METHOD FOR THE ALEATORY SAMPLING AND STATISTICAL EVALUATION OF MECHANICAL STRENGTHS AND DIMENSIONAL VARIATIONS OF THE CONCRETE PAVING BLOCKS [1] [2]

Juan J. HOWLAND
Dr., Eng., Adjunct Professor
INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO "JOSÉ A. ECHEVERRÍA"
Staff Researcher
MINISTRY OF THE BUILDING INDUSTRY OF CUBA
La Habana, Cuba

SUMMARY

Within a system of quality assurance - QA in the manufacture of concrete paving blocks, it is essential to establish the statistical evaluation of its fundamental properties, which is the only scientific way of establishing, for a given manufacturing process, the variations of these properties and their control.

In this paper, step by step and by means of examples, a method is indicated to random sampling the manufactured concrete paving blocks, with the help of a table of aleatory numbers, that constitute a basic step so that the laws of statistics can fully work in the data analysis.

The study of the result dispersions is introduced in the tests for the determination of dimensions of the lot of concrete paving blocks and its mechanical strengths, on a statistical basis, and, specifically, it is explained how the calculation is made of the characteristic flexural strength (module of rupture) obtained from the lot and the evaluation of the internal deviation of the test (within test) that allows to establish the quality and stability of the preparation procedures, conservation and testing of the samples.

The importance of the use of the characteristic strength obtained from the lot is clearly established, in the adjustment of the cement content of the mixture, starting from the concept of the cement performance.

1. INTRODUCTION

With reason, statistics have been defined as the "Science to make decisions in the presence of uncertainty", as on the long road of investigation and technological innovation, we are constantly confronted with uncertainty, and even though it cannot be stated that statistics, in its current state of development, gives the solution to all situations that involves insecurity, every time more and more methods are developed that give the basis for the analysis of these situations with a scientific base, in a logical and systematical manner.

The quality control -QC of the manufacture of concrete paving blocks demands, in the contemporary practice, the use of statistics to obtain a rational evaluation, sufficiently complete and scientifically based of the quality of the production. Statistics is a tool that, well applied, allows to arrive at results that are difficult to disagree with; but when it is not correctly used, when the basic requirements of its application are not met and the laws that its evaluation demands are not respected, it can lead, inevitably, to erroneous and wild results.

In the field of concrete technology, many years of practice have shown that in the evaluation of its mechanical strength, with great precision, the Normal frequency distribution or Gaussiana are fulfilled, which is very advantageous, as this distribution has unquestionable qualities. Nevertheless, it is important to explain that the manufacture of concrete paving blocks is not like the production of ready-mixed concrete, as it is not probable that you can count with a high number of samples to evaluate the acceptance or rejection of a lot. Generally, in this case, it will be imperative to use the Student "t" distribution, specially conceived for small samples.

2. THE ALEATORY SAMPLING OF THE MANUFACTURE OF CONCRETE PAVING BLOCKS

Within the framework of statistical application to the manufacture of concrete products, very few specialists do not know that the sampling should be aleatory; however, and unfortunately, very few specialists really do an aleatory sampling, due to, basically, not having the knowledge of what aleatory implies in the selection of samples. An aleatory sampling cannot be based on ones own decision, or on that of the specialists of QC.

Statistical methods manage data obtained from observations, in form of measurements or counting, always starting from the observation source, with the object of reaching conclusions with respect to said source of observation. The set of observations taken from a source are called sample, while that source is called population, as the statistical meth-

---

1 The editors used the International System of Units (SI) in this book of Proceedings, and the comma ", " as the Decimal Marker. Each paper is presented first in English and then in Spanish, with the Tables and Figures, in both languages, placed in between. The References are included only in the original version of each paper.

2 This is a translation of the original paper written in Spanish, made by Soraya Falah, not submitted to the approval of the author.

ods allow to obtain conclusions of populations starting from samples.

To obtain a sample of a population, so as to obtain valid conclusions for said population, is not as easy as it appears. So that the sample is really representative, it has to be taken at random, that is, in an aleatory manner.

A sample is at random, when each of the members of the population has the same chance of being chosen. For this, the method used for the sampling has to assure the independence and the characteristics of constant probability of the sample. For that effect, the tables of aleatory numbers are constructed in such a manner that they provide samples that have these properties, so that the samples obtained using the tables of aleatory numbers are considered as random samples. A table of aleatory numbers can be found in any elemental text on statistics.

The aleatory sampling leads, early on, to the models of probable distribution. There are many examples of failures that have take place with the use of probability methods, due to the fact that conclusions have been extracted based on samples that have not been taken on a random basis, and it is that the concessions at random generate very complicated and serious problems.

2.1 METHODOLOGY FOR THE ALEATORY SAMPLING OF PAVING BLOCKS

2.1.1 DEFINE THE MAGNITUDE OF THE LOT OF PAVING BLOCKS

To effect an aleatory sampling, it is indispensable to establish the magnitude of the concrete paving block population that is being sampled. In this field, the population is defined as a lot.

The lot of concrete paving blocks is the quantity of elements manufactured with the same or very similar concrete mix and component materials of the concrete, that are manufactured with the same equipment and technological conditions and that are submitted for judgment at the same time.

Be it, for example, the manufacture of a lot of concrete paving blocks for one customer, that is made up of a total of 131 840 units.

2.1.2 ESTABLISH THE SAMPLING FREQUENCY

The minimum frequency of the sampling of the manufacture of concrete elements normally is defined in the technical-normative documents.

In the specific case of a lot of the indicated magnitude, generally it is established to obtain a minimum sample of 6 units for each 50 000 manufactured units. These 6 units are destined for the testing of mechanical strength at 7 d and 28 d and for the testing of dimensional control.

2.1.3 DIVIDE THE LOT INTO SUB-LOTS

Where each sub-lot will be represented by one sample of nine units by age. In the case of the example indicated in 2.1.1, the quantity of the sub-lots shall be:

$$\frac{131\,840}{50\,000} = 2{,}63 \approx 3 \text{ sub-lots}$$

The two first sub-lots will be composed of 50 000 units and the third will be of 31 840.

Notwithstanding, the best measure of physical units to be able to take a sample is the pallet that is made up of the paving blocks. Let us say that in this case a typical pallet is made up of 600 paving blocks, then each of the sub-lots will have:

$$\text{The first two: } \frac{50\,000}{600} = 83 \text{ pallets}$$

$$\text{The third one: } \frac{31\,840}{600} = 53 \text{ pallets}$$

2.1.4 WORK OUT THE SAMPLING PLAN

With the help of a Table of aleatory numbers, so many aleatory numbers from the Table are selected as sub-lots have been defined. In the case of the example indicated, the first three aleatory numbers with four decimal figures are selected, which are shown in Table 2.

As can be seen in Table 2, the result of the aleatory number by the number of pallets composed by the sub-lot, allows us to clearly establish the pallet that is to be sampled.

The pallets that should be sampled, or from which a sample of 6 units shall be taken, establishes the sampling plan, which has been based on the positive action of a Table of aleatory numbers, which makes the sample completely aleatory.

3. METHODOLOGY FOR THE STATISTICAL EVALUATION OF MECHANICAL STRENGTHS OF THE CONCRETE PAVING BLOCKS

The first step to be able to analyze the results of mechanical strengths of the products is rooted in being able to discriminate if said results truly respond to the same population of values, with the possibility of being statistically evaluated.

The values of one population form part of the results of the testing of the mechanical strengths that correspond to the same type of product (that is, the same product code), for the elements that are worked out with the same raw materials (cement, aggregates, water, pigments, etc.), or, at least, with materials that are appreciably equal, under the same manufacturing conditions, and that have received the same curing treatment. Furthermore, the evaluation must also correspond to strength values evaluated at the same age (7 d or 28 d), and to the elements that

have been tested with the same methods and under identical laboratory conditions and preferably by the same testers.

In the specific case of compression strength, it is essential to know if same refer to the net area or the gross area of the element, as shown in the Figure 1. Although the most recent technical norms make reference to the net area of the element, it cannot be avoided that in the daily practice, when referring to the compression strength, the majority of persons refer to the gross area and not to the net area.

With the total list of the figures of mechanical strength that characterize a specific lot of products, and that constitute a statistical sample, the corresponding analysis is carried out, which includes the following steps.

Before proceeding to carry out the testing of mechanical strengths, each element (paving block) of the sample is weighed on a scale with an accuracy of no less than 1 g and having taken the measurements (length, width and depth) with a caliper (vernier) and the results of these tests shall be adequately recorded.

The weighing of the paving blocks is a very useful data when evaluating localized decreases of the mechanical strengths, as when this decrease coincides with the decrease in weight (density) of same, the causes can be focalized in the conformation parameters of the paving block in the machines, or in a change of density of the raw materials, specially of sand.

3.1 CARRY OUT THE CALCULATION OF THE AVERAGE STRENGTH

The average strength is determined by:

$$R_{bm} = \frac{\sum R_{bi}}{n}$$

Where:

R_{bi}: Individual values of the mechanical strength of he elements
n: Number of values of the evaluated sample

Let us see, for example, a series of values of strength to flexotraction at 28 d of the irregular concrete paving block (see Figure 2) with a depth of 80 mm :

4,8; 5,0; 5,1; 4,9; 4,8; 5,1; 4,7; 5,0; 4,9 MPa

The mean strength to flexotraction R_{bm} shall be:

R_{bm} = 4,92 MPa

3.2 CALCULATE THE STANDARD DEVIATION OF THE LOT

The standard deviation of the lot is determined by the following formula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (R_{bm} - R_{bi})^2}{n - 1}}$$

In the above example, it is easy to calculate that:

S = 0,139 MPa

3.3 DETERMINING THE CHARACTERISTIC STRENGTH (R_{bk}) OF THE EVALUATED SAMPLE

The characteristic strength is a value of mechanical strength on a statistical basis and is associated to a determined probability that the mechanical strength of the population of paving blocks is given in said figure.

As in the case of the manufacture of concrete paving blocks, the quantity of evaluated samples will almost never become large, it deals with small samples and therefore it will be necessary to apply the Student "t" distribution, as an adjustment to the normal distribution.

Figure 3 shows a drawing of the Student "t" distribution, as well as the position of the mean and characteristic mechanical strength, for a 90% of probability that the value "t" is really assumed in the calculation. In the conventional Tables of the Student "t" distribution that can be found in any elemental statistics textbook, the value of associated probability in this case equals 0,1; that is, 10 % that the value of "t" surpasses the value indicated in the Table, which means, that a limit value of 5 % is being assumed in each of the symmetric branches of the Student distribution.

The characteristic strength is determined then by:

$R_{bk} = R_{bm} - t\,S$

Where the value of the Student "t" distribution is determined by the corresponding Table for an associated probability of 90 % or 95 %, as is the case, and for a degree of freedom "n", that is in function of the number of the values of the sample, that is:

v = n - 1

For the values indicated in the previous example:

R_{bk} = 4,92 - 1,8595 (0,139) = 4,66 MPa

That means, that the characteristic strength to flexotraction of the concrete paving blocks lot of the previous example was of 4,66 MPa.

The lot is accepted by the results of its testing of mechanical strength only if the characteristic strength obtained, through the evaluated samples, is higher or equal to the specified strength established by the norms or standards of technical instructions or the requirements of the customer.

For example, in the Colombian INCONTEC Norm NTC 2 017, it is established that the strength to flexotraction in the middle point of the concrete paving blocks (rupture module) shall not be less than 4,5 MPa for the mean of the sample and it is fur-

thermore indicated that no individual value shall be lower than 3,6 MPa. Of course, should a value be indicated, not for the average of the sample, but for the characteristic strength obtained, the second requirement would not be necessary, as the calculated strength on a statistical basis has a certain implicit defective fraction, which in this case has been indicated as being no higher than 10 %.

It is very important to develop trend curves of the mechanical strengths of the concrete paving blocks, for each particular type of product, across time, where the characteristic strength values are indicated of the different manufactured lots. These trend graphics, also called quality charts, allow the manufacturer to identify on time those moments that can be critical in the processes, as is the case of the decreasing trends of the mechanical strengths, in which an influence can be exerted by some concrete lots of raw materials or some inadequate parameters of the manufacturing process. In the trend Graphs, as shown in Figure 4 for the case of the strength to flexotraction of the concrete paving blocks, in a highlighted color (generally red) shows the strength specified in the norms, standard documents of control or requirements of the customer.

3.4 CALCULATE THE WITHIN TEST

The Within Test allows us to evaluate the quality by which all procedures and preparation methods of the samples are carried out, as well as the quality of execution of the tests of mechanical strengths. In the specific case of the determination of the compression strength, a very important factor is the quality of the execution of the capping (placement of the capping), and great influence is also exerted by the uniformity of the curing, the correct placement of the samples in the press machine (centering) and the attachments in the case of flexotraction strength, the speed of the application of the load, the role of the lab technician, etc.

The principle of the internal coefficient of variation of the test is that the elements extracted from one same sample, that present good conditions (appearance), that have received the same curing treatment, logically should present minimal dispersions in the tests for mechanical strengths, unless minimum technical requirements have been violated in the execution conditions of the tests between one or another element tested.

In the same aforementioned example, for the 9 values of strength to flexotraction of the concrete paving block, the values indicated correspond to 3 samples of 3 concrete paving blocks, that have been placed in consecutive order, that is:

Sample 1: 4,8; 5,0; 5,1
Sample 2: 4,9; 4,8; 5,1
Sample 3: 4,7; 5,0; 4,9

The scope of each of these samples is calculated. The scope is defined as the difference between the highest value and the lowest value of the sample, that is:

Sample 1: R1 = 0,3 MPa
Sample 2: R2 = 0,3 MPa
Sample 3: R3 = 0,3 MPa

The average scope of the lot is then determined:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{m} R_i}{m} \quad \text{(MPa)}$$

And the typical internal deviation of the test by:

$$S_1 = \frac{1}{d_2} \times \bar{R} \quad \text{(MPa)}$$

Where:

$1/d_2$: Constant factor which depends on the number of averaged elements in the series. In our case, each series is composed of three elements, for which $1/d_2 = 0,5907$

Finally, the within test is calculated by:

$$V_1 = \frac{S_1}{R_{bm}} \times 100 \ (\%)$$

The figure obtained from the internal coefficient of variation of the test is compared with the figures indicated in Table 3, which has been extracted from the Report of the Committee 214 of the American Concrete Institute and which indicates the degree of control that is associated to a determined figure obtained from said coefficient.

In the Example developed, $\bar{R} = 0,3$; then the Typical Internal Deviation of the Test shall be:

S_1 = 0,1771 MPa and the internal coefficient of variation of the Test shall be: V1 = 3,59%, which gives a very good result.

3.5 READJUSTMENT OF THE CEMENT CONSUMPTION IN THE CONCRETE MIXES STARTING FROM THE RESULTS OBTAINED FOR MECHANICAL STRENGTHS

The value of the characteristic strength obtained, due to its statistical value, allows to obtain conclusions for adapting of the cement consumption of the mixes, starting from the concept of cement yield.

Take for example a case in which the characteristic strength to compression of a lot of concrete paving blocks has a value of 5,2 MPa, when the strength specified in the valid norm is 4,5 MPa and that the consumption of cement employed in the mixture is 300 kg per cubic meter of concrete. In this case the cement yield Rc is equal to:

$$R_c = \frac{300}{5,2} = 57,69 \text{ kg/MPa}$$

That is, that 57,69 kg of cement are used for each MPa of strength to flexotraction of the paving blocks.

If the strength to be obtained is 4,5 MPa, then the adequate consumption of cement for this Yield shall be:

C = 4,5 x 57,69 = 259,6 >> 260 kg

That is, that for this concept on a theoretical scale 40 kg of cement could be saved per m^3, which is a respectable figure. In a first approximation it is not recommended to reduce so much, but an initial consumption of 280 kg could be assumed per cubic meter, that is, a reduction of 20 kg in the first approximation.

4. THE EVALUATION OF DIMENSIONAL VARIATIONS OF THE CONCRETE PAVING BLOCKS

The dimensional variations of the paving blocks constitute very important elements for QC of same and the study of its systematical behavior allows us to sight, with sufficient time, the wear or dimensional variations of the molds, for its correction, repair or substitution.

In the standardization documents, technical instructions or customer requirements, the dimensional variations of the paving blocks is separately established for the dimensions in the plant (length and width) and depth. For example, the Colombian Norm NTC 2 017 establishes a variation of ± 2 mm for the dimensions in plant and ± 3 mm for depth.

In the case of irregular formed paving blocks as shown in Figure 2, the measurement of the dimensions in plant (length and width), is more difficult due to the need to establish the registered rectangle, which establishes in fact an additional difficulty in the accuracy of the measurement if we compare it to the paving blocks that have regular geometric forms (rectangles or squares). In this sense is justified a small investment in the manufacture of an attachment, in the form of a pattern, that allows the determination with greatest possible accuracy of the dimensions of said registered rectangle.

It is very important that the dimensions of the paving blocks, taken from the same aleatory samples (representative of a manufactured lot), are kept in a statistical record similar to the trend graph of the mechanical strengths indicated in Figure 4. In this way, more than three values with increasing tendency, even though they do not yet surpass the normative requirements of quality, indicate a systematic wear of the molds or even a decrease of the parameters of conformation of the paving blocks, that may require preventive measures to avoid an even greater wear.

5. CONCLUSIONS

The experiences stated on the application of statistical methods for the evaluation of the mechanical strengths and the dimensional variations of the manufacture of concrete paving blocks on a scientific basis, try to fill a certain void that is seen in the international standard on this problem.

On the other hand, the unquestionable validity of the information level that these evaluations can give to correct, on time, and as a preventive measure, some modifications of parameters and incorrectness in the process of manufacturing paving blocks, is very important for the reduction of costs and increase of quality and therefore, should be carefully taken into account.

0,4751	0,2091	0,6985	0,8636	0,3027	0,3454	0,4609	0,4000	0,5102	0,2364
0,6936	0,3182	0,3410	0,5636	0,9831	0,3364	0,0893	0,9726	0,2471	0,3182
0,6112	0,2909	0,5937	0,3727	0,7159	0,6181	0,4552	0,1545	0,5693	0,5636
0,7930	0,8908	0,6912	0,4545	0,3609	0,6454	0,9363	0,1000	0,8583	0,4545
0,0652	0,4818	0,0318	0,7272	0,8915	0,2636	0,8183	0,5636	0,3093	0,1818
0,4604	0,2091	0,1303	0,8090	0,6442	0,3182	0,9401	0,5091	0,9144	0,9181
0,0167	0,3727	0,6893	1,0000	0,1904	0,1818	0,5967	0,9726	0,7944	0,5909
0,0077	0,6181	0,3886	0,7817	0,6074	0,8908	0,7547	0,2636	0,8725	0,2636
0,6777	0,8636	0,0312	0,8090	0,7522	0,9181	0,0101	0,2909	0,0135	0,8908
0,8010	0,8362	0,0166	0,5909	0,7041	0,8362	0,2896	0,8362	0,2044	0,7272

0,8011	0,6454	0,2517	0,2909	0,7399	0,8080	0,3115	0,4000	0,4797	0,9454
0,6718	0,6454	0,2763	0,8090	0,9328	0,5009	0,3377	0,8362	0,0866	0,4272
0,5567	0,1818	0,0314	0,4818	0,1507	0,4000	0,5661	0,1545	0,2889	0,1273
0,0481	0,2636	0,9560	1,0000	0,3087	0,3181	0,4742	0,6727	0,4783	0,7000
0,4266	0,9454	0,4622	0,4000	0,7513	0,1818	0,9483	0,4000	0,0304	0,9181
0,3941	0,5636	0,1327	0,7817	0,6469	0,4818	0,2951	0,6451	0,8945	0,4515
0,9876	0,7545	0,6922	0,5636	0,2536	0,7545	0,0441	0,1273	0,4499	0,2081
0,6313	0,7272	0,0010	0,1273	0,1488	0,1818	0,9143	0,1273	0,9209	0,9454
0,6803	0,3182	0,7609	0,2091	0,9411	0,5636	0,5723	0,8362	0,5827	0,5636
0,7955	0,9726	0,5957	0,1000	0,0571	1,0000	0,6069	0,4000	0,4560	0,8908

Table 1. Organized list of aleatory numbers with four decimal fractions.
Tabla 1. *Lista ordenada de números aleatorios con cuatro fracciones decimales.*

ALEATORY NUMBERS FOR EACH SUB-LOT *NÚMEROS ALEATORIOS PARA CADA SUBLOTE*	PALLET PER SUB-LOT *ESTIBAS POR SUBLOTE*	PALLETS CHOSEN AT RANDOM IN THE SUB-LOT *ESTIBAS SELECCIONADAS AL AZAR EN EL SUBLOTE*	PALLET THAT MUST BE SAMPLED *ESTIBA QUE DEBE SER MUESTREADA*
Column 1 ***Columna 1***	**Column 2** ***Columna 2***	**Column 1 x Column 2** ***Columna 1 x Columna 2***	**Column 3** ***Columna 3***
0,4751	83	40	**40**
0,6936	83	58	58 + 83 = **141**
0,6112	54	33	33 + 83 + 83 = **199**

Table 2. Selection of the pallets to sample.
Tabla 2. *Selección de las estibas a muestrear.*

TYPE OF OPERATION *TIPO DE OPERACIÓN*	DEGREE OF CONTROL / *GRADO DE CONTROL*				
	EXCELLENT *EXCELENTE*	VERY GOOD *MUY BUENO*	GOOD *BUENO*	ACCEPTABLE *ACEPTABLE*	DEFICIENT *DEFICIENTE*
Field control or production plant control *Control de campo o de instalación productora*	< 3,0	3,0 a 4,0	4,0 a 5,0	5,0 a 6,0	> 6,0

Table 3. Degree of control associated to the values of the internal coefficient of variation of the "within test" for the field level of the producing installation [3].
Tabla 3. *Grado de control asociado a los valores del coeficiente de variación interno del ensayo para nivel de* campo o instalación productora [3].

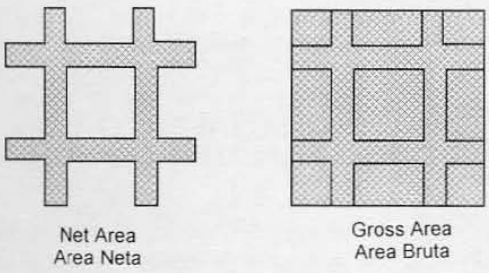


Figure 1. Net Area and Gross Area of the section of the concrete pving grid [6].
Figura 1. *Area Neta y Area Bruta de la sección de un Gramoquín de concreto [6].*

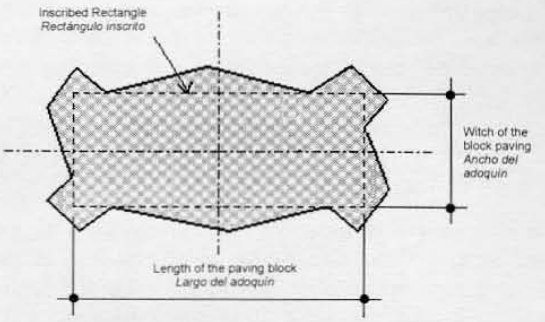


Figure 2. Dimensional parameters of concrete paving block [5].
Figura 2. *Parámetros dimensionales de un adoquín de concreto [5].*

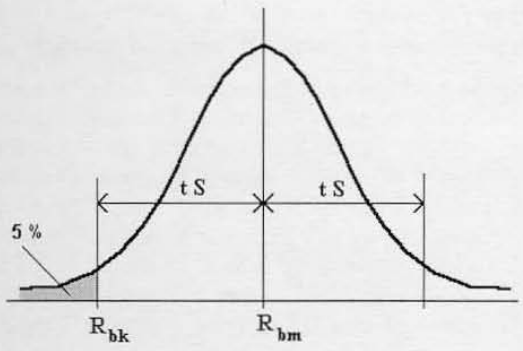
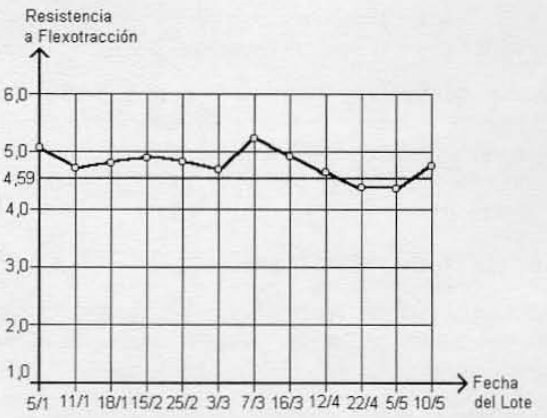


Figure 3. Diagram of the Student "t" distribution showing the Characteristic Strength for 90 % of the associated probability.
Figura 3. *Esquema de Distribución "t" de Student mostrando la Resistencia Característica para un 90% de probabilidad asociada.*



Date of the Lot / *Fecha del Lote* - Flexural Strenth / *Resistencia a la Flexotracción.*

Figure 4. Trend graph of the flexural strength of the concrete paving block's lots.
Figura 4. *Gráfico de tendencia de las resistencias a flexotracción de los lotes de Adoquines.*

MÉTODO PARA EL MUESTREO ALEATORIO Y LA EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS Y LAS VARIACIONES DIMENSIONALES DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO [3] [4]

Juan J. HOWLAND
Dr., Ing., Profesor Titular Adjunto
INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO "JOSÉ A. ECHEVERRÍA"
Investigador Titular
MINISTERIO DE LA CONSTRUCCIÓN DE CUBA
La Habana, Cuba

RESUMEN

Dentro de un sistema de aseguramiento de la calidad en la producción de adoquines de concreto, es esencial el establecimiento de la evaluación estadística de sus propiedades fundamentales, que es la única forma científica de establecer, para un proceso dado de producción, las variaciones de estas propiedades y su control.

3 Esta es la versión original de esta ponencia.
4 Los editores utilizaron el Sistema Internacional de Unidades (SI) en estas Memorias, y la coma "," como Puntuación Decimal. Cada ponencia se presenta primero en Inglés y luego en Español, con las Tablas y Figuras, en ambos idiomas, colocadas en medio de ellas. La Bibliografía se incluye sólo en la versión original de cada ponencia.

En esta ponencia se indica, paso a paso y mediante ejemplos concretos, un método para efectuar el muestreo al azar de los adoquines producidos, con el auxilio de una tabla de números aleatorios, que constituye un paso fundamental para que puedan funcionar a plenitud las leyes de la estadística en el análisis de los datos.

Se introduce el estudio de las dispersiones de los resultados en los ensayos de determinación de las dimensiones del Lote de adoquines y de sus resistencias mecánicas, sobre una base estadística y, muy especificamente, se explica cómo se efectúa el cálculo de la resistencia característica a flexotracción (módulo de rotura) obtenida del lote y la evaluación de la desviación interna del ensayo (within test), que permite establecer la calidad y estabilidad de los procedimientos de preparación, conservación y ensayo de las muestras.

Queda claramente establecida la importancia del empleo de la resistencia característica obtenida del Lote, en el ajuste de los contenidos de cemento de la mezcla, a partir del concepto de rendimiento del cemento.

1. INTRODUCCIÓN

Con razón se ha definido la estadística como la "Ciencia de tomar decisiones en presencia de la incertidumbre", pues en el largo camino de la investigación y la innovación tecnológica, constantemente nos enfrentamos con la incertidumbre, y si bien no se puede afirmar que la estadística, en su estado actual de desarrollo, da solución a todas las situaciones que impliquen inseguridad, cada vez se desarrollan métodos nuevos que proporcionan el fundamento para el análisis de estas situaciones con una base científica, de una forma lógica y sistemática.

El control de la calidad de la producción de adoquines de concreto exige, en la práctica contemporánea, el empleo de la estadística para lograr una evaluación racional, lo suficientemente completa y científicamente fundamentada, de la calidad de la producción. La estadística es una herramienta de trabajo que, bien aplicada, permite aportar resultados muy difíciles de discrepar; pero cuando no se emplea correctamente, cuando se incumplen los requerimientos básicos de su aplicación y no se respetan las leyes que exigen su evaluación, puede conducir, inevitablemente, a resultados erróneos y disparatados.

En el campo de la tecnología del concreto, la práctica de muchos años ha demostrado que, en la evaluación de sus resistencias mecánicas, se cumple, con mucha precisión, la distribución de frecuencias Normal o Gaussiana, lo que es muy ventajoso, pues esta distribución tiene bondades incuestionables. No obstante, es importante aclarar que la producción de adoquines y bloques de concreto no es como la producción de concreto premezclado, pues es poco probable que se pueda contar con un elevado número de muestras para evaluar la aceptación y rechazo de un lote. Generalmente en este caso será imprescindible utilizar la distribución "t" de Student, concebida especialmente para muestras pequeñas.

2. EL MUESTREO ALEATORIO DE LA PRODUCCIÓN DE ADOQUINES DE CONCRETO

En el marco de las aplicaciones de la estadística a la fabricación de productos de concreto, muy pocos especialistas desconocen que el muestreo ha de ser aleatorio; sin embargo, y desafortunadamente, muy pocos especialistas hacen realmente un muestreo aleatorio, debido, fundamentalmente, al desconocimiento cabal de los que implica la aleatoriedad en la selección de las muestras. Un muestreo aleatorio no se puede basar en la propia decisión, o en la decisión de los especialistas de control de calidad.

Los métodos estadísticos manejan datos obtenidos de observaciones, en forma de mediciones o conteo, siempre a partir de una fuente de observaciones, con el objetivo de arribar a conclusiones respecto a dicha fuente de observaciones. Al conjunto de observaciones tomado de una fuente se le denomina muestra, en tanto que a la fuente se le denomina población, por lo que los métodos estadísticos permiten obtener conclusiones acerca de poblaciones a partir de muestras.

Obtener una muestra de una población, de manera que puedan extraerse conclusiones válidas para dicha población, no es tan sencillo como parece. Para que la muestra sea realmente representativa, tiene que ser extraída al azar, o sea, de forma aleatoria.

Un muestreo es al azar, si cada uno de los miembros de la población tiene igual probabilidad de ser elegido. Para ello, el método empleado para el muestreo tiene que asegurar la independencia y las características de probabilidad constante de la muestra. A tal efecto, las tablas de número aleatorios se construyen de manera que arrojen muestras que posean estas propiedades, por lo que las muestras obtenidas utilizando tablas de números aleatorios se consideran como muestras al azar. Una Tabla de números aleatorios se puede encontrar en cualquier texto elemental de estadística.

El muestreo aleatorio conduce, fácilmente, a los modelos probabilísticos de distribución. Existen muchísimos ejemplos de fracasos ocurridos con el empleo de los métodos probabilísticos, debido a que se han extraído conclusiones basadas en muestras que no han sido tomadas al azar, y es que las concesiones al azar generan problemas muy complicados y serios.

2.1 METODOLOGÍA PARA EL MUESTREO ALEATORIO DE LOS ADOQUINES

2.1.1 DEFINIR LA MAGNITUD DEL LOTE DE ADOQUINES

Para efectuar el muestreo aleatorio es indispensable

establecer el alcance de la población de adoquines de concreto que se va a muestrear. En este campo la población se define como un lote.

El lote de adoquines de concreto, es la cantidad de elementos producidos con igual o muy semejante dosificación y materiales componentes del concreto, que se confecciona con los mismos equipos y condiciones tecnológicas y que se somete a juicio de una sola vez.

Sea, por ejemplo, la producción de un lote de adoquines de concreto para un cliente, que consta de un total de 131 840 unidades.

2.1.2 ESTABLECER LA FRECUENCIA DE MUESTREO

La frecuencia mínima de muestreo de la producción de elementos de concreto normalmente está definida en los documentos técnico - normalizativos.

En el caso concreto de un lote de la magnitud indicada, por lo general se establece obtener una muestra mínima de 6 unidades por cada 50 000 unidades producidas. Estas seis unidades estarán destinadas para los ensayos de resistencias mecánicas a 7 d y 28 d y los para ensayos de control dimensional.

2.1.3 DIVIDIR EL LOTE EN SUB-LOTES

Donde cada sub-lote estará representado por una muestra de nueve unidades por edad. En el caso del ejemplo indicado en 2.1.1, la cantidad de sub-lotes será:

$$\frac{131\,840}{50\,000} = 2{,}63 \approx 3 \text{ sub-lotes}$$

Los dos primeros sub-lotes serán de 50 000 unidades y el tercero de 31 840 unidades.

No obstante, la mejor medida de unidades físicas para poder sacar una muestra es la estiba que se conforma con los adoquines. Digamos que en este caso una estiba típica cuenta con 600 adoquines, luego cada uno de los sub-lotes contará con:

Los dos primeros: $\frac{50\,000}{600} = 83$ estibas

El tercero: $\frac{31\,840}{600} = 53$ estibas

2.1.4 ELABORAR EL PLAN DE MUESTREO

Con el auxilio de una Tabla de números aleatorios se seleccionan tantos números aleatorios de la Tabla como sub-lotes se hayan definido. En el caso del ejemplo indicado se seleccionan los tres primeros números aleatorios con cuatro cifras decimales, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tal como se puede observar en la Tabla 2, el producto del número aleatorio por el número de estibas con que cuenta el sub-lote permite establecer claramente la estiba que hay que muestrear.

Las estibas que deben ser muestreadas, o sea a las que se les extraerá una muestra de 6 adoquines, establecen el plan de muestreo, que ha tomado como base la acción positiva de una Tabla de números aleatorios, lo que hace la muestra totalmente aleatoria.

3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO

El primer paso para poder efectuar el análisis de los resultados de resistencias mecánicas de los productos radica en poder discriminar si dichos resultados responden realmente a una misma población de valores, con posibilidad de ser evaluada estadísticamente.

Forman parte de una misma población de valores, los resultados de ensayos de resistencias mecánicas que corresponden a un mismo tipo de producto (o sea un mismo código de producto), para los elementos que sean elaborados con las mismas materias primas (cemento, agregados, agua, pigmentos, etc.) o, al menos, con materiales que sean sensiblemente iguales, en las mismas condiciones de producción, y que hayan recibido el mismo tratamiento de curado. Además de ésto, la evaluación tiene que corresponder también a valores de resistencia evaluados a la misma edad (7 d ó 28 d) y que los elementos hayan sido ensayados con los mismos métodos e idénticas condiciones de laboratorio, y preferiblemente por los mismos laboratoristas.

En el caso concreto de las resistencias a compresión, es indispensable conocer si las mismas se refieren al área neta o al área bruta del elemento, tal como se indica en la Figura 1. Si bien las normas técnicas más recientes hacen referencia al área neta de los elementos, no puede obviarse que en la práctica cotidiana, al referirse a la resistencia a compresión la mayoría de las personas se refieren al área bruta y no a la neta.

Con el listado total de los valores de resistencias mecánicas que caracterizan a un determinado lote de productos, y que constituyen una muestra estadística, se procede a efectuar el análisis correspondiente, que incluye los siguientes pasos.

Antes de proceder a efectuar los ensayos de resistencias mecánicas, cada elemento (adoquín) de la muestra es pesado en una báscula con precisión no menor de 1 g y medidas sus dimensiones (largo, ancho y espesor) con un Pie de Rey (nonio) y los resultados de estos ensayos serán adecuadamente anotados.

El pesaje de los adoquines es un dato muy útil cuando se evalúan caídas localizadas de las resistencias mecánicas, pues cuando esta caída coinciden con un descenso del peso (densidad) de los mismos, las causas pueden estar localizadas en los parámetros de conformación del adoquín en las máquinas, o en un cambio de densidad de las materias primas, especialmente la arena.

3.1 EFECTUAR EL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA MEDIA (PROMEDIO)

La resistencia media se determina por:

$$R_{bm} = \frac{\sum R_{bi}}{n}$$

Donde:

R_{bi} : Valores individuales de resistencia mecánica de los elementos.
n: Número de valores de la muestra evaluada.

Veamos, por ejemplo, una serie de valores de resistencia a flexotracción (módulo de rotura) a 28 días del adoquín irregular de concreto (ver la Figura 2) con espesor de 80 mm:

4,8; 5,0; 5,1; 4,9; 4,8; 5,1; 4,7; 5,0; 4,9 MPa

La resistencia media a flexotracción R_{bm} será:

R_{bm} = 4,92 MPa

3.2 CALCULAR LA DESVIACIÓN TÍPICA DEL LOTE

La desviación típica del lote se determina por la siguiente expresión:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (R_{bm} - R_{bi})^2}{n - 1}}$$

En el ejemplo anteriormente indicado, es fácil calcular que:

S = 0,139 MPa

3.3 DETERMINAR LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA (R_{BK}) DE LA MUESTRA EVALUADA

La resistencia característica es un valor de resistencia mecánica con base estadística y está asociada a una determinada probabilidad de que la resistencia mecánica de la población de adoquines se encuentre en dicho valor.

Como en el caso de la producción de adoquines de concreto la cantidad de muestras evaluadas prácticamente nunca llegará a ser grande, se trata de muestras pequeñas y por lo tanto será necesario aplicar la distribución "t" de Student, como ajuste de la distribución normal.

En la Figura 3 se muestra un esquema de la distribución "t" de Student, así como la posición de las resistencias mecánicas media y característica, para un 90% de probabilidad de que el valor de "t" sea realmente asumido en el cálculo. En las Tablas convencionales de la distribución "t" de Student que pueden ser encontradas en cualquier libro de estadística elemental, el valor de probabilidad asociado en este caso equivale a 0,1; o sea el 10% de que el valor de "t" supere el valor indicado en la Tabla, lo que quiere decir que se está asumiendo un valor límite del 5% en cada una de las ramas simétricas de la distribución de Student.

La resistencia característica se determina entonces por:

$R_{bk} = R_{bm} - t\,S$

Donde el valor de "t" de la distribución de Student se determina por la Tabla correspondiente para una probabilidad asociada del 90 % o el 95 % según el caso y para un grado de libertad "n", que está en función del número de valores de la muestra, o sea:

v = n - 1

Para los valores indicados en el ejemplo expuesto con anterioridad:

R_{bk} = 4,92 - 1,8595 (0,139) = 4,66 MPa

O sea que la resistencia característica a flexotracción del lote de adoquines de concreto del ejemplo citado fue de 4,66 MPa.

El lote se acepta por los resultados de sus ensayos de resistencia mecánica sólo si la resistencia característica obtenida, a través de las muestras evaluadas, es mayor o igual que la resistencia especificada por las normas o instrucciones técnicas o por los requisitos establecidos por el cliente.

Por Ejemplo en la Norma Colombiana ICONTEC NTC 2 017, se establece que la resistencia a flexotracción en el punto medio del adoquín (módulo de rotura) no será menor de 4,5 MPa para la media de la muestra y se indica además que ningún valor individual será menor de 3,6 MPa. Por supuesto que si se indicara un valor, no para la media de la muestra, sino para la resistencia característica obtenida, la segunda exigencia no sería necesaria, pues la resistencia calculada con base estadística lleva implícita una cierta fracción defectuosa, que en este caso se ha indicado no superior al 10%.

Es muy importante desarrollar curvas de tendencia de las resistencias mecánicas de los adoquines, por cada tipo en particular de producto, con el tiempo, donde se vayan indicando los valores de resistencias características de los diferentes lotes de producción. Estos gráficos de tendencia, también denominados "cartas de calidad" (quality charts), le permiten al productor identificar a tiempo aquellos momentos que pueden resultar críticos en los procesos, como es el caso de las tendencias decrecientes en las resistencias mecánicas, en lo que pueden estar incidiendo algunos lotes concretos de materias primas o algunos parámetros inadecuados del proceso de producción. En los gráficos de tendencia, como el mostrado en la Figura 4 para el caso de la resistencia a flexotracción de los adoquines, se indica en color destacado (generalmente rojo) la resistencia especificada en las normas, documentos normativos de control o exigencias del cliente.

3.4 CALCULAR LA DESVIACIÓN INTERNA DEL ENSAYO (WITHIN TEST)

La desviación interna del ensayo (within test) permite evaluar la calidad con que se efectúan todos los

procedimientos y métodos de preparación de las muestras, así como la calidad de realización de los ensayos de resistencias mecánicas. En el caso concreto de determinación de las resistencias a compresión, un factor muy importante es la calidad de realización del refrentado (colocación del capping), e influye mucho también la uniformidad en la realización del curado, la correcta ubicación de los elementos en la prensa (centrado) y de los aditamentos en el caso de la resistencia a flexotracción, la velocidad de aplicación de las cargas, el papel del laboratorista, etc.

El principio del coeficiente de variación Interno del ensayo, es que los elementos extraídos de una misma muestra, que presenten buenas condiciones (apariencia), que han recibido el mismo tratamiento de curado, deben presentar lógicamente dispersiones mínimas en los ensayos de resistencias mecánicas, a menos que se hayan violado requerimientos técnicos mínimos en las condiciones de realización de los ensayos entre uno y otro elemento ensayado.

En el mismo ejemplo indicado con anterioridad, para los 9 valores de resistencia a flexotracción del adoquín, los valores indicados corresponden a 3 muestras de 3 adoquines cada una, que han sido colocados en orden consecutivo, o sea:

Muestra 1: 4,8 ; 5,0 ; 5,1
Muestra 2: 4,9 ; 4,8 ; 5,1
Muestra 3: 4,7 ; 5,0 ; 4,9

Se calcula el recorrido de cada una de estas muestras. El recorrido se define como la diferencia entre el valor mayor y el menor de la muestra, o sea:

Muestra 1: R1 = 0,3 MPa
Muestra 2: R2 = 0,3 MPa
Muestra 3: R3 = 0,3 MPa

Se determina entonces el recorrido medio (promedio) del lote:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{m} R_i}{m} \quad (MPa)$$

Y la desviación típica Interna del ensayo por:

$$S_1 = \frac{1}{d_2} \times \bar{R} \quad (MPa)$$

Donde:

$1/d_2$: Constante que depende del número de elementos promediados en la serie. En nuestro caso cada serie consta de tres elementos, para lo cual $1/d_2 = 0,5907$.

Finalmente se calcula el coeficiente de variación interno del ensayo (within test) por:

$$V_1 = \frac{S_1}{R_{bm}} \times 100 \quad (\%)$$

El valor obtenido del coeficiente de variación interno del ensayo se compara con los valores indicados en la Tabla 3, que ha sido extraída del Informe del Comité 214 del American Concrete Institute y que indica el grado de control que está asociado a un determinado valor obtenido de dicho coeficiente.

En el Ejemplo desarrollado, $\bar{R} = 0,3$; entonces la desviación Típica Interna del Ensayo será:

$S_1 = 0,1771$ MPa y el coeficiente de variación Interno del Ensayo será: $V_1 = 3,59$ %, que resulta muy bueno.

3.5 REAJUSTE DE LOS CONSUMOS DE CEMENTO EN LAS DOSIFICACIONES A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE RESISTENCIAS MECÁNICAS

El valor de resistencia característica obtenida, por su valor estadístico, permite obtener conclusiones para la adecuación de los consumos de cemento en las dosificaciones, a partir del concepto de rendimiento del cemento.

Sea por ejemplo un caso en que la resistencia característica a compresión de un lote de adoquines tenga un valor de 5,2 MPa, cuando la resistencia especificada por la norma vigente es de 4,5 MPa y que el consumo de cemento empleado en la dosificación sea de 300 kg por m^3 de concreto. En este caso el rendimiento del cemento Rc es igual a:

$$R_c = \frac{300}{5,2} = 57,69 \text{ kg/MPa}$$

O sea que se está empleando 57,69 kg de cemento por cada MPa de resistencia a flexotracción del adoquín.

Si la resistencia a obtener es 4,5 MPa, entonces el consumo de cemento adecuado para este rendimiento será:

$C = 4,5 \times 57,69 = 259,6 >> 260$ kg

O sea que por este concepto, a escala teórica podrían ahorrarse 40 kg de cemento por metro cúbico, que resulta una cifra respetable. En una primera aproximación no es recomendable reducir tanto, pero podría asumirse un consumo inicial de 280 kg por metro cúbico, o sea una reducción de 20 kg en la primera aproximación.

4. LA EVALUACIÓN DE LAS VARIACIONES DIMENSIONALES DE LOS ADOQUINES DE CONCRETO

Las variaciones dimensionales de los adoquines constituyen elementos muy importantes del control de calidad de los mismos y el estudio de su comportamiento sistemático permite avistar, con suficiente tiempo, sobre los desgastes o variaciones dimensionales de los moldes de conformado, para su corrección, reparación o sustitución.

En los documentos normativos, instrucciones técnicas o requisitos del cliente, las variaciones di-

mensionales de los adoquines se establecen separadamente para las dimensiones en planta (largo y ancho) y en profundidad (espesor). Por ejemplo en la Norma Colombiana NTC 2 017 se establece una variación de ± 2 mm para las dimensiones en planta y de ± 3 mm para la de profundidad.

En el caso de los adoquines de forma irregular, como el mostrado en la Figura 2, la medición de las dimensiones en planta (largo y ancho), se dificulta por la necesidad de establecer el rectángulo inscrito, lo que establece de hecho una dificultad adicional en la exactitud de la medición si lo comparamos con los adoquines de formas geométricas regulares (rectangulares o cuadrados). A tal efecto se justifica una pequeña inversión en la fabricación de un aditamento, a modo de plantilla que permita determinar con la mayor exactitud posible las dimensiones de dicho rectángulo inscrito.

Es muy importante que las dimensiones de los adoquines, tomadas de las mismas muestras aleatorias (representativas de un lote de producción), se lleven en un récord estadístico similar al gráfico de tendencia de las resistencias mecánicas indicado en la Figura 4. De esta forma, más de tres valores en tendencia creciente, aunque no sobrepasen aún los requerimientos normativos de calidad, indican un desgaste sistemático de los moldes o acaso una disminución en los parámetros de conformación del adoquín, que pueden requerir la toma de medidas preventivas para evitar un desastre mayor.

5. CONCLUSIONES

Las experiencias expuestas sobre la aplicación de métodos estadísticos para la evaluación de las resistencias mecánicas y las variaciones dimensionales de la producción de adoquines de concreto sobre una base científica, tratan de complementar un cierto vacío que se aprecia en la normativa internacional sobre esta problemática.

Por otra parte, la validez incuestionable del nivel de información que estas evaluaciones aportan para corregir con tiempo, con carácter preventivo, algunas modificaciones de parámetros e incorrecciones en el proceso de producción de los adoquines, tiene una gran importancia en la reducción de los costos y en la elevación de la calidad y por lo tanto deben ser tenidas bien en cuenta.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. HOWLAND J.J. Experiencias en la creación de un sistema de aseguramiento de la calidad para la producción de bloques y adoquines de concreto. // En : Cemento-Hormigón. -- Vol.67, No.766 (Dic, 1996); P.1479-1492.
2. FREUND J.E. Estadística elemental moderna. -- 1.ed. -- La Habana : Pueblo y Educación, 1979. -- P.v.
3. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 214. Práctica recomendada para la evaluación de la resistencia del hormigón. -- Detroit : ACI, 1977. -- P.v. -- Reaprobado en 1983.
4. HOWLAND J.J. y URRUTIA F. Método para la determinación de la resistencia característica a la compresión, la evaluación de la uniformidad y la aceptación o rechazo de los hormigones. // En : Cemento-Hormigón. -- Vol.64, No.718 (Abr, 1993); P.440-450.
5. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Adoquines de Hormigón. -- Santa Fe de Bogotá : ICONTEC, 1983. -- 4P. -- (ICONTEC, NTC 2 017).
6. _____. Rejillas de concreto (gramoquines) para pavimentación y control de erosión. -- Santa Fe de Bogotá : ICONTEC, 1996. -- 8P. -- (ICONTEC, NTC 3 766).