

l'industria italiana del **CEMENTO**



PROCEDIMENTO DI CALCOLO DELLA COMPOSIZIONE DEL CALCESTRUZZO PER MANUFATTI IN C.A. E C.A.P. MATURATI A VAPORE

LUIGI COPPOLA (*), GIACOMO MORICONI (**)

RIASSUNTO

Si è trovata una correlazione tra la resistenza meccanica a compressione a 28 giorni e 20°C ($R_{28,20}$), e la resistenza meccanica al tempo t del corrispondente calcestruzzo stagionato a vapore alla temperatura T ($R_{t,T}$). Tale correlazione rende possibile l'estensione del procedimento di mix-design anche al calcestruzzo destinato alla realizzazione della maggior parte delle strutture prefabbricate in c.a. e c.a.p.. Essa, tuttavia, è molto complessa e dipende fondamentalmente dai seguenti parametri: a) classe di cemento; b) tempo di prestagionatura ambientale; c) velocità di riscaldamento; d) temperatura massima di regime; e) durata del ciclo di vapore; f) tempo, dopo il ciclo di vapore. I dati sperimentali sono stati analizzati ed aggregati sotto forma di tabelle per semplificare la correlazione tra $R_{t,T}$ ed $R_{28,20}$, e quindi tra $R_{t,T}$ e composizione del calcestruzzo in termini di rapporto a/c .

1. INTRODUZIONE

In base alla disponibilità dei dati esistenti nella letteratura tecnica, ed in particolare di quelli raccolti dal produttore di calcestruzzo in relazione alle specifiche materie prime impiegate (cementi, aggregati, ecc.), è possibile calcolare con sufficiente accuratezza quale debba essere la composizione del calcestruzzo in funzione delle proprietà richieste ed in particolare della resistenza meccanica a compressione. Questo procedimento di calcolo prende il nome di *mix-design*, ed un elemento essenziale di questo procedimento è costituito dalla conoscenza della relazione tra resistenza meccanica richiesta da una parte, e rapporto acqua/cemento (a/c) dall'altra [1].

Nella Fig. 1 sono mostrate le correlazioni tra la resistenza meccanica media a 28 giorni e 20°C ed il rapporto a/c per cementi Portland 425 e 525 che sono i più comunemente impiegati nella produzione di manufatti in c.a. e c.a.p. prefabbricati. Le curve di correlazione ($R_{28,20}$) - a/c riportate in Fig. 1 sono state tracciate mediando i dati sperimentali disponibili per i vari cementi reperibili sul nostro territorio nazionale e si riferiscono tutti a stagionature di 20°C come previsto dalle norme per il calcolo della R_{ck} dalla $R_{28,20}$. Per esempio, con un cemento Portland 425, se si vuole ottenere una resistenza meccanica media a 28 giorni di 50 MPa, occorre adottare un rapporto a/c di 0,50. Da questo valore, e dal quantitativo di acqua (a) calcolabile - con i metodi per brevità qui non riportati e già noti nella letteratura [1] - in base agli inerti e agli eventuali additivi disponibili, si può poi determinare il dosaggio di cemento (c) richiesto.

ABSTRACT

A relationship has been found between the 28' day compressive strength at 20°C ($R_{28,20}$) and the compressive strength ($R_{t,T}$) of the corresponding concrete at the time t after a steam curing process at the temperature T . Such a relationship allows us to extend the mix-design procedure to the concrete used for the reinforced or prestressed prefabricated structures. However, this relationship is very complex and depends on the following parameters: a) type of cement; b) time of curing at room temperature before steam curing; c) heating rate; d) maximum temperature of steam curing; e) time of steam curing; f) time after steam curing. All the experimental data have been analyzed and aggregated in form of tables to simplify the relationship between $R_{t,T}$ and $R_{28,20}$ and therefore between $R_{t,T}$ and mix composition in terms of w/c of the concrete.

Questi dati, che consentono di predeterminare la composizione del calcestruzzo, ed in particolare il rapporto a/c , in funzione della R_{ck} richiesta nel progetto della struttura e del tipo di cemento prescelto, non sono purtroppo utilizzabili per i manufatti maturati con ciclo di vapore, in quanto la correlazione resistenza meccanica-rapporto a/c è fortemente dipendente dalla temperatura ed in particolare da quella esistente nel primo giorno di idratazione.

In realtà occorre tener conto di altre due esigenze che rendono più complesso il problema [2]:

il produttore di manufatti prefabbricati non è tanto e solo interessato a conoscere la R_{ck} (a 28 giorni), quanto e soprattutto la resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore e quella alle stagionature immediatamente successive;

la correlazione resistenza meccanica - rapporto a/c non dipende solo dalla temperatura di stagionatura, ma in modo più complesso dalla "storia termica" del ciclo che include i seguenti quattro parametri: a) la stagionatura preliminare a temperatura ambiente (t_{v1}); b) la velocità di riscaldamento (v); c) la temperatura massima di regime (T); d) la durata totale del ciclo termico (t_{v2}).

Tutto ciò ha reso di fatto impraticabile il procedimento del *mix-design* per i calcestruzzi trattati a vapore. Lo scopo del lavoro descritto nella presente relazione è stato quello di trovare delle correlazioni tra la $R_{28,20}$ ed una qualsiasi resistenza meccanica ($R_{t,T}$) determinata al tempo t dopo un certo ciclo di vapore caratterizzato dalla temperatura massima T oltre che dagli altri suddetti parametri rappresentati in Fig. 2 (t_{v1} , v , t_{v2}).

Una volta trovata la correlazione (1)

$$R_{t,T} = f(R_{28,20}) \quad (1)$$

sotto forma di funzione, di tabelle o grafici diventa poi possibi-

(*) Enco, Engineering Concrete, Spresiano.
(**) Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Facoltà di Ingegneria, Università di Ancona.

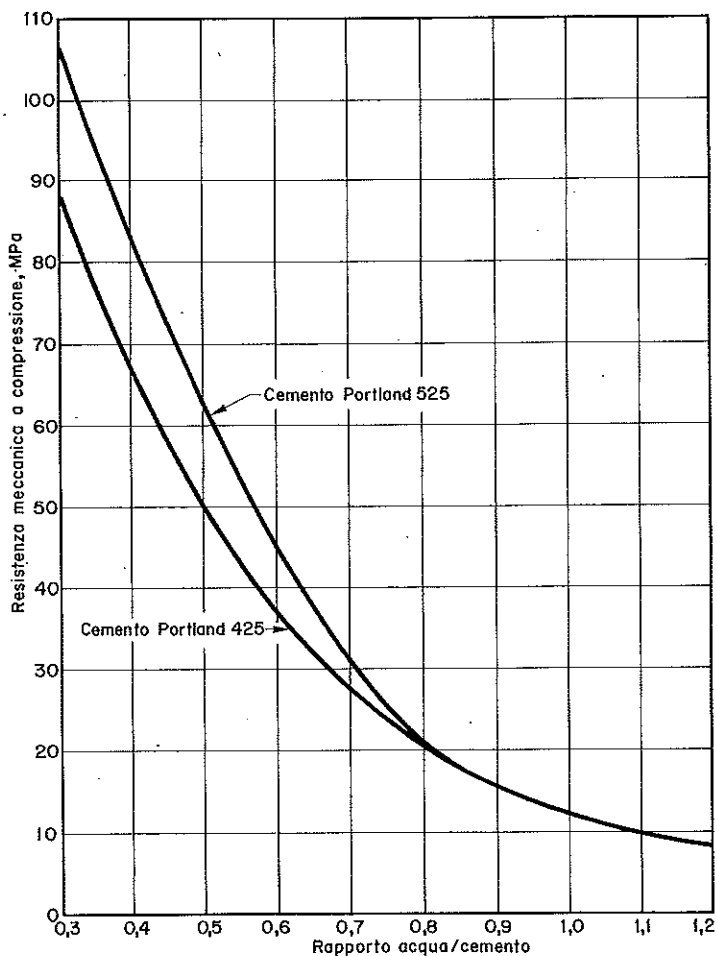


Fig. 1 - Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi confezionati con cemento Portland di classe 425 e 525. (Per i calcestruzzi con cemento d'altoforno o pozzolanico di classe 425 si ottengono all'incirca le stesse resistenze meccaniche a 28 giorni di quelli confezionati con il cemento Portland di pari classe).

le determinare il rapporto a/c giacché è già noto il legame (2) tra $R_{28,20}$ ed a/c :

$$R_{28,20} = g(a/c) \quad (2)$$

in forma grafica come è mostrato in Fig. 1.

2. PARTE SPERIMENTALE

È stata eseguita una vasta ed approfondita sperimentazione i cui dettagli tecnici per brevità di spazio disponibile, non posso-

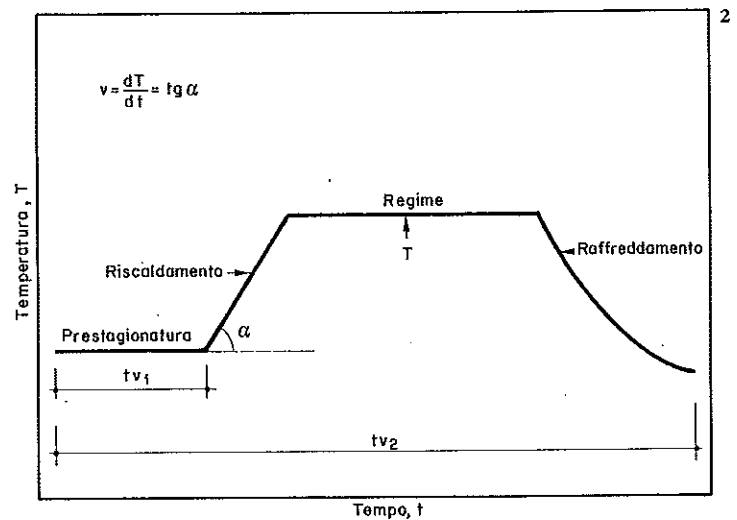


Fig. 2 - Parametri caratteristici di un ciclo termico per un trattamento a vapore del calcestruzzo.

no essere riportati se non in forma di risultati medi finali.

Sono stati impiegati numerosi cementi d'altoforno, pozzolanici e Portland di classe 425, nonché cementi Portland di classe 525 provenienti da diverse cementerie dislocate sul territorio nazionale ed aggregati naturali e di frantumazione con diametro massimo variabile tra 10 e 30 mm. Sono stati confezionati calcestruzzi - con o senza additivi superfluidificanti - facendo variare il rapporto a/c al fine di ottenere resistenze meccaniche variabili entro un ampio intervallo (da 15 a 80 MPa come $R_{28,20}$).

Per ogni impasto è stata effettuata sia una stagionatura a 20°C, sia una serie di stagionature a vapore (per un totale di 27 cicli termici) per le quali si sono fatti variare i seguenti parametri:

- tempo di prestagionatura a 20°C: 1-2-3 ore;
- velocità di riscaldamento: 10-20-30°C/ora;
- temperatura massima di regime: 50-65-80°C.

Sui calcestruzzi sono state determinate le resistenze a 1,3,7 e 28 giorni. Per i calcestruzzi trattati a vapore, inoltre, è stata determinata anche la resistenza meccanica al tempo di 18 ore che, nella maggior parte degli stabilimenti di prefabbricazione, coincide con la fine del ciclo di vapore, dopo il quale il calcestruzzo seguita ad essere stagionato a temperatura ambiente.

Nella Fig. 3 è mostrato in dettaglio un tipico esempio del procedimento sperimentale adottato per un cemento Portland 425: sono riportate (sull'ordinata di sinistra) sia le resistenze meccaniche relative alla stagionatura di 20°C, sia quelle ottenute con

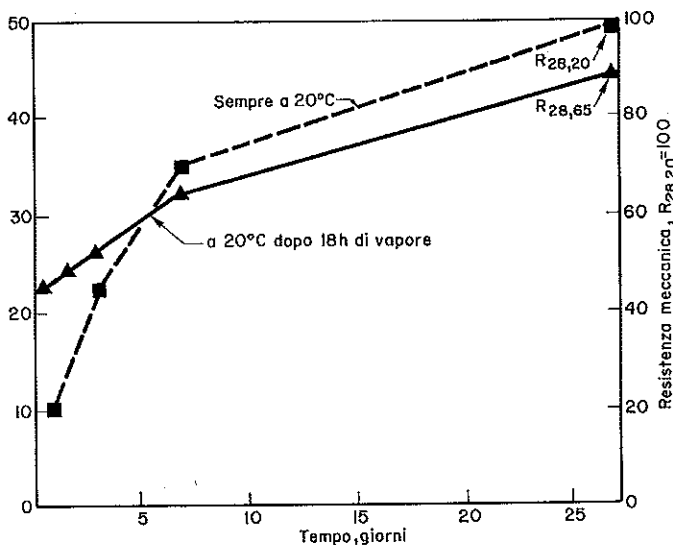


Fig. 3 - Resistenze meccaniche a compressione di un calcestruzzo stagionato a vapore e successivamente a 20°C e di un calcestruzzo analogo stagionato costantemente a 20°C. Sull'ordinata di destra le resistenze meccaniche sono espresse come percentuale della $R_{28,20}$.

Il ciclo di vapore adottato ($t_{v1} = 2h$; $v = 20^\circ C/h$; $T = 5^\circ C$). Si può notare che la resistenza meccanica del calcestruzzo stagionato a vapore, inizialmente superiore a quella del corrispondente calcestruzzo stagionato a 20°C, risulta già a 7 giorni penalizzata rispetto a quest'ultima. In particolare, ponendo eguale a 100 il valore di $R_{28,20}$, tutti gli altri dati, ed in particolare quelli che si riferiscono al calcestruzzo maturato a vapore, possono essere espressi come un valore percentuale di $R_{28,20}$ (sull'ordinata di destra). Pertanto si ricava, per esempio, che la resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore ($R_{18,65}$), dove 18 si riferisce al tempo di 18 ore, rappresenta il 45% della $R_{28,20}$:

$$R_{18,65} = 0,45 R_{28,20} \quad (3)$$

L'equazione (3) è la forma esplicita della generica equazione (1) valida, per un cemento Portland 425, nelle specifiche condizioni sperimentali adottate. In sostanza, se l'obiettivo è quello di ottenere una resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore pari a $R_{18,65}$ per esempio 22,5 MPa, questo obiettivo, in termini di composizione del calcestruzzo, è del tutto equivalente a quello di produrre un calcestruzzo che a 28 giorni e 20°C abbia una $R_{28,20}$ pari a:

$$R_{28,20} = R_{18,65}/0,45 = 22,5/0,45 \text{ MPa} = 50 \text{ MPa}$$

Da ciò si deduce, tramite la Fig. 1, che occorre adottare un rapporto a/c non superiore a 0,50 per ottenere con quel ciclo termico una resistenza meccanica a compressione di almeno 2,5 MPa alla fine del ciclo di vapore (18 ore).

3. RISULTATI SPERIMENTALI

Purtroppo, la relazione (3) sopra riportata non è generalizzabile, se si cambia la classe del cemento (425 o 525) oppure il tempo t cui si è interessati ad ottenere una certa resistenza meccanica oppure ancora uno dei parametri che caratterizzano il ciclo termico adottato (t_{v1} , v , T , t_{v2} in Fig. 2).

Non sono apparsi, invece, influenti sulla correlazione né il tipo di inerte né la presenza o meno di additivi superfluidificanti: ciò non vuol dire, per esempio, che l'aggiunta o meno di additivi non modifichi le resistenze meccaniche in assoluto, ma piuttosto che l'aggiunta di additivo per ridurre il rapporto a/c beneficia sia la resistenza meccanica a 20°C ($R_{28,20}$), sia quella del calcestruzzo maturato a vapore ($R_{v,T}$) in modo da non modificare significativamente la correlazione tra questi due valori, e nel caso specifico il coefficiente 0,45 che appare nell'equazione (3).

Tutti i dati sperimentali ottenuti sono stati prima analizzati sotto forma di grafici simili a quelli riportati in Fig. 3 e poi aggregati al fine di trovare delle correlazioni le più generiche possibili tra $R_{v,T}$ e $R_{28,20}$. Queste correlazioni sono qui riportate in forma tabulare: le Tabelle da 1 a 3 si riferiscono ai cementi Portland, pozzolanici e d'altoforno di classe 425, le Tabelle da 4 a 6 al cemento Portland 525 e tutte si riferiscono al più comune ciclo di vapore in termini di durata ($t_{v2} = 18$ ore). Ciascuna Tabella è caratterizzata dai già menzionati parametri che caratterizzano il ciclo di vapore; una volta che sia noto il ciclo di vapore

TABELLA 1

RESISTENZE MECCANICHE A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON CEMENTI PORTLAND, POZZOLANICI E D'ALTOFORNO DI CLASSE 425 ALLA FINE DEL CICLO DI VAPORE (18h) E ALLE STAGIONATURE SUCCESSIVE (1,3,7 E 28 GIORNI), $T = 50^\circ C$, ESPRESSE IN PERCENTUALE RISPETTO A $R_{28,20}$.

Maturazione	Resistenza meccanica (%)					t_{v1} (h)	v $^\circ C/h$
	18h	1g	3gg	7gg	28gg		
a 20 °C	—	—	—	—	100	—	—
a 20 °C dopo il trattamento a vapore	45	50	55	70	85	1	10
	40	45	50	65	85	1	20
	35	40	45	60	85	1	30
	45	50	60	75	90	2	10
	40	45	55	70	90	2	20
	35	40	50	70	90	2	30
	45	50	60	75	90	3	10
	40	45	55	70	90	3	20
	40	45	55	70	90	3	30

prescelto in termini di t_{v1} , v e T è possibile progettare la composizione del calcestruzzo richiesto in base allo schema logico nel seguito illustrato sotto forma di esempio.

Si debba confezionare un calcestruzzo per una struttura preabbricata in c.a.p. per la quale a 3 giorni - in vista dell'operazione di tesatura dei cavi - si debba raggiungere una resistenza a compressione di 30 MPa.

Il ciclo termico prescelto è il seguente:

stagionatura preliminare a temperatura ambiente: 2 ore

velocità di riscaldamento: 20°C/ora

temperatura di regime durante il ciclo di vapore: 65°C

termine del ciclo di vapore (incluso raffreddamento): 18 ore)

cemento disponibile: Portland 425

In base a questi dati si entra nella Tabella 2, che si riferisce appunto a queste condizioni di lavoro, e si trova che a 3 giorni a resistenza meccanica del calcestruzzo trattato a vapore in queste condizioni ($R_{3,65}$) è pari al 55% della resistenza meccanica a 28 giorni che lo stesso calcestruzzo avrebbe avuto se fosse stato sempre stagionato a 20°C:

$$R_{3,65} = 0,55 R_{28,20} \quad (4)$$

Poiché si impone che:

$$R_{3,65} = 30 \text{ MPa} \quad (5)$$

è necessario confezionare un calcestruzzo che presenti:

$$R_{28,20} = 30/0,55 = 55 \text{ MPa} \quad (6)$$

TABELLA 2

RESISTENZE MECCANICHE A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON CEMENTI PORTLAND, POZZOLANICI E D'ALTOFORNO DI CLASSE 425 ALLA FINE DEL CICLO DI VAPORE (18h) E ALLE STAGIONATURE SUCCESSIVE (1,3,7 E 28 GIORNI), T = 65°C, ESPRESSE IN PERCENTUALE RISPETTO A $R_{28,20}$.

Maturazione	Resistenza meccanica (%) al tempo di					t_{v1} (h)	v °C/h
	18h	1g	3gg	7gg	28gg		
a 20 °C	—	—	—	—	100	—	—
a 20 °C dopo il trattamento a vapore	50	55	60	65	85	1	10
	40	45	50	60	80	1	20
	35	40	45	60	80	1	30
	50	55	60	70	90	2	10
	45	50	55	65	85	2	20
	40	45	55	65	85	2	30
	50	55	60	70	90	3	10
	45	50	55	65	85	3	20
	40	45	55	65	85	3	30

TABELLA 3

RESISTENZE MECCANICHE A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON CEMENTI PORTLAND, POZZOLANICI E D'ALTOFORNO DI CLASSE 425 ALLA FINE DEL CICLO DI VAPORE (18h) E ALLE STAGIONATURE SUCCESSIVE (1,3,7 E 28 GIORNI), T = 80°C, ESPRESSE IN PERCENTUALE RISPETTO A $R_{28,20}$.

Maturazione	Resistenza meccanica (%) al tempo di					t_{v1} (h)	v °C/h
	18h	1g	3gg	7gg	28gg		
a 20 °C	—	—	—	—	100	—	—
a 20 °C dopo il trattamento a vapore	60	60	65	70	75	1	10
	50	50	55	65	70	1	20
	45	45	50	60	70	1	30
	60	65	70	75	85	2	10
	55	60	65	70	80	2	20
	50	55	60	65	80	2	30
	60	65	70	75	85	3	10
	60	65	70	75	80	3	20
	55	60	65	70	80	3	30

TABELLA 4

RESISTENZE MECCANICHE A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON CEMENTO 525 PORTLAND, ALLA FINE DEL CICLO DI VAPORE (18h) E ALLE STAGIONATURE SUCCESSIVE (1,3,7 E 28 GIORNI), T = 50°C, ESPRESSE IN PERCENTUALE RISPETTO A $R_{28,20}$.

Maturazione	Resistenza meccanica (%) al tempo di					t_{v1} (h)	v °C/h
	18h	1g	3gg	7gg	28gg		
a 20 °C	—	—	—	—	100	—	—
a 20 °C dopo il trattamento a vapore	55	60	70	80	90	1	10
	50	55	65	75	90	1	20
	45	50	65	75	90	1	30
	55	60	70	85	95	2	10
	50	55	65	80	95	2	20
	45	50	65	80	95	2	30
	55	60	70	85	95	3	10
	55	60	65	80	95	3	20
	50	55	65	80	95	3	30

TABELLA 5

RESISTENZE MECCANICHE A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON CEMENTO 525 PORTLAND, ALLA FINE DEL CICLO DI VAPORE (18h) E ALLE STAGIONATURE SUCCESSIVE (1,3,7 E 28 GIORNI), T = 65°C, ESPRESSE IN PERCENTUALE RISPETTO A R_{28,20}.

Maturazione	Resistenza meccanica (%)					t _{v1} (h)	v °C/h
	18h	1g	al tempo di		28gg		
			3gg	7gg			
a 20 °C	—	—	—	—	100	—	—
a 20 °C dopo il trattamento a vapore	60	65	70	75	90	1	10
	55	60	65	70	85	1	20
	50	55	60	70	85	1	30
	60	65	75	80	95	2	10
	55	60	70	75	90	2	20
	50	55	70	75	90	2	30
	60	65	75	80	95	3	10
	60	65	70	75	90	3	20
	55	60	70	75	90	3	30

Dalla Fig. 1 si ricava che, per soddisfare la (6) e quindi anche a (5), è necessario adottare per *a/c* un valore non superiore a 1,47.

Val la pena di precisare che il valore di R_{28,20} pari a 55 MPa è del tutto "fittizio" e non corrisponde alla reale resistenza meccanica a 28 giorni del calcestruzzo trattato a vapore, la quale risulterà effettivamente, come si può vedere nella Tabella 2, pari a:

$$R_{28,65} = 0,85 R_{28,20} = 0,85 \cdot 55 = 47 \text{ MPa} \quad (7)$$

Da ciò si deduce che la R_{ck}, assumendo uno scarto quadratico medio (δ) di 5 MPa, risulterà:

$$R_{ck} = 47 \text{ MPa} - k\delta = 47 - 1,4 \cdot 5 = 40 \text{ MPa} \quad (8)$$

Il valore di R_{28,20} in sostanza, rappresenta soltanto un valore di riferimento molto utile per il calcolo del rapporto *a/c* giacché, la maggior parte dei dati disponibili che correlano resistenza meccanica e rapporto *a/c* sono stati determinati a 20°C (Fig. 1). D'altra parte la Fig. 1, congiuntamente con le Tabelle 1-6, consente appunto di estendere questa correlazione anche ai calcestruzzi trattati a vapore entro un campo di condizioni sperimentali molto ampio e che include in massima parte i cicli di lavoro impiegati per le strutture in c.a. e c.a.p. prefabbricate.

TABELLA 6

RESISTENZE MECCANICHE A COMPRESSIONE DI CALCESTRUZZI CONFEZIONATI CON CEMENTO 525 PORTLAND, ALLA FINE DEL CICLO DI VAPORE (18h) E ALLE STAGIONATURE SUCCESSIVE (1,3,7 E 28 GIORNI), T = 80°C, ESPRESSE IN PERCENTUALE RISPETTO A R_{28,20}.

Maturazione	Resistenza meccanica (%)					t _{v1} (h)	v °C/h	
	18h	1g	al tempo di		28gg			
			3gg	7gg				
a 20 °C	—	—	—	—	100	—	—	
a 20 °C dopo il trattamento a vapore	65	70	75	80	85	1	10	
	60	65	70	75	80	1	20	
	55	60	65	70	80	1	30	
	70	75	80	85	90	2	10	
	65	70	80	85	90	2	20	
	60	65	75	80	85	2	30	
	70	75	85	90	95	3	10	
	70	75	85	90	95	3	20	
		65	70	80	85	90	3	30

4. CONCLUSIONI

L'enorme mole di dati sperimentali raccolti sulla resistenza meccanica dei calcestruzzi trattati a vapore in diverse condizioni sperimentali - prestagionatura, velocità di riscaldamento, temperatura di regime del ciclo termico - consente di correlare questi valori con la resistenza meccanica "di riferimento" a 28 giorni e 20°C (R_{28,20}).

Poiché è già nota la correlazione tra R_{28,20} e la composizione del calcestruzzo (in particolare il rapporto *a/c*), è possibile estendere il calcolo della composizione del calcestruzzo (*mix-design*) in funzione delle resistenze richieste anche per le strutture in c.a. e c.a.p. trattate a vapore.

ESEMPIO DI MIX-DESIGN

Di seguito viene proposto, a titolo di esempio, il procedimento di calcolo della composizione di un calcestruzzo stagionato a vapore destinato alla realizzazione di tegole prefabbricate, per il quale si richiede una resistenza caratteristica (R_{ck}) di 55 MPa e una resistenza media alla fine del ciclo di vapore (t_{v1} = 1h, v = 30°C/h; T = 65°C; t_{v2} = 18h), R_{18,65} pari a 30 MPa.

Si richiede, inoltre, che il calcestruzzo venga gettato con uno *slump* di 20 cm e si dispone di cemento Portland di classe 525, di inerti naturali aventi un diametro massimo di 15 mm e di un

ditivo superfluidificante capace di ridurre l'acqua d'impasto il 20% se dosato all'1% rispetto al peso del cemento.

In base a questi dati si individua la Tabella 5 che si riferisce a queste condizioni di lavoro e si ricava che la resistenza media alla fine del ciclo di vapore ($R_{18,65}$) è pari al 50% della resistenza a 28 giorni che lo stesso calcestruzzo avrebbe se fosse stagionato costantemente a 20°C ($R_{28,20}$).

$$R_{18,65} = 0,50 R_{28,20}$$

Dovendo essere:

$$R_{18,65} = 30 \text{ MPa}$$

ora occorre confezionare un calcestruzzo che abbia:

$$R_{28,20} = 30/0,50 = 60 \text{ MPa}$$

D'altra parte, occorre garantire per il calcestruzzo una R_{ck} di 50 MPa; assumendo per il fattore di probabilità (K) il valore di 4 fornito dalla normativa vigente e per lo scarto quadratico medio (δ) un valore di 3,5 MPa (valore fornito dallo stabilimento di produzione del calcestruzzo) la resistenza media ($R_{28,65}$) risulta:

$$R_{28,65} = 50 + 1,4 \cdot 3,5 = 55 \text{ MPa}$$

Dalla Tabella 5 si ricava che la resistenza meccanica a 28 giorni di un calcestruzzo che dopo aver subito il ciclo di vapore viene stagionato costantemente a 20°C ($R_{28,65}$) è pari all'85% della resistenza meccanica a 28 giorni che lo stesso calcestruzzo avrebbe se fosse stagionato sempre a 20°C ($R_{28,20}$):

$$R_{28,65} = 0,85 R_{28,20}$$

Poiché deve essere:

$$R_{28,65} = 55 \text{ MPa}$$

occorre confezionare un calcestruzzo che abbia:

$$R_{28,20} = 55/0,85 = 65 \text{ MPa}$$

Pertanto, tra le due prescrizioni - quella relativa alla R_{ck} e quella alla resistenza meccanica alla fine del ciclo - la più cogente risulta quella che impone per il calcestruzzo una resistenza caratteristica di 50 MPa, in quanto a quest'ultima corrisponde una $R_{28,20}$ maggiore di quella che corrisponde alla $R_{18,65}$.

Dalla Fig. 1 si ricava che per ottenere una $R_{28,20}$ di 65 MPa con il cemento Portland di classe 525 occorre utilizzare un rapporto a/c non superiore a 0,49.

L'acqua di impasto necessaria ad ottenere un calcestruzzo con una lavorabilità di 20 cm di *slump* con gli inerti a disposizione e impiegando l'additivo superfluidificante è pari a circa 180 kg/m³. Pertanto il quantitativo di cemento (c) risulta:

$$c = 180/0,49 = 365 \text{ kg/m}^3$$

Assumendo un volume di aria intrappolata di circa 25 l/m³, per il cemento una massa volumica di 3,15 kg/l e una massa volumica per l'inerte s.s.a. di 2,65 kg/l si ottiene il quantitativo di inerte (i) per m³ di calcestruzzo:

$$i = (1000 - 365/3,15 - 180 - 25) \cdot 2,65 = 1800 \text{ kg/m}^3$$

In definitiva la composizione del calcestruzzo richiesto è la seguente:

acqua	180	kg/m ³
cemento Portland 525	365	kg/m ³
additivo superfluidificante	3,7	l/m ³
inerti	1800	kg/m ³

BIBLIOGRAFIA

[1] COLLEPARDI M.: "Scienza e Tecnologia del calcestruzzo", 3a Ed. Hoepli, Milano, 1991.

[2] ACI Committee 517: "Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure - State of the Art", *ACI Manual of Concrete Practice 1986*, Part 5, 517, Detroit, 1986.