

LA HOUILLE BLANCHE

ÉDITIONS B. ARTHAUD, Succ^r de J. REY, GRENOBLE

Abonnement pour une Année $\left\{ \begin{array}{l} \text{France} \dots\dots 40 \text{ francs} \\ \text{Etranger} \dots\dots 50 \text{ francs} \end{array} \right\}$ Le Numéro : 7 francs

Compte Chèques Postaux LYON 5-84

SOMMAIRE

HYDRAULIQUE. — La construction du barrage de Cignana (*suite et fin*), par Félice CONTESSINI, ingénieur. — Sur les régulateurs isochrones, par L. BARBILLON, professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble. — Moulinet pour la détermination de la vitesse et de la direction des courants fluviaux ou marins.

LÉGISLATION. — Chutes d'eau sur les rivières navigables et flottables. Délimitation du lit (*plenissimum flumen*), par Paul BOUGAULT, Avocat à la Cour d'Appel de Lyon.

DOCUMENTATION.
INFORMATIONS.
BIBLIOGRAPHIE.

HYDRAULIQUE

La construction du barrage de "Cignana"

par Félice CONTESSINI, *Ingénieur*

(Direction des Constructions Hydrauliques du Groupe S. I. P.)

(SUITE ET FIN)

APPENDICE

Détermination de la composition granulométrique la mieux appropriée pour les bétons.

Nous croyons utile de rapporter ici les résultats d'une recherche effectuée par l'ingénieur G. Wetter, destinée à établir la composition granulométrique la mieux appropriée des matériaux incorporés dans un béton, en considérant comme telle, celle qui, à parité de ciment et d'eau de gâchage, donne au béton le maximum de résistance et d'imperméabilité.

Cette recherche n'est pas une nouveauté absolue, puisqu'elle a été déjà faite par plusieurs auteurs, mais chez nous, il en manquait un exposé clair et pratique.

W.-B. Fuller (1) a établi l'équation à laquelle doit satisfaire un matériau pour présenter cette composition, c'est-à-dire :

$$(1) \quad P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (\text{parabole de Fuller})$$

d = diamètre quelconque compris entre 0 et D en mm.

D = diamètre maximum du matériau à essayer en mm.

P = % en poids du matériau $< d$.

Les bétons correspondants à cette formule ont la résistance et la compacité susdites, mais sont très difficilement utilisables

(1) W.-B. Fuller and S. F. Thompson (1907). — *The laws of proportioning concrete.*

en pratique, car ils ont un très bas degré de fluidité, et demandent un brassage énergique.

Après Fuller, le problème fut repris par différents chercheurs (Abrams, Taylor et Thompson, Joung et d'autres).

Fuller lui-même ne s'arrête pas à sa « parabole », mais il fournit une nouvelle « courbe » (combinaison d'une partie d'ellipse et d'une droite) variable avec la qualité des matériaux et leurs dimensions extrêmes.

Les récentes modifications que J. Bolomey a portées à la parabole de Fuller nous semblent réellement intéressantes et pratiques et ce furent précisément elles qui nous ont porté à rédiger cette note.

J. Bolomey (1), en se basant sur de très nombreux essais faits au laboratoire et au chantier, a introduit dans la formule un terme correctif : A , en transformant ainsi cette équation en :

$$(2) \quad P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

L'introduction de A a pour effet d'augmenter le pourcentage du matériau fin.

Le terme A dépend de la nature du matériau incorporé, qu'il provienne d'un lit de fleuve ou qu'il soit obtenu par concassage,

(1) J. Bolomey, ex-directeur des travaux du barrage de Wäggitte et de Barberine, professeur à l'Université de Lausanne : Cfr. *Détermination de la résistance à la compression des mortiers et bétons Durcissement des bétons et mortiers.*

de la plus ou moins grande rugosité de la surface des grains et du degré de fluidité qu'on veut obtenir.

Il est connu que, dans un béton, le ciment, le matériau fin (1) et l'eau forment en se mélangeant un gâchis, que Gaye appelle « Leitzement » (mortier de ciment) qui remplit les vides du béton, en lui donnant la compacité nécessaire, enveloppe la surface des grains et, s'il y en a un excès, forme des zones de lubrification parmi les grains et c'est cet excès qui, selon sa teneur, donne au béton une plus ou moins grande fluidité.

Si cet excès manque ou se trouve en quantités très petites, le béton, tout en étant compact, serait d'un emploi très difficile car les grains ne pourraient pas glisser les uns sur les autres.

Le coefficient A varie de 8 à 12 pour les matériaux fluviaux et, suivant la fluidité exigée : avec $A = 12$, on obtient un béton coulant sans difficulté.

Pour des matériaux concassés, A varie de 10 à 15.

La formule (2) se rapporte à l'ensemble « ciment-matériaux incorporés ».

En pratique, pour simplifier le calcul, on a cru devoir transformer la formule en une autre relation indépendante du ciment et du matériau fin.

Désignons par d_1 la dimension maximum pour le matériau fin, et rapportons le nouveau pourcentage P_1 au matériau d_1

(1) Le choix de la dimension maximum pour le matériau fin est, d'un certain point de vue et entre certaines limites, arbitraire : J. Bolomey définit un matériau fin quant il est inférieur à 0,5 mm. Gaye (Der Gussbeton, Cfr.) celui inférieur à 0,223 mm. c'est-à-dire passé au tamis de 900 trous ; au barrage de Cignana (pour des raisons de convenance due à la série des trieurs employés, on a adopté comme dimension maximum : 0,36 mm.

Naturellement plus grande est cette dimension maximum, et plus grand devra être l'excès dont on a parlé et qui est calculé par les formules.

à D au lieu de O à D (comme dans la formule 2), on arrive facilement à la formule suivante :

$$P_1 = \frac{\left[A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \right] - \left[A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}} \right]}{100 - \left[A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}} \right]} \times 100$$

ou encore, en réduisant :

$$(3) \quad P_1 = \frac{\sqrt{\frac{d}{D}} - \sqrt{\frac{d_1}{D}}}{\sqrt{\frac{d}{D}} - \sqrt{\frac{d_1}{D}}} \times 100 \quad (4)$$

La formule (3), non seulement est indépendante du ciment et du matériau fin, mais aussi de la constante A : elle est donc valable pour un matériau quelconque et pour n'importe quelle fluidité.

Les pourcentages P_1 dépendent seulement du diamètre maximum D et de d_1 .

Le tableau 1 et les graphiques correspondants (fig. 61 et 62) sont calculés pour $d_1 = 0,36$ mm. ; mais ils peuvent être employés pour $D \geq 15$ mm., pour une valeur quelconque de d_1 comprise entre 0,25 et 0,50 mm. ; on commet, dans ce cas, une erreur maximum de ± 3 % pour $D = 15$ mm. et de ± 1 % pour $D = 100$ mm.

(Pour $D < 15$ mm., l'erreur peut être de ± 6 %.)

Ce que l'on vient de dire est valable pour les matériaux de d_1 à D.

Le pourcentage P_f du matériau 0 à d_1 , c'est-à-dire « ciment

(1) En partant de la formule de Fuller, on serait arrivé au même résultat ; ceci est évident, car la modification de J. Bolomey se rapporte uniquement au matériau $< d_1$.

TABLEAU I

Composition granulométrique idéale pour les matériaux de d_1 à D.

$$P_1 = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{d}{D}} - \sqrt{\frac{d_1}{D}}}{\sqrt{\frac{d}{D}} - \sqrt{\frac{d_1}{D}}} \text{ avec } d_1 = 0,36 \text{ mm.}$$

d en $\frac{m}{m}$	Valeur de P_1 (pourcentage en poids rapporté au matériau de d_1 à D)												
	D = 5 $\frac{m}{m}$	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
0,5	6,5	4,2	3,3	2,8	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1
1,0	24,4	15,6	12,2	10,3	9,1	8,2	7,0	6,2	5,6	5,2	4,8	4,5	4,3
1,5	38,2	24,4	19,1	16,1	14,2	12,8	10,9	9,7	8,7	8,0	7,5	7,0	6,7
2,0	49,8	31,7	24,9	21,0	18,5	16,7	14,2	12,5	11,4	10,5	9,7	9,1	8,7
3,0	69,2	44,0	34,6	29,2	25,7	23,2	19,8	17,5	15,8	14,5	13,5	12,7	12,0
4,0	85,5	54,7	42,8	36,2	31,8	28,7	24,1	21,6	19,5	18,0	16,8	15,7	15,3
5,0	100,0	63,8	50,0	42,2	37,2	33,5	28,5	25,2	22,9	21,0	19,6	18,4	17,4
10,0		100,0	78,4	66,2	58,2	52,5	44,7	39,6	35,8	33,0	30,6	28,8	27,2
15,0			100,0	84,5	74,3	67,0	57,0	50,5	45,7	42,0	39,2	36,7	34,8
20,0				100,0	88,0	79,5	67,5	59,8	54,0	49,8	46,3	43,5	41,1
25,0					100,0	90,0	76,8	68,0	61,5	56,5	52,7	49,5	46,8
30,0						100,0	85,0	75,5	68,2	62,8	58,4	54,8	51,9
40,0							100,0	88,5	80,0	73,6	68,5	64,3	61,0
50,0								100,0	90,5	83,3	77,5	72,6	68,8
60,0									100,0	92,0	85,5	80,0	76,0
70,0										100,0	93,0	87,2	82,6
80,0											100,0	93,5	88,6
90,0												100,0	94,5
100,0													100,0

Nota. — Le tableau est valable pour $D \geq 15$ mm. × même pour des valeurs de d_1 différentes de 0,36 mm., mais comprises entre 0,25 et 0,50 mm., l'erreur maximum est de ± 3 %.

Linee di composizione granulometrica (materiale sopra il vaglio 50)

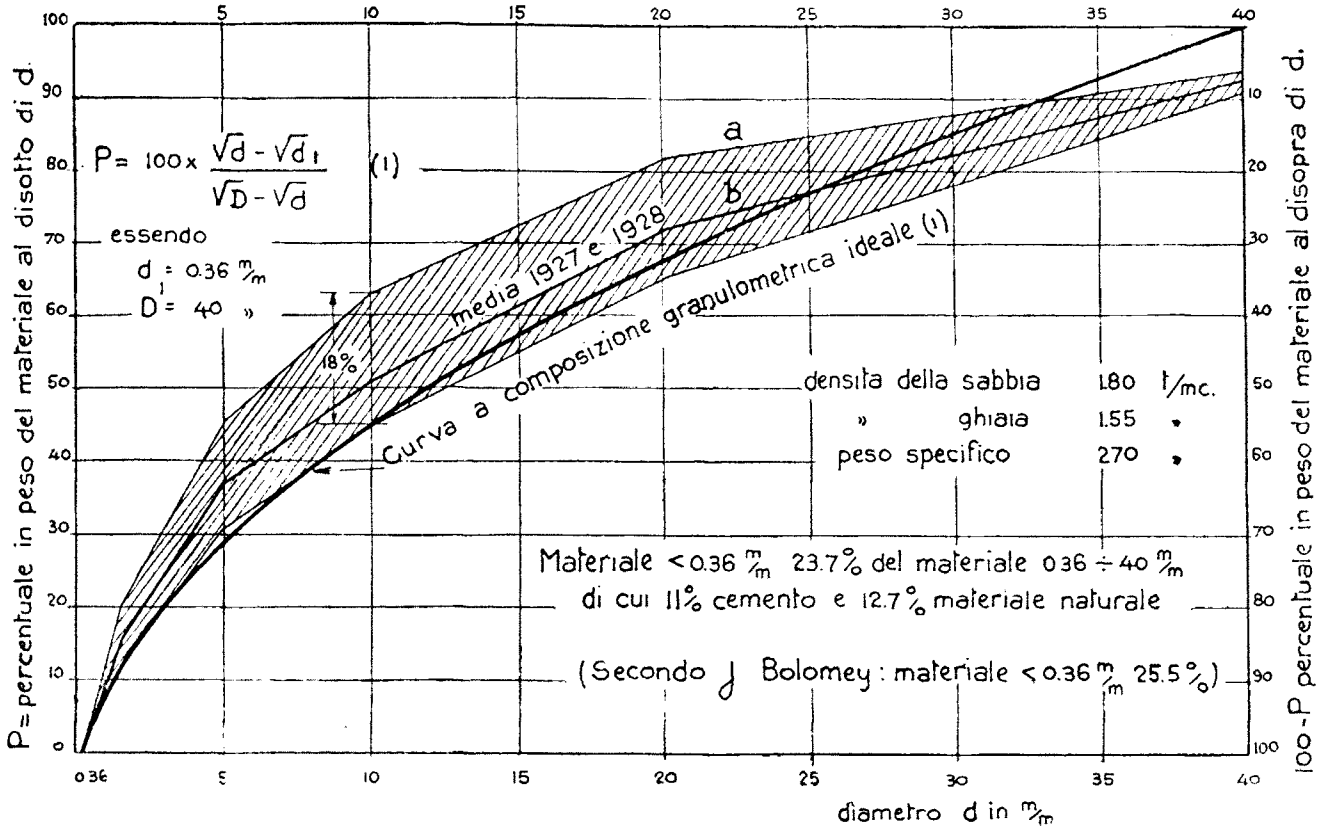


Fig. 61. — Lignes de composition granulométrique idéale du matériau en dessus de 0,36 m/m.
 Les pourcentages sont rapportés au matériau 0,36 à D.— P₁ : pourcentage en poids du matériau en-dessous de d.
 100 — P₁ : pourcentage en poids du matériau en dessus de d.

Linee di composizione granulometrica ideale del materiale sopra 0.36 mm

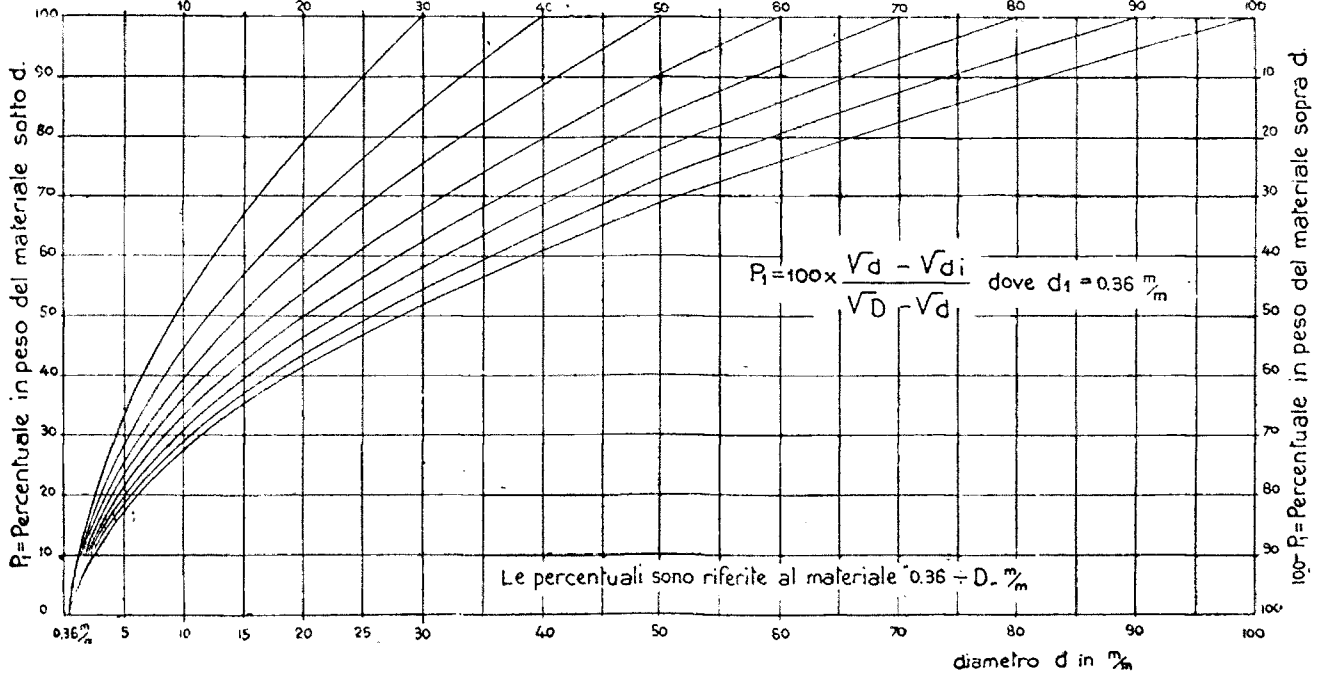


Fig. 62.

TABLEAU II

D en mm		5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
d ₁ = 0,36	A = 12	55,0	40,0	34,5	31,0	29,0	27,5	25,5	24,0	23,0	22,5	22,0	21,5	21
d ₁ = 0,36	A = 14	58,7	43,5	37,5	34,2	32,0	30,5	28,5	27,0	26,0	25,3	24,7	24,1	23,5
d ₁ = 0,25	A = 12	36,4	31,9	30,4	28,0	26,2	25,0	23,4	22,2	21,4	20,8	20,3	19,9	19,6
d ₁ = 0,50	A = 12	66,0	46,4	38,5	34,9	32,1	30,4	28,0	26,2	25,0	24,1	23,4	22,8	22,2

+ matériaux fins », selon Bolomey, est exprimé par la formule : des matériaux $< d_1$ relatives à ces trieurs, on doit employer la formule :

$$P_f = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}}$$

où P_f est rapporté aux matériaux 0 à D.

Pour obtenir les pourcentages dont la comparaison directe soit possible, il est nécessaire de rapporter P_f aux matériaux d_1 à D ; on aura :

$$(4) \quad P_f = \frac{A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}}}{100 - \left[A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}} \right]} \times 100$$

Le tableau II donne les valeurs de P_f pour $A = 12$ (matériaux fluviaux, béton coulé). $A = 14$ (matériau concassé, béton coulé) et pour $d_1 = 0,25 - 0,36 - 0,5$ mm.

Si dans la série des trieurs employés on a des cribles $< d_1$, (dans la série du laboratoire de Maën on avait par exemple un trieur de 0,15 mm.) et si on veut déterminer les proportions

$$P_f = \frac{A + (100 - A) \sqrt{\frac{d'}{D}}}{100 - \left[A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}} \right]} \times 100$$

On indique par d' la dimension d'un crible quelconque $< d_1$.

En résumé : de la formule :

$$P_f = \frac{\sqrt{d} - \sqrt{d_1}}{\sqrt{D} - \sqrt{d_1}} \times 100$$

On obtient les pourcentages en poids du matériau d_1 à D et d'après la formule :

$$P_f = \frac{A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}}}{100 - \left[A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}} \right]} \times 100$$

TABLEAU III (a)

d en millimètres	BÉTON DE CIGNANA		D'ap. J. Bolomey $D = 40 \frac{m}{m} \%$	
	kg./m ³	% en poids		
70 à 40	140	7,5	0	(1) fine naturelle. (2) Ciment. (3) : $P_f = 100 \times \frac{A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}}}{100 - \left\{ A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}} \right\}}$
40 à 20	375	20,9	32,5	
20 à 10	375	20,4	22,5	
10 à 5	260	11,4	16,5	
5 à 1,5	385	21,1	17,5	
1,5 à 0,36	285	15,7	11,0	
0,36 à 70,0	1820	100,0	100,0	
< 0,36	{ 230 (1) 200 (2)	23,6	25,5 (3)	Etant donné que : $A = 12$ (matériaux fluviaux, béton coulables). $d_1 = 0,36$ mm. $D = 40$ mm.
Eau	201	litre/m ³		
	2451	kg./m ³	(Béton frais)	

TABLEAU III (b)

d en millimètres	BÉTON DES LACS JUMEAUX		D'ap. J. Bolomey $D = 65 \frac{m}{m} \%$	
	kg./m ³	% en poids		
65 à 40	290	17,5	23,4	(1) fine naturelle. (2) Ciment. (3) : $P_f = 100 \times \frac{A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_1}{D}}}{100 - \left\{ A + (A - 100) \sqrt{\frac{d_1}{D}} \right\}}$
40 à 30	155	9,2	11,3	
30 à 10	540	32,3	31,0	
10 à 5	270	16,2	12,4	
5 à 1,5	250	15,0	13,5	
1,5 à 0,36	165	9,8	8,4	
0,36 à 65,0	1670,0	100,0	100,0	
< 0,36	{ 300 (1) 250 (2)	32,9	27,1 (3)	Etant donné que : $A = 15$ (matériaux concassés, béton coulable). $d_1 = 0,36$ mm. $D = 65$ mm.
Eau	225	litre/m ³		
	2445	kg./m ³	(béton frais).	

on a le pourcentage des matériaux 0 à d_1 (ciment + matériaux fins), tous les deux rapportés aux matériaux d_1 à D.

Pour mieux éclaircir ce que nous venons de dire, nous croyons utile de rapporter ici l'exemple du béton du barrage de Cignana (matériaux de fleuve) et celui du béton du barrage des Lacs Jumeaux (Laghi gemelli Alto Brembo) (matériaux de concassage).

a) A Cignana, on a fixé la dimension maximum des matériaux à 70 mm. Les matériaux de dimensions plus grandes étaient concassés avant d'être introduits dans les silos.

Comme on l'a déjà dit, les matériaux de dimensions infé-

La quantité de matériaux de 40 à 70 mm., en effet, est négligeable, puisqu'elle est de 7,5 % en poids.

Dans le tableau III sont rapportées les données numériques relatives au béton de Cignana.

Ce béton s'est montré très bon, bien compact et facilement adhérent.

La divergence, relativement faible entre les valeurs P_f de Bolomey et celles réelles, peut être attribuée aux variations inévitables et aussi à la présence de matériaux supérieurs à 40 mm.

(En effet, par exemple, pour $D = 50$ mm., $P_f = 24$ %, voir tableau II).

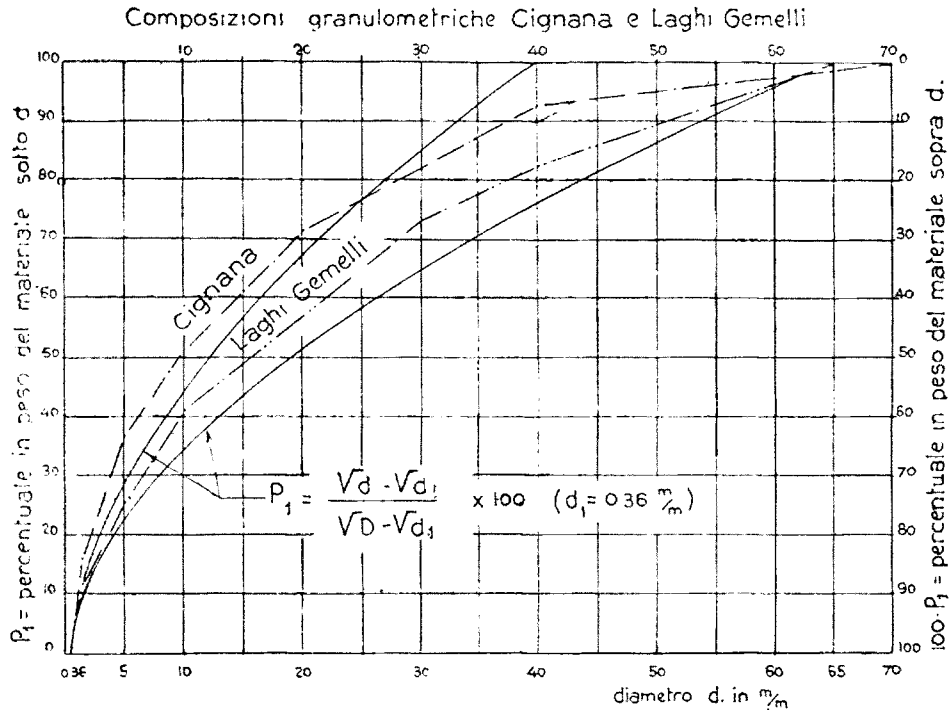


Fig. 63. — Composition granulométrique de Cignana et des lacs Jumeaux.

rieures à 70 mm. étaient divisés en matériaux de 0 à 15 mm. et de 15 à 70 mm.

Cette subdivision fut adoptée, car les essais préliminaires montrèrent que le matériau du banc se présentait en parties égales en dessous et en dessus de cette dimension, ce qui devait de beaucoup faciliter le transport, le triage et le dosage.

Mais, en pratique, on trouva que les matériaux au-dessous de 15 mm. se trouvaient en quantité supérieure à celle prévue : on décida alors d'adopter une composition granulométrique contenant plus de sable, tout en obtenant un béton qui réponde aux conditions de résistance demandées. Cette composition (qui doit être retenue comme « moyenne ») est représentée dans le graphique figure 63 et elle est mise en comparaison avec la figure granulométrique idéale correspondant à $D = 40$ mm, puisqu'elle s'en rapproche sensiblement.

b) Pour la construction du barrage des Lacs Jumeaux, on a dû employer des matériaux concassés.

L'installation permet d'obtenir du sable 0 à 10 mm., du menu gravier de 10 à 30 mm. et du gravier de 30 à 60 mm. ; en plus, un concasseur à boulets fournit le matériau fin pour ajouter au mélange, parce que celui-ci, provenant des concasseurs, eût manqué. La composition granulométrique (fig. 63) a été étudiée en cherchant à obtenir un bon rendement de l'installation et à ne pas s'éloigner de la composition idéale.

Dans le même tableau III sont aussi rapportées les valeurs numériques relatives au béton du barrage des Lacs Jumeaux.

Ce béton a l'aspect très compact, tout en étant adhérent ; il est encore plus compact que celui du barrage de Cignana, mais l'excès de matériau fin est très visible à l'œil nu et il faudra en réduire la proportion.