

# Μελέτη συνθέσεων σκυροδέματος στη Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου

Λ. Χαρικιοπούλου – Cordova

*Συντελεστής Μελέτης Σκυροδέματος και Γεωτεχνικών Εργασιών στην Κοινοπραξία Γέφυρα*

Σ. Λυκούδης

*Υπεύθυνος Εργασηρίου Σκυροδέματος στην Κοινοπραξία Γέφυρα*

Π. Παπανικόλας

*Τεχνικός Διευθυντής στην Κοινοπραξία Γέφυρα*

*Λέξεις Κλειδιά:* αντοχή, ανθεκτικότητα, αδρανή, τσιμέντο, ρευστοποίηση, αντλησιμότητα, δοκιμές

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η μελέτη για τη σύνθεση των διαφόρων τύπων σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου έχει βασιστεί σε ειδικές προδιαγραφές αντοχής και ανθεκτικότητας στο χρόνο, καθώς και στις ιδιαιτερότητες των μεθόδων κατασκευής του Έργου. Ειδική έρευνα έγινε για όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή σκυροδέματος στις δύο μονάδες της Κοινοπραξίας Γέφυρας, ώστε να πληρούν τις συμβατικές προδιαγραφές, αλλά και να είναι όσον το δυνατόν συμβατά αναμεταξύ τους. Απαιτήθηκαν δεκάδες δοκιμές, εργαστηριακές αλλά και στις μονάδες παρασκευής σκυροδέματος, όσο και πρακτικές δοκιμαστικές σκυροδετήσεις σε ειδικά κατασκευασμένες μακέτες ώστε να γίνουν αποδεχτές οι «φόρμουλες» που χρησιμοποιούνται καθημερινά εδώ και τέσσερα χρόνια στην κατασκευή του Έργου.

## 1 ΟΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Η μελέτη για την σύνθεση των διαφόρων τύπων σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου έχει βασιστεί αφενός στις συμβατικές τεχνικές προδιαγραφές του Έργου (ΚΜΕ), και αφετέρου στις ειδικές απαιτήσεις της κατασκευής, σύμφωνα με τις διάφορες μεθόδους που ενδείκνυνται στα διαφορετικά τμήματα του Έργου.

### 1.1 Αντοχή Σκυροδέματος

Με βάση τις απαιτήσεις της προ-μελέτης του Έργου, οι τάξεις αντοχής των κατασκευαστικών τμημάτων της «Κύριας Γέφυρας» ορίζονται από C45/55 έως και C60/75, ενώ για τις Γέφυρες Προσβάσεως διακυμούνται από C30/37 έως και C45/55. Αυτές οι τάξεις αντοχής οδήγησαν εν μέρει την επιλογή των τσιμέντων, και το καθορισμό των μέγιστων ορίων των λόγων w/c (νερό προς τσιμέντο) για κάθε τάξη σκυροδέματος.

### 1.2 Ανθεκτικότητα στο Χρόνο

Η ικανοποιητική λειτουργία της γέφυρας χωρίς ανάγκη μεγάλων επισκευαστικών εργασιών για μια ελάχιστη διάρκεια 120 χρόνων αποτελεί μία από τις βασικότερες συμβατικές υποχρεώσεις της Γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου. Κατά συνέπεια, αυτή η ικανότητα μεταφράζεται σε φυσική και χημική ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ώστε να μπορεί να προστατευτεί ο οπλισμός του από τη διάβρωση καθ' όλη τη περίοδο των 120 χρόνων.

Ειδική μελέτη πραγματοποιήθηκε για να ληφθούν τα ανάλογα μέτρα τόσο στην διαδικασία των συνθέσεων σκυροδέματος, όσο και στην επιλογή του πάχους επικάλυψης των διάφορων τμημάτων, ώστε να γίνει εφικτή η παραπάνω απαίτηση.

Η επιλογή των τσιμέντων, των αδρανών, των βασικών παραμέτρων των συνθέσεων σκυροδέματος (π.χ. τα μέγιστα όρια των λόγων w/c) αλλά και της επικάλυψης είχαν ως βασικό σκοπό την πλήρωση αυτής της ανθεκτικότητας.

### 1.3 Ιδιαιτερότητες Τμημάτων και Μεθόδων Κατασκευής

Οι διάφορες κατασκευαστικές παράμετροι που καθοδήγησαν εν μέρει τη μελέτη της σύνθεσης των σκυροδεμάτων της Γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου είναι οι εξής:

- Ογκώδη τμήματα που απαιτούν τη χρήση ενός σκυροδέματος με σχετικά χαμηλή αλλά και ελεγχόμενη αύξηση της θερμοκρασίας του κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, άρα τη χρήση ιδιαίτερα χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης τσιμέντων,
- ύπαρξη τμημάτων με μεγάλα ποσοστά οπλισμού (εώς και  $900 \text{ kg/m}^3$ ) που απαιτούν τη χρήση ενός σκυροδέματος με πολύ καλή ρευστότητα, αλλά και με ελεγχόμενο μέγεθος αδρανών (μέγιστη διάμετρος 20 mm),
- κατασκευαστικές μέθοδοι (αντλήσεις σε μήκος 500 μ., μεταφορά του σκυροδέματος που ξεπερνά τις δύο ώρες και ακολουθείται από κατακόρυφη άντληση μέχρι και 100 μ. ύψος, κτλ...) που απαιτούν τη χρήση σκυροδεμάτων με μεγάλη ρευστότητα και αντλησιμότητα, αλλά και διατήρηση για 2 και 3 ώρες αυτών των ιδιοτήτων,
- εντατικό πρόγραμμα εργασιών που απαιτεί την απόκτηση σχετικά υψηλών αντοχών σε λίγες ώρες.

## 2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΡΙΟΥ-ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ

Η επίτευξη των παραπάνω αυστηρών προδιαγραφών και απαιτήσεων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την σωστή επιλογή και συμβατότητα των πρώτων υλών του σκυροδέματος (αδρανή, άμμος, τσιμέντα, πρόσμηκτα) και τον αυστηρό ποιοτικό έλεγχο στην σύνθεση και παραγωγή του σκυροδέματος.

### 2.1 Αδρανή

Δύο βασικά χαρακτηριστικά οδήγησαν την έρευνα αδρανών για αυτό το Έργο.

Για να αποφευχθεί κάθε πιθανότητα μελλοντικής ζημιάς στο σκυρόδεμα από αλκαλοπυριτική αντίδραση, επιλέχθηκαν μη αλκαλο-δραστήρια αδρανή όπως ορίζεται στον αμερικάνικο κανονισμό.

Επίσης, με βάση τις ιδιαιτερότητες των μεθόδων κατασκευής, ο σκελετός του σκυροδέματος (δηλαδή η καμπύλη αδρανών) έπρεπε να είναι όσο το δυνατόν ομοιογενής, ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν σταθερές συνθέσεις με μεγάλη ρευστότητα και ικανότητα άντλησης, παρ'όλη την μικρή ποσότητα συνολικού νερού των συνθέσεων (μικρός λόγος νερού προς τσιμέντο).

Για να γίνει αυτό, οι συνθέσεις σκυροδέματος έπρεπε να έχουν αρκετά μεγάλη ποσότητα τσιμέντου και “filler” (λεπτόκοκκα κάτω των 0,08 μm), γεωμετρικά ομοιογενή χονδρόκοκκα αδρανή, και καλοδιαβαθμισμένη άμμο.

Η ιδανικότερη επιλογή αδρανών για την επιτυχία ενός τέτοιου αποτελέσματος είναι το γαρμπίλι και το χαλίκι να είναι σπαστά υλικά (ποταμίσια ή λατωμείου) με ελεγχόμενη διαβάθμιση, και η άμμος να είναι καθαρή ποταμίσια με λεπτή και ομοιογενή διαβάθμιση.

Πράγματι, η φυσική πεπάλη της ποταμίσιας άμμου θα είχε φανεί πολύ χρήσιμη στην πραγματοποίηση ενός κατάλληλου σκελετού.

Δυστυχώς όμως, οι έρευνες ποταμίσις άμμου στην περιοχή οδήγησαν σε αλκαλοπυριτικά δραστήρια αδρανή, και έτσι απορρίφθηκαν.

Η επιλογή των αδρανών κατέληξε στη χρήση ασβεστολιθικών αδρανών με προέλευση το λατωμείο της Hellamat Abeme (Lafarge) στον Άραξο Αχαΐας.

Με βάση τη γεωμετρία των κατασκευαστικών τμημάτων και την πυκνότητα του οπλισμού, η μέγιστη διάμετρος των αδρανών επιλέχθηκε ως 20 mm. Τρεις διαβαθμίσεις χρησιμοποιούνται: 0 – 4 για την άμμο, 4 – 10 για το γαρμπίλι, και 10 – 20 για το χαλίκι.

Διάφορες τροποποιήσεις έγιναν στο λατωμείο της Hellamat Abeme ώστε οι διαβαθμίσεις των αδρανών να είναι όπως περιγράφονται παραπάνω, και η πεπάλη της άμμου να είναι όσο το δυνατόν λιγότερη, διότι αντιθέτως από την πυριτική πεπάλη, η ασβεστολιθική σπαστή πεπάλη έχει μεγάλη απορροφητικότητα νερού, και «στεγνώνει» το μίγμα.

## 2.2 Τσιμέντα

Οι τύποι τσιμέντων που χρησιμοποιούνται στο Έργο καθορίζουν σχεδόν από μόνοι τους τις τελικές παραμέτρους του σκυροδέματος σε σχέση με την ανθεκτικότητα στο χρόνο και την αντοχή.

Πράγματι, εκτός της ανάγκης για τσιμέντα χαμηλής περιεκτικότητας σε αλκαλικά (για κάθε ενδεχόμενο) και χλώρια, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί τσιμέντο τύπου CEM III (BFS) με σκωρία (με βάση το DIN 1164), που είναι γνωστό για τις ιδιότητες του σε ότι αφορά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε θαλάσσιες περιοχές.

Με λίγα λόγια, η σκωρία «παγιδεύει» ένα μεγάλο ποσοστό των ελεύθερων χλωρίων που ενδέχεται να βρεθούν στο σκυρόδεμα, και εμποδίζει την αντίδρασή τους με το οξυγόνο, με τελικό αποτέλεσμα την αδυναμία περαιτέρω οξείδωσης του οπλισμού.

Επίσης, τα τσιμέντα που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πρέπει να έχουν χαμηλή και ελεγχόμενη θερμότητα ενυδάτωσης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η δυνατότητα ρηγμάτωσης λόγω ξύρασης των ιδιαίτερα ογκωδών τμημάτων.

Τελικά, μετά από διάφορες τεχνικές και οικονομικές συζητήσεις και διαπραγματεύσεις, τα τσιμέντα που επιλέχθηκαν για την κατασκευή της Γέφυρας Ρίου-Αντιρρίου είναι τα παρακάτω:

- BFS CEM III/A 42.5 με 60% σκωρία (slag) που χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα σκυροδέματα της Κύριας Γέφυρας, και κυρίως στα θεμέλια της, καθώς και στις γέφυρες πρόσβασης, και παρασκευάζεται ειδικά για την Κοινοπραξία Γέφυρα,
- Portland CEM I 52.5 με χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης που χρησιμοποιείται κυρίως στο κατάστρωμα της γέφυρας και εν μέρει σε όλα τα άλλα σκυροδέματα της τάξης C60/75,
- CEM II BM 32.5 για όλες τις υπόλοιπες κατασκευές.

Όλα τα τσιμέντα προέρχονται από την εταιρεία TITAN, και κάθε τύπος τσιμέντου πρέπει να πληρεί εκτός από τις βασικές προδιαγραφές του DIN 1164, και τις ειδικές προδιαγραφές της Γέφυρας (π.χ. όρια συρρίκνωσης, ελεγχόμενα όρια «Blaine» για ομοιογένεια παραγωγής, όρια θερμότητας ενυδάτωσης, κτλ..).

## 2.3 Πρόσμηκτα

Η έρευνα για τα πρόσμηκτα έγινε σε δεύτερη φάση, αφού τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφόρων συνθέσεων σκυροδέματος είχαν καθορισθεί.

Τα σημαντικότερα πρόσμηκτα που χρησιμοποιούνται είναι υπερ-ρευστοποιητές τελευταίας γενιάς, που χάρη στην μεγάλη ικανότητα τους να αποσυνδέουν τους μικρότερους κόκκους του τσιμέντου, καθυστερούν την ενυδάτωση του, και δίνουν στα σκυροδέματα με ελάχιστη συνολική ποσότητα νερού (χαμηλό λόγο νερού προς τσιμέντο) μια ρευστή και εργάσιμη μορφή για κάποιο διάστημα.

Συχνά, λειτουργούν και ως επιβραδυντές, διατηρώντας αυτές τις ιδιότητες για αρκετό χρόνο (2-3 ώρες) στα πολύ ρευστά σκυροδέματα.

Αρχικώς, η Κοινοπραξία Γέφυρα συνεργάστηκε με διάφορες εταιρείες που παράγουν πρόσμηκτα για σκυρόδεμα. Όλες οι εταιρείες πρότειναν με βάση δοκιμών που έγιναν στα εργαστήρια τους αλλά και στα παρασκευαστήρια σκυροδέματος του εργοταξίου, κάποια προϊόντα αναλόγως με τις προτεινόμενες συνθέσεις για κάθε τάξη και τύπο σκυροδέματος.

Τελικά τα παρακάτω πρόσμηκτα (ύπερ-ρευστοποιητές) επιλέχθηκαν:

- OPTIMA 100 της CHRYSO
- Glenium 27 της MBT
- Rheobuilt της MBT

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν επίσης Viscosity Agents, Air Entrainers, κτλ.. Ειδικές δοκιμές έγιναν για τη χρήση αυτών των προσμηκτών.

### 3 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Με βάση τις προδιαγραφές του Έργου, τις απαιτήσεις της κατασκευής, και τα δεδομένα των συστατικών υλικών που χρησιμοποιούνται, ορίστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των συνθέσεων ως εξής.

#### 3.1 Λόγος Νερού προς Τσιμέντο ( $w/c$ )

Τα μέγιστα όρια του λόγου νερού προς τσιμέντο δόθηκαν με βάση την τάξη αλλά και τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας στο χρόνο, άρα διαπερατότητας σε νερό και σε χλώρια του σκυροδέματος, για κάθε τμήμα της κατασκευής.

Ως μέγιστος λόγος νερού προς τσιμέντο επιλέγει το 0,40.

#### 3.2 Τύπος και Ποσότητα Τσιμέντου

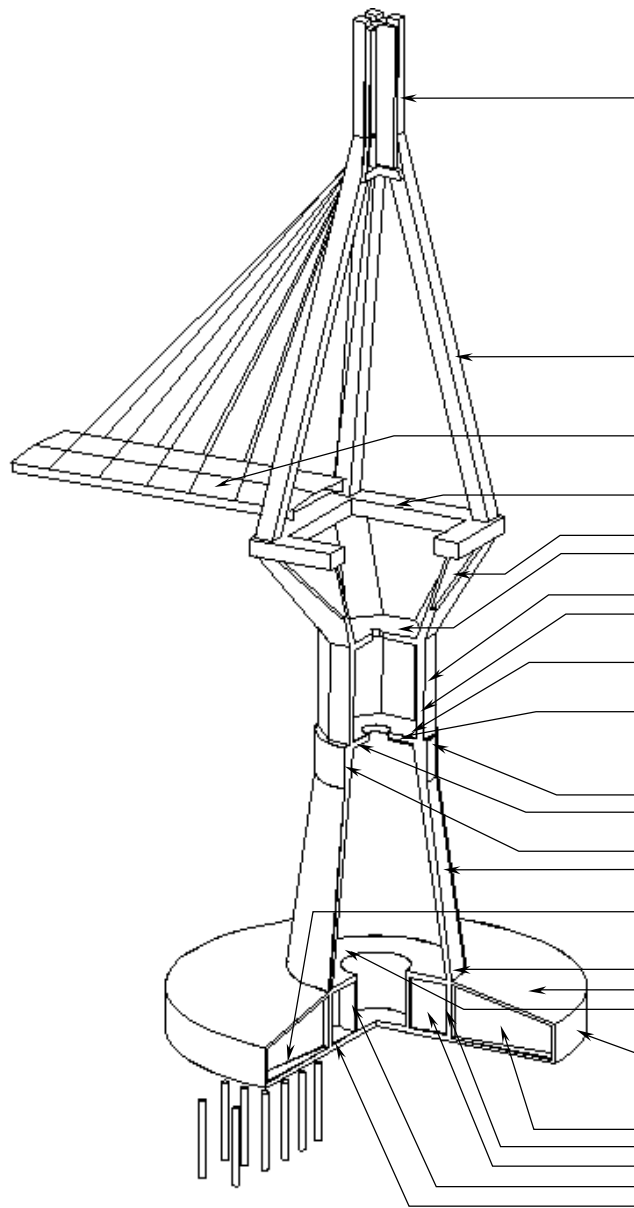
Η επιλογή του τύπου τσιμέντου που χρησιμοποιείται σε κάθε τμήμα της κατασκευής ορίστηκε από την τάξη σκυροδέματος που ενδείκνυται, αλλά και από τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας στο χρόνο. Πράγματι, οι κατασκευές εν θαλάσση, και ειδικότερα στην ζώνη  $\pm 10\mu$  από την επιφάνεια της θάλασσας (Splash Zone), ενδέχεται να χρειάζονται μεγαλύτερη προστασία ως προς την διαπερατότητα τους από νερό και χλώρια, από τις κατασκευές που βρίσκονται στην ακτή, ή 100  $\mu$  πάνω από το νερό. Στην περιοχή αυτή η επικάλυψη είναι 100mm.

Στη συνέχεια, η ποσότητα τσιμέντου της κάθε σύνθεσης ορίστηκε από τις ιδιαίτερες γεωμετρικές συνθήκες του κάθε τμήματος, και τις μεθόδους κατασκευής του.

Η ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου που χρησιμοποιείται στο Έργο είναι 400  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Ο Πίνακας 1 δείχνει αυτές τις επιλογές για όλα τα τμήματα της Κύριας Γέφυρας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΚΥΡΙΕΣ ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΥ W/C ΓΙΑ ΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΡΙΟΥ-ΑΝΤΙΡΡΙΟΥ



Concrete Location	Concrete Type	Theoretical Quantities (m3)	w/c Ratio	Cement Dosage (kg/m3)	Cement Type	
Pylon Head	C60/75	4.000	0,37	490	Mix 1/3 CEM I 52.5 & 2/3 CEM III 42.5	IN SITU
Pylon legs	C60/75	13.464	0,37	490	Mix 1/3 CEM I 52.5 & 2/3 CEM III 42.5	
Viaduct Deck	C60/75	16.870	0,35	490	CEM I 52.5 (100% CEM I) or CEM III 42.5 (100% CEM III)	
Pylon Base	C50/60	11.380	0,37	425	CEM III 42.5	
Pier Head	C45/55	14.568	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Pier Head Slab	C45/55	2.060	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Octagon (except splash zone)	C45/55	6.504	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Octagon (splash zone)	C45/55	2.944	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Octagon connection M4	C50/60	616	0,35	450	CEM III 42.5 Patras	
Octagon connection (M1, M2, M3)	C60/75	1.848	0,35	490	CEM III 42.5	
Pier Shaft Slab	C45/55	280	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	WET DOCK
Shaft slab wall (splash zone)	C45/55	332	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Pier Shaft Slab (including precast)	C45/55	964	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Cone climbings (splash zone)	C45/55	3.460	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Cone climbings (except splash zone)	C45/55	23.556	0,40	420	CEM III 42.5 Patras	
Ballasting concrete		7.620	0,40	350	CEM II 32.5 Patras	DRY DOCK
Cone	C45/55	2.565	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Footings Top Slabs	C45/55	15.350	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Ring Slabs	C45/55	4.896	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
External Wall	C45/55	11.244	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Temp. Cofferdams	C45/55	1.828	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Walls for trim tanks	C45/55	645	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Radial Beams	C45/55	24.080	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
External Ring Wall	C45/55	9.004	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Diaphragm Walls	C45/55	2.459	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Internal Ring Wall	C45/55	2.701	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
Raft	C45/55	25.417	0,40	400	CEM III 42.5 Patras	
<b>TOTAL MAIN VIADUCT ONLY</b>		<b>210.655</b>				

### 3.3 Έρευνα καταλληλότερου σκελετού αδρανών

Παράλληλα με τον ορισμό ποσότητας τσιμέντου, και λόγου νερού προς τσιμέντο, εκτελέσθει η έρευνα για τον καταλληλότερο σκελετό του σκυροδέματος (δηλαδή τα ποσοστά των διαφόρων αδρανών), με βάση τα χαρακτηριστικά των υπαρχόντων αδρανών, και τα απαιτούμενα αποτελέσματα του μίγματος.

Με βάση λοιπόν την απαίτηση σκυροδεμάτων με μεγάλη ομοιογένεια και καλή ικανότητα άντλησης, δηλαδή μεγάλη ποσότητα ψιλών κόκκων, και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αδρανών του Αράξου, ορίστηκε ένας λόγος χονδρόκοκκων προς άμμο G/S~1, και ποσότητες αδρανών τέτοιες που να πλησιάζουν τα 50% για την άμμο, 15% με 20% για το 4-10, και 30% με 35% για το 10-20.

Στη συνέχεια, για ένα δεδομένο λόγο νερού προς τσιμέντο (0,4), και μία ορισμένη ποσότητα τσιμέντου ( $400 \text{ kg/m}^3$ ), πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές με εναλλακτικές ποσότητες αδρανών, ώστε να καθοριστεί ο καταλληλότερος σκελετός για το σκυρόδεμα. Ακολούθησαν δοκιμές στο παρασκευαστήριο σε «αληθινές» συνθήκες, και βεβαίως δοκιμές άντλησης, για να ολοκληρωθεί η έρευνα.

Αυτός ο σκελετός χρησιμοποιήθηκε εκ των υστέρων για όλους τους τύπους σκυροδέματος με ποσότητες ανάλογες με τον αληθινό λόγο νερού προς τσιμέντο, και την αληθινή ποσότητα τσιμέντου.

Ο σκελετός που επελέχθει είναι ο εξής:

Άμμος (0-4) Αράξου	53%
Γαρμπίλι (4-10) Αράξου	15,5%
Χαλίκι (10-20) Αράξου	31,5 %

## 4 ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΓΚΡΙΣΗΣ

Με βάση τις παραπάνω επιλογές συστατικών υλικών, και τα κύρια χαρακτηριστικά των βασικών συνθέσεων του Έργου, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές για τον ορισμό των διαφόρων τελικών συνθέσεων σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στη Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου.

### 4.1 Δείκτες Παρακολούθησης των κυρίων χαρακτηριστικών

Για την κάθε βασική σύνθεση (π.χ.  $400 \text{ kg/m}^3$  Cem III/A 42.5 με λόγο w/c = 0.4), και για το κάθε τμήμα του Έργου (π.χ. κατασκευή πέλματος στη ξηρά δεξαμενή με άντληση 500 μ), ορίστηκαν πρώτα απ'όλα πρακτικές προδιαγραφές με συγκεκριμένους δείκτες παρακολούθησης των κριτήριων αποδοχής των.

Οι βασικοί δείκτες είναι οι παρακάτω:

- Slump και Flow, δοκιμές καθίζησης με κώνο, και με τράπεζα κατά DIN στο νωπό σκυρόδεμα για τον έλεγχο εργασιμότητας,

- Πυκνότητα, ποσοστό αέρα, και δοκιμή εξύδρωσης στο νωπό σκυρόδεμα για τον έλεγχο σωστής παραγωγής και κατάλληλης σύνθεσης,

- Αντοχή σε θλίψη και σε εφελκυσμό στο «σκληρό» σκυρόδεμα για τον έλεγχο αντοχής,
- Δοκιμή αρχικής συρρίκνωσης στο «σκληρό» σκυρόδεμα για τον έλεγχο σύνθεσης και θερμότητας ενυδάτωσης,
- Δοκιμή διείσδυσης νερού υπό πίεση, και δοκιμές RCPT (rapid chloride penetration test: δοκιμή γρήγορης διείσδυσης χλωρίων) στο «σκληρό» σκυρόδεμα για τον έλεγχο ανθεκτικότητας στο χρόνο.

Στον Πίνακα 2, παρουσιάζουμε σαν παράδειγμα τις συγκεκριμένες προδιαγραφές που επιλέχθηκαν και τις ανάλογες τιμές των δεικτών παρακολούθησης για τους διάφορους τύπους σκυροδέματος των τάξεων C45/55 και C60/75.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΑΞΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C45/55 & C60/75

Location	Strength	RCPT	Cement type	Slump (cm)	Flow (cm)	Workability retention	Working time	Placing method	Pumping length	Pumping rate	Rc early-age	
Dry-dock	Raft	C45/55	<2000C	CEM III	20	55	1 hour	2 hours	Pump	400m	30m <sup>3</sup> /h	3 Mpa at 16 h
	Walls	C45/55	<2000C	CEM III	20	55	1 hour	2 hours	Pump	400m	30m <sup>3</sup> /h	3 Mpa at 16 h
	Precast slabs	C45/55	<2000C	CEM III	>16		1 hour	2 hours	Pump	30m	30m <sup>3</sup> /h	9 Mpa at 36 h
	Footing top slab	C45/55	<2000C	CEM III	12		1 hour	2 hours	Pump	400m	30m <sup>3</sup> /h	3 Mpa at 16 h
	Cone first lift	C45/55	<1000C	CEM III	18	50	1 hour	2 hours	Pump	400m	30m <sup>3</sup> /h	3 Mpa at 16 h
Wet-dock	Cone	C45/55	<1000C	CEM III	18	50	1 hour 30	3 hours	Pump	120 or 400m	30m <sup>3</sup> /h	9 Mpa at 36 h
In Situ	Pier shaft slab first	C45/55	<2000C	CEM III	18	50	1 hour 30	2 hours	Pump	120 or 400m	30m <sup>3</sup> /h	10 Mpa at 30 h
	Pier shaft slab	C60/75	<2000C	CEM III	20	55	>2 hours	>3 hours	Pump	100m	40m <sup>3</sup> /h	10 Mpa at 30 h
	Pier shaft	C45/55	<1000C	CEM III	18	50	>2 hours	>3 hours	Pump	100m	40m <sup>3</sup> /h	3 Mpa at 16 h
	Pier head slab	C45/55	<2000C	CEM III	18	50	>2 hours	>3 hours	Pump	100m	40m <sup>3</sup> /h	3 Mpa at 16 h
	Pier head	C45/55	<2000C	CEM III	18	50	>2 hours	>3 hours	Pump	100m	40m <sup>3</sup> /h	3 Mpa at 16 h
	Pylone legs	C60/75	<4000C	CEM III & I	20	55	3 hours	4 hours	Pump or crane	100m	30m <sup>3</sup> /h	15 Mpa at 30 h
	Pylone head	C60/75	<4000C	CEM III & I	20	55	3 hours	4 hours	Pump or crane	100m	30m <sup>3</sup> /h	15 Mpa at 30 h
	Deck on-shore	C60/75	<4000C	CEM III	16	45	2 hours	2 hours	Pump or crane	100m		15 Mpa at 30 h
	Deck joint	C60/75	<4000C	CEM I	18	50	>3 hours	4 hours	Pump or crane	100m	30m <sup>3</sup> /h	12 Mpa at 14 h 21 Mpa at 34 h 2 Mpa TSS at 34 h



#### 4.2 Προκαταρκτικές δοκιμές σύνθεσης

Για κάθε τελικό τύπο σκυροδέματος έγιναν εργαστηριακές δοκιμές για τον καθορισμό της ακριβούς «φόρμουλας», δηλαδή ουσιαστικά για τον ορισμό του τελικού λόγου νερού προς τσιμέντο, και του τύπου τσιμέντου αλλά και του ακριβούς ποσοστού προσμήκτου.

Στη συνέχεια, στο παρασκευαστήριο σκυροδέματος της Κοινοπραξίας, δοκιμάστηκαν ένα ή και πολύ συχνά περισσότερα χαρμάνια των 2 m<sup>3</sup> της κάθε σύνθεσης, για να τελειοποιηθεί η «φόρμουλα» ως προς τα ακριβή ποσοστά νερού και προσμήκτων, και ως προς τον τρόπο που εκτελείται η ανάμιξη (τρόπος και χρόνοι ανάμιξης των υλικών, αληθινές υγρασίες, κτλ..)

Για κρίσιμες σκυροδετήσεις σε περιοχές με πυκνό οπλισμό, πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές σκυροδετήσεις σε αντιπροσωπευτικά δοκίμια, κλίμακας 1:1. Εκτός του σκυροδέματος, με τις δοκιμές αυτές μελετήθηκαν η τοποθέτηση του οπλισμού, καθώς και η εφαρμογή και η αφαίρεση των καλουπιών.

#### 4.3 Τελικές δοκιμές εκπλήρωσης (Conformity Trials) και διαδικασία έγκρισης

Πρωτού χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του Έργου οι συνθέσεις σκυροδέματος, πρέπει να εγκριθούν από το Τεχνικό Τμήμα της Κοινοπραξίας Γέφυρας, και κυρίως από τον Επιβλέποντα Μηχανικό ως προς την εκπλήρωση όλων των προδιαγραφών του Έργου, και των απαιτήσεων της κατασκευής.

Οι «Δοκιμές Εκπλήρωσης» της κάθε σύνθεσης γίνονται ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία:

- Παρασκευάζονται 3 χαρμάνια των 2 m<sup>3</sup> από την συγκεκριμένη σύνθεση το ένα μετά το άλλο στο παρασκευαστήριο, παρουσία ενός αντιπρόσωπου του Επιβλέποντα Μηχανικού. Η επανάληψη γίνεται για να ελεγχθεί ότι η παραγωγή είναι ομοιογενής και σταθερή, και ότι τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος δεν διαφέρουν από το ένα χαρμάνι στο άλλο.

- Στο κάθε χαρμάνι ελέγχονται όλοι οι δείκτες νεπού σκυροδέματος (εκτός της εξύδρωσης που γίνεται μόνο μία φορά), και λαμβάνονται δοκίμια για έλεγχο αντοχής σε νεαρά ηλικία, 7, 28 και 90 ημέρες.

- Με το τελευταίο χαρμάνι, λαμβάνονται και τα ανάλογα δοκίμια για τις δοκιμές συρρίκνωσης, και διείσδυσης νερού, και σκυροδετείται ένα μικρό τοιγάκι (1 m<sup>3</sup>) για τις δοκιμές διείσδυσης χλωρίων.

- Εξάλλου, το κάθε φορτηγό παραμένει στο εργαστήριο και συνεχίζεται να ελέγχεται η εργασιμότητα της σύνθεσης, όση ώρα προδιαγράφεται για το συγκεκριμένο τύπο σκυροδέματος.

- Στη συνέχεια, κι αν απαιτείται από τις προδιαγραφές, το παραγόμενο σκυρόδεμα, ή και στην ανάγκη πρόσθετα χαρμάνια (με ανάλογο έλεγχο εργασιμότητας και αντοχής) χρησιμοποιούνται για δοκιμές άντλησης ή/και για δοκιμές σκυροδέτησης σε «πραγματικές» συνθήκες. Πράγματι, για τα πιο δύσκολα κι ευαίσθητα τμήματα του Έργου, μακέτες σε αληθινές διαστάσεις οπλίστηκαν και σκυροδετήθηκαν δοκιμαστικά πριν την εφαρμογή των επιλεγμένων μεθόδων κατασκευής και τη χρήση της ορισμένης για το συγκεκριμένο τμήμα σύνθεσης σκυροδέματος στη μόνιμη κατασκευή.

- Τελικά, για την κάθε σύνθεση, ετοιμάζεται μία έκθεση με τα αποτελέσματα της μελέτης και ειδικά των «Δοκιμών Εκπλήρωσης», η οποία υποβάλλεται στον Επιβλέποντα Μηχανικό για έγκριση. Στην πραγματικότητα, οι διάφορες συνθέσεις συγκεντρώθηκαν ανά τάξη σκυροδέματος.

Οι Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζουν σαν παράδειγμα τους τελικούς πίνακες των εκθέσεων των τάξεων C45/55 και C60/75, που χρησιμοποιούνται στη Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην καλωδιωτή γέφυρα του Ρίου-Αντιρρίου θα ενσωματωθούν 210,000 κυβικά μέτρα σκυροδέματος. Οι μελέτες των συνθέσεων των διαφόρων σκυροδεμάτων θα πρέπει να ικανοποιούν τις ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς την αντοχή (C45/55 έως C60/75) και την ανθεκτικότητα στο χρόνο.

Στις ιδιαιτερότητες των μεθόδων κατασκευής περιλαμβάνονται: η ύπαρξη ογκώδων σκυροδετήσεων, πυκνού οπλισμού, αντλήσεις μεγάλου μήκους (500 μ.) και υψομετρικής διαφοράς, διατήρηση ρευστών ιδιοτήτων έως και 3 ώρες, υψηλές αντοχές σε νεαρές ηλικίες.

Η βασική σύνθεση περιλαμβάνει:

- Μέγιστο λόγο νερού-τσιμέντου 0,40.
- Η ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου είναι  $400 \text{ kg/m}^3$ . Με εξαίρεση το καταστρώμα το τσιμέντο είναι BFS CEM III/A 42.5 με 60% σκωρία. Για το κατάστρωμα χρησιμοποιείται Portland CEM I 52.5.
- Μη αλκαλο-δραστήρια ασβεστολιγικά αδρανή λατομείου με σκελετό: άμμο (0-4) 53%, γαρμπίλι (4-10) 15,5% και χαλίκη (10-20) 31,5%.
- Πρόσμηκτα: OPTIMA 100 της CHRYSO, Glenium και Rheobuilt της MBT.

## 6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ΚΜΕ, Κανονισμός Μελετών Ερευνών για την μελέτη – κατασκευή αυτοχρηματοδότησης και εκμετάλλευσης έργου μόνιμης Ζεύξης Ρίου – Αντιρρίου, Σεπτέμβριος 1992
- Τ.Σ.Υ. –Volume 6, Τεχνική Συγγραφή Υποχρεώσεων για την κατασκευή της Γέφυρας Ρίου - Αντιρρίου
- Σκυρόδεμα:
  - DIN 1045 (88), Structural use of concrete – Design and construction
  - ENV 206 (97), Concrete – Performance, production and conformity
  - DIN 1048 (91), Testing concrete – Testing of fresh concrete – Testing of hardened concrete
  - DIN 1084 (78), Quality control of concrete structures and reinforced concrete structures – Ready – mixed concrete
  - EN 1008A (97), Mixing water for concrete – Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including wash water from recycling installations in the concrete industry, as mixing water for concrete.
- Τσιμέντο: - DIN 1164 (94), Cement – Compositions and Requirements
- Αδρανή: - EN 18-541 (94), Granulats – Granulats pour Betons hydrayliques

- ASTM C227 (97), Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations (mortar-Bar-Method)
- Πρόσμηκτα: - ASTM C494 (98), Standard Specification for Chemical Admixtures for concrete
- ASTM C260 (98), Standard Specification for Air Entraining Admixtures for Concrete

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΞΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C45/55

Mix name	BP code	MIX DESIGN (kg/m <sup>3</sup> )								Slump (cm)	Flow (cm)	Workability keeping	Setting Time	Pumpability	Early-age strength*				Use	
		Sand	4-10	10-20	CEM (III + I)	Water	W/C	MBT 1. GI 27 2. Rh T3	CHRYSO 1. Opt 100						Rc 16h	Rc 18h	Rc 24h	Rc 30h		
1 N	401	980	290	585	400	170	+/- 5	0.38	1. 4.4 +/- 0.4		12		20 min	1h	no	3			9	Raft Spacers
1 F	406	980	290	585	400	175	+/- 5	0.40	1. 5.2 +/- 0.4		>20	55	45 min	1h30	200m at 30m <sup>3</sup> /h	3			9	Walls at - 8.0
2 F	420	980	290	585	400	178	+/- 5	0.40	1. 4.4 +/- 0.4		>20	55	30 min	1h	no	3			9	Precast Slabs
3 N	423	980	290	585	400	175	+/- 5	0.40		1. 4.5 +/- 0.5	12	40	> 1 h	> 2 h	400m at 25m <sup>3</sup> /h	1	3		8	Footing Top Slab
3 P	429	980	290	585	400	180	-	0.41		1. 5 +/- 0.5	16	45	> 1 h	> 2 h	400m at 30m <sup>3</sup> /h	1	3		8	Rafts and Walls & Pier Shaft & Pier Head
4 F	424	940	280	555	450	195	+/- 5	0.40		1. 4.5 +/- 0.5	20	50	> 2 h	> 3 h	400m at 35m <sup>3</sup> /h	1	3	6	9	Cone
5 F	422	940	280	555	450	190	+/- 5	0.38	1. 4.8 +/- 0.4		>20	55	1 h	2 h	400m at 30m <sup>3</sup> /h	4	6		11	Rafts at -12.0
6 F	425	970	285	575	420	185	+/- 5	0.40		1. 5 +/- 0.5	20	50	> 2 h	> 3 h	400m at 30m <sup>3</sup> /h	2	3		9	Cone
7 R	445	900	900	-	450	190	+/- 5	0.38	1. 6 +/- 1		>20	55	30 min	1h	no	4				Repair
8 F	446	940	840	-	450	190	+/- 5	0.38		1. 7.5 +/-1.0	20	55	> 2 h	> 3 h	400m at 30m <sup>3</sup> /h	1	3		9	Mass Microconcrete
9 F	444	1300	600	-	470	195	+/- 5	0.36	1. 8 +/- 1		>20	55	30 min	1 h	no					Spacers
10 F	430	970	285	575	420 **	185	+/- 5	0.40		1. 5 +/- 0.5	20	50	> 2 h	> 3 h	400m at 30m <sup>3</sup> /h	3	4	9	12	Cone
12 (P) F	432	980	290	585	400	180	+/- 5	0.41	1. 4.8 +/- 0.4 2. 1.8 +/- 0.2		20	55	> 1 h	> 2 h	400m at 20-25m <sup>3</sup> /h	4			12	Rafts, Walls, Precast Slabs

**NOTES** \*Early-age Strength Values given are minimal values

corresponding to 20°C curing (mass effect is not integrated)

Slump values are given at +/- 2 cm. Flow values are given at +/- 5 cm.

\*\*20% of CEM I 52,5 / 80% of CEM III/A 42,5

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΞΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ C60/75

Mix Name	BP Code	Mix Design (kg/m <sup>3</sup> )								Slump (cm)	Flow (cm)	Workability Keeping	Setting Time	Early Age Strength		Use
		Sand	4-10	10-20	Cement Type + Quantity	Water		W/C	Admixture Type					Rc 16h (Mpa)	Rc 30h (Mpa)	
Mix 1	610	920	280	560	CEM III 490	175	+ / - 5	0,33	Optima 100 8 +/- 0,5	20	55	>2h	> 3h	3-lav	12	Pier Shaft Slab
Mix 2	620	920	280	560	CEM III 327 + CEM I 163	175	+ / - 5	0,33	Optima 100 8 +/- 0,5	20	55	3h	> 3h	2	19	Pylon Legs
Mix 3	612	920	280	580	CEM III 490	175	+ / - 5	0,33	Optima 100 7 +/- 0,5	16-18	45-48	2h	> 2 h	at 24 h 8	16	Deck On Shore
Mix 4	670	930	280	580	CEM I 450	185	+ / - 5	0,35	Optima 100 7 +/- 0,5	18-20	50	3h30	> 3 h 30	9	32	Deck Off Shore