

## IL CALCESTRUZZO "REOPLASTICO"

### "RHEOPLASTIC" CONCRETE

Mario Collepari

#### INTRODUZIONE

Tutte le proprietà del calcestruzzo indurito possono essere migliorate diminuendo il rapporto acqua/cemento. Infatti, se diminuisce l'acqua di impasto, aumentano le resistenze meccaniche a flessione ed a compressione, diminuisce la porosità capillare della pasta cementizia ed aumenta la impermeabilità del materiale. A causa di ciò il calcestruzzo mostra una maggiore resistenza agli attacchi chimici, (per esempio i solfati) ed a quelli fisici (per esempio la formazione di ghiaccio), mentre i ferri risultano più protetti dalla corrosione. Al diminuire del rapporto acqua/cemento, inoltre, diminuiscono le variazioni dimensionali del calcestruzzo dovute a variazioni igrometriche (ritiro) o ad applicazioni di carichi costanti (fluage).

In pratica questi risultati sono ottenuti solo se si realizza una completa compattazione del calcestruzzo corrispondente all'incirca ad un contenuto d'aria inferiore all'1%. La curva continua della fig. 1 mostra schematicamente questo andamento, e quando la qualità del calcestruzzo è valutata attraverso la resistenza meccanica, la curva illustra graficamente la nota legge di Abrams [1] valida appunto per calcestruzzi completamente compattati.

$$S = \frac{K_1}{K_2 w/c}$$

dove  $S$  è la resistenza meccanica,  $w/c$  è il rapporto acqua/cemento,  $K_1$  e  $K_2$  sono costanti che dipendono dalla stagionatura, dalla temperatura, dagli inerti, ecc. Quando, per un dato sistema di consolidamento manuale o meccanico,

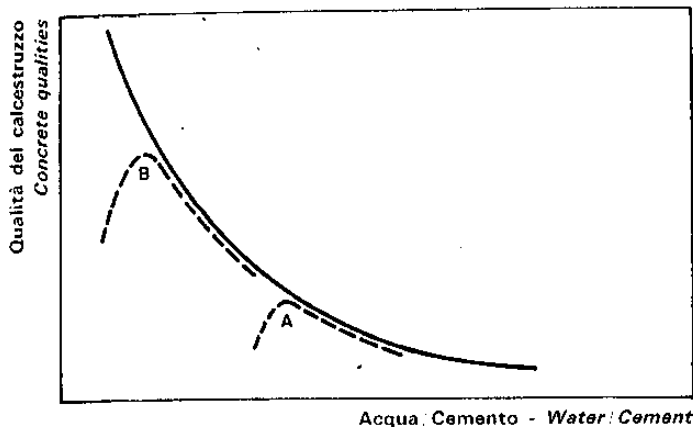
#### INTRODUCTION

*All the properties of hardened concrete can be improved by reducing the water/cement (w/c) ratio. In fact, in theory, reducing the quantity of mixing water leads to increased compressive and flexural strengths, reduced capillary porosity of the cement paste and increased impermeability. As a result, the concrete exhibits a greater resistance to chemical attack (for example, sulphates) and physical attack (for example, the formation of ice), while the reinforcing steel tends to be more protected from corrosion attack. Moreover, at a reduced w/c ratio, dimensional changes of the concrete due to the hygrometric variations (shrinkage) or the application of constant loads (creep), are also reduced.*

*In practice, these results are obtainable only if complete concrete compaction, corresponding to an air content of less than 1%, is achieved. The continuous curve in fig. 1 is a schematic illustration of this behaviour, and when the concrete quality is evaluated by mechanical strength the curve becomes a graphic illustration of the well-known law of Abrams [1] which is valid precisely for completely compacted concretes.*

$$S = \frac{K_1}{K_2 w/c}$$

*where  $S$  is the strength,  $w/c$  is the water/cement ratio,  $K_1$  and  $K_2$  are constants depending on curing, temperature, aggregates, etc. When, for a given system of manual or mechanical compaction, the  $w/c$  ratio is reduced below a*



1 - Andamento schematico delle qualità del calcestruzzo in funzione del rapporto acqua/cemento (w/c). La linea continua si riferisce ad una completa compattazione, quelle tratteggiate ad un'incompleta compattazione. Curva A: calcestruzzo poco vibrato. Curva B: calcestruzzo più vibrato e/o additivato con fluidificante.

1 - Concrete qualities in function of water/cement (w/c) ratio. The full line shows the behaviour of concretes fully consolidated. Curve A: concrete lightly vibrated. Curve B: concrete normally vibrated and/or containing fluidifying additive

si va al di sotto di un certo rapporto acqua/cemento, il calcestruzzo diviene così poco lavorabile che in pratica non può essere compattato completamente e tutte le qualità del calcestruzzo, dalla resistenza meccanica all'impermeabilità, dalla durezza alla stabilità dimensionale, risultano peggiorate dall'ulteriore diminuzione del rapporto acqua/cemento. In pratica, pertanto, al diminuire del rapporto acqua/cemento le qualità del calcestruzzo prima migliorano e quindi peggiorano come è schematicamente illustrato dalle curve tratteggiate della fig. 1. Il valore del rapporto acqua/cemento corrispondente al massimo della curva, e cioè alle qualità ottimali del calcestruzzo, dipende dal sistema di compattazione e dalla fluidità del calcestruzzo stesso. Quanto più efficiente è la vibrazione e quanto più fluido è il calcestruzzo, tanto più basso è il rapporto acqua/cemento corrispondente al massimo della curva e tanto migliori risultano le qualità del materiale.

Queste considerazioni spiegano le ragioni che hanno sempre stimolato la ricerca di più efficienti sistemi di compattazione e di più efficaci additivi fluidificanti. Recentemente sono apparsi in commercio nuovi additivi di elevato potere fluidificante che dovrebbero consentire un eccezionale miglioramento delle qualità del calcestruzzo proprio perché rendono possibile l'ottenimento di calcestruzzi molto fluidi (slump 15-25 cm) e quindi facilmente compattabili, anche con rapporti acqua/cemento dell'ordine di 0,40-0,45.

Tuttavia, occorre tener presente che, maggiore è la fluidità del calcestruzzo, maggiori risultano il bleeding e la segregazione degli inerti. Gli inconvenienti legati a questi fenomeni sono dettagliatamente descritti dal Powers [2]. Essi sono molteplici ed alcuni di essi molto insidiosi per la impossibilità di essere valutati direttamente attraverso una semplice osservazione visiva. Innanzitutto il calcestruzzo risulta nel complesso più eterogeneo perché gli inerti più pesanti e più grossi si dirigono sul fondo della struttura, mentre l'acqua risale in superficie trascinando con sé il cemento e le particelle più fini. L'acqua che risale, inoltre, rimane in parte intrappolata al di sotto degli inerti più grossi o delle armature, con la conseguenza che diminuisce l'adesione tra pasta cementizia ed inerte, mentre i ferri risultano meno protetti dalla corrosione. Altri inconvenienti possono essere legati al trasporto per pompe che richiede un calcestruzzo non segregabile, e al ritiro particolarmente

certain value, the concrete becomes so unworkable that in practice it is not possible to achieve complete compaction, and all the concrete qualities from strength to impermeability, from durability to dimensional stability are adversely affected by any further reduction in the w/c ratio. Consequently in practice, with a decrease in the w/c ratio, an initial improvement in concrete quality is noted which then becomes a deterioration as schematically illustrated by the dotted curves in fig. 1: The value of the w/c ratio corresponding to the peak of the curve, that is to the optimum quality of the concrete, depends on the system of compaction and the flowability of the concrete itself. The more efficient the vibration and flowable the concrete, the lower is the w/c ratio corresponding to the peak of the curve and so much the better are the qualities of the material.

These considerations explain the reasons which have always stimulated the research for more efficient compaction systems, and for more efficient fluidifying additives. Recently, new additives have made their appearance commercially having extremely high fluidifying properties and which should result in an exceptional improvement in the quality of concrete in that they actually make it possible to produce a very flowable concrete (slumps 15-25 cm), and therefore easily compactable, even with w/c ratios of the order of 0,40-0,45.

At the same time, it should not be forgotten that the higher the flowability, the greater are the bleeding and the tendency towards aggregate segregation. The inconveniences resulting from these phenomena are described in detail by Powers [2]. They are numerous, and some of them are very insidious indeed due to the impossibility of their direct evaluation using simple visual observation methods. First of all, the concrete becomes more heterogeneous due to the fact that the heavier and larger aggregate particles sink towards the bottom of the structure while the water rises to the surface bringing with it cement and the finer aggregate particles. The rising water, moreover remains partly trapped under the larger aggregate particles and under the reinforcing steel with the result that there is reduced adhesion between the cement paste and the aggregates whilst the steel remains less protected from corrosion attack. Other disadvantages are related to the concrete

elevato sulla superficie del calcestruzzo per l'alto contenuto di acqua e anche di cemento.

Tutti gli inconvenienti sopra menzionati, e provocati sostanzialmente da una scarsa coesione e plasticità del calcestruzzo, possono essere di modesta entità in un normale conglomerato, ma diventano ovviamente più evidenti e più pericolosi in un calcestruzzo molto fluido. Occorre tener presente che l'American Concrete Institute [3] prende in considerazione calcestruzzi fluidi con uno slump massimo di 17-18 cm. Con i nuovi additivi superfluidificanti, invece, è possibile ottenere con un basso rapporto acqua/cemento calcestruzzi molto più fluidi con uno slump di 20-25 cm. È evidente, quindi, che i problemi connessi con il bleeding e la segregazione degli inerti diventano ancora più importanti con l'introduzione sul mercato dei nuovi additivi superfluidificanti. Per valutare bene tutte le potenziali caratteristiche dei calcestruzzi fluidi, pur preparati con un basso rapporto acqua/cemento, è necessario che accanto alla fluidità sia presa in considerazione una misura della coesione, della plasticità, della resistenza alla segregazione.

Scopo di questa nota è quello di suggerire un metodo per valutare, in modo semplice e rapido, le proprietà reologiche di fluidità e di plasticità del calcestruzzo, attraverso la determinazione di un indice di « reo-plasticità » (IRP). Un elevato valore dell'IRP sta a indicare che il calcestruzzo è « reoplastico », e cioè oltre a essere scorrevole, facile da mettere in opera, e ben compattabile, è anche plastico, coesivo, con scarsa tendenza alla sedimentazione e con un bleeding relativamente basso.

La valutazione della fluidità può essere fatta, per esempio, attraverso la determinazione dell'abbassamento al cono di Abrams, mentre più difficile appare una misura quantitativa della tendenza alla segregazione degli aggregati. Powers [2], nello studio delle proprietà del calcestruzzo fresco, ha messo in evidenza come la sedimentazione dei solidi da una parte, ed il bleeding dell'acqua dall'altra, siano due manifestazioni dello stesso fenomeno e cioè della instabilità dell'impasto provocato da una scarsa coesione. Tutte le misure quantitative del fenomeno sono quindi ricondotte ad una misura dell'acqua che affiora in superficie, purché si abbia cura di impedire l'evaporazione e l'assorbimento dell'acqua da parte della cassafornia e degli inerti insaturi.

## PARTE SPERIMENTALE

Tutte le operazioni di preparazione dei calcestruzzi e di misure di slump e di bleeding sono state effettuate in una camera climatica termostata a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e con umidità relativa del 65%. I materiali impiegati (cemento, inerti, acqua e additivo) sono stati conservati nelle stesse condizioni igrometriche per almeno tre giorni prima di essere utilizzati.

Utilizzando una betoniera a ciclo forzato con asse verticale, sono stati confezionati tre tipi di calcestruzzi con cemento Portland normale, caratterizzati da un diverso dosag-

*pumping, which requires an unsegregable concrete, or to the resulting particularly high surface shrinkage of the concrete due to the high concentration there of water and cement.*

*All the above-mentioned disadvantages, which are substantially due to the scarce cohesion and plasticity of the concrete, can be of modest entity in a normal conglomerate, but they become more evident, and more dangerous, in a very flowable concrete. It is to be noted that the American Concrete Institute [3] takes into consideration flowable concretes, having a maximum slump of  $17 \div 18$  cm. With the new superfluidifying additives it is possible to obtain with a low w/c ratio, extremely flowable concrete having a slump of  $20 \div 25$  cm. It is evident, therefore, that the problems relating to bleeding and aggregate segregation become more important with the introduction onto the market of these new superfluidifiers. To properly evaluate all of the potential characteristics of flowable concrete, even those designed with a low w/c ratio, it is necessary that besides the flowability measurement, measurements of cohesion, plasticity and resistance to segregation be taken into consideration.*

*The scope of this paper is to suggest a method for the simple and rapid evaluation of the rheological properties and the plasticity of concrete by means of the determination of a Rheoplastic Index (RPI). A high value of RPI indicates that a concrete is « rheoplastic », that is, apart from being flowable, easily placeable and well compacted, it is also plastic, cohesive and with very little tendency towards segregation and bleeding.*

*The evaluation of flowability can be made for example by means of Abrams slump cone, while it appears more difficult to measure the tendency towards segregation of the aggregates. Powers [2] in his study of the properties of fresh concrete has revealed that the sedimentation of the solids on the one hand, and bleeding on the other are two manifestations of the same phenomenon that is, the instability of the mix due to its low cohesion. All the quantitative measurements of the phenomena are thus reduced to the measurement of the water which appears on the surface, given that cure is taken to prohibit its evaporation and its eventual absorption by the formwork and/or insaturated aggregates.*

## EXPERIMENTAL

*The whole procedure of preparation of the concrete mixes and the measurements of slump and bleeding were carried out in a climatized room thermostatically controlled at  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  with relative humidity at 65%. The material used (cement, aggregates, water and additive) were maintained for at least three days under the same hydrothermic conditions before being used.*

*By using a pan mixer with vertical axis, three types of concrete mix were prepared each having a different Portland cement nominal content (300-350-400  $\text{Kg}/\text{m}^3$ ). The w/c ratio*

gio nominale di cemento (300-350-400 Kg/m<sup>3</sup>). Per ciascun tipo di calcestruzzo il rapporto a/c è stato fatto variare in modo che lo slump, misurato immediatamente dopo una miscelazione di 2 minuti dell'impasto, variasse da circa 2 a circa 25 cm. Misure di slump al di fuori di questo intervallo sono scarsamente ripetibili o significative. Infatti un abbassamento al cono inferiore a 2 cm ha una validità piuttosto limitata [3], mentre valori di slump superiori a 20-25 cm non possono in pratica essere ottenuti se si tiene conto che anche con il più fluido dei calcestruzzi, dopo il sollevamento del cono si ottiene una « focaccia » di un certo spessore. La fig. 2 mostra gli abbassamenti al cono di Abrams in funzione del rapporto acqua/cemento per calcestruzzi con diversi dosaggi di cemento con e senza additivi: si può osservare che al di fuori dell'intervallo 2-22 cm lo slump non varia apprezzabilmente anche con forti variazioni del rapporto acqua/cemento.

Come inerti sono stati impiegati una sabbia con diametro massimo di 5 mm ed un modulo di finezza di circa 2, ed una ghiaia di diametro massimo di 15 mm. Il rapporto sabbia/ghiaia è stato di 2/3.

Le prove sono state effettuate sia in presenza che in assenza di additivi. Questi additivi impiegati sono stati scelti fra quelli disponibili in commercio: l'additivo n. 1 è un fluidificante di tipo tradizionale a base di acidi idrocarbossilici, gli additivi n. 2 e 3 sono superfluidificanti a base di polimeri sintetici. Le percentuali di aggiunta rispetto al peso dei cementi sono state: 0,2%, 3% e 3% rispettivamente per gli additivi n. 1, 2 e 3. Lo slump è stato misurato immediatamente dopo la miscelazione in betoniera.

Il bleeding è stato misurato secondo il metodo descritto dalle norme UNI [4], cioè prelevando per mezzo di una pipetta il volume dell'acqua essudata ogni 10 min durante i primi 60' e successivamente ogni 30 min per il tempo rimanente fino ad esaurimento del bleeding per inizio della presa. Il contenitore cilindrico (diametro 25 cm; altezza 27 cm) rimaneva chiuso per impedire l'evaporazione dell'acqua fra una misura e l'altra.

Il volume, in cm<sup>3</sup> di acqua essudata riferita alla sezione, in cm<sup>2</sup>, del contenitore cilindrico è stata riportata in funzione del tempo. La velocità di bleeding, in cm/sec si mantiene costante per un periodo di tempo che dipende dalle caratteristiche del calcestruzzo, per poi diminuire fino ad annullarsi in corrispondenza della presa del cemento [2]. A questo punto, il volume totale di acqua essudata per unità di superficie, riferito all'altezza del calcestruzzo (25 cm) dentro il contenitore cilindrico, indica la cosiddetta capacità di bleeding [2].

Sia i valori dello slump, che quelli della capacità di bleeding dipendono ovviamente da tutti i parametri condizionanti le proprietà del calcestruzzo fresco: composizione del calcestruzzo, tipo di cemento, di inerti e di additivo, modalità di mescolamento, temperatura, ecc. Nella presente nota si vuole esaminare, in particolare, come l'introduzione di un

*of each mix was varied so that the slump, measured immediately after a 2 minutes mixing of the batch, would vary from 2 to 25 cm approximately. Slump measurements outside this range are not easily repetitive, and of little significance. In fact, a slump of less than 2 cm can hardly be considered valid, whilst slumps of over 20-25 cm cannot be measured if it is taken into account that even with the most flowable concrete, on lifting the cone, there always remains a « pat » of a certain thickness. Fig. 2 illustrates slump readings as a function of the w/c ratio for concretes with different cement contents; it can be seen that outside the limits of the 2-22 cm zone, the slump does not vary to any appreciable extent even when the w/c ratio values alter considerably.*

*The aggregates used were a sand having a maximum diameter of 5 mm, and a fineness modulus of approximately 2, and a gravel having a maximum diameter of 15 mm. The sand/gravel ratio was 2/3.*

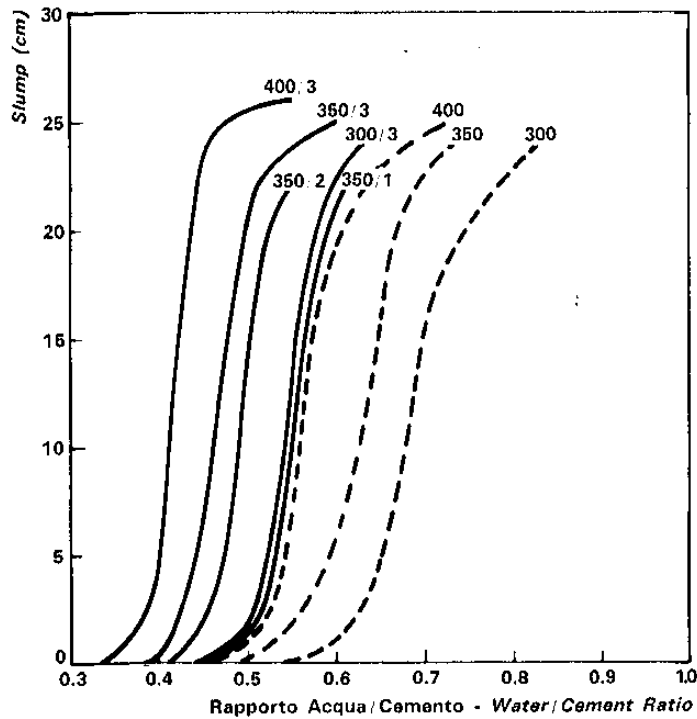
*The tests were carried out with and without additives. These were chosen from those commercially available; additive No. 1 is a fluidifier of traditional type based on hydroxycarboxylic acids, additives No. 2 and 3 are superfluidifiers based on synthetic polymers. The additive dosage in relation to the cement weight was 0,2%, 3% and 3% respectively for additives No. 1, 2 and 3. The slump measurement was taken immediately after the batch was discharged from the mixer.*

*The bleeding was measured according to the method described in the UNI Standards [4]; that is, by means of a pipette drawing off the resultant bleed water at intervals of 10 min during the first 60 min period and then successively at intervals of 30 min for the period of time remaining until the initial set commences, when no further bleed water is produced. The test cylinder (diameter 25 cm, height 27 cm) was kept sealed between one reading and the other, to prevent the evaporation of water.*

*The ratio of volume (in cm<sup>3</sup>) of the exuded water to the section (in cm<sup>2</sup>) of the test cylinder was then plotted as a function of time. The velocity of bleeding, in cm/sec, is constant for a period of time which depends on the characteristics of the concrete, and then diminishes to zero at the moment when the cement commences its set [2]. At this point, the total volume of exuded water per unit of surface area, referred to the concrete thickness (25 cm) inside the test cylinder, indicates the so-called bleeding capacity [2].*

*The slump as well as the bleeding capacity are obviously dependent upon the parameters which condition the properties of fresh concrete; that is, the composition of the concrete, the type of cement, aggregate and additive, the mixing sequence, the temperature, etc. This article examines, in parti-*

additivo fluidificante modifichi la «reoplasticità» di un determinato calcestruzzo, fermo restando che questa proprietà non dipende soltanto dall'additivo, ma anche dagli altri parametri, quale per esempio il dosaggio di cemento.



ular, how the introduction of a fluidifying additive modifies the «rheoplasticity» of a concrete, given that this particular property is dependent on the presence of additives, as on the other parameters, for example, the cement content.

2 - Influenza del rapporto acqua/cemento sull'abbassamento al cono di Abrams (slump). Le curve tratteggiate si riferiscono a calcestruzzi non additivati, le curve continue a calcestruzzi contenenti l'additivo. I primi numeri accanto alle curve indicano i dosaggi di cemento in  $\text{Kg}/\text{m}^3$ , i secondi il tipo di additivo

2 - Influence of water/cement ratio on slump cone. Full and dashed lines concern concretes with and without additives respectively. The first figure on the curves shows the cement content in  $\text{Kg}/\text{m}^3$  and the second one indicates the number of the additive.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

In fig. 3 è mostrato l'andamento della capacità di bleeding (B) in funzione dello slump (S) per i calcestruzzi privi di additivo. La capacità di bleeding aumenta con l'aumentare della scorrevolezza del calcestruzzo valutata attraverso lo slump. Si può osservare che maggiore è il contenuto di cemento, minore è la capacità di bleeding per un dato valore dello slump. L'area (A) compresa tra la curva, l'asse dell'ascisse e le due verticali tratteggiate corrispondenti ai valori dello slump di 2 e 22 cm, risulta tanto minore quanto maggiore è il contenuto di cemento. Il reciproco di A potrebbe rappresentare una misura dell'IRP, in quanto minore è A, più vicina all'ascisse si trova la curva: ciò significa che la capacità di bleeding risulta relativamente piccola sia per bassi che per alti valori dello slump. I valori di A e del suo reciproco (IRP) sono mostrati in Tabella I per i calcestruzzi con e senza aggiunta di additivo.

In fig. 4 è mostrato il comportamento di due calcestruzzi, entrambi con un contenuto di cemento di  $350 \text{ Kg}/\text{m}^3$  e contenenti l'additivo n. 1 fluidificante di tipo tradizionale (fig. 4a) e l'additivo superfluidificante n. 2 (fig. 4b). Con il primo additivo si osserva che, a pari rapporto a/c, aumenta lo slump (fig. 2) tuttavia in misura inferiore a quella degli additivi n. 2 e 3. Anche la capacità di bleeding aumenta

## RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 3 shows the bleeding capacity (B) in function of the slump (S), for concretes without additives. The bleeding capacity increases with an increase in the flowability of the concrete, measured in terms of its slump. It can be seen that the higher becomes the cement content, the lower is the bleeding capacity for any given slump value. The area (A) contained between the curve, the abscissa, and the two vertical lines corresponding to slumps 2 and 22 cm respectively, diminishes as the cement content increases. The reciprocal of A could represent a measure of the RPI, in that the smaller A becomes, the closer the curve approximates to the horizontal axis. This signifies that the bleeding capacity can be low for either high or low values of slump. Values of A, and its reciprocal (RPI) are shown in Table I, for concretes with and without additives.

Fig. 4 demonstrates the behaviour of two concretes with the same cement content of  $350 \text{ Kg}/\text{m}^3$ , to one of which has been added the traditional type of additive No. 1 (fig. 4a) and to the other, the superfluidifying additive No. 2 (fig. 4b). It can be seen that for the same w/c ratio, the addition of additive No. 1 causes an increase in slump which is lower than

all'aumentare della fluidità (fig. 4a) cosicché il reciproco di  $A$  per questo calcestruzzo ( $21,74 \text{ cm}^{-1}$ ) è di poco superiore a quello del corrispondente calcestruzzo privo di additivo ( $13,16 \text{ cm}^{-1}$ ). Un maggior aumento (da  $13,16$  a  $37,04$ ) viene registrato con l'additivo n. 2.

Nella fig. 5 è mostrato l'andamento della capacità di bleeding in funzione dello slump per tre calcestruzzi tutti contenenti l'additivo n. 3. Si può osservare che l'area  $A$  diminuisce all'aumentare del contenuto di cemento e diviene praticamente nulla nell'impasto più ricco in cemento ( $400 \text{ Kg/m}^3$ ). Ciò indica che in esso la segregazione è praticamente assente anche quando la fluidità è così elevata (slump  $22 \text{ cm}$ ) da poter considerare autolivellante il calcestruzzo.

Da un punto di vista esecutivo, una valutazione dell'IRP con il metodo ora descritto si presenta piuttosto laboriosa, in quanto è necessario preparare una serie di calcestruzzi con un contenuto di acqua crescente cosicché lo slump passi progressivamente da  $2$  a  $22 \text{ cm}$ . Inoltre, la misura di  $1/A$  non è indicativa del comportamento di un calcestruzzo ma piuttosto di una serie di calcestruzzi. La misura appare sostanzialmente più idonea per valutare globalmente l'effetto di un certo additivo su una serie di calcestruzzi a fluidità variabile. Da questo punto di vista, il rapporto tra il valore di  $1/A$  misurato per il calcestruzzo additivato, e quello corrispondente per il calcestruzzo senza additivo, può rappresentare un'utile indicazione dell'effetto dell'additivo sulla « reoplasticità » dei calcestruzzi. Tale rapporto ( $E$ ) è riportato nella quinta colonna della Tabella I e mostra, per esempio, la maggiore efficacia dell'additivo n. 3 rispetto agli altri impiegati in questo lavoro.

L'esame dei grafici delle figg. 3-5 mostra che le maggiori differenze nella capacità di bleeding dei diversi calcestruzzi, appaiono quando la fluidità è molto elevata, cioè proprio quella corrispondente ai calcestruzzi precedentemente definiti « reoplastici ». Pertanto una valutazione più significativa, oltre che più rapida dal punto di vista esecutivo, potrebbe avvenire attraverso la misura della capacità di bleeding di un determinato calcestruzzo avente una fluidità elevata, per esempio corrispondente ad uno slump di  $20 \text{ cm}$ . Un calcestruzzo « reoplastico » dovrebbe in sostanza accoppiare l'elevata scorrevolezza alla bassa capacità di bleeding (circa  $2 \cdot 10^{-3}$ ) di un calcestruzzo plastico e coesivo come quello che si ottiene normalmente con uno slump di  $2-3 \text{ cm}$  (fig. 3).

Fissato lo slump (per es.  $20 \text{ cm}$ ), minore è la capacità di bleeding ( $B'$ ), maggiore sarà l'indice di « reoplasticità » del calcestruzzo. L'IRP potrebbe quindi essere valutato attraverso il reciproco della capacità di bleeding ( $1/B'$ ) di un calcestruzzo con slump di  $20 \text{ cm}$ . I valori così calcolati sono mostrati nella penultima colonna della Tabella I. Essi mostrano che l'IRP così definito aumenta sia con il contenuto di cemento, che per aggiunta degli additivi impiegati. Tuttavia l'effetto di questi ultimi varia notevolmente con il tipo di additivo. Se si assume come « reoplastico » un calcestruzzo che abbia uno slump di  $20 \text{ cm}$

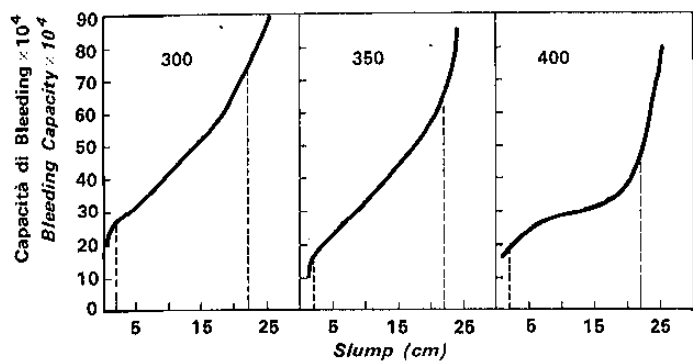
those observed in the case of additives No. 2 and 3 (fig. 2). Also the bleeding capacity increases with flowability (fig. 4a) so that the reciprocal of  $A$  pertaining to this concrete ( $21.74 \text{ cm}^{-1}$ ) is slightly higher than that for the corresponding concrete without additive ( $13.16 \text{ cm}^{-1}$ ). A greater increase (from  $13.16$  to  $37.04$ ) was obtained with additive No. 2.

Fig. 5 illustrates the bleeding capacity in function of the slump, for three concrete mixes each containing additive No. 3. It can be seen that the area  $A$  decreases with an increase in the cement content, and becomes practically zero in the richer mix ( $400 \text{ Kg/m}^3$ ). This indicates that segregation is practically absent even though the flowability is such (slump  $22 \text{ cm}$ ) that the concrete can be considered self-levelling.

From the practical point of view, an evaluation of the RPI using the method described above, seems fairly laborious in that it is necessary to prepare a series of concrete mixes with increasing water contents such that the slump changes progressively from  $2$  to  $22 \text{ cm}$ . Moreover, the measurement of the factor  $1/A$  is not indicative of the behaviour of a particular concrete, but rather of a series of different concrete mixes. This measurement appears more substantially suitable for a global evaluation of the effect of a particular additive on a series of concretes of varying fluidity. From this point of view, the ratio between the value of  $1/A$  for a series of concretes containing additive and that for the same series without additive, could represent a useful indication of the effect of the additive on the « rheoplasticity » of the concretes. Such a ratio ( $E$ ) has been shown in the fifth column of Table I and demonstrates, for example, the greater efficiency of additive No. 3 with respect to the others used in this study.

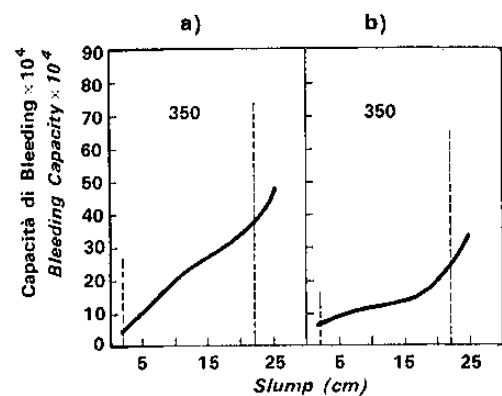
An examination of the graphs in figs. 3-5 shows that the major differences in the bleeding capacities of the various concretes, occur when the flowability is very high, that is just at those values of slump which correspond to concretes which were previously called « rheoplastic ». Consequently, a more significant evaluation, and from the practical point of view a more rapid one, could be arrived at by measuring the bleeding capacity of a given concrete having a high flowability, for example corresponding to a slump of  $20 \text{ cm}$ . A « rheoplastic » concrete substantially should couple high fluidity with the low bleeding capacity (about  $2 \cdot 10^{-3}$ ) of a plastic and cohesive concrete such as is normally obtained at  $2-3 \text{ cm}$  slump (fig. 3).

For a fixed slump (for example  $20 \text{ cm}$ ), the smaller the bleeding capacity, the greater will be the RPI of the concrete. The RPI could therefore be evaluated as the reciprocal of the bleeding capacity ( $1/B'$ ) of a concrete at slump  $20 \text{ cm}$ . These values so calculated are shown in the penultimate column of Table I. These figures indicate that the RPI defined in this manner increases both with a cement content increase, and with the addition of the additives examined in this work. Nevertheless, the latter effect varies considerably with the type of additive. If it is assumed to be « rheoplastic » a concrete which has a slump of  $20 \text{ cm}$  and a bleeding capacity



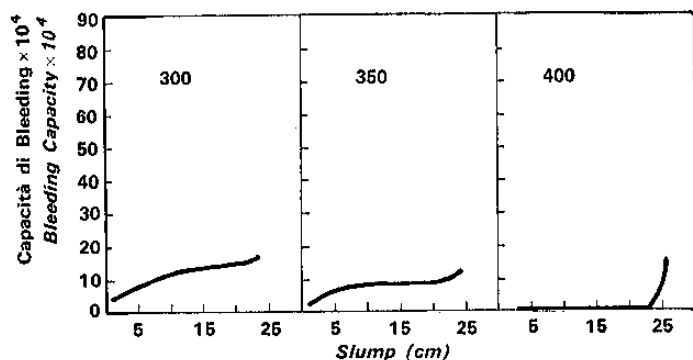
3 - Capacità di bleeding in funzione dello slump per calcestruzzi non contenenti additivi. I numeri dentro i grafici indicano i dosaggi di cemento in Kg/m<sup>3</sup> di calcestruzzo

3 - Bleeding capacity in function of slump for concretes not containing additives. The figures into the diagrams show the cement content in Kg/m<sup>3</sup>



4 - Capacità di bleeding in funzione dello slump per calcestruzzi contenenti gli additivi n. 1 (a) e n. 2 (b) entrambi con un dosaggio in cemento di 350 Kg/m<sup>3</sup>

4 - Bleeding capacity in function of slump for concretes with a cement content of 350 Kg/m<sup>3</sup> and containing additives n. 1 (a) and n. 2 (b)



5 - Capacità di bleeding in funzione dello slump per calcestruzzi contenenti l'additivo n. 3 e con dosaggio di cemento di 300 - 350 - 400 Kg/cm<sup>3</sup>

5 - Bleeding capacity in function of slump for concretes containing the additive n. 3 and with cement content of 300 - 350 - 400 Kg/m<sup>3</sup>

Dosaggio di cemento Cement content	Additivo N. Additive No.	A (cm)	1/A (cm <sup>-1</sup> )	E	1/B'	E'
300	—	0,094	10,64	—	150	—
350	—	0,076	13,16	—	170	—
400	—	0,060	16,67	—	260	—
350	1	0,046	21,74	1,7	290	1,7
350	2	0,027	37,04	2,8	500	2,9
300	3	0,023	43,47	4,1	600	4,0
350	3	0,016	62,51	4,8	1250	7,4
400	3	0,000	∞	∞	∞	∞

TABELLA I  
Effetto del dosaggio di cemento e di alcuni additivi sulla « reoplasticità » del calcestruzzo, valutata attraverso 1/A e 1/B'

TABLE I  
Influence of the cement content and some additives on the « rheoplasticity » of concrete, determined by 1/A and 1/B'

L'additivo N. 1 è un tradizionale additivo riduttore di acqua, a base di acidi idrossicarbossilici, aggiunto in misura dello 0,2% rispetto al peso di cemento. Gli additivi N. 2 e 3 sono fluidificanti a base di polimeri sintetici aggiunti in misura del 3%.

Additive No. 1 is a common water reducing admixture, containing hydroxy-carboxylic acids, the amount of which is 0.2% by weight of cement. Additives No. 2 and 3 are synthetic polymers the amount of which is 3%.

ed una capacità di bleeding inferiore a  $2 \cdot 10^{-3}$ , l'IRP di un tale calcestruzzo dovrebbe essere superiore a 500.

I dati della Tabella I mostrano che, a parità di dosaggio di cemento ( $350 \text{ Kg/m}^3$ ), solo con l'additivo n. 3 l'IRP (600) è decisamente superiore al valore sopra menzionato. La Tabella I indica anche che, aumentando il contenuto di cemento (per es. a  $400 \text{ Kg/m}^3$ ) e impiegando un opportuno additivo (per es. n. 3) si può arrivare ad un calcestruzzo con IRP infinito, e cioè privo praticamente di bleeding pur essendo molto fluido.

Nell'ultima colonna della Tabella I è mostrato il rapporto tra il valore di  $1/B'$  per i calcestruzzi con additivo e quello corrispondente per il calcestruzzo senza additivo. Tale rapporto ( $E'$ ), che indica l'effetto dell'additivo sul particolare calcestruzzo fluido preso in esame, presenta valori abbastanza simili a quelli di  $E$  ricavati più in generale su una serie di calcestruzzi. Anche il valore di  $E'$  mette in evidenza la diversa efficacia degli additivi sulla « reoplasticità » di un calcestruzzo.

## CONCLUSIONI

L'aumento della fluidità del calcestruzzo è generalmente accompagnata da un aumento della segregazione degli inerti e del bleeding. Questo, come è noto, può provocare alcuni seri inconvenienti quali la riduzione dell'adesione tra la pasta cementizia e gli inerti, una protezione minore dei ferri, e soprattutto una maggiore eterogeneità delle strutture.

Nel presente lavoro viene proposto di valutare il comportamento reologico e la plasticità del calcestruzzo fresco attraverso la determinazione del cosiddetto indice di « reoplasticità » (IRP) definito come:  $\text{IRP} = 1/B'$  dove  $B'$  è la capacità di bleeding di un calcestruzzo molto fluido con slump di 20 cm e dove valori elevati dell'IRP corrispondono a calcestruzzi molto fluidi oltre che privi di segregazione.

L'IRP di un calcestruzzo dipende non solo dal contenuto di cemento, dal tipo di additivo impiegato, come è mostrato in questo lavoro, ma anche dal tipo di inerte, dalle modalità di mescolamento, oltre che ovviamente dalle condizioni ambientali. Tuttavia calcestruzzi di elevata « reoplasticità », per es. con IRP maggiori di 500, possono essere ottenuti solo mediante l'impiego di particolari additivi. Diviene allora possibile, in questo caso, preparare calcestruzzi di ottime qualità dal punto di vista della resistenza meccanica, del ritiro, del fluage, dell'impermeabilità, della durezza, ecc. [5-7] ed al tempo stesso di facile messa in opera oltre che privi di segregazione.

Si propone, inoltre, di definire effetto di « reoplasticità » di un additivo il rapporto fra l'IRP del calcestruzzo con additivo e quello dello stesso calcestruzzo senza additivo. I dati ottenuti nel presente lavoro mostrano che non tutti gli additivi fluidificanti si comportano allo stesso modo

*less than  $2 \cdot 10^{-3}$  the RPI of such a concrete should be higher than 500.*

*The data from Table I demonstrate that, at equal cement contents ( $350 \text{ Kg/m}^3$ ), only with additive No. 3 the RPI (600) is decidedly higher than the above mentioned figure. Table I also indicates that by increasing the cement content (for example to  $400 \text{ Kg/m}^3$ ) and using a suitable additive (for example No. 3) it is possible to arrive at a concrete with an infinite value of RPI, that is practically devoid of bleeding while at the same time being very flowable.*

*In the last column of Table I is shown the ratio between the value  $1/B'$  for the corresponding concretes with and without additive. This ratio ( $E'$ ), which indicates the effect of the additive on the particular fluid concrete being examined, exhibits values sufficiently similar to those of  $E$  obtained more generally from a series of concretes. Also the value of  $E'$  demonstrates the diversity of the effectiveness of the additives on the « reoplasticity » of a concrete.*

## CONCLUSIONS

*The increase in flowability of concrete is generally accompanied by an increase in the segregation of the aggregates, and in the bleeding. It is well known that this can cause some serious inconveniences such as the reduction of the adhesion between cement paste and the aggregates, less protection of the reinforcing steel and, above all, a greater heterogeneity of the structure.*

*In this paper, it is proposed to evaluate the rheological behaviour and the plasticity of fresh concrete by means of the determination of the so-called « reoplasticity » index (RPI), defined as  $1/B'$ , where  $B'$  is the bleeding capacity of a very flowable concrete having slump of 20 cm, and where high values of RPI correspond to very flowable and unsegregable concretes.*

*The RPI of a concrete depends not only on the cement content, and on the type of additive used, as has been demonstrated in this paper, but also on the type of aggregates, the mixing system, and obviously, the environmental conditions. Nevertheless concretes having a high « reoplasticity », for example, with RPI higher than 500, can be obtained only using particular additives. It becomes, then, possible in this case to prepare concretes of high quality from the point of view of strength, shrinkage, creep, impermeability, durability, etc. [5-7] and at the same time being very placeable apart from being devoid of segregation.*

*It is proposed, furthermore, to define the effect of « reoplasticity » of an additive as the ratio between the RPI of a concrete with additive and the RPI of the same concrete without additive. The data obtained in this work show that not all the fluidifying additives have the same effect in modify-*



nel modificare l'IRP. Solo alcuni fanno aumentare il valore dell'IRP e presentano cioè un effetto di « reoplasticità » molto maggiore di 1. Quando ciò avviene, l'aggiunta di un additivo provoca un notevole aumento della fluidità ed al tempo stesso una riduzione nel bleeding e nella segregazione degli inerti.

Novembre, 1975

*ing the RPI value. Only a few produce an increase in the RPI value, and show a « rheoplastic » effect much greater than 1. When this happens, the addition of an additive causes a notable increase in flowability and, at the same time, a reduction in the bleeding of water and in the segregation of the aggregates.*

*November, 1975*

Dipartimento di Scienza dei Materiali - Facoltà di Ingegneria - Università di Ancona - Via della Montagnola - 60100 Ancona

#### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] NEVILLE A.M.: « Properties of Concrete », ed. Pitman Paperback, Londra (1975).
- [2] POWERS T.C.: « The Properties of Fresh Concrete », John Wiley & Sons, Inc., New York (1968).
- [3] American Concrete Institute Standard, ACI Manual of Concrete Practice, Vol. 1, pag. 309-1, ACI Publication, Detroit (1973).
- [4] Norma UNI 7122/72 Calcestruzzo fresco. Determinazione della quantità d'acqua di impasto essudata.

- [5] COLLEPARDI M., S. GUELLA, M. VALENTE: « Porosità, permeabilità e durabilità del calcestruzzo », Giornate AICAP, Sanremo, ottobre 1975.
- [6] COLLEPARDI M., S. GUELLA, M. VALENTE: « Studio degli attacchi chimici del calcestruzzo con particolare riferimento all'azione dell'acqua del mare », Giornate AICAP, Sanremo, ottobre 1975.
- [7] COLLEPARDI M., S. GUELLA, M. VALENTE: « Degradazione del calcestruzzo provocata da cicli gelo-disgelo », Giornate AICAP, Sanremo, ottobre 1975.

**Il calcestruzzo « reoplastico » - Riassunto** - Il calcestruzzo « reoplastico » è un calcestruzzo molto fluido ma al tempo stesso poco segregabile ottenibile mediante l'aggiunta di polimeri sintetici. Si propongono due metodi per la valutazione del cosiddetto indice di « reoplasticità » del calcestruzzo. Il primo è basato sulla misura dell'abbassamento al cono di Abrams e della capacità di bleeding su una serie di calcestruzzi con rapporto acqua/cemento variabile. La « reoplasticità » viene valutata come il reciproco dell'area che si trova sotto la curva della capacità di bleeding in funzione dell'abbassamento al cono. Il secondo metodo, più semplice e più rapido, si basa sulla misura della sola capacità di bleeding di un calcestruzzo fluido (slump = 20 cm). L'indice di « reoplasticità » coincide con il reciproco della capacità di bleeding di questo calcestruzzo.

**« Rheoplastic » concrete - Synopsis** - Rheoplastic concrete is a very flowable concrete but at the same time with low segregation. It is obtained by adding synthetic polymers to a traditional concrete. Two methods for the evaluation of the so called « rheoplasticity » index are proposed in this paper. The first method is based on the determination of the Abrams cone slump and the bleeding capacity for a series of concretes with different water/cement ratio. The « rheoplasticity » is measured by the reciprocal of the area under the bleeding capacity curve versus slump. The second method, which is more rapid and simple, is based on the measure of the bleeding capacity of a flowable concrete (slump = 20 cm). The « rheoplasticity » index is the reciprocal of the bleeding capacity of this concrete.

**Le béton « rhéoplastique » - Résumé** - Le béton « rhéoplastique » est un béton très fluid mais au même temps avec peu de réssuage, qui peut être obtenu par l'addition de polymers synthetics au béton traditionnel. Dans cet article on a proposé deux méthodes pour la mesure de l'index appelé de « rhéoplasticité ». La première méthode est basée sur la mesure de l'affaissement au cone d'Abrams et de la capacité de réssuage pour une série de bétons préparés avec différent rapport eau/ciment. Le « rhéoplasticité » est évaluée par le réciproque de la surface qui est sous la courbe du réssuage en fonction de l'affaissement. La deuxième méthode, plus simple et plus rapide, est basée seulement sur la mesure de la capacité du réssuage d'un béton fluid (affaissement = 20 cm). L'index de « rhéoplasticité » est exprimé par le réciproque de la capacité du réssuage de ce béton.

**« Rheoplastischer » Beton - Zusammenfassung** - « Rheoplastischer » ist ein ziemlich flüssiger Beton, der gleichzeitig wenig Absonderungen aufweist. Dies erzielt man mit Zusatz synthetischer Polymeren zum traditionellen Beton. Der Artikel schlägt zwei Methoden zur Messung des Indexes der « Rheoplatizität » vor. Die erste dieser Methoden begründet sich auf die Messung des Zusammenfalls der Kegelspitze und des Auslaufvermögens einer Serie von Betonproben hergestellt mit verschiedenen Wasser/Zement-Verhältnissen. Die « Rheoplatizität » wird auf der Basis der Gegenseitigkeit der Zone unter der Kurve des Auslaufvermögens gegenüber des Zusammenfalls des Kegels bewertet. Die zweite Methode, die einfacher und schneller ist, begründet sich auf die Messung des Auslaufvermögens eines sehr dünnflüssigen Beton s(Kegel = 20 cm). In diesem Falle ist der Index der « Rheoplatizität » die Gegenseitigkeit des Auslaufvermögens dieses Betons.