Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 3 (1948)

Artikel: Composition granulométrique des bétons: granulométrie optimum, meilleure combinaison courante, détermination pratique

Autor: Vallette, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-4007

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 11.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

IIa1

Composition granulométrique des bétons

Granulométrie optimum. Meilleure combinaison courante. Détermination pratique

Kornzusammensetzung des Betons

Beste Kornzusammensetzung

Übliche beste Zusammensetzung aus zwei Komponenten. Praktische Bestimmung

Composition of concrete

The best composition of concrete. The usual best composition of two components

Practical definition

R. VALLETTE

Chef de la Division des Ouvrages d'Art de la S. N. C. F., Paris

La composition des bétons a fait l'objet de nombreuses études et nous avons indiqué [1] comment, après les avoir analysées, nous avons été amenés à reprendre complètement la question et à la mettre au point. Nous avons abouti à des granulométries et à des règles de composition conduisant au béton de plus haute qualité; nous avons étendu ces règles aux combinaisons binaires d'éléments courants tout venant de carrière, attendant, pour les sanctionner, les résultats des applications de chantier. Disposant aujourd'hui de ces résultats, nous pouvons donner ici, après de nombreuses déterminations, les méthodes pratiques conduisant aux meilleurs bétons de chantier.

Notre exposé comprendra : un résumé des lois et conditions régissant la composition des bétons; l'indication des granulométries et des compositions idéales; l'indication des méthodes de détermination de ces compositions avec leur application aux matériaux couramment livrés, permettant d'obtenir les meilleures combinaisons binaires possibles; enfin, la relation des résultats obtenus.

---

(1) *Travaux*, mai et août 1944.

Bases expérimentales de la composition des bétons

L'étude de la composition des bétons débute à la fin du siècle dernier. Dès ce début, les grands principes concernant la granulométrie ont été mis en évidence et il est juste et nécessaire à ce sujet de marquer la part prépondérante des chercheurs français dans ce domaine.

De Préaudeau, Durand-Claye et Alexandre d'abord, mettent en évidence l'influence de la granulométrie, puis R. Féret, dès 1892, fixe les bases, qui se révéleront définitives, de cette granulométrie et de la composition des bétons, créant ainsi la science du béton : granulométrie discontinue (sans grains moyens), eau de gâchage, fonction de la finesse des grains et proportionnelle aux quantités, emploi du minimum de grains fins, résistance fonction croissante du rapport $\frac{c}{e+v}$ (c : ciment; e : eau; v : vides) suivant les lois (en volumes absolus) :

$$R = K\left(\frac{c}{e+v} - 0{,}1\right) \quad \text{ou} \quad R = K\left(\frac{c}{c+e+v}\right)^2 .$$

Il faut ajouter à ces bases, comme éléments (également expérimentaux) ayant une influence sur la composition : l'état du béton permettant une bonne mise en œuvre (ou ouvrabilité) étudié d'abord en Amérique; la question très importante de l'effet de paroi suivant la grandeur relative des grains et des moules et éventuellement le ferraillage (béton armé), mise en évidence par M. Caquot; les procédés de mise en œuvre, vibration, transport à la pompe (qui se fondent d'ailleurs avec l'ouvrabilité).

Enfin, M. Boloney a donné une expression expérimentale de l'eau de gâchage d'un poids P de pierres de grain d_1/d_2 (fig. 1).

$$e = \frac{K\,P}{\sqrt[3]{d_1\,d_2}}$$

Les règles expérimentales de Féret furent délaissées pour des principes

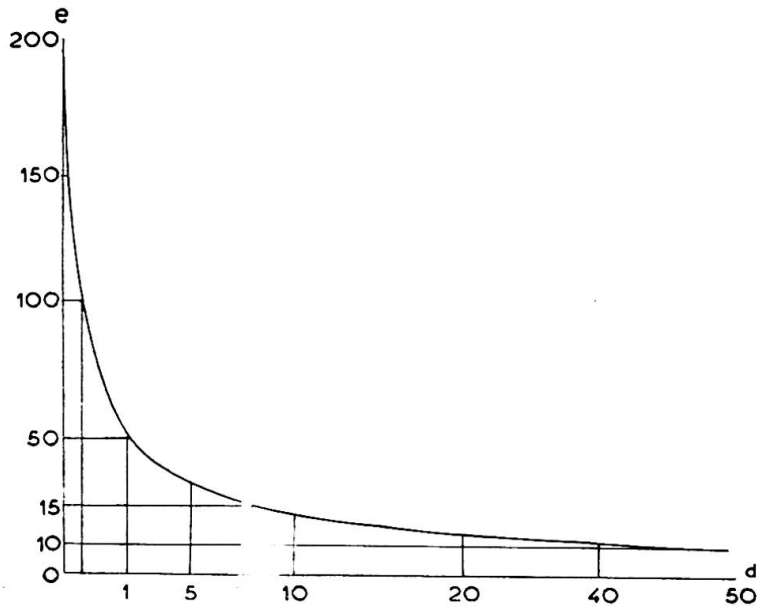

Fig. 1. Eau de gâchage des pierres en litres par mètre cube de grains de grosseur « d » en millimètres.

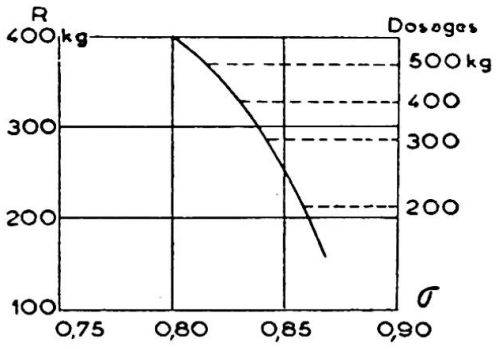

Fig. 2. Variation de la compacité σ avec le dosage C et la résistance R (σ = 889-0,17 C).

théoriques qui semblaient mieux satisfaire la raison : granulométries continues considérées comme étant les plus compactes, compacité du mélange sec ou gâché pris comme critère de qualité, mais qui ne résiste pas au contrôle expérimental, qui montre que :

Les granulométries continues composées de grains voisins, se pénétrant mal, ont une compacité particulièrement mauvaise (0,65 à 0,70) ; une composition assez discontinue donne bien mieux (près de 0,80 en binaire et de 0,90 en ternaire).

Les mélanges secs les plus compacts ne donnent d'ailleurs pas les meilleurs bétons.

La compacité du béton, elle-même, n'est pas un facteur indépendant de qualité, car elle diminue quand le dosage augmente (fig. 2). Des compacités allant de 0,43 à 0,84 ont donné de mêmes résistances (*Congrès A. I. P. C.*, 1936, *Rapport Préliminaire*, p. 1153).

Il faut donc revenir aux bases expérimentales caractérisant effectivement les critères de qualité des bétons.

Composition optima des bétons

Les qualités caractéristiques d'un béton sont : la résistance, la moindre perméabilité et la moindre porosité.

Les lois expérimentales montrent que ces qualités sont présentées par les compositions pleines exigeant, pour leur mise en œuvre, le minimum d'eau de gâchage pour un dosage fixé $\left(\text{maximum de } \frac{C}{E}\right)$ et que, pour satisfaire à cette dernière condition, il faut employer les plus grosses granulométries.

Partant de ces bases, nous avons recherché et déterminé :

1° La grosseur relative la plus forte des grains secondaires D_2/d_2 pouvant remplir une structure primaire D_1/d_1 à gros grains;

2° L'échelle granulométrique complète des pierres à employer dans les compositions;

3° Les méthodes donnant les proportions de chaque catégorie à utiliser, suivant le dosage, pour obtenir le plus grand rapport $\frac{C}{E}$.

4° Les formules de composition dans quelques cas définis;

5° L'extension de la méthode aux compositions binaires gravier-sable, de matériaux tout venant livrés habituellement sur les chantiers (béton à minimum de sable).

a) Granulométrie idéale

Les grains D_1 de la première catégorie doivent être pris le plus gros que le permet la nature des travaux et d_1 doit être très voisin de D_1 pour *obtenir de gros vides*. Nous avons pris 2 passoires voisines $d_1 = 0{,}63\ D_1$ (incorporer les grains $0{,}63\ D_1/0{,}2\ D_1$ suivants, ne donne *aucun gain sur le vide total* et crée des vides fins).

Pour les grains de la seconde catégorie D_2/d_2 qui doivent être pris du plus gros module pouvant pénétrer dans la formation primaire sans la déranger, un essai est nécessaire (en fixant $d_2 = 0{,}63D_2$ environ comme pour la première catégorie). Les essais (sur pierres roulées) nous ont conduits à fixer $D_2 = 0{,}2\ d_1$ (*on gagne très peu* sur le remplissage avec de *plus petits grains* et on perd nettement sur *l'eau de mouillage*).

Les autres catégories, ternaires et quaternaires, sont à fixer par principe dans les mêmes conditions (formations homothétiques).

On arrive ainsi à des granulométries-types telles que les suivantes avec

$$d_1 = 0{,}63\ D_1, \quad D_2 = 0{,}2 \text{ à } 0{,}25\ d_2, \quad D_3 \approx 0{,}3\ d_2$$

$$\frac{d_2}{D_2} = \frac{d_3}{D_3} = \frac{d_4}{D_4} = 0{,}5$$

Eléments	Béton cyclopéen		Cailloux		Gravillon	Mortiers	
Primaire D_1/d_1. .	400/250	200/120	100/63	63/40	25/16	10/6,3	3,2/1,6
Secondaire D_2/d_2 .	63/32	25/16	16/8	10/5	3,2/1,6	1,6/0,8	0,32/0,16
Ternaire D_3/d_3 . .	10/5	5/2,5	2,5/1,2	1,6/0,8	0,6/0,2	—	—
Quaternaire D_4/d_4.	1,6/0,8	0,8/0,3	0,32/0,16	0,25/0,12	—	—	—

b) Composition

Il s'agit de déterminer les proportions à employer des diverses catégories de grains pour obtenir avec le *minimum* d'eau un *mélange plein* en place dans les moules correspondant à ceux du chantier et avec les moyens de mise en œuvre prévus.

Avec le *béton armé*, les armatures sont à considérer, d'abord pour fixer D_1, qui doit passer dans les mailles et intervalles et ensuite comme effet de parois, mais très faiblement, leur volume relatif étant réduit (en moyenne 2 à 3 %) certains nœuds exceptionnels d'armatures étant traités à part en les chargeant en mortier.

On voit, d'après cette définition du béton, que la détermination de sa composition comporte nécessairement une partie expérimentale pour contrôler sa facilité de moulage avec les moyens prévus (ouvrabilité) et le remplissage des moules à pâte ressuante.

On voit, d'autre part, qu'il faut employer le moins possible de grains des dernières catégories pour avoir le minimum d'eau (*béton à minimum de sable*).

Nous avons recherché et utilisé diverses méthodes pour réaliser toutes les conditions; finalement, nous nous sommes arrêtés à la suivante, mise au point au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics, et qui s'est montrée si générale et si sûre qu'on peut considérer comme définitivement réglée la question de la détermination pratique des bétons.

c) Méthode

La méthode (qui peut être pratiquée directement au chantier) consiste à déterminer, en partant des dernières catégories, les mortiers de dosage minimum, puis à introduire le maximum de gravier compatible avec le bon remplissage des moules; enfin, à réaliser le dosage prévu en substituant, pour le dosage fixé, de la pâte pure aux sables fins (plein pour plein).

Le bon remplissage se constate par la ressuée de la pâte pure et peut se contrôler par le calcul des volumes apparent et absolu.

On se guide, pour les déterminations, sur le vide et les eaux de mouillage des éléments. Voici, par exemple, l'opération pour un béton de gravillon avec la granulométrie discontinue idéale.

d) Application

Béton de gravillon, g 25/16, vibré, pierres roulées, ciment Portland.

1° *Sable secondaire* s_1, *3,2/1.6.*

Volume apparent : 1
Vides (grains mouillés) : 0,370
Volume plein mouillé : 0,630

2° *Mortier de dosage minimum* à pâte ressuante, volume de pâte égal aux vides avec un léger excès (1 kg de ciment mouillé à 0,23 C donne un volume de 0,56 litre).

3° *Béton binaire de dosage minimum* par incorporation au mortier du maximum de gravillon mouillé permettant un bon moulage, donnant au mètre cube de béton : en volumes absolus (moule de 2 litres, béton armé) :

$$540\ g + 238\ s + 309 \text{ kg C} + \text{eau} : 120 \text{ litres} = 1\ 000$$

Et en volumes apparents :
Gravillon : 980, sable : 424, ciment : 309 kg.

4° *Béton pratique à minimum de sable pour un dosage C quelconque* (fig. 3).

C > 309 kg. Un volume de pâte pure (C-309)0,56 est à substituer à un égal volume plein mouillé de sable, soit 0,63 *s* (*s* volume apparent) donnant la composition :

$$g = 980,\ s = 0{,}89\ (785 - C)$$

C < 309 kg. Il faut substituer à (309 — C) kg de ciment, un volume apparent *t* de sable ternaire tel que les volumes pleins mouillés soient égaux (compacité du sable ternaire mouillé 0,74 *t*) donnant la composition :

$$g = 980,\ s = 424,\ t = 0{,}76\ (309 - C).$$

5° *Rapport* $\frac{C}{E}$ *et résistance.*

On obtient des rapports $\frac{C}{E}$ remarquables donnés pour C > 309, par :

$$\frac{C}{E} = \frac{C}{67 + 0{,}168\ C}$$

soit : 2,78, 3 et 3,30 pour les dosages 350, 400 et 500.

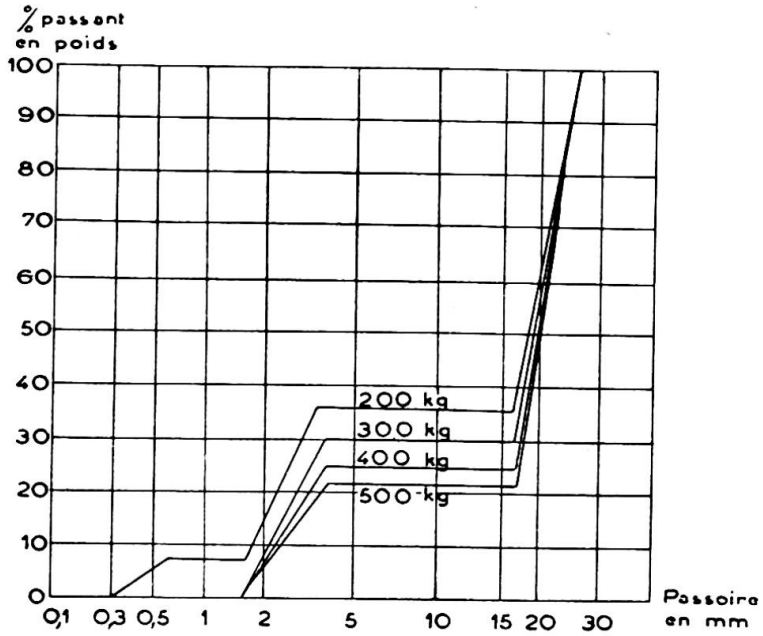

Fig. 3. Granulométrie optimum du béton de gravillon suivant dosages.

Pour $C < 309$, on a :

$$E = 90 + 0{,}093\ C$$

Si on lui adjoint la formule de Féret sous la forme (Rm résistance du mortier normal) :

$$R = 6\ Rm \left(\frac{C}{C + 3{,}1\ E}\right)^2 .$$

On remarque qu'on obtient encore une bonne résistance avec des dosages inférieurs à 200 kg.

Avec le *béton de cailloux*, les résultats sont évidemment encore plus favorables et on peut admettre des dosages inférieurs à 150 kg et on pourrait descendre à moins de 100 kg avec le *cyclopéen*.

Bétons à minimum de sable avec les matériaux tout venant de carrière, gravier et sable

Il s'agit, ici, de déterminer le mélange *gravier-sable* donnant un *béton plein et ouvrable* pour le dosage fixé, en exigeant le minimum d'eau, c'est-à-dire le mélange donnant ces conditions avec le *minimum de sable*.

C'est uniquement un problème de confection pratique du béton qui est résolu par la méthode indiquée ci-dessus pour la granulométrie discontinue.

Cette méthode est employée à la S. N. C. F. pour toutes les natures de bétons : gros béton, béton de gravillon armé, pour parties massives ou parois minces, en opérant dans des moules correspondant à ces conditions et avec les moyens de mise en œuvre prévus : piquage, coulage, vibration, avec lissage ou non des surfaces.

Voici quelques résultats :

Carrières ou travaux / Compositions	Piacé		Courtalain	Châlons		Chantilly	Juvisy			Croslay
	Voile mince	c 50/12 s 3/0,2 moule 0,30	c 6,3/2,5 roulé g 16/1,6 } broyés s 3,5+0,4 moule 0,30	g 16/3 s 6/0,2			c 60/20 g 85/10 s 7/0,2			25/7 20/0,2 0,20
				voûte	béquille		0,20		0,30	
Caillou .	—	1030	820	—	—	—	—	950	970	—
Gravillon.	920	—	135	800	950	990	975	broyé	roulé	325
Sable . .	355	429	475	400	304	298	290	484	402	790
Ciment .	350	225	275	400	400	400	350	250	250	350
Eau. . .	146	125	146	178	160	143	143	129	114	155
C/E . . .	2,4	1,80	1,88	2,26	2,50	2,80	2,45	1,93	2,2	2,26

Remarques

Les compositions variées indiquées, qui sont incontestablement les *meilleures qu'on puisse obtenir* avec les matériaux livrés montrent combien sont peu justifiées les compositions fixes (800/400 ou à courbe de référence). Les rapports C/E restent remarquables.

A dosage égal, ces rapports C/E sont d'autant meilleurs qu'on se rapproche plus des granulométries discontinues optima dont les compositions se retrouvent alors (Juvisy). Les sables fins sont défavorables, mais il y a auto-correction, car ce sont eux qui restent en moindre quantité avec la méthode utilisée.

Avec les pierres de broyage, on a trouvé des vides de 54 % pour le gravillon et jusqu'à 60 % pour des sables. Leur mise en place est plus difficile, aussi, la proportion de sable augmente, surtout en petite épaisseur, mais, là encore, la méthode indiquée permet d'obtenir les *meilleures conditions*.

Toutes ces compositions, *faibles en sable et en eau*, surprennent les chantiers aux premières gâchées, le béton apparaissant comme un tas de graviers non liés, mais leur bonne mise en œuvre sous la vibration rassure de suite. Un tour de main vite trouvé est nécessaire avec la vibration interne pour éviter le creux que forme l'aiguille avec ces mélanges qui deviennent tout de suite très fermes.

Résumé

Les bases définitives de la composition des bétons sont fournies par les *lois et règles de M. R. Feret* et par les conditions du bon remplissage des moules, compte tenu de l'effet de paroi et des moyens de mise en œuvre.

Ces lois expriment, d'une part, que les meilleurs bétons sont ceux qui exigent le *moins d'eau* pour leur mise en œuvre et, d'autre part, que cette quantité d'eau est fonction de la granulométrie des pierres, les plus petits grains exigeant le plus d'eau.

Ces conditions conduisent à rechercher comme *compositions idéales* celles qui fournissent un béton plein avec les plus gros grains possibles. La solution est donnée par une *granulométrie très discontinue*, formée de catégories de grains de grosseurs voisines dans chaque catégorie et très

distinctes entre catégories, de façon à assurer le remplissage des vides sans déranger les grains. Le mélange des catégories doit alors être fait de façon à utiliser le *moins possible de sable fin* pour obtenir le remplissage de la composition.

Ce *béton plein à minimum de grains fins* est obtenu automatiquement par une méthode expérimentale qui constitue un contrôle de l'état du béton. On obtient ainsi *avec certitude* le béton de plus haute qualité.

Quand on n'est pas maître de la granulométrie et qu'on doit employer les *matériaux tout venant* de carrières, les mêmes bases conduisent à rechercher le *béton à minimum de sable*. Il est obtenu par la même méthode expérimentale de composition que pour le béton ci-dessus et fournit la meilleure solution possible dans ce cas.

Les dispositions de cette méthode, qui fait intervenir les vides des structures de grains, leur eau de mouillage et les conditions de leur mélange, permettent de juger les granulométries et les compositions et d'acquérir la maîtrise des bétons.

Les conditions mêmes de la détermination de ces bétons montrent que les autres bases : compacité des mélanges secs, granulométries continues à courbe de référence, qui sont sans lien avec les lois expérimentales, ne peuvent conduire aux compositions optima qui viennent d'être fixées et qu'elles ne peuvent être retenues pour ce but.

On donne ici : les granulométries-types optima, les méthodes de détermination des compositions, l'application de ces méthodes pour ces granulométries-types, discontinues, puis, pour les matériaux tout-venant, l'évaluation de la résistance des bétons, en fonction du dosage et de la granulométrie; enfin les résultats remarquables obtenus dans l'application de ces bétons aux chantiers de la S. N. C. F.

Ces résultats, en consacrant ces méthodes, permettent de considérer comme définitivement résolue la question de la détermination pratique des meilleurs bétons.

Zusammenfassung

Die endgültigen Grundlagen der Zusammensetzung des Betons sind bestimmt durch die *Gesetze und Regeln von Feret* und durch die Bedingungen der guten Füllung der Schalung, wobei der Wirkung der Wände und der Betonherstellung Rechnung getragen wird.

Diese Gesetze drücken einerseits aus, dass die besten Betonsorten diejenigen sind, die zur Herstellung am *wenigsten Wasser* brauchen und anderseits, dass die Wassermenge eine Funktion der Granulometrie darstellt, wobei die kleineren Kornabstufungen am meisten Wasser verlangen.

Diese Bedingungen zeigen, dass die *optimalen Zusammensetzungen* diejenigen sind, die uns einen dichten Beton mit möglichst grossen Körnern liefern. Die Lösung ist gegeben durch eine *lückenhafte Kornabstufung*, zusammengesetzt aus Kategorien von Körnern gleicher Grössenordnung. Diese Kategorien unterscheiden sich stark voneinander, damit die Hohlräume sich füllen können ohne die Kornzusammensetzung zu stören. Die Kategorien sollen so gemischt werden, dass man *möglichst wenig Feinsand* braucht, um trotzdem die Hohlräume möglichst gut zu füllen.

Dieser dichte Beton mit einem Minimum an Feinkorn ergibt sich von

selbst nach einer experimentellen Methode, welche zugleich eine Kontrolle des Betons ermöglicht. Man erhält auf diese Weise *mit Sicherheit* einen Beton von höchster Qualität.

Wenn man auf die Granulometrie keinen Einfluss haben kann und das *Grubenmaterial wie es ist verwenden muss*, so führen dieselben Grundlagen dazu, einen *Beton mit einem Minimum an Sand* herzustellen, wobei dieselbe experimentelle Methode für die Zusammensetzung zur Anwendung gelangt.

Die Anordnungen dieser Methode, welche auf die Hohlräume der Kornstrukturen, das Anmachwasser und die Mischungsbedingungen aufbaut, erlauben ein sicheres Urteil über die Kornabstufungen und die Zusammensetzungen und führen zur vollständigen Beherrschung der Betonqualität.

Die Bedingung selbst für die Bestimmung dieser Betonsorten zeigt, dass die andern Grundlagen : Die Dichte der Trockenmischung, die stetige Kornzusammensetzungskurve, welche erdacht und ohne Zusammenhang mit den experimentellen Gesetzen sind, nicht zu den optimalen Zusammensetzungen führen können, wie sie eben aufgezeigt wurden und daher für diesen Zweck nicht mehr weiter zur Anwendung gelangen können.

Im Folgenden wird gegeben : Die Charakteristiken der optimalen Kornabstufungen, die Methoden für die Bestimmung der Zusammensetzungen, die Anwendung dieser Methoden für diese unstetigen Kornabstufungstypen; ferner für ungeeignete Kies-Sand-Mischungen, die Abschätzung der Betonfestigkeit, in Abhängigkeit der Zementdosierung und der Kornabstufung; endlich wird auf die hervorragenden Ergebnisse in der Anwendung dieser Betonsorten auf den Baustellen der S. N. C. F. hingewiesen.

Diese Ergebnisse, welche diese Methoden legitimieren, erlauben es, die Frage nach der praktischen Bestimmung der besten Betonsorten als gelöst zu betrachten.

Summary

The conclusive basic rules for the composition of concrete are defined in *Feret's Rules & Regulations* and conditioned by a good filling of the shuttering, in which account is taken of the effect of the walls and preparation of the concrete.

These rules state, on the one hand, that the best kinds of concrete are those requiring in their preparation the *least amount of water* and on the other hand that the quantity of water represents a function of grading, in which the small-grain grades require the most water.

These provisos show that the best compositions are those which give us a rich concrete with the largest possible grains. The solution is given in a very *incomplete grading*, composed of categories of grains of the same size. These categories vary a lot from one another, in order that the voids may be filled without disturbing the composition of the grains. The categories should be so mixed that *as little fine sand* as possible be used, in order to fill the voids as well as possible.

This rich concrete with a minimum of fine grains is obtained automatically, according to an experimental method which makes a control of the

concrete possible at the same time. By acting thus, a concrete of the highest quality is sure to be obtained.

If it is not possible to rely upon grading and the *excavated material has to be used as it is*, these rules lead to obtaining *concrete with a minimum of sand*, in which this experimental method for the composition is used.

The instructions of this method, which relies on the voids of the grain structures, the water to be added and the conditions for carrying out the mixing, enable us to form a sound judgement of the grading of grains and the compositions and lead to an absolute controlling of the quality of the concrete.

The proviso itself for the definition of these kinds of concrete shows that the other rudiments : density of the dry mixture, constant curve of the composition of grains, which were devised without any cohesion with experimental laws, cannot lead to perfect compositions in the manner in which they were compiled and can therefore no longer be used for this purpose.

The author then enumerates : characteristics of optimum grading, methods for defining compositions, the use of these methods for such inconstant grading; for unsuitable mixtures of sand and gravel the evaluation of strength, depending on the admixture of cement and grading of grains. Finally, he points to the excellent results in the use of these kinds of concrete obtained in works completed by the S. N. C. F.

These results, which prove the methods cited, enable us to regard the question of practical selection of the best kinds of concrete as solved.