistencia real y de una relación agua/cemento dada, está expresada por la ecuación siguiente, para los valores de KO <30 s VeBe:

$$KO'_1 = \left(1{,}825 - 0{,}917\ w\right) KO^{0{,}794+0{,}177\ w} \quad (7.10)$$

y cuando KO ≥ 30 s VeBe, la ecuación será:

$$KO'_1 = 1{,}047 \cdot KO^{0{,}94} \quad (7.11)$$

Para obtener la cantidad de pasta ficticia $pc'_1$, utilizamos la ecuación siguiente a partir de los valores $KO'_1$ hallados anteriormente:

$$pc'_1 = KO'_1 \cdot ps \quad (7.12)$$

donde ps representa la característica de los agregados, la cual se mide mediante la pendiente que genera la línea que se traza con los valores obtenidos en el laboratorio.

Según la figura 7.6 tenemos que:

$$pc = pc'_1 = pc \cdot KO = KO'_1 \cdot\ ps \quad (7.13)$$

por lo que la cantidad de pasta real pc, se puede determinar a partir de la igualdad anterior:

$$pc = \frac{KO'_1 \cdot ps}{KO} \quad (7.14)$$

A partir del valor pc hallado, podemos determinar la composición de 1 $m^3$ de concreto fresco de la forma siguiente:

volumen de cemento:

$$C = \frac{pc}{3{,}1 \cdot w + 1} \quad (7.15)$$

cemento en peso:

$$c = C \cdot \rho_c = 3{,}10\ \ C \quad (7.16)$$

La cantidad de agua a utilizar en litros, a partir de la relación aguacemento conocida será:

$$a = c \cdot w \tag{7.17}$$

El volumen total de los agregados de la mezcla será, para un concreto con 2% de porosidad:

$$G = 1000 - 20 - pc \tag{7.18}$$

De donde, el peso material será igual a:

$$g = G \cdot \rho_g \tag{7.19}$$

Siendo $\rho_g$ el peso específico promedio de los agregados a utilizar.

Esta cantidad total de agregados se divide entre los porcentajes óptimos de las mezclas de las fracciones (arena y grava), los cuales se determinaron en el laboratorio, por el método del vacío mínimo.

Con los materiales calculados se elaboran mezclas y se determina el grado de exactitud de los diseños mediante mediciones de control.

## 7.5 Dependencia de la consistencia con respecto al valor de la relación agua cemento w

Durante esta investigación hemos observado que la consistencia de la mezcla de concreto constituye una función del valor de *w*, lo que puede expresar la dependencia de los valores de las pendientes de las líneas rectas *ps*, con respecto a los valores de *w*. Esta dependencia se determinó para cuatro tipos de agregados, tres de los cuales fueron tomados como patrones de comparación y el de La Habana ensayado, como representativo de las características de los agregados triturados.

El comportamiento de estos agregados se expresa en la figura 7.6 que ilustra la dependencia de *ps* con *w*. Los resultados de la investigación realizada nos dieron la posibilidad de determinar, para los agregados triturados lo siguiente:

1. La cantidad de pasta de cemento para determinar los valores de *w* y KO.
2. La clasificación adecuada de las mezclas de concreto, desde el punto de vista de las cantidades de *pc* y sus excesos representados por $V_{pc}$.
3. De acuerdo con estas características, determinar sus posibilidades de compactación con los equipos disponibles.

En virtud de esta clasificación de las mezclas de concreto, calculamos en primer lugar, las cantidades de *pc* y los excesos de pasta de cemento $V_{pc}$ para *w* (0,35; 0,45; 0,55; 0,65) y para una KO (5; 10; 20; 40; 80 s VeBe), suponiendo que el porcentaje de vacío de la mezcla óptima de los agregados es de 31,60% después de la compactación (volumen de los huecos 316 $dm^3/m^3$).

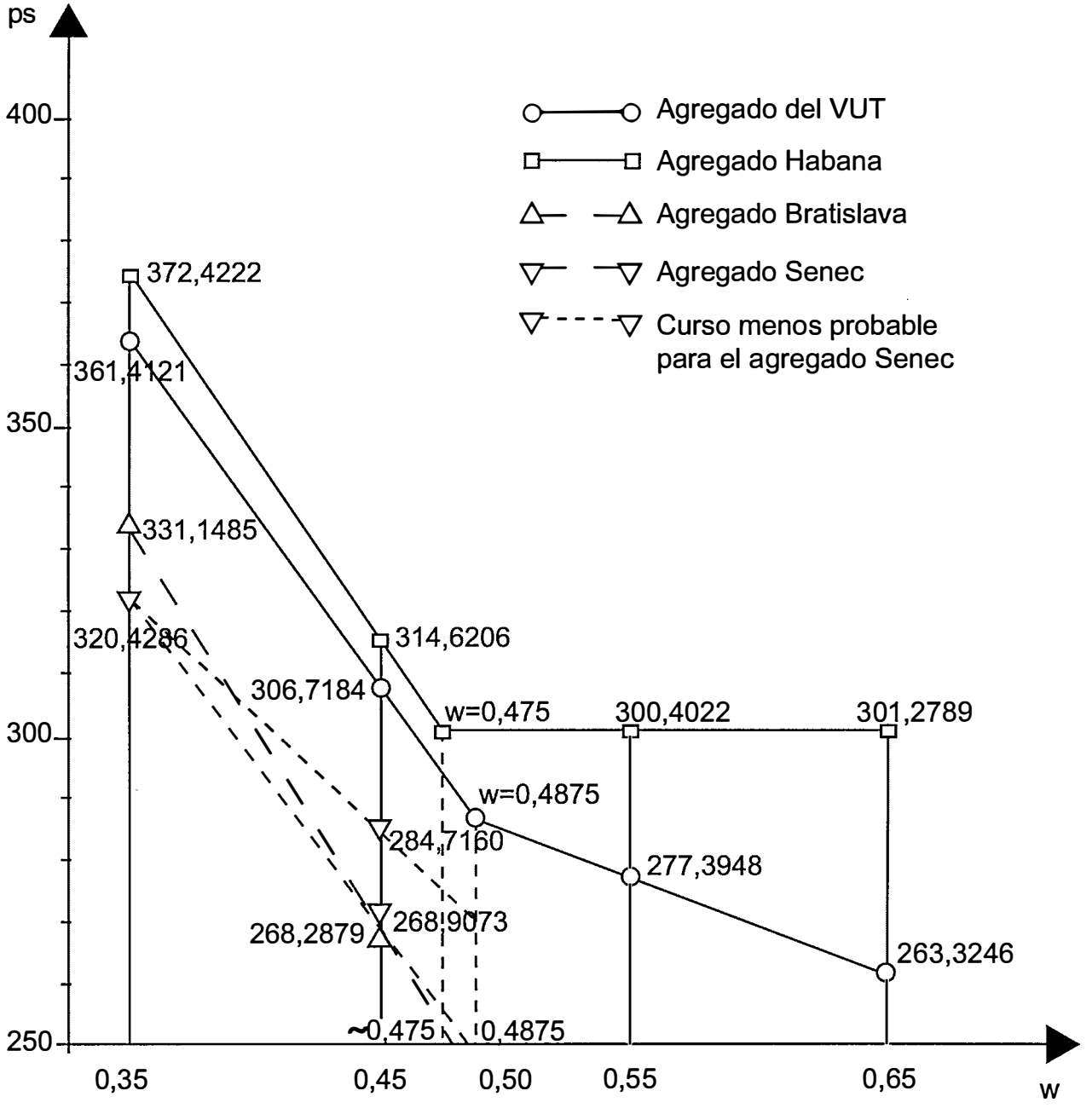



**Figura 7.6 Dependencia de los valores de ps con respecto a los valores de w**

La misma clasificación de las mezclas de concreto, desde el punto de vista de su grado de compactación, fue llevada a cabo tomando en consideración los conocimientos y experiencias que se han obtenido hasta la actualidad, sobre la acción de los equipos compactadores, principalmente los vibradores, de acuerdo con los valores de la consistencia y según el exceso de pasta de cemento $V_{pc}$ (figuras. 7.7 y 7.8). Como resultado, las mezclas de concreto fueron divididas en cuatro grupos:

*MEZCLAS DE CONCRETO DEL GRUPO I*

En este grupo están incluidas las mezclas de concreto que pueden compactarse mediante vibradores de inmersión o mediante una vibración ligera, de poca intensidad, con una consistencia, de hasta aproximadamente 5 s VeBe, lo que corresponde con un revenimiento en el cono de Abrams de 34,43 mm.

*MEZCLAS DE CONCRETO DEL GRUPO II*

En el *grupo II* fueron incluidas las mezclas de concreto que pueden compactarse mediante vibración superficial en moldes y mesas vibratorias, con una intensidad de vibración tal como se utiliza en la actualidad.

Para estos fines se pueden emplear mezclas de concreto con una consistencia que va desde 5 hasta aproximadamente 10 s VeBe, lo que corresponde con un revenimiento en el Cono de Abrams desde 34,43 hasta 6,28 mm.

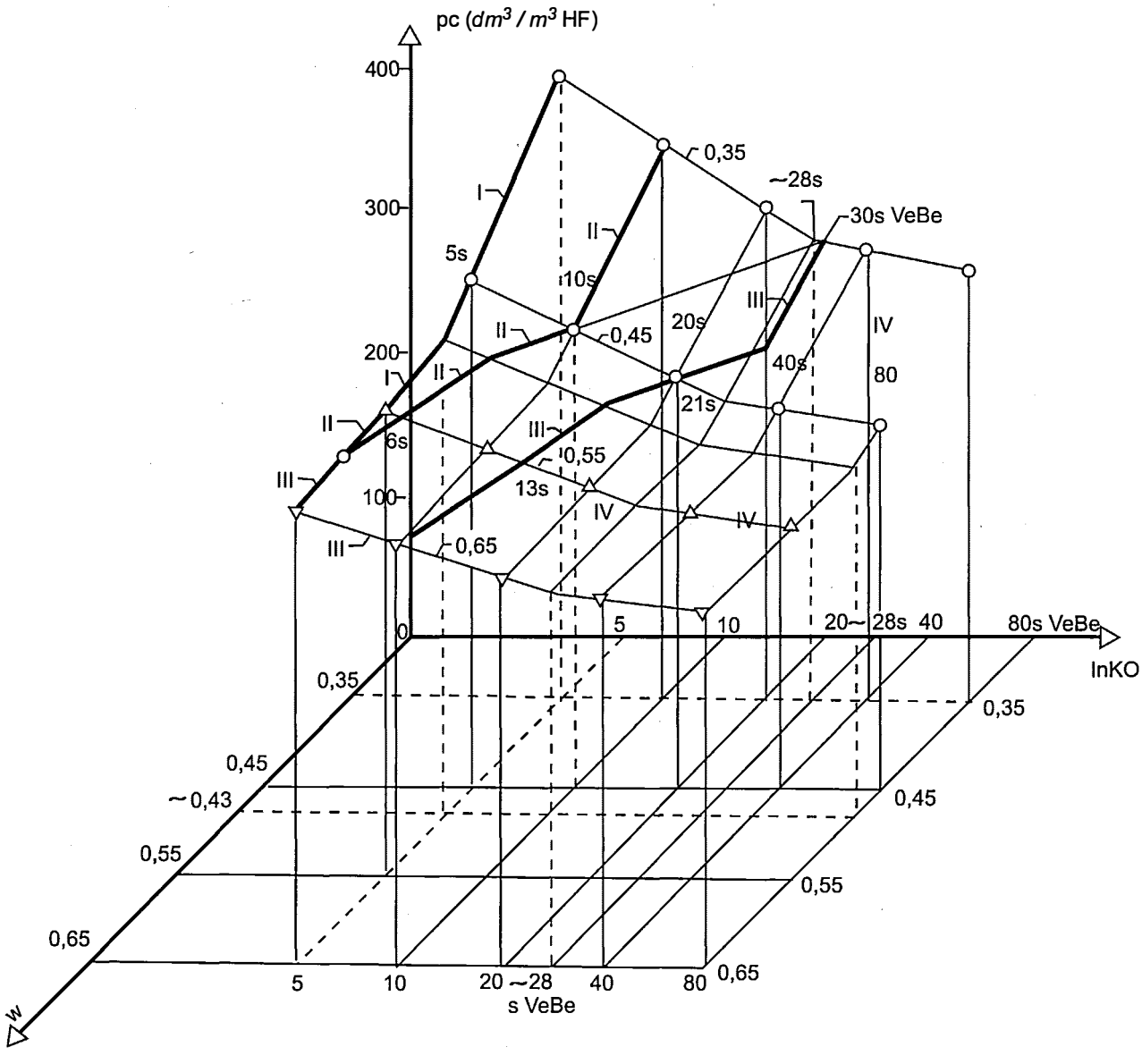



**Fig. 7.7. Diagrama volumétrico de las cantidades de pc, en dependencia de w y KO**

*MEZCLAS DE CONCRETO DEL GRUPO III*

En este grupo se incluyeron las mezclas de concreto que se compactan con una técnica de vibración perfeccionada, es decir, en mesas o moldes vibratorios, con una vibración intensa que permite compactar las mezclas de concreto con una consistencia de 19 hasta 30 s VeBe. En estos casos suele ser útil el empleo de equipos vibratorios con una estructura especial. De acuerdo con los conocimientos más recientes, es conveniente utilizar en estos equipos vibratorios una frecuencia adecuadamente seleccionada, ya sea resonante o de absorción. Utilizando una frecuencia semejante, podemos compactar las mezclas de concreto del *grupo III*, hasta una consistencia de alrededor de 20 s VeBe, igualmente se realiza con una vibración superficial.

*MEZCLAS DE CONCRETO DEL GRUPO IV*

En el grupo IV hay que incluir las mezclas que pueden compactarse todavía cuando *w* oscila entre 0,35 y 0,40; siendo $\acute{\imath}_{pc} > 0,90$; y KO > 30 s VeBe, mediante métodos y equipos especiales (por ejemplo mediante el método utilizado por la tecnología SPIROLL, por el empleo del vibroprensado en la fabricación de tubos por los sistemas VYHY, SIOME u otros, para la producción de paneles vibroprensados mediante el sistema VIPRES, y lo más difundido, el concreto compactado por rodillos, para presas, carreteras, canales, etc. Sin estos equipos vibratorios especiales, las mezclas de este grupo no se pueden compactar a la perfección y su empleo para la producción de elementos confeccionados con concretos llenos y con superficies lisas no es aconsejable.

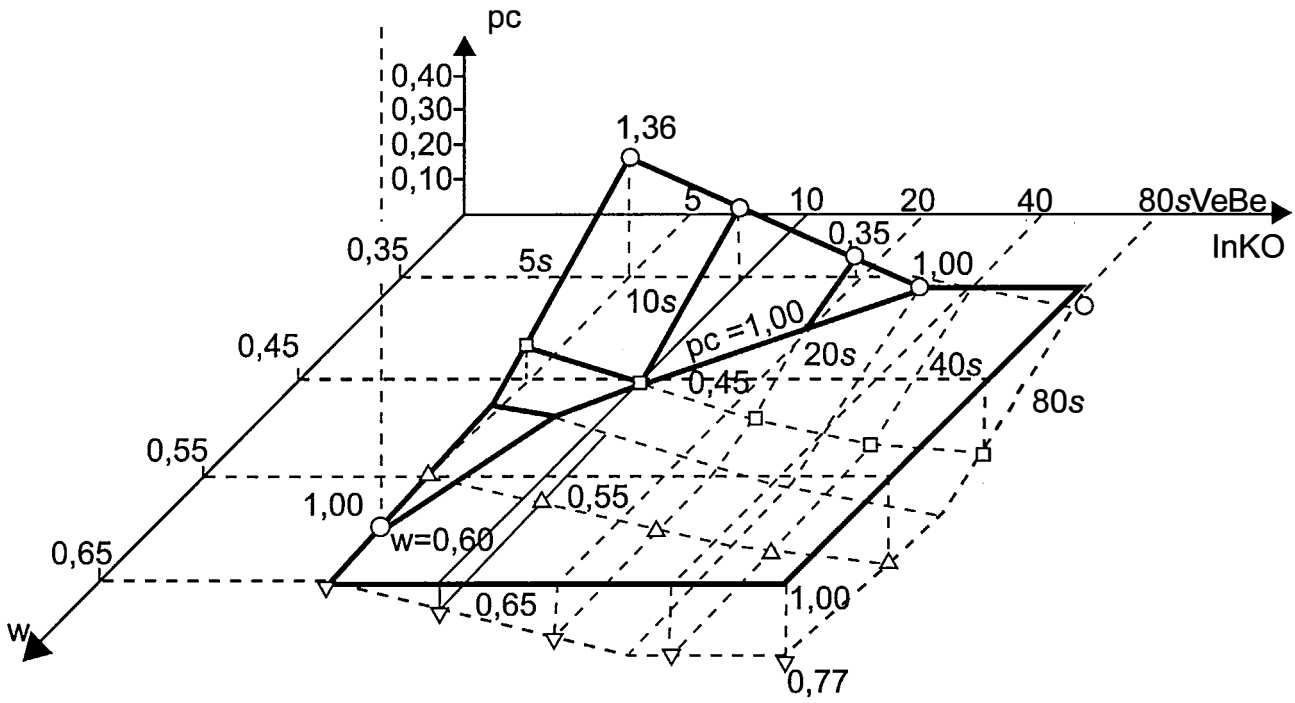



**Fig. 7.8 Diagrama volumétrico de los "excesos" de la pasta de cemento pc, en dependencia de w y KO**

## 7.6 Evaluación de los efectos técnico-económicos al emplear mezclas de concreto con una consistencia superior

Como efectos económicos principales del empleo de mezclas de concreto con una consistencia superior, tenemos los notables ahorros de cemento indicados en la figura 7.9, para los valores crecientes de KO. Valorando los resultados, encontramos que se puede determinar el ahorro asequible de cemento $\Delta c$, con una precisión satisfactoria para cualquier consistencia y *w* dadas, mediante el cálculo con las relaciones deducidas que se vienen utilizando.

En general, podemos comprobar que los ahorros de cemento derivados del aumento de la consistencia, cuando *w* corresponde con la resistencia requerida del concreto son muy acentuados y la reducción de los costos por 1 $m^3$ de concreto, que en relación con esto se produce, no sólo hace posible cubrir la amortización de los equipos correspondientes de compactación más potentes, sino también obtener otros ahorros adicionales de energía.

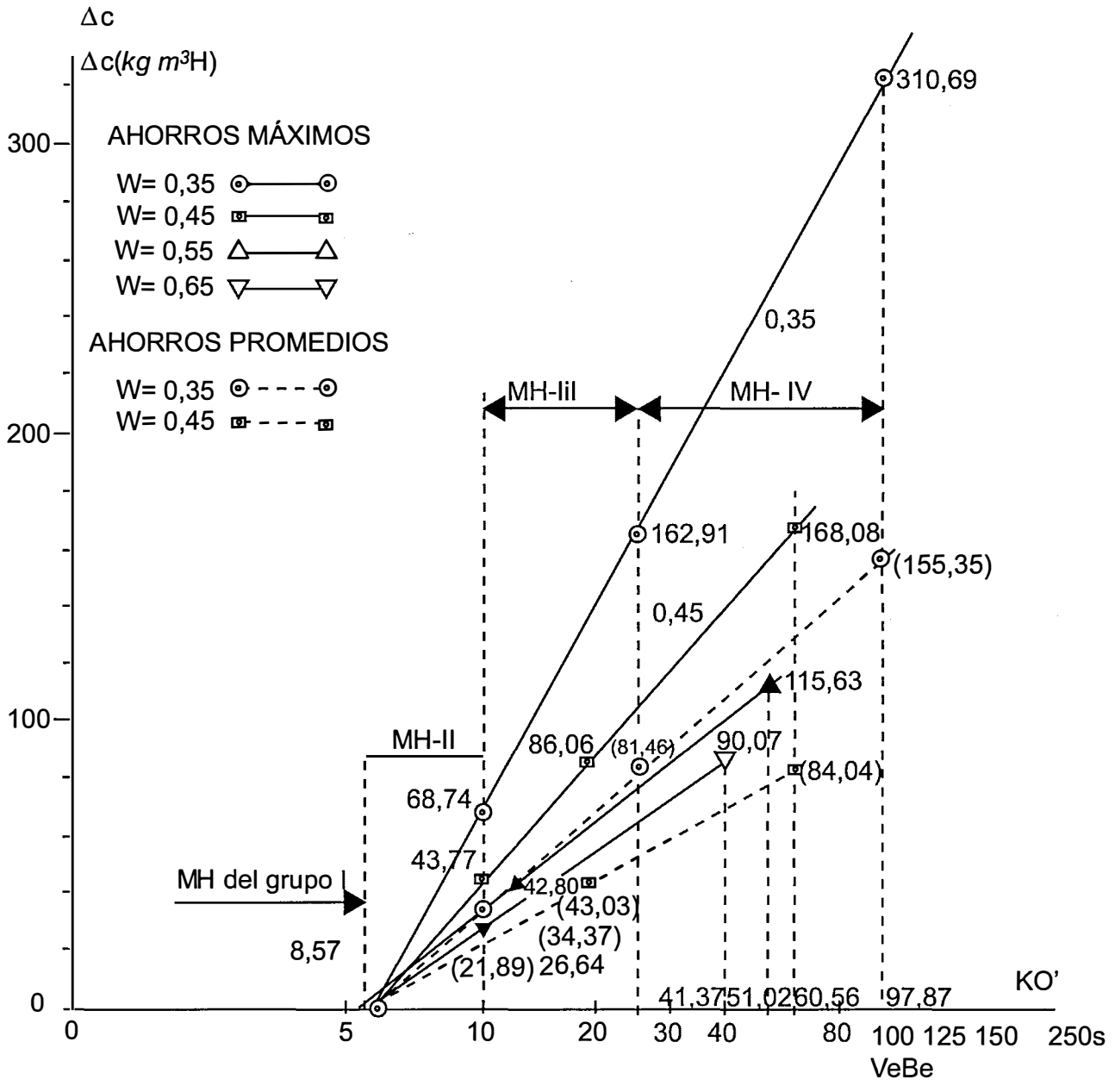



**Fig. 7.9. Ahorros de cemento (Δc en kg/cm³ de concreto), los cuales se pueden lograr por el aumento de KO, en dependencia de la consistencia ficticia $KO'_1$, para w (0,35; 0,45; 0,55; 0,65)**

Una realidad que no podemos pasar por alto es que los concretos de mezclas con KO superiores, poseen con las mismas *w*, mejores resistencias y propiedades, y presentan una menor contracción. Por ejemplo, las estructuras horizontales tienen una menor cantidad de flecha, sobre todo las permanentes.

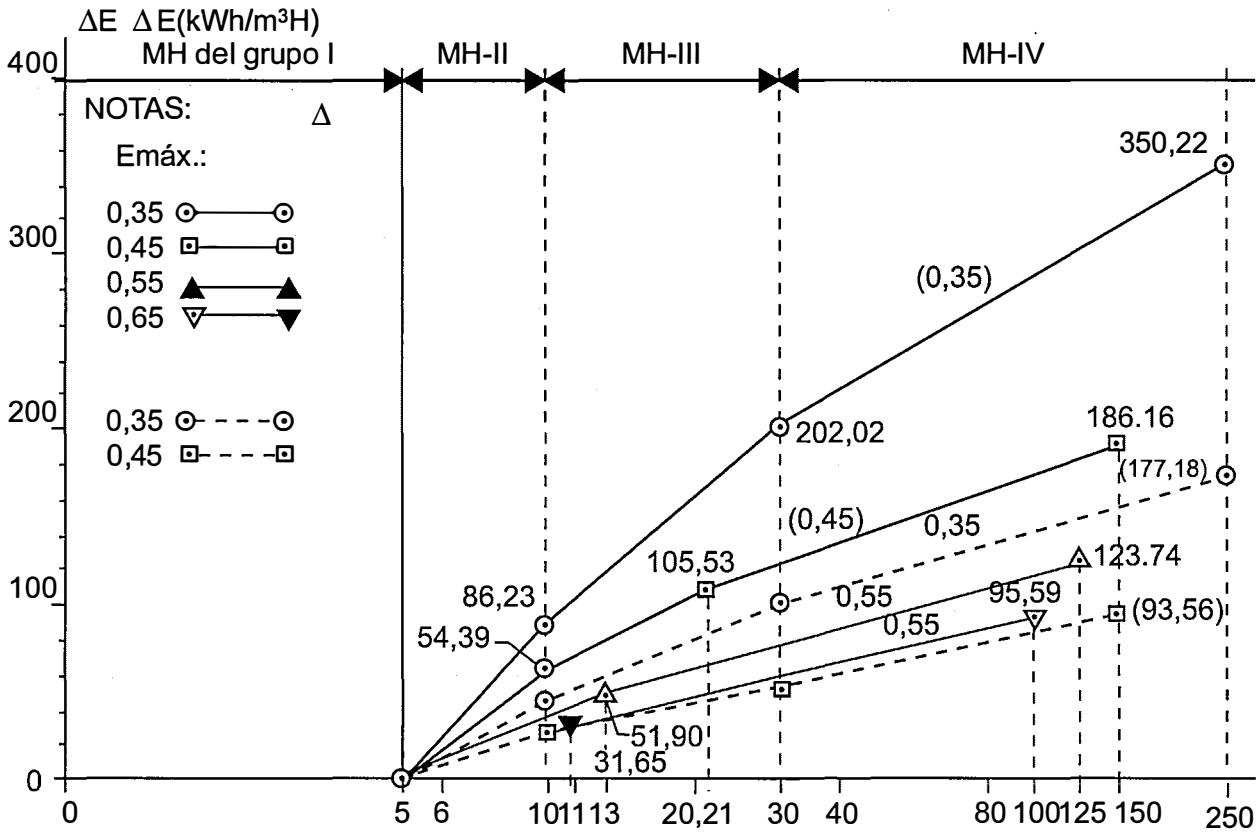



**Fig. 7.10 Ahorros aproximados de energía primaria (en kwh/m$^3$ (Δ E máx.), asequibles mediante el aumento de KO de las MH confeccionadas con el agregado ensayado, en dependencia de KO, para w (0,35; 0,45; 0,55; 0,65)**

De acuerdo con las condiciones existentes en nuestras plantas de prefabricado y en nuestras obras, y la costumbre de trabajar con mezclas de concreto muy blandas, recomendamos producir el cambio por pasos, en la forma siguiente:

1. Pasar de mezclas de concreto con plasticidad de 8 a 10 cm de revenimiento en el cono de Abrams, a mezclas de concreto con KO igual a 5 s VeBe, con lo cual se podrían obtener ahorros de cemento de hasta 50 Kg/m$^3$ de concreto producido, con *w* que va desde 0,35 a 0,65, aplicándosele correctamente la vibración dirigida con los equipos existentes.
2. Pasar de mezclas de concreto con KO de 5 s VeBe, a 10 s VeBe, compactándose en forma dirigida con los vibradores existentes en el país, así obtendríamos un ahorro promedio adicional de cemento de 45 Kg/m$^3$ de concreto producido.
3. Introducir vibradores, previamente estudiados, con la potencia adecuada, para pasar de KO de 10 s VeBe, a 30 s VeBe, con lo cual se puede obtener un ahorro de cemento, adicional a los anteriores, de 55 Kg/m$^3$ de concreto producido.

De la utilización de mezclas de concreto con KO superiores logramos ahorros indirectos de energía, la necesaria para la producción de cantidades de cemento ahorrado, estos ahorros se expresan en la figura 7.10, de acuerdo con el tipo de mezcla que se compacte.

También existe un ahorro de energía por la disminución del tiempo de vibración, al aplicársele ésta en forma dirigida a la masa de concreto.

## 7.7 Proceso de aplicación del método

Los estudios e investigaciones antes efectuados permiten formular un proceso de diseño de la composición de las mezclas de concreto, siempre que estén dados los valores de *w,* como resultante de la resistencia requerida del concreto y la consistencia KO, como resultante de la intensidad del equipo compactador, expresada por la aceleración efectiva de la vibración $A_e$.

El proceso puede resumirse en los pasos siguientes:

***Primer paso*:** Se determina la relación óptima de los agregados gruesos y finos mediante el método experimental del mismo autor (expresado en este libro) con el que se determinan los porcentajes de vacío y las superficies mínimas de las mezclas de agregados siguientes:

35:65; 40:60; 45:55; 50:50; 55:45; 60:40

La relación óptima será la que menor vacío tenga.

***Segundo paso:*** Partiendo de la mezcla óptima de los agregados que se emplearan, ésta tiene un vacío, que requerirá un volumen de pasta de cemento *pc* en $dm^3/m^3$ de concreto y se prefijan las cantidades de *pc* para 5 mezclas de prueba, cuyos volúmenes de pasta de cemento *pc*, serán del 4% menor en el orden decreciente que la que le antecede.

***Tercer paso:*** Determinadas las cantidades de pasta de cemento *pc*, se determina la composición de cada mezcla de concreto de prueba.

***Cuarto paso:*** Determinación de la consistencia KO real de cada mezcla de prueba, para lo que se calculará una cantidad de sólo 30 L de concreto para la realización de la prueba que se repetirá a cada una, dos veces y cuyos valores no pueden diferir uno del otro en un 15%. Sí los valores difieren uno de otro en un 15% es necesario repetir el ensayo y tener en cuenta la influencia que pueden ejercer los cambios de temperatura, por lo que se recomienda repetirlo dentro de los 15 minutos siguientes.

***Quinto paso***: Cálculo de la consistencia ficticia $KO_i$ con el uso de la ecuación (1) y (2) en dependencia del valor de la consistencia real KO obtenidas anteriormente y la *w* prefijada. Las tablas 7.1 y 7.2 del libro contienen los valores de $KO_i$ para diferentes combinaciones de *w* y KO de las dos ecuaciones.

***Sexto paso:*** Cálculo del volumen ficticio de pasta de cemento. Éste se realiza mediante la aplicación de la ecuación siguiente:

$$pc_i = KO \cdot pc$$

donde:

KO = consistencia real y

pc = volumen de pasta de cemento real.

***Séptimo paso:*** Cálculo del valor de la tangente ps. La tangente de la línea que representa el valor ficticio de la pasta de cemento para cada punto y su promedio representa la característica de los agregados usados, se determina por la ecuación:

$$ps = \frac{pc_i}{KO_i}$$

***Octavo paso:*** Una vez determinado el valor promedio de ps que representa la característica de los agregados, podemos calcular la dosificación de un concreto que se elaborará con estos agregados y que se dispone de un determinado equipo que puede compactar dicho concreto con una consistencia KO.

El siguiente paso es calcular primero la pc real para esa KO dada.

**EJEMPLO:**

Se desea determinar la composición de la mezcla de un concreto de Rh = 21 MPa, con una $w$ = 0.52 y se dispone un cilindro compactador-vibrador cuya aceleración permite compactar un concreto de 60 s VeBe.

***Primer paso:*** Se determinó en el laboratorio por método experimental la relación óptima de arena: grava de 45:55 y su porcentaje de vacío óptimo es de 32.6% lo que equivale a 326 $dm^3/m^3$ de pasta de cemento pc para el concreto fresco.

***Segundo paso:*** Determinada la cantidad de pc para la relación óptima, calculamos la cantidad de pc para las cinco mezclas de prueba acorde con lo prescrito:

$pc_1$ = 326,20 $dm^3/m^3$ de HF
$pc_2$ = 313,15 $dm^3/m^3$ de HF
$pc_3$ = 300,62 $dm^3/m^3$ de HF
$pc_4$ = 288,59 $dm^3/m^3$ de HF
$pc_5$ = 277,04 $dm^3/m^3$ de HF

***Tercer paso:*** Determinación de la composición de cada mezcla de concreto para su correspondiente pc. Calculémosla para pc = 326,20 $dm^3/m^3$.

Partiendo de la ecuación:

$$C = \frac{pc}{3{,}1 \cdot w + 1}$$

donde:

C = cantidad de cemento en volumen

pc = cantidad de pasta de cemento

w = relación agua-cemento

3,1 = peso específico del cemento

Cálculo de la cantidad de cemento para pc = 326,20 $dm^3/m^3$

$$C = \frac{pc}{3{,}1 \cdot w + 1} = \frac{326{,}20}{3{,}1 \cdot 0{,}52 + 1} = 124{,}8851 \ L/m^3$$

Cálculo de la cantidad de cemento en peso:

$$c = 124{,}8851 \cdot 3{,}1 = 387{,}1440 \ Kg/m^3 \ \text{de HF}$$

Cálculo de la cantidad de agua:

$$a = c \cdot w = 387{,}1440 \cdot 0{,}52 = 201{,}3149 \ Kg/m^3 \ \text{de HF}$$

Cálculo en volumen de los agregados:

$$G = 1000 - 20 - pc = 980 - 326{,}20 = 653{,}8000 \ L/m^3 \ \text{de HF}$$

Se supone el 2% de aire en el concreto que equivale a 20 L en 1000 L que tiene un $m^3$ de HF.

Cálculo en peso de los agregados:

$$g = 653{,}20 \cdot 2{,}56 = 1673{,}7280 \ Kg/m^3 \ \text{de HF}$$

Donde 2.56 peso específico corriente promedio de los agregados usados y cuya composición es:

Arena = 45% de 1673,7280 = 753,1776 $Kg/m^3$ de HF

Grava = 55% de 1673,7280 = 920,5504 $Kg/m^3$ HF

Los materiales para un $m^3$ de concreto fresco serán:

C = 386,1440 $Kg/m^3$

Ag = 201,3149 $Kg/m^3$

Ar = 753,171776 $Kg/m^3$

$G = 920{,}5504\ Kg/m^3$

Los materiales para un $m^3$ de concreto fresco (HF) serán:

$C = 386{,}1440\ Kg/m^3$

$Ag = 201{,}3149\ Kg/m^3$

$Ar = 753{,}1776\ Kg/m^3$

$G = 920{,}5504\ Kg/m^3$

Esta composición se debe calcular para cada pc.

Si estos son los materiales para un metro cúbico de HF compuesto por $(1000 - 20) = 980$ Litros, se podrá calcular la cantidad de materiales para 30 L de mezcla que usaremos en cada prueba por la simple regla de tres:

Para el cemento:

$$\frac{386{,}1440}{980} : \frac{x}{30} \therefore\ 11{,}82\ Kg/\text{ para 30 litros de HF}$$

Agua:

$$\frac{201{,}3149}{980} : \frac{x}{30} \therefore\ 6{,}1617\ Kg/\text{ para 30 litros de HF}$$

Arena:

$$\frac{753{,}1776}{980} : \frac{x}{30} \therefore\ 23{,}05 Kg/\text{ para 30 litros de HF}$$

Grava:

$$\frac{920{,}5504}{980} : \frac{x}{30} \therefore\ 28{,}19\ Kg/\text{ para 30 litros de HF}$$

Este cálculo se repite para cada dosificación que previamente se había calculado para los distintos pc y con ellas se hacen mezclas que nos permitan determinarle a cada una su consistencia real KO.

***Cuarto paso:*** Determinación de la real consistencia de cada mezcla calculada.

En el consistómetro VeBe se hace una primera determinación de KO de una parte de los 30 L de concreto confeccionado, después de esta mezcla

probada se mezcla con la cantidad sobrante, se homogeniza bien y se hace otra nueva determinación. Los valores obtenidos de ambas mediciones no pueden diferir uno de otro en el 15%, si así fuere, es necesario repetir el ensayo completo dentro de los 15 minutos siguientes.

De estos ensayos supongamos que hemos obtenido las consistencias reales siguientes:

$$KO_1 = 5{,}0 \text{ s VeBe}$$

$$KO_2 = 7{,}1 \text{ s VeBe}$$

$$KO_3 = 10{,}3 \text{ s VeBe}$$

$$KO_4 = 16{,}3 \text{ s VeBe}$$

$$KO_5 = 21{,}6 \text{ s VeBe}$$

***Quinto paso:*** Cálculo de la consistencia ficticia. Teniendo en cuenta que las mediciones de las KO reales han sido menor de 30 s VeBe, usaremos la ecuación (3.10).

$$KO_i = (1{,}825 - 0{,}917\ w)\ KO^{0{,}794+0{,}177\ w}$$

$$KO_i = (1{,}825 - 0{,}917 \cdot 0{,}52)\ KO^{0{,}8660}$$

$$KOi = (1{,}3482) \cdot KO^{0{,}8660}$$

$$KO_{i-1} = 5{,}4340 \text{ s VeBe para KO} = 5{,}0$$

Los demás valores resultaron:

$$KO_{i-2} = 7{,}3611 \text{ s VeBe}$$

$$KO_{i-3} = 10{,}1594 \text{ s VeBe}$$

$$KO_{i-4} = 15{,}0381 \text{ s VeBe}$$

$$KO_{i-5} = 19{,}2926 \text{ s VeBe}$$

***Sexto paso***: Cálculo del volumen ficticio de pc

$$pc_i = KO \cdot pc$$

$$pc_{i-1} = 5{,}0 \cdot 326{,}20 = 1631{,}0000$$

$$pc_{i-2} = 7{,}1 \cdot 313{,}15 = 2223{,}3650$$

$$pc_{i-3} = 10{,}3 \cdot 300{,}62 = 3096{,}3860$$

$$pc_{i-4} = 16{,}2 \cdot 288{,}59 = 4675{,}1580$$

$$pc_{i-5} = 21{,}6 \cdot 277{,}04 = 5984{,}0640$$

***Séptimo paso:*** Cálculo de la tangente ps para cada punto y determinación del valor promedio que representa la característica de los agregados.

$$ps_i = \frac{pc_i}{KO_i}$$

$$P_1 = \frac{1631{,}0000}{5{,}4340} = 300{,}1472$$

$$P_2 = \frac{223{,}3650}{7{,}3611} = 302{,}0424$$

$$P_3 = \frac{3096{,}3860}{10{,}1594} = 304{,}7804$$

$$P_4 = \frac{4675{,}1580}{15{,}0381} = 310{,}8875$$

$$P_5 = \frac{5984{,}0640}{19{,}2926} = 310{,}1740$$

$$ps = 1528{,}0315 \div 5 = 305{,}6063 \ \text{(promedio)}$$

$$ps = 305{,}6063$$

Si un valor ps difiere en más del 2.5 del valor promedio de ps obtenido, se elimina ese valor y ps se obtiene con el resto de los pci obtenidos.

El 2,5% de ps es 7,640, por lo que no hay valor que no cumpla lo exigido.

Confeccionemos un cuadro con los valores obtenidos.

| Mezclas | pc | KO | $pc_i$ | $KO_i$ | ps |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 326,20 | 5,0 | 1631,00 | 5,4340 | 300,1472 |
| 2 | 313,5 | 7,1 | 2223,36 | 7,3711 | 302,0424 |
| 3 | 300,62 | 10,3 | 3096,38 | 10,1594 | 304,7804 |
| 4 | 288,59 | 16,2 | 4675,15 | 15,0381 | 310,8875 |
| 5 | 277,04 | 21,6 | 5984,06 | 19,2926 | 310,1740 |
| | | | | | **ps = 305,6063** |

Calculemos ahora pc real para una KO de 60 s VeBe posible a compactar por el equipo disponible.

$$KO_i = 1{,}047 \cdot KO^{0.94} \text{ porque KO>30 s VeBe}$$

$$KO_i = 1{,}047 \cdot (60)^{0.94}$$

$$KO = 49{,}1370 \text{ s VeBe}$$

Determinemos el valor $pc_i$ (pasta ficticia) para esa $KO_i$

$$pci = ps \cdot KO_i$$

$$pc_i = 305{,}6063 \cdot 49{,}1370$$

$$pc_i = 15016{,}5843$$

Determinemos la cantidad real de pasta de cemento para la consistencia real de KO = 60 s VeBe.

$$pc = \frac{pc_i}{KO} = \frac{15016,584}{60} = 250,276\,L/m^3$$

Cálculo de la cantidad de cemento

$$C = \frac{pc}{3,1 \cdot w + 1} = \frac{250,276}{3,1 \cdot 0,52 + 1}$$

$$C = \frac{250,276}{2,612} = 95,8\ \ L/m^3 \text{ de concreto}$$

La dosificación resultante es:

$$c = 95,8 \cdot 3,1 = 296,98\ \ Kg/m^3 \text{ de HF}$$

$$Ag = 0,52 \cdot 296,98 = 154,42\ \ L/m^3$$

$$G = 1000 - 20 - 250,276 = 729,724$$

$$G = 729,724 \cdot 2,56 = 1868,0934$$

$$Arena = 1868,0934 \cdot 0,45 = 860,6\ \ Kg/m^3 \text{ de HF}$$

$$Grava = 1868,0934 \cdot 0,55 = 1027,4\ \ Kg/m^3 \text{ de HF}$$

El ejemplo elaborado es con datos supuestos que responden a objetivos didácticos.

## Tabla 7,1

**Tabla de consistencia ficticia $KO_i$ para valores de consistencia real (KO) menor e igual a 30 s VeBe $KO_i = (1{,}825 - 0{,}917w)KO^{0{,}794+0{,}177w}$**

| KO | W=0,30 | W=0,35 | W=0,40 | W=0,45 | W=0,50 | W=0,55 | W=0,60 | W=0,65 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,0 | 1,54990 | 1,50405 | 1,45820 | 1,4123S | 1,36650 | 1,32065 | 1,27480 | 1,22895 |
| 1,5 | 2.16745 | 2,11089 | 2.05390 | 1,99647 | 1.93860 | 1,88029 | 1.82153 | 1.76233 |
| 2,0 | 2,74970 | 2,68478 | 2,61895 | 2,55221 | 2,48455 | 2,41596 | 2,34644 | 2,27596 |
| 2,5 | 3,30704 | 3,23534 | 3,16225 | 3,08776 | 3,01185 | 2,93449 | 2,85568 | 2,77538 |
| 3,0 | 3,84530 | 3,76801 | 3,68883 | 3,60775 | 3,52474 | 3,43975 | 3,35277 | 3,26377 |
| 3,5 | 4,36820 | 4,28624 | 4,20190 | 4,11515 | 4,02595 | 3,93424 | 3,84000 | 3,74316 |
| 4,0 | 4,87829 | 4,79241 | 4,70368 | 4,61202 | 4,51738 | 4,41970 | 4,31892 | 4,21498 |
| 4,5 | 5,37744 | 5,28829 | 5,19578 | 5,09985 | 5,00041 | 4,89739 | 4,79071 | 4,6S029 |
| 5,0 | 5,86708 | 5,77519 | 5,67946 | 5,57979 | 5,47610 | 5,36828 | 5,25624 | 5,13989 |
| 5,5 | 6,34830 | 6,25415 | 6,15567 | 6,05275 | 5,94528 | 5,83315 | 5,71622 | 5,59440 |
| 6,0 | 6,82201 | 6,72601 | 6,62521 | 6,51945 | 6,40863 | 6,29260 | 6,17122 | 6,04435 |
| 6,5 | 7,28894 | 7,19146 | 7,08869 | 6,98049 | 6,86669 | 6,74714 | 6,62168 | 6,49015 |
| 7,0 | 7,74969 | 7,65107 | 7:54668 | 7,43636 | 7,31993 | 7,19721 | 7,06801 | 6,93216 |
| 7,5 | 8,20478 | 8,10531 | 7,99961 | 7,88748 | 7,76873 | 7,64315 | 7,51054 | 7,37068 |
| 8,0 | 8,65465 | 8,55461 | 8,44788 | 8,33422 | 8,21343 | 8,08528 | 7,94954 | 7,80596 |
| 8,5 | 9,09%8 | 8,99933 | 8,89181 | 8,77689 | 8,65433 | 8,52387 | 8,38526 | 8,23823 |
| 9,0 | 9,54020 | 9,43977 | 9,33171 | 9,21576 | 9,09167 | 8,95915 | 8,81792 | 8,66770 |
| 9,5 | 9,97652 | 9,87621 | 9,76783 | 9,65108 | 9,52569 | 9,39133 | 9,24771 | 9,09451 |
| 10,0 | 10,40887 | 10,30890 | 10,20040 | 10,08306 | 9,95657 | 9,82059 | 9,67480 | 9,51885 |
| 10,5 | 10,83751 | 10,73805 | 10,62962 | 10,51188 | 10,38450 | 10,24710 | 10,09934 | 9,94083 |
| 11,0 | 11,26262 | 11,16387 | 11,05569 | 10,93773 | 10,80963 | 10,67100 | 10,52146 | 10,36059 |
| 11,5 | 11,68441 | 11,58651 | 11,47875 | 11,36075 | 11,23212 | 11,09243 | 10,94128 | 10,77823 |
| 12,0 | 12,10304 | 12,00616 | I 1,89897 | 11,78109 | 11,65208 | 11,51151 | 11,35893 | 11,19387 |
| 12,5 | 12,51867 | 12,42294 | 12,31648 | 12,19887 | 12,06965 | 11,92835 | 11,77449 | 11,60759 |
| 13,0 | 12,93142 | 12,83699 | 12,73141 | 12,61421 | 12,48492 | 12,34304 | 12,18807 | 12,01947 |
| 13,5 | 13,34144 | 13,24844 | 13,14386 | 13,02722 | 12,89801 | 12,75570 | 12,59975 | 12,42961 |
| 14,0 | 13,74884 | 13,65740 | 13,55396 | 13,43800 | 13,30899 | 13,16638 | 13,00960 | 12,83806 |
| 14,5 | 14,15374 | 14,06397 | 13,96178 | 13,84663 | 13,71796 | 13,57518 | 13,41770 | 13,24489 |
| 15,0 | 14,55623 | 14,46824 | 14,56743 | 14,25321 | 14,12500 | 13,98218 | 13,82412 | 13,65017 |
| 15,5 | 14,95640 | 14,870:11 | 14,77098 | 14,65780 | 14,53017 | 14,38743 | 14,22892 | 14,05396 |

## Tabla 7.1 (Continuación)

**Tabla de consistencia ficticia $KO_i$ para valores de consistencia real (KO) menor e igual a 30 s VeBe $KO_i = (1{,}825 - 0{,}917w)KO^{0{,}794+0{,}177w}$**

| KO | W=0,30 | W=0,35 | W=0,40 | W=0,45 | W=0.50 | W=0,55 | W=0,60 | W=0.65 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 16,0 | 15,35435 | 15,27026 | 15,17252 | 15.06050 | 14,93355 | 14.79101 | 14.63216 | 14,45630 |
| 16,5 | 15,75015 | 15,66816 | 15,57217 | 15,46136 | 15,33521 | 15.19296 | 15,03389 | 14.85725 |
| 17,0 | 16,14388 | 16.06409 | 15,96983 | 15.86043 | 15,73518 | 15,59335 | 15,43416 | 15.25685 |
| 17,5 | 16.53562 | 16.45811 | 16.36574 | 16,25780 | 16.13356 | 15,99223 | 15.83303 | 15.65515 |
| 18.0 | 16.92543 | 16,85029 | 16,75990 | 16,65351 | 16,53036 | 16,38964 | 16.23054 | 16.05219 |
| 18,5 | 17,31336 | 17,24068 | 17.15235 | 17.04761 | 16,92565 | 16.78563 | 16,62672 | 16.44801 |
| 19,0 | 17,69949 | 17,62936 | 17,54317 | 17,44015 | 17,31947 | 17,18026 | 17,02162 | 16.84264 |
| 19.5 | 18.08387 | 18,01635 | 17,93239 | 17.83119 | 17,71187 | 17.57355 | 17,41528* | 17.23612 |
| 20,0 | 18.46655 | 18.40172 | 18,32007 | 18,22077 | 18,10290 | 17.96554 | 17,80773 | 17.62848 |
| 20,5 | 18.84757 | 18.78551 | 18,70625 | 18.60891 | 18.49257 | 18.35627 | 18.19901 | 18.01976 |
| 21,0 | 1952699 | 19.16777 | 19.09097 | 18,99568 | 18,88095 | 18.74578 | 18,58915 | 18.40998 |
| 21.5 | 19.60485 | 19.54854 | 19,47426 | 19.38110 | 19,26805 | 19,13410 | 18.97818 | 18.79917 |
| 22,0 | 19,98120 | 19,92785 | 19.85618 | 19,76521 | 19,65392 | 19,52126 | 19,36612 | 19.18735 |
| 22,5 | 20.35607 | 20,30576 | 20,23675 | 20,14805 | 20.03860 | 19.90728 | 19,75301 | 19.57456 |
| 23.0 | 20,72949 | 20,68229 | 20.61602 | 20.52964 | 20.42207 | 20,29221 | 20.13886 | 19.96082 |
| 23,5 | 21.10153 | 21.05748 | 20,99401 | 20.91002 | 20.80443 | 20,67607 | 20.52371 | 20.34615 |
| 24,0 | 21.47219 | 21.43137 | 21,37074 | 21,28922 | 21.18566 | 21,05886 | 20,90759 | 20,73056 |
| 24,5 | 21,84152 | 21.80397 | 21,74626 | 21.66726 | 21,56580 | 21.44064 | 21.29051 | 21.11409 |
| 25.0 | 22,20955 | 22,17534 | 22.12060 | 22,04417 | 21.94486 | 21.82141 | 21,67248 | 21,49675 |
| 25,5 | 22,57632 | 22,54549 | 22,49377 | 22.41999 | 22,32290 | 22,20120 | 22,05355 | 21,87854 |
| 26,0 | 22.94183 | 22,91444 | 22.86581 | 22,79472 | 22,69991 | 22,58004 | 22,43373 | 22.25954 |
| 26.5 | 23.30613 | 23,28224 | 23.23675 | 23.16840 | 23.07593 | 22,95795 | 22,81303 | 22.63971 |
| 27.0 | 23,66926 | 23,64889 | 23.60659 | 23,54106 | 23,45098 | 23,33493 | 23.19147 | 22,01910 |
| 27,5 | 24,03122 | 24.01445 | 23,97537 | 23,91271 | 23,82507 | 23,71102 | 23,56908 | 23,39769 |
| 28,0 | 24,39203 | 24.37890 | 24,34312 | 24,28336 | 24,19822 | 24.08624 | 23,94586 | 23,77552 |
| 28,5 | ?4,75174 | 24,74229 | 24,70984 | 24.65305 | 24,57046 | 24,46058 | 24,32184 | 24.15261 |
| 29,0 | 25,11036 | 25.10463 | 25,07558 | 25.02179 | 24.94180 | 24.83408 | 24.69703 | 24.52896 |
| 29,5 | 25,46791 | 25.46596 | 25,44033 | 25,38961 | 25,31227 | 25.20676 | 25.07145 | 24.90460 |
| 30.0 | 25,82443 | 25.82628 | 25,80412 | 25,75650 | 25.68188 | 25.57863 | 25.44510 | 25.57953 |

## Tabla 7.2

**Tabla de consistencia ficticia $KO_i$ para valores de consistencia real (KO) mayores de 30 s VeBe $KO_i = 1{,}047\,KO^{0.94}$**

| KO | KO' | KO | KO' | KO | KO' | KO | KO' |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30,5 | 26,01289 | 48,0 | 39,83946 | 65,5 | 53,35973 | 83,0 | 66,66225 |
| 31,0 | 26,41354 | 48,5 | 40,22943 | 66,0 | 53,74252 | 83,5 | 67,03967 |
| 31,5 | 26,81382 | 49,0 | 40,61916 | 66,5 | 54,12514 | 84,0 | 67,41695 |
| 32,0 | 27,21370 | 49,5 | 41,00867 | 67,0 | 54,50760 | 84,5 | 67,79409 |
| 32,5 | 27,61323 | 50,0 | 41,39792 | 67,5 | 54,88989 | 85,0 | 68,17112 |
| 33,0 | 28,01237 | 50,5 | 41,78694 | 68,0 | 55,27199 | 85,5 | 68,54800 |
| 33,5 | 28,41117 | 51,0 | 42,17575 | 68,5 | 55,65393 | 86,0 | 68,92474 |
| 34,0 | 28,80959 | 51,5 | 42,56430 | 69,0 | 56,03570 | 86,5 | 69,30138 |
| 34,5 | 29,20765 | 52,0 | 42,95264 | 69,5 | 56,41731 | 87,0 | 69,67786 |
| 35,0 | 29,60538 | 52,5 | 43,34076 | 70,0 | 56,79876 | 87,5 | 70,05421 |
| 35,5 | 30,00278 | 53,0 | 43,72865 | 70,5 | 57,18005 | 88,0 | 70,43046 |
| 36,0 | 30,39983 | 53,5 | 44,11633 | 71,0 | 57,56119 | 88,5 | 70,80656 |
| 36,5 | 30,79655 | 54,0 | 44,50377 | 71,5 | 57,94214 | 89,0 | 71,18253 |
| 37,0 | 31,19295 | 54,5 | 44,89103 | 72,0 | 58,32293 | 89,5 | 71,55837 |
| 37,5 | 31,58902 | 55,0 | 45,27804 | 72,5 | 58,70355 | 90,0 | 71,93408 |
| 38,0 | 31,98478 | 55,5 | 45,66486 | 73,0 | 59,08405 | 90,5 | 72,30966 |
| 38,5 | 32,38023 | 56,0 | 46,05146 | 73,5 | 59,46438 | 91,0 | 72,68511 |
| 39,0 | 32,77536 | 56,5 | 46,43787 | 74,0 | 59,84455 | 91,5 | 73,06046 |
| 39,5 | 33,17019 | 57,0 | 46,82406 | 74,5 | 60,22457 | 92,0 | 73,43570 |
| 40,0 | 33,56472 | 57,5 | 47,21005 | 75,0 | 60,60441 | 92,5 | 73,81081 |
| 40,5 | 33,95897 | 58,0 | 47,59583 | 75,5 | 60,98413 | 93,0 | 74,18578 |
| 41,0 | 34,35292 | 58,5 | 47,98145 | 76,0 | 61,36370 | 93,5 | 74,56062 |
| 41,5 | 34,74656 | 59,0 | 48,36683 | 76,5 | 61,74309 | 94,0 | 74,93539 |
| 42,0 | 35,13995 | 59,5 | 48,75202 | 77,0 | 62,12236 | 94,5 | 75,31000 |
| 42,5 | 35,53303 | 60,0 | 49,13703 | 77,5 | 62,50148 | 95,0 | 75,68449 |
| 43,0 | 35,92585 | 60,5 | 49,52185 | 78,0 | 62,88044 | 95,5 | 76,05888 |
| 43,5 | 36,31840 | 61,0 | 49,90645 | 78,5 | 63,25925 | 96,0 | 76,43313 |
| 44,0 | 36,71066 | 61,5 | 50,29089 | 79,0 | 63,63794 | 96,5 | 76,80726 |
| 44,5 | 37,10266 | 62,0 | 50,67513 | 79,5 | 64,01649 | 97,0 | 77,18129 |
| 45,0 | 37,49441 | 62,5 | 51,05919 | 80,0 | 64,39487 | 97,5 | 77,55522 |
| 45,5 | 37,88589 | 63,0 | 51,44305 | 80,5 | 64,77309 | 98,0 | 77,92905 |
| 46,0 | 38,27710 | 63,5 | 51,82676 | 81,0 | 65,15124 | 98,5 | 78,30267 |
| 46,5 | 38,66807 | 64,0 | 52,21027 | 81,5 | 65,52918 | 99,0 | 78,67627 |
| 47,0 | 39,05879 | 64,5 | 52,59359 | 82,0 | 65,90701 | 99,5 | 79,04974 |
| 47,5 | 39,44925 | 65,0 | 52,97675 | 82,5 | 66,28471 | 100,0 | 79,42307 |

# BIBLIOGRAFÍA


1. ACI – Bibliography No. 14 – History of Concrete 30 BC to 1922 AD.
2. Helene P. y Tercian P. Manual de Dosagem e Controle dos Concreto. PINI – Brasil. 1993.
3. Red DURAR Troconis O. y otros. Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de concreto armado. Venezuela – 1997.
4. Red Rehabilitar. Helene P. y otros. Manual de Rehabilitación de Estructuras de concreto. Sao Paulo – Brasil – 2003.
5. Fernández Canovas. M. Patología y Terapéutica del concreto armado. Madrid – España – 1994
6. Calavera J. Patología de estructuras de concreto Armado y Pretensado. INTEMAC – Madrid – España – 1996.
7. Andrade M. C. Inspección de obras dañadas por corrosión de armadura. Inst. Eduardo Torroja – España –1988.
8. Corvo F. La salinidad de la ambiente en Cuba y la región Caribeña. Su influencia sobre la corrosión de los metales. C. Habana – FECONS – 2001.
9. Leiro López A. Los procesos químicos de degradación del concreto. Metodología para su detección y estudio. CEDEX – Madrid – España 2001.
10. Leiro López A. Utilización de cementos adecuados con el fin de contribuir a la durabilidad del concreto. CEDEX – Madrid – España – 2001.
11. CONCRETO. Manuel Fernández Canovas. Colegio de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos. Madrid – 1996.
12. MEHTA P. K. y Monteiro P. J. Concreto – Estructura, Propiedades y materiales. IMCyC – México – 1998.
13. González Isabel G. Concreto de Alta Resistencia. INTEMAC – España. 1993.
14. Delibes Liniers A. Tecnología y Propiedades Mecánicas del concreto. INTEMAC – España – 1993.
15. Isaia, Geraldo C. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizaçoes. IBRACON – Brasil – 2005.

16. Malhotra V. M y Helene P. High – Performance CONCRETE internacional Conference. Recife, PE – Brasil – 2002.
17. AITCIN, P. C. Concreto de Alto Desempeño. PINI – Brasil – 2000.
18. Collepardi M. IL nuovo Calcestruzzo. Milano – Italia –2003.
19. ARREDONDO, F., *Dosificación de concretos*, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1969.
20. BERTHIER, J. et CALTAUX, C., "Essai de forme des granulate", *Bulletin de liaison des laboratoires routiers* (septembre-octobre 1966).
21. BERZIN, D. V. y. V. I. GALAKTIONOV, "Influencia de la forma de los agregados para la resistencia de los concretos y morteros", *Stroitelnye materialy*, No. 7, 1963.
22. BLOEM, D. L. and R. D. GAYMOR, "Effects of aggregate properties on strength of concrete", *ACI Journal*, No. 10, oct. 1963.
23. CAILLEUX, A., "Distinction des galets marins et fluviatiles", *Bull. Soc. Geol.*, France 5-1945.
24. Centro de Normas y Tipificación de la Construcción. Método de Dosificación del Concreto. La Habana, abril 1976.
25. DANTINE, R. et LONGUEVILLE P., "Etude critique des methodes de qualification des pierres utilices dans les constructions routieres", *Mémoires du C. E. R E S.*, Liége 1965.
26. FERET, R., "New Investigation of the effect of particles of concrete", *ACI Journal*, November 1938.
27. GOLDBECK, A. T., "An Investigation of the effect of flat and elongated pieces in crushed stone used as an aggregate in concrete pave ments", *The crushed stone journal,* may 1930.
28. GORDON, S., "Selección de la forma óptima de los agregados gruesos", *Stroitelnye materialy*, No. 2, 1958.
29. HANSEN, T. C., "Physical composition of hardened portland cement paste", *ACI. J.*, No. 5, 1970.
30. HORENI, J., *Vliv tvarové jakosti hrubého kameniva na pevnost a trvahlivist betonu*, Praha, září, 1968.

31. KAPLAN, M. F. and R. JONES, "The effect of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure". *Magazine of concrete research*, No 26, 1957.
32. KAPLAN, M.F., "The effect of the properties of coarse aggregates on the workability of Concrete", *Magazine of concrete research*, No. 29, aug. 1958.
33. __, "Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates", *ACI journal*, No. 11 may 1959.
34. Norma CSN 721172: Determinación de la granulometría y la forma de los granos de los agregados. Praha, 1967.
35. O'Reilly, V. A., *Influencia de las características de las formas de los agregados sobre la consistencia de las mezclas de concreto.* Habana, CTCM, 1981.
36. __, *Metodología para el diseño de la composición de las mezclas de concreto de una consistencia requerida*, Habana, CTCM, 1980.
37. __, *Método para el diseño de mezclas de concreto para las condiciones específicas de Cuba,* Habana, CTCM, 1980.
38. __, *Metodología para el diseño de la composición de las mezclas de concreto de una consistencia requerida*, Habana, CTCM, 1981.
39. PAVLIK, DOLEZEL Y FIEDLER, Tecnología del concreto, Praha, 1973.
40. PAVILLON, A., "Gravillons routiers, cubicité et qualite", Annales de I. T. B. T. P., Mars 1974.
41. PENTLAND, A., "A method of measuring the angularity of sand. Proc. And trans", *Royal Society of Canada*, 3-21-1927.
42. PLAGEMANN, W., *Der einfluss der kornform auf das poren volumen und dieverdichtungswilligkeit stetig zusamengesetzter zuschlagstoffge menge, Baustoffindustrie*, 1996.
43. POWERS, T. C., *The properties of fresh concreto*, J. Willey and Sons, New York, 1968.
44. PYE, W. D., "Sphericity determinations of pebbles and sand grains". *Journal of Sedimentary Petrology*, 11 august 1941.

45. RIHA, J., "Algunas nuevas posibilidades de la producción del concreto con el ahorro máximo del cemento", Ciclo de Conferencias sobre Tecnología del concreto, La Habana, 1976.
46. __, "Dependencia entre la composición y la consistencia de las mezclas de concreto", Conferencias Científicas de concreto 80 en Tratanska Lomnica, RSCH, 1980.
47. RIHA, J. y J. FILOUS, "Influencia de la consistencia de la mezcla de concreto para las resistencias iniciales del concreto con fraguado acelerado por calor", *Stavivo*, Praha, 1970.
48. RIHA, J. y J. STORK, *Tecnología de los elementos prefabricados*, Praha, 1964.
49. __, *Tecnología de elementos de construcción I,* Praha, 1964.
50. RILEY, N. A., "Projection sphericity", Journal of sedimentary, petrology, (august 1941).
51. SCHAFFNER, H. J., *Abnahme des böschungswinkels und setzungen von kornhaufwerken bei dinamischer auregung in abhängigkeit ven den kornund gefügeeigenschaften mitteilungen der forschungsanstalt für schiffahrt, wasser- und grundbau*, Berlin, Heft 15, 1965.
52. SHALOTMANN, B., "Uber der Einfluss der Zementleimmengeaut die Betondruckfestigheit", *Beton*, No. 10, october 1964.
53. TICHELL, F. G., "The examination of fragmental rocks", *Standfort University Press*, 1931.
54. WADELL, H., "Volume, shape and roundness of rock particles", *Journal of Geology*, 40, 1932.
55. __, "Sphericity and roundness of rock particles", *Journal of Geology, 41, 1933.*
56. __, "Shape determination of large sedimental rock fragments", *Pan American Geologist*, 61, 1934.
57. __, "Some new sedimentation formulas", *Physics*, 5, 1934.
58. __, "Volume, Shape and roundness of quartz particles", *Journal of Geology*, 43, 1935.
59. WALKERS, S. and C. E., PPROUDLEY, "Effects of flat particles on concrete making properties of gravel. ASTM – Proceedings, june 1929.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C.
Insurgentes sur 1846, Col. Florida,
C. P. 01030, Delegación Álvaro Obregón, México, D.F.
Tels: (55) 5322 5740 con 30 líneas
Fax (55) 5322 5745
www.imcyc.com
imcyc@mail.imcyc.com