

M&S

April 2005

Volume 38 - No. 277

10 numéros par an

ISSN 1359-5997

Materials and Structures

Matériaux et Constructions

Surendra P. Shah
Editor-In-Chief

J. Marchand, S. Mindess, H. W. Reinhardt, Å. Skarendahl
Associate Editors



L'emploi de métakaolin dans la production de béton écologiquement efficace

(The use of metakaolin to produce the eco-efficient concrete)

L. A. P. Oliveira¹, S. Jalali², J. M. Fernandes² et E. Torres¹

(1) Département de Génie Civil, Université de Beira Interior, Covilhã, Portugal

(2) Département de Génie Civil, Université de Minho, Guimarães, Portugal

Received: 9 February 2004; accepted: 11 August 2004

RÉSUMÉ

Les matériaux d'addition font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du béton, car l'utilisation des additions apporte une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton. D'autre part, leur utilisation a pour objectif de réduire la consommation de ciment, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement. Cet article étudie les avantages et les limitations de la substitution partielle du ciment par le métakaolin. Les résultats obtenus démontrent que cette substitution apporte, pour le béton de même ordre de résistance à la compression, une amélioration considérable au niveau de la durabilité. Ce qui permet de conclure que le métakaolin est un substitut efficace capable de réduire le contenu de ciment pour l'obtention de bétons équivalents.

1359-5997 © 2004 RILEM. All rights reserved.

ABSTRACT

One of the more recent developments in the production of concrete is the use of additions, resulting in a significant improvement to the mechanic and durability performances of concrete. Furthermore, to the extent that it leads to a reduction in cement consumption, the use of additions contributes to solving environmental problems in a simple and economic manner. This article presents a study of the advantages and limitations of the partial replacement of cement by metakaolin in concrete. Its results demonstrate that such a substitution provides considerable improvements at the level of durability for concretes of the same level of compressive strength. This indicates that metakaolin is indeed an efficient substitute to cement, and its use results in the production of equivalent concretes.

1. INTRODUCTION

L'industrie de la construction est sans doute une des plus grandes consommatrices de ressources naturelles et est en même temps responsable de la production d'un grand volume de déchets. Au delà de cette constatation, un nouveau problème est apparu ces 30 dernières années : la dégradation précoce des structures en béton. Donc, la durabilité du béton et les questions liées à l'environnement sont les préoccupations fréquentes des études actuelles sur les bétons. Avec le développement des adjuvants superplastifiants et la disponibilité d'additions actives, l'emploi du béton de haute performance a fortement augmenté dans ces dernières années. L'un des matériaux les plus récents utilisés comme addition, remplaçant une partie du ciment dans les bétons, est le métakaolin. Son efficacité dans l'amélioration des propriétés du béton est prouvée par plusieurs études en laboratoire et par les résultats sur chantiers.

Les bétons contenant du métakaolin présentent des comportements similaires à ceux contenant de la fumée de silice, c'est-à-dire une amélioration de la résistance mécanique

et une réduction significative de la perméabilité [1, 2]. Cette addition entraîne aussi une réduction du retrait du béton [3, 4].

Certains auteurs [5-8] ont constaté qu'une addition de l'ordre de 15% de métakaolin confère une capacité supérieure de résistance en milieux agressifs, tels ceux des eaux de mer et des solutions acides.

L'utilisation d'additions actives dans les bétons comme substitut du ciment a des avantages divers dont les principaux se rapportent au fait que le ciment est le composant le plus coûteux du béton, que sa production exige une grande consommation d'énergie et que la production d'une tonne de ciment libère approximativement autant de dioxyde de carbone dans l'atmosphère [9].

Cet article présente une étude dont le but principal est de viabiliser l'utilisation de métakaolin produit à partir de kaolinites portugaises dans la production des bétons de haute performance considérés comme écologiquement efficaces. L'absence, au Portugal, de métakaolin fait que l'un des objectifs de ce travail fut la production et l'évaluation du métakaolin comme substitut partiel du ciment dans les bétons. Car il est connu qu'une réaction directe du métakaolin avec

1359-5997 © 2004 RILEM. All rights reserved.

doi:10.1617/14186

Tableau 3 – Compositions et consistance des bétons

Matériaux	C300	C30M10	C330	C33M10	C33M15	C33HRM10	C33SF10	C400
Ciment [kg/m ³]	300	270	330	300	285	300	300	400
Rapport E/C [kg/kg]	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,4
Sable [kg/m ³]	1136	1136,3	1029,5	1029,5	1029,5	1029,5	1029,5	884,0
Pierre concassée [kg/m ³]	712,5	712,5	723,1	723,1	723,1	723,1	723,1	776,3
Métakaolin [kg/m ³]	...	30	...	30	45	...	...	...
SF [kg/m ³]	...	...	...	...	...	...	30	...
HRM [kg/m ³]	...	...	...	...	...	30	...	...
Rheobuild [%]	2	2,5	1,5	2	2,5	1,75	1,75	1,5
Affaissement Cône d'Abrams [mm]	30	25	150	140	160	165	165	160

mesurées. Le Tableau 3 montre les compositions des 8 mélanges de béton étudiés dans ce travail.

3. PROTOCOLE D'ESSAIS

Les déterminations de la résistance à la compression, de la résistivité électrique, de la diffusion de ions chlore et de l'absorption d'eau par capillarité ont été réalisées sur des échantillons de différents mélanges de béton à l'âge de 28, 56 et 90 jours. Les valeurs présentées, pour tous les essais, sont les moyennes obtenues des résultats individuels de trois éprouvettes.

3.1 Essais de résistance à la compression

Les essais pour la détermination de la résistance à la compression ont été réalisés en conformité avec la norme LNEC E226 [14]. La vitesse d'application de la charge a été de 10 kN/s et les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.

3.2 Essais de diffusion des ions chlore

La méthode « CTH Rapid Method », développée par Luping [15] a été employée pour la détermination du coefficient de diffusion des ions chlore. Cette méthode consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une différence de potentiel pendant une période de temps préalablement établie. Une face de l'éprouvette a été mise en contact avec une solution cathode, contenue dans un compartiment amont, préparée avec 4g de NaOH + 100 g de NaCl par litre d'eau distillée et l'autre face en contact avec une solution anode, préparée avec 12 g de NaOH par litre d'eau, contenue dans un compartiment aval. Une fois le temps terminé, en fonction du courant initial, l'éprouvette est divisée axialement et la profondeur de pénétration est mesurée par un procédé colorimétrique, utilisant du nitrate d'argent. La différence de potentiel appliquée a été de $30 \pm 0,2$ V. La durée de l'essai est basée sur une proposition de Luping. Cette proposition, présentée au Tableau 4, a été revue et adaptée à ce travail.

Tableau 4 – Durée des essais CTH Rapid Method

Courant Initial I_0 [mA]	Durée de l'essai t_{eth} [heures]
$I_0 < 5$	$t_{eth} = 168$
$5 \leq I_0 < 10$	$t_{eth} = 96$
$10 \leq I_0 < 30$	$t_{eth} = 48$
$30 \leq I_0 < 60$	$t_{eth} = 24$
$60 \leq I_0 < 120$	$t_{eth} = 8$
$120 \leq I_0 < 240$	$t_{eth} = 4$
$I_0 \geq 240$	$t_{eth} = 2$

Le coefficient de diffusion est déterminé par l'expression suivante [15]:

$$D = \frac{R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot U} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot E}{z \cdot F \cdot U}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0} \right) \quad (2)$$

Où:

D: coefficient de diffusion, m²/s;

z: valeur absolue de valence du ion, pour les ions de chlore z = 1;

F: paramètre de Faraday, $F = 9,648 \times 10^4$ J/(V.mol);

U: valeur absolue de la différence de potentiel, V;

T: température de la solution, K;

L: épaisseur de l'éprouvette, m;

x_d : profondeur de pénétration, m;

t: durée de l'essai, s;

erf^{-1} : l'inverse de la fonction d'erreur;

c_d : concentration des ions chlore avec laquelle la couleur est modifiée, $c_d \approx 0,07$ N;

c_0 : concentration des ions chlore dans la cellule, N.

3.3 L'essai de résistivité électrique

La résistivité électrique est déterminée par la lecture initiale du courant dans l'essai de diffusion des ions chlore.

Tableau 3 – Compositions et consistance des bétons

Matériaux	C300	C30M10	C330	C33M10	C33M15	C33HRM10	C33SF10	C400
Ciment [kg/m ³]	300	270	330	300	285	300	300	400
Rapport E/C [kg/kg]	0,35	0,35	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,4
Sable [kg/m ³]	1136	1136,3	1029,5	1029,5	1029,5	1029,5	1029,5	884,0
Pierre concassée [kg/m ³]	712,5	712,5	723,1	723,1	723,1	723,1	723,1	776,3
Métakaolin [kg/m ³]	...	30	...	30	45	...	...	...
SF [kg/m ³]	...	...	...	...	...	...	30	...
HRM [kg/m ³]	...	...	...	...	...	30	...	...
Rheobuild [%]	2	2,5	1,5	2	2,5	1,75	1,75	1,5
Affaissement Cône d'Abrams [mm]	30	25	150	140	160	165	165	160

mesurées. Le Tableau 3 montre les compositions des 8 mélanges de béton étudiés dans ce travail.

3. PROTOCOLE D'ESSAIS

Les déterminations de la résistance à la compression, de la résistivité électrique, de la diffusion de ions chlore et de l'absorption d'eau par capillarité ont été réalisées sur des échantillons de différents mélanges de béton à l'âge de 28, 56 et 90 jours. Les valeurs présentées, pour tous les essais, sont les moyennes obtenues des résultats individuels de trois éprouvettes.

3.1 Essais de résistance à la compression

Les essais pour la détermination de la résistance à la compression ont été réalisés en conformité avec la norme LNEC E226 [14]. La vitesse d'application de la charge a été de 10 kN/s et les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de 10 cm de côté.

3.2 Essais de diffusion des ions chlore

La méthode « CTH Rapid Method », développée par Luping [15] a été employée pour la détermination du coefficient de diffusion des ions chlore. Cette méthode consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une différence de potentiel pendant une période de temps préalablement établie. Une face de l'éprouvette a été mise en contact avec une solution cathode, contenue dans un compartiment amont, préparée avec 4g de NaOH + 100 g de NaCl par litre d'eau distillée et l'autre face en contact avec une solution anode, préparée avec 12 g de NaOH par litre d'eau, contenue dans un compartiment aval. Une fois le temps terminé, en fonction du courant initial, l'éprouvette est divisée axialement et la profondeur de pénétration est mesurée par un procédé colorimétrique, utilisant du nitrate d'argent. La différence de potentiel appliquée a été de $30 \pm 0,2$ V. La durée de l'essai est basée sur une proposition de Luping. Cette proposition, présentée au Tableau 4, a été revue et adaptée à ce travail.

Tableau 4 – Durée des essais CTH Rapid Method

Courant Initial I_0 [mA]	Durée de l'essai t_{cth} [heures]
$I_0 < 5$	$t_{cth} = 168$
$5 \leq I_0 < 10$	$t_{cth} = 96$
$10 \leq I_0 < 30$	$t_{cth} = 48$
$30 \leq I_0 < 60$	$t_{cth} = 24$
$60 \leq I_0 < 120$	$t_{cth} = 8$
$120 \leq I_0 < 240$	$t_{cth} = 4$
$I_0 \geq 240$	$t_{cth} = 2$

Le coefficient de diffusion est déterminé par l'expression suivante [15]:

$$D = \frac{R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot U} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot U}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0} \right) \quad (2)$$

Où:

D: coefficient de diffusion, m²/s;

z: valeur absolue de valence du ion, pour les ions de chlore $z = 1$;

F: paramètre de Faraday, $F = 9,648 \times 10^4$ J/(V.mol);

U: valeur absolue de la différence de potentiel, V;

T: température de la solution, K;

L: épaisseur de l'éprouvette, m;

x_d : profondeur de pénétration, m;

t: durée de l'essai, s;

erf^{-1} : l'inverse de la fonction d'erreur;

c_d : concentration des ions chlore avec laquelle la couleur est modifiée, $c_d \approx 0,07$ N;

c_0 : concentration des ions chlore dans la cellule, N.

3.3 L'essai de résistivité électrique

La résistivité électrique est déterminée par la lecture initiale du courant dans l'essai de diffusion des ions chlore.

La loi d'Ohm a été utilisée pour estimer les valeurs de la résistivité.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (4)$$

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = \frac{V \cdot A}{L \cdot I} \quad (5)$$

Où:

R: résistance électrique, Ω ;

I: intensité de courant, A;

V: différence de potentiel, V;

ρ : résistivité électrique, $\Omega \cdot \text{cm}$;

L: longueur, cm;

A: aire, cm^2 .

3.4 L'essai d'absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques de 105 mm de diamètre et 155 mm de hauteur, selon la norme E393 [16].

La pente de la droite qui s'ajuste le mieux avec les points expérimentaux, en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} , représente le coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Les résultats sont exprimés en g/m^2 pour chaque temps \sqrt{t} .

4. L'ANALYSE DES RÉSULTATS

Pour une évaluation plus efficace, les résultats ont été analysés en deux séries de cinq mélanges chacune. La série A contient les mélanges nommés C300, C30M10, C330, C33M10 et C400. La série B contient les mélanges C330, C33M10, C33M15, C33SF10 et C33HRM10.

L'efficacité des additions actives a été mesurée à l'aide du facteur K, où

$$K = \frac{C - X}{C} \times 100 \quad (6)$$

où,

K: Efficacité des additions actives, %;

C: Valeur obtenue avec le mélange de référence;

X: Valeur obtenue avec le mélange X.

4.1 Résistance à la compression

La Fig. 2 représente l'évolution des résistances à la compression avec l'âge des mélanges de la série A.

En analysant les résultats des résistances à la compression, il est possible de faire les constatations suivantes :

A cause de son contenu en ciment, le béton C400 est celui qui présente, pour tous les âges, les résistances les plus élevées.

Avec la même quantité de liant la substitution de 10% de ciment CEM I par du métakaolin a augmenté les résistances des bétons. Le béton avec 300 kg/m^3 de liant a eu une

augmentation de 8% de sa résistance à 28 jours et de 21% à 90 jours. Le béton dont le contenu de liant était de 330 kg/m^3 a présenté une résistance à 7 jours inférieure à celui avec 300 kg/m^3 , mais à l'âge de 28 jours l'efficacité est de 10% augmentant pour 18% à l'âge de 90 jours entre les bétons contenant du métakaolin.

Les résultats plus élevés présentés par le béton C400 ont été réduits par rapport à ceux du béton C33M10 au fur et à mesure que l'âge augmentait, au point d'avoir une différence d'à peine 2 MPa à l'âge de 90 jours. Il faut remarquer la forte différence de dosage en ciment entre ces deux mélanges, soit 100 kg/m^3 de plus pour le mélange C400.

Dans le but de comparer l'efficacité du métakaolin produit avec la microsiline SF et le HRM, la Fig. 3 montre l'évolution des résistances à la compression de la série B.

Les valeurs obtenues, à l'âge de 7 jours, pour les mélanges C33M10 et C33M15 sont inférieures à celle du béton de référence, car il faut un temps d'induction pour que le métakaolin puisse réagir avec la chaux du ciment. Par contre, les valeurs obtenues sont plus élevées pour les âges les plus avancés. L'évolution des résistances de ces mélanges avec l'âge est similaire. Les résultats indiquent que la substitution de 15% du ciment par le métakaolin est plus avantageuse, car le mélange C33M15 a eu une

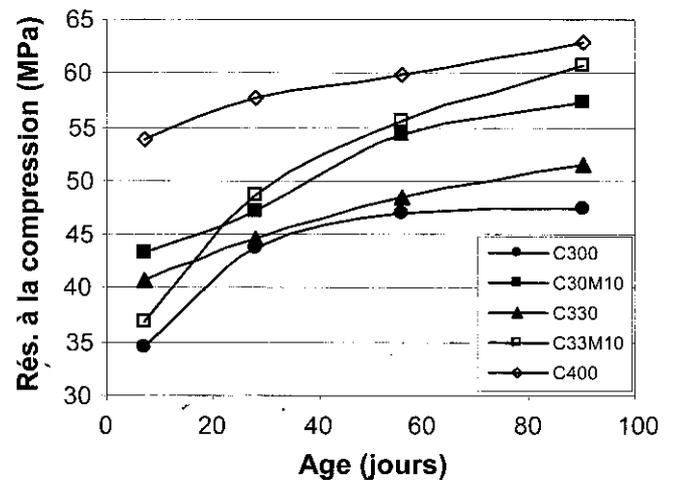


Fig. 2 - Série A : L'évolution des résistances à la compression.

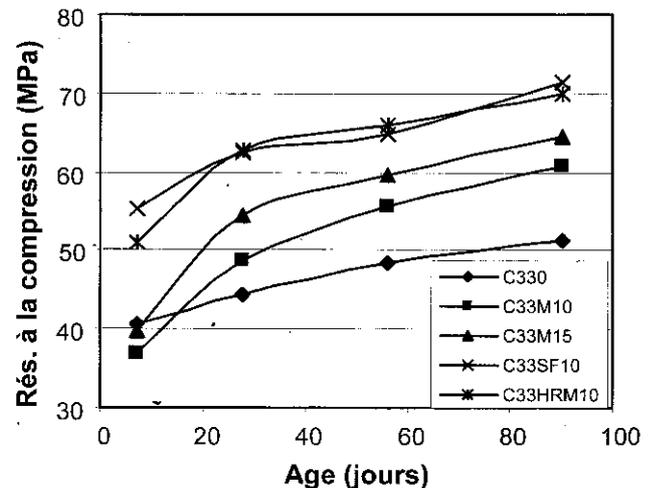


Fig. 3 - Série B : L'évolution des résistances à la compression.

efficacité de 23% à l'âge de 28 jours et de 26% à l'âge de 90 jours.

Les SF et HRM sont les additions qui conduisent aux meilleurs résultats. En utilisant la fumée de silice, la valeur la plus élevée correspond à la résistance à l'âge de 7 jours, soit 55,3 MPa. À l'âge de 90 jours les résultats sont similaires à ceux obtenus avec le HRM, correspondant à une efficacité de l'ordre de 40%.

4.2 La diffusion des ions chlore

Le Tableau 5 montre les moyennes des résultats obtenus dans les essais réalisés avec la série A. La Fig. 4 montre l'évolution avec l'âge du coefficient de diffusion du chlore.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation du métakaolin produit est largement bénéfique dans la réduction du coefficient de diffusion des ions chlore. Les valeurs pour les bétons incorporant le métakaolin sont, à tout âge, au moins 50% inférieures à celle du béton de référence.

La Fig. 4 témoigne du grand avantage de l'utilisation du métakaolin dans l'objectif de diminuer le coefficient de diffusion des ions chlore. Même pour le béton avec 400 kg/m³ de ciment, les résultats sont inférieurs à ceux où le métakaolin était présent.

Les moyennes des résultats des essais réalisés avec les mélanges de la série B sont présentées au Tableau 6. La Fig. 5 montre également l'évolution avec l'âge des coefficients de diffusion des ions chlore.

Cet essai est suffisamment sensible pour mettre en évidence l'évolution du coefficient de diffusion des ions chlore avec l'augmentation en âge, principalement pour les

bétons de qualité inférieure. Il exprime aussi la différence entre la qualité des bétons aux mêmes âges.

La substitution de 15% de métakaolin conduit à des résultats relativement meilleurs si ils sont comparés à ceux obtenus avec la substitution de 10%. Donc il est clair que, le remplacement de 15% de ciment par le métakaolin est avantageux. A l'âge de 28 jours la composition C33M15 a atteint une diminution du coefficient de diffusion du chlore de 70% et de 65% à l'âge de 90 jours.

L'utilisation du SF et du HRM conduit à des résultats analogues à l'âge de 28 jours, la diminution du coefficient de diffusion du chlore est de 80%. Pour le HRM cette valeur est maintenue avec l'augmentation en âge, néanmoins pour le SF la valeur se réduit à 70% à l'âge de 90 jours.

4.3 Résistivité électrique

Les résultats des essais de résistivité électrique obtenus pour la série A sont présentés au Tableau 7. La Fig. 6 montre l'évolution de la résistivité avec l'âge du béton.

Les valeurs obtenues montrent que l'utilisation du métakaolin améliore de manière effective le comportement du béton. La différence, qui se maintient à tout âge, pour les valeurs données par les bétons avec métakaolin, supérieures à 80%, est très importante. De ce fait, l'essai montre clairement la différence de qualité entre les bétons à n'importe quel âge. A plus long terme, la différence d'ordre de 17% est perceptible avec l'augmentation du contenu de ciment dans les bétons.

Le Tableau 8 montre les résultats de l'essai de l'évolution de la résistivité pour la série A. La Fig. 7 groupe

Mélange / Âge	28	56	90	Efficacité des additions actives K		
				28	56	90
C300	37,57	35,99	27,63	0	0	0
C30M10	17,37	11,23	11,83	-54	-69	-57
C330	33,44	24,77	21,07	0	0	0
C33M10	15,49	12,09	9,26	-54	-51	-56
C400	38,13	30,84	22,25	0	0	0

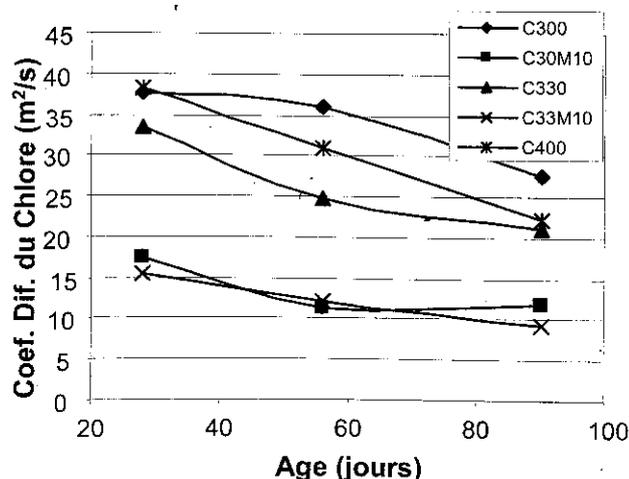


Fig. 4 - Série A : Évolution du coefficient de diffusion des ions chlore.

Mélange / Âge	28	56	90	Efficacité des additions actives K		
				28	56	90
C330	33,44	24,77	21,07	0	0	0
C33M10	15,49	12,09	9,26	-54	-51	-56
C33M15	10,17	6,84	7,27	-70	-72	-65
C33SF10	6,36	5,73	6,03	-81	-77	-71
C33HRM10	5,63	4,57	3,83	-83	-82	-82

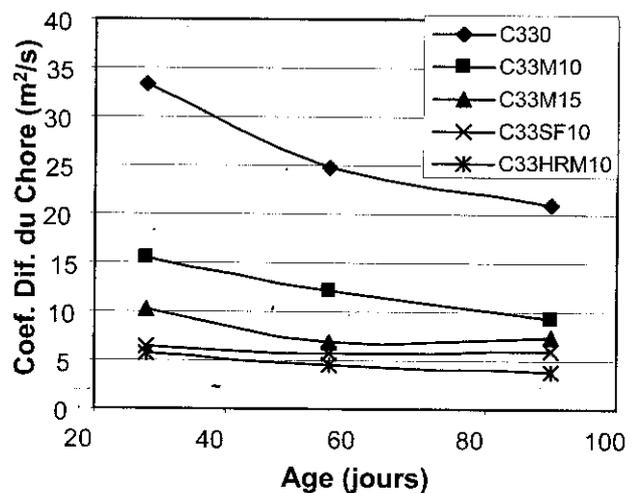


Fig. 5 - Série B : Évolution des coefficients de diffusion du chlore.

Mélange / Âge	28	56	90	Efficacité des additions actives K		
				28	56	90
C300	0,43	0,41	0,45	0	0	0
C30M10	0,79	0,99	1,09	84	140	144
C330	0,38	0,51	0,58	0	0	0
C33M10	0,66	0,82	1,28	71	60	119
C400	0,35	0,40	0,49	0	0	0

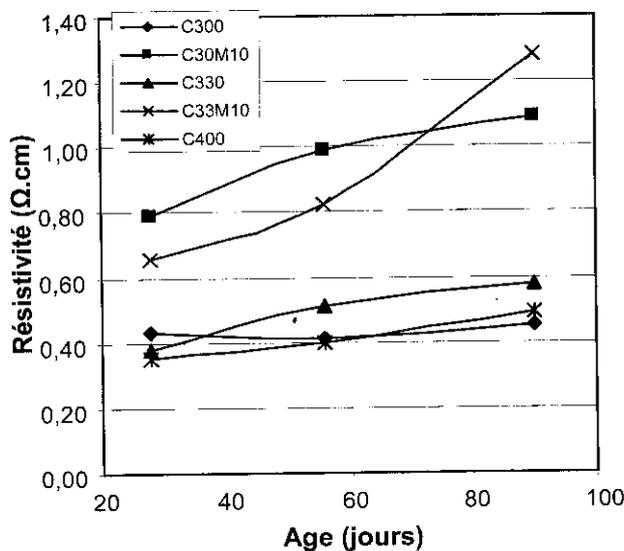


Fig. 6 - Série A : Évolution de la résistivité électrique.

l'évolution de la résistivité électrique avec l'âge des bétons.

Les résultats, les plus intéressants, ont été observés avec la substitution de 15% de métakaolin. À l'âge de 28 jours l'augmentation de la résistivité est de 142%, valeur qui augmente à 162% à l'âge de 90 jours. Les résultats obtenus avec SF et HRM sont à peu près identiques, avec une différence plus importante pour le HRM à l'âge de 90 jours. Avec le HRM, l'efficacité est 220% à 28 jours relativement au béton de référence, cette valeur augmente à 230% à 90 jours.

4.4 Absorption d'eau par capillarité

Le Tableau 9 présente les valeurs obtenues pour les bétons de la série A et la Fig. 8 montre l'évolution avec l'âge du béton du coefficient de capillarité.

À tous les âges, les bétons incorporant du métakaolin ont les coefficients d'absorption d'eau les plus faibles. Le béton C300, comparativement au béton C330, se comporte le mieux. Cela est dû au rapport eau/liant plus bas, qui a été adopté pour ce mélange.

Cet essai indique aussi que l'utilisation du métakaolin est très positive dans l'amélioration de la performance du béton. Néanmoins, on constate que l'augmentation de l'âge du béton diminue la différence entre les bétons avec métakaolin et celui de référence.

À l'âge de 90 jours le béton C30M10 présente un coefficient d'absorption d'eau 8% plus faible que celui du béton C300. La substitution de 10% de métakaolin dans le

Mélange / Âge	28	56	90	Efficacité des additions actives K		
				28	56	90
C330	0,38	0,51	0,58	0	0	0
C33M10	0,66	0,82	1,28	71	60	119
C33M15	0,93	1,23	1,53	142	139	162
C33SF10	1,15	1,58	1,40	199	208	140
C33HRM10	1,23	1,69	1,93	219	229	230

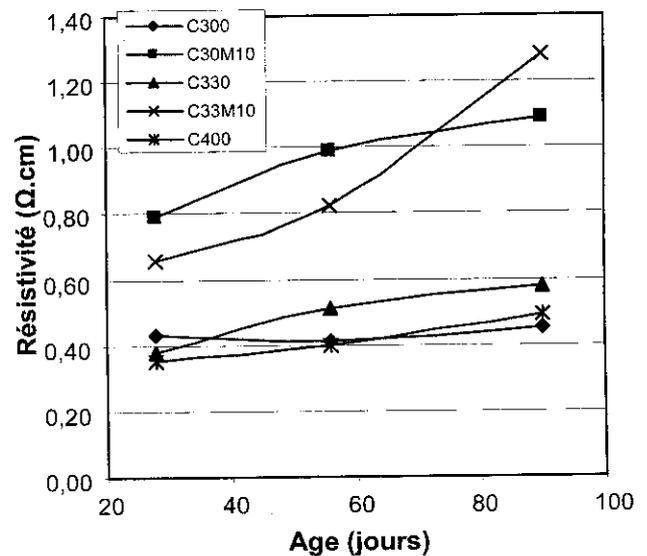


Fig. 7 - Série B : Évolution de la résistivité électrique.

mélange C33M10 donne une efficacité de 35% par rapport au béton de référence.

Le Tableau 10 montre les valeurs obtenues pour les bétons de la série B et la Fig. 9 montre l'évolution avec l'âge du béton du coefficient de capillarité.

Avec 10 et 15% de substitution de ciment par le métakaolin, l'amélioration est assez significative, soit 60% à 28 jours, valeur qui diminue à 35% à 90 jours. Il n'y a pas de différence significative entre l'ajout de 10 ou 15%. Avec l'utilisation du SF et HRM les améliorations sont encore plus importantes. À l'âge de 28 jours l'amélioration est de 75%, qui diminue pour atteindre 60% à 90 jours.

L'effet du rapport eau/liant est analysé en comparant les résultats des essais des mélanges C300 (E/C=0,35) et C330 (E/C=0,45), ainsi que entre les mélanges C30M10 (E/C=0,35) et C33M10 (E/C=0,45). Une augmentation de l'absorption d'eau par capillarité supérieure à 30% a été constatée dans le groupe C300 et C330 due au rapport E/C plus élevé. Entre les mélanges C30M10 et C33M10 cette augmentation a été réduite et à long terme cette réduction est de l'ordre de 5%.

En ce qui concerne les résistances à la compression, aucune différence significative n'a été vérifiée à l'intérieur des deux groupes de mélanges. Finalement, on peut conclure que le rapport E/C plus faible n'a pas influencé favorablement les résultats des essais de diffusion du chlore et de la résistivité électrique. Ces conclusions sur l'effet du rapport E/C sont considérées valables, car si l'augmentation

Mélange / Âge	28	56	90	Efficacité des additions actives K		
				28	56	90
C300	241,7	173,3	127,0	0	0	0
C30M10	122,5	143,3	116,7	-49	-17	-8
C330	356,8	222,9	171,3	0	0	0
C33M10	146,4	122,5	111,2	-59	-45	-35
C400	206,9	166,1	144,1	0	0	0

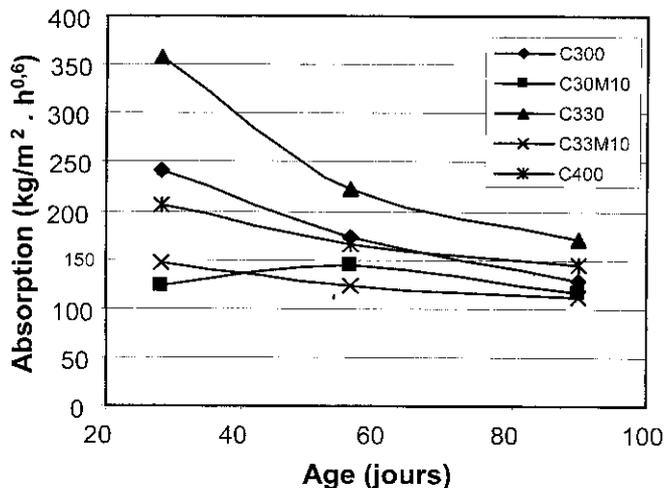


Fig. 8 - Série A : Évolution des coefficients d'absorption d'eau.

du contenu de liant entre les mélanges comparés a été de l'ordre de 10% ; la réduction du rapport E/C a été de 20%.

5. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans ce travail nous amènent aux conclusions suivantes:

1. Pour la transformation du kaolin en métakaolin, une température de 750°C est nécessaire. Ce procédé implique une perte de 12% en masse. Tous les matériaux doivent atteindre cette température.

2. C'est principalement avec les essais qui évaluent la durabilité du béton que les résultats démontrent les avantages de la substitution partielle de ciment par le métakaolin.

3. Il est possible de réduire la quantité de ciment pour obtenir des bétons équivalents lors de l'addition du métakaolin. Cette réduction dépend de l'importance de la résistance désirée.

4. Le remplacement de 15% de ciment par du métakaolin est le plus efficace, autant pour la résistance que pour la durabilité.

5. Les meilleurs résultats obtenus avec le métakaolin de haute réactivité (HRM) sont probablement associés à la pureté de la matière première et à la plus faible dimension de ses particules.

6. Les résultats obtenus avec SF sont semblables à ceux des HRM.

7. D'après les résultats obtenus dans cette étude on peut conclure qu'il est possible, au Portugal, de produire des

Mélange / Âge	28	56	90	Efficacité des additions actives K		
				28	56	90
C330	356,8	222,9	171,3	0	0	0
C33M10	146,4	122,5	111,2	-59	-45	-35
C33M15	129,5	85,0	109,1	-64	-62	-36
C33SF10	93,4	76,0	81,0	-74	-66	-53
C33HRM10	84,8	77,6	72,5	-76	-65	-58

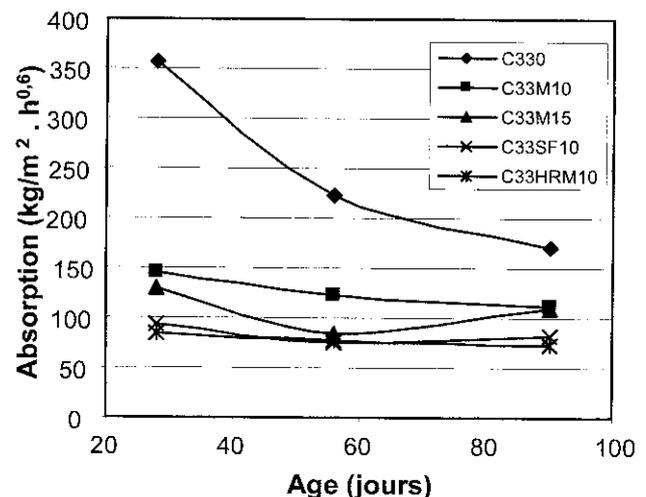


Fig. 9 - Série B : Évolution des coefficients d'absorption d'eau.

bétons écologiquement efficaces. Néanmoins, pour la production de métakaolin à l'échelle industrielle, une étude de l'optimisation de calcination du kaolin, en fonction du type de four employé, s'avère nécessaire.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du Project POCTI/ECM/34338/99, financé par la « Fundação para a Ciência e a Tecnologia » que les auteurs remercient.

REFERENCES

- [1] Caldarone, M.A, Gruber, K.A and Burg, R.G., 'High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture', *Concrete International* **16** (11) (1994) 37-40.
- [2] Marsh D., 'An alternative to silica fume', *Concrete Production* **97** (11) (1994) 24-30.
- [3] Wild, S.; Khatib, J. and Roose, L.J., 'Chemical and autogenous shrinkage of Portland cement-metakaolin pastes', *Advanced Cement Research* **10** (3) (1998) 109-119.
- [4] Rols, S., Mbessa, M., Ambroise, J. and Péra, J., 'Influence of ultra-fine particle type on properties of very-high-strength concrete', in Malhotra, V.M., Helene, P., Prudencio, L.R., Dal Molin, D.C.C., editors, *Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference on High Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*, Gramado, RS, Brazil, 1999, 671-686.

- [5] Marwan, T., Péra, J. and Ambroise, J., 'The action of some aggressive solutions on Portland and calcined laterite blended cement concretes', in: Malhotra V.M, editor. Proceedings of the Fourth International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Vol I. Istanbul, Turkey, May 1992, 763-779.
- [6] Bosc, J.L., Kouame, K. and Péra, J., 'Improvement of concrete durability in tropical marine environment by adding métakaolin and superplasticisers', in Proceedings of the Sixth International Conference on Durability of Building Materials and Components, Vol. 1. Omiya, Japan, 1993, 448-457.
- [7] Khatib, J. and Wild, S., 'Sulphate resistance of metakaolin mortar', *Cement Concrete Research* 28 (1) (1998) 83-92.
- [8] Péra, J., Rols, S., Chabannet, M. and Ambroise, J., 'Influence of the cement type on the resistance of concrete to an agricultural environment', in: Cohen, M., Mindess, S., Skalny, J., editors. Materials Sciences of Concrete: The Sidney Diamond Symposium (The American Concrete Society, 1998) 419-430.
- [9] Sabir, B.B., Wild, S. and Bai, J., 'Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review', *Cement & Concrete Composites* 23 (2001) 441-454.
- [10] Dunster, A.M, Parsonage, J.R. and Thomas, M.J.K., 'The pozzolanic reaction of metakaolin and its effects on PC hydration', *Journal of Materials Science* 28 (1993) 1345-1350.
- [11] Coutinho, A.S. and Gonçalves, A., 'Production and properties of Concrete' (LNEC, Lisbon, 1994) [only available in Portuguese].
- [12] Liu, J.N., 'Strength and hydration of an activated aluminosilicate material', Pennsylvania State University, USA, 1998.
- [13] Faury, J., 'Le béton. Influence de ses constituants inertes. Règles à adopter pour sa meilleure composition. Sa confection et son transport sur les chantiers' (Dunod, Paris, 1958).
- [14] LNEC – E226, 'Concrete: Compression Test', LNEC, Lisboa, 1968 [only available in Portuguese].
- [15] Luping, T., 'Chloride transport in concrete – Measurement and prediction', Doctoral Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1996.
- [16] LNEC – E393, 'Concretes: Determination of capillarity water absorption', LNEC, Lisbon, 1993 [only available in Portuguese].
-



MATERIALS AND STRUCTURES

MATERIAUX ET CONSTRUCTIONS

CONTENTS

Volume 38, Issue 277, April 2005

Scientific reports

- 289 **Fatigue behavior of concrete subjected to biaxial loading in the compression region**
B. Mu and S. P. Shah
- 299 **Mechanical threshold of cementitious materials at early age**
J. M. Torrenti and F. Benboudjema
- 305 **Mode I and mixed mode fracture studies in brittle materials using the Brazilian disc specimen**
H. N. Atahan, M. A. Tasdemir, C. Tasdemir, N. Ozyurt and S. Akyuz
- 313 **A comparison of transport properties for concrete using the ponding test and the accelerated chloride migration test**
C. C. Yang
- 321 **Durability of bonded cement-based overlays: effect of metal fibre reinforcement**
A. Turatsinze, J.-L. Granju, V. Sabathier and H. Farhat
- 329 **Flexural behavior of reinforced concrete beams with cementitious repair materials**
S.-K. Park and D.-S. Yang
- 335 **Mechanical behaviour of thermally damaged high-strength steel fibre reinforced concrete**
G. M. Giaccio and R. L. Zerbino
- 343 **Shear behaviour of steel fibre reinforced concrete beams**
A. Meda, F. Minelli, G. A. Plizzari and P. Riva
- 353 **Effect of normalizing heat treatment on the mechanical behaviour of low-alloy steel weld metals**
V. B. Trindade, J. C. Payão-Filho, A. S. Guimarães and R. P. R. Paranhos
- 359 **Preliminary modeling of internal heterogeneities in fibre reinforced concrete**
O. Plé and O. Bayard
- 367 **Influence of the pozzolanic fraction obtained from vitrified bottom-ashes from MSWI on the properties of cementitious composites**
A. Saccani, F. Sandrolini, F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi and I. Lancellotti
- 373 **Alkali-silica reactivity criteria for concrete aggregates**
M. Berra, T. Mangialardi and A.E. Paolini
- 381 **Alkali-aggregate reaction in Swiss tunnels**
A. Leemann, C. Thalmann and W. Studer
- 387 **Influence of composite materials confinement on alkali aggregate expansion**
I. Mohamed, L. Curtil, S. Ronel-Idrissi and P. Hamelin
- 395 **Quantification of movements of flat and elongated particles in hot mix asphalt subject to wheel load test**
J. S. Chen, S.-Y. Wong and K.-Y. Lin
- 403 **L'emploi de métakaolin dans la production de béton écologiquement efficace
(The use of metakaolin to produce the eco-efficient concrete)**
L. A. P. Oliveira, S. Jalali, J. M. Fernandes et E. Torres
- 411 **Study on hydration of Portland cement with fly ash using electrical measurement**
X. Wei and Z. Li
- 419 **Dama de Elche: Pigments, surface coating and stone of the sculpture**
M. P. Luxán, J. L. Prada and F. Dorrego
- 425 **Study of the degradation causes affecting stucco sculptures from the Valentino Castle in Turin**
J.-M. Tulliani and C. Bertolini Cestari