

# A durabilidade de concretos de alto desempenho com metacaulim frente à penetração de íons cloreto

Charles Siervi Lacerda <sup>(1)</sup>; Paulo Helene <sup>(2)</sup>

(1) *Mestrando da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PCC.USP.  
e-mail : [charles.lacerda@poli.usp.br](mailto:charles.lacerda@poli.usp.br)*

(2) *Prof. Titular Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PCC.USP.  
Coordenador Internacional da Red Rehabilitar CYTED. Deputy Chairman **fib** (CEB-FIP) Commission 5 “Structural Service Life Aspects”. Presidente do IBRACON*

*Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, PCC.USP. São Paulo SP 05508-900, Cidade Universitária,  
Brasil.*

*Fax: +55 +11 3091-5544. Tels.: +55 +11 3091- 5440*

## RESUMO

A durabilidade dos concretos tem sido uma preocupação dos engenheiros e de toda a sociedade não só por uma questão econômica, onde os custos dos reparos têm alcançado patamares elevados, mas também porque os concretos têm sido utilizados em ambientes cada vez mais hostis como plataformas e obras marítimas, donde se conclui por uma necessidade na melhoria da qualidade do concreto. Um dos principais agentes agressivos encontrados nos concretos são os íons cloreto que podem surgir principalmente em região litorânea. A sua presença no concreto armado, aliado à umidade e oxigênio, leva à despassivação da armadura e permite, dessa forma, o início do processo de corrosão. Assim, a determinação da resistência à penetração de íons cloreto é um fator bastante importante na determinação da durabilidade desse concreto. Neste estudo procurou-se determinar a resistência à penetração de íons cloreto em três traços distintos de concretos (1:3, 1:4 e 1:5) sendo, para cada traço, examinados um concreto com substituição de 8% do cimento, em massa, por metacaulim, e, outro, de referência, sem adição. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios onde se observou que os concretos com metacaulim apresentaram, em todas as idades pesquisadas, 28, 63 e 91 dias, elevadas resistências à penetração de íons cloreto podendo, sob este aspecto, serem considerados duráveis e bastante recomendados para obras onde se faz presente o ataque de agentes agressivos caracterizados por íons cloreto.

**PALAVRAS CHAVE:** durabilidade, metacaulim, concreto, alto desempenho.

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a durabilidade dos concretos tem ocorrido não só por parte dos engenheiros como também de toda sociedade, primeiro, por uma questão econômica onde os custos dos reparos têm alcançado patamares muito elevados, e, segundo, mas não menos importante, por uma questão ambiental quanto à conservação dos recursos naturais [1, 2].

Em sólidos porosos, como é o caso dos concretos, a permeabilidade do material à água geralmente determina a taxa de deterioração da estrutura, principalmente quando sujeita à ação da água do mar, onde várias causas físicas e químicas estão agindo concomitantemente contribuindo, assim, para a redução da vida útil [3].

Os principais agentes químicos deletérios das estruturas de concreto armado em ambientes marítimos são o gás carbônico e os íons cloreto e sulfato. [3, 4, 5].

Segundo Helene [4], na presença de íons cloreto, dependendo da relação Cl/OH, pode ocorrer a destruição do filme protetor que é formado naturalmente nas armaduras quando em contato com concretos jovens e de elevada alcalinidade. Quando isso ocorre existe grande possibilidade de corrosão do aço. Ainda, quando grandes quantidades de cloretos estão presentes, o concreto tende a conservar mais umidade o que vai aumentar o risco de corrosão com a conseqüente diminuição da resistividade elétrica do concreto.

Husni et al [6] defendem que o ataque por cloretos deve ser considerado muito mais severo que o ataque por sulfatos, pois, substâncias presentes na água do mar, até mesmo os íons cloreto, limitam a severidade dos efeitos dos ataques por sulfatos. Ainda, a corrosão da armadura causada pela penetração dos íons cloreto aparece em forma de “pite” que pode levar à ruptura pontual das barras [7].

A entrada dos íons cloreto no concreto se dá através dos poros [3] e a permeabilidade dos concretos é controlada, principalmente, pela pasta de cimento hidratada [8].

A utilização do metacaulim como adição mineral em substituição ao cimento promove um refinamento da estrutura dos poros da pasta de cimento [9]. Experimentos realizados por Boddy et al, Gruber et al e Caldarone et al [10, 11, 12] mostraram um aumento na resistência à penetração de íons cloreto nos concretos contendo metacaulim.

Assim, a determinação da resistência do concreto à penetração de íons cloreto é um fator bastante importante na determinação da durabilidade desse concreto.

## **2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

Foram escolhidos três diferentes traços de concreto, sendo a relação cimento/agregados em massa de materiais secos de 1:3, 1:4 e 1:5, por abrangerem o campo dos concretos estruturais correntes.

Foi adotada uma substituição de 8% de massa de cimento por metacaulim por estar numa faixa mais comum de substituição que é de 5 a 15% [13, 14].

O metacaulim utilizado apresentou área superficial específica de 738 m<sup>2</sup>/kg, diâmetro médio das partículas de 12,4 µm e densidade de massa específica de 2650 kg/m<sup>3</sup>. A atividade pozolânica do metacaulim medida através do Método de Chapelle, segundo proposto por Raverdy et al [15], resultou em 729,4 mg CaO/g amostra.

O cimento utilizado, de fabricação nacional, foi o CP V ARI Plus RS por possuir maior percentual de clínquer em sua composição, comparativamente aos demais cimentos do mercado, possibilitando, assim, averiguar com mais clareza os efeitos do metacaulim no concreto tendo em vista a maior liberação de hidróxido de cálcio, necessário às reações pozolânicas, quando da hidratação do cimento.

Foram utilizados areia natural (rosa) com módulo de finura de 1,21 e densidade de massa específica de 2.650 kg/m<sup>3</sup> e brita 1, granítica, de módulo de finura de 6,91 e densidade de massa específica de 2660 kg/m<sup>3</sup>. Os agregados miúdo e graúdo atendem à ABNT NBR 7211.

Toda a pedra utilizada foi lavada previamente e seca em estufa. A areia foi somente seca em estufa.

Em todo concreto executado foi incorporado o aditivo denominado plastificante / redutor de água que também pode atuar como retardador de endurecimento com a finalidade de se reduzir a relação água/aglomerantes.

A consistência foi mantida para todos os traços e medida através do tronco de cone onde se fixou o abatimento em 80 mm.

Os concretos foram executados seguindo orientação de Helene [16].

Na Tabela 1 observa-se o resumo dos traços executados para os ensaios.

**Tabela 1** Síntese dos traços estudados para concretos de “slump” 80 mm.

Traço	nome	substituição	cimento : adição : areia : brita ; a/c	$\gamma_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	Ar (%)	C (kg/ m <sup>3</sup> )
1 : 3	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 0,96 : 2,04 ; 0,31	2.412	1,7	560
	M	metacaulim (8%)	0,92 : 0,08 : 0,96 : 2,04 ; 0,34	2.391	1,2	507
1 : 4	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,45 : 2,55 ; 0,42	2.382	2,0	439
	M	metacaulim (8%)	0,92 : 0,08 : 1,45 : 2,55 ; 0,46	2.361	1,3	398
1 : 5	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,94 : 3,06 ; 0,52	2.369	1,9	363
	M	metacaulim (8%)	0,92 : 0,08 : 1,94 : 3,06 ; 0,58	2.341	1,9	327

Os ensaios para verificação de durabilidade, principalmente com relação à penetração de íons cloreto, com seus respectivos regulamentos normativos e as idades dos ensaios, constam da Tabela 2.

**Tabela 2** – Ensaios realizados e respectivas idades.

Propriedades	Método de ensaio	Idade (dias)
Resistência à penetração de íons cloreto	ASTM C 1202 / 94	28, 63 e 91
Absorção de água por imersão e índice de vazios	ASTM C 642 / 97	28, 63 e 91
Resistividade elétrica do concreto	ASTM G 57 / 92	28, 63 e 91

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Resistência à penetração de íons cloreto

No presente estudo, a determinação da resistência à penetração de íons cloreto foi feita seguindo o procedimento de ensaio do método ASTM C1202, a 28, 63 e 91 dias de idade.

Os corpos-de-prova foram lacrados entre câmaras, ou células, sendo uma com cloretos (Cl<sup>-</sup>) e outra sem cloretos. A seguir foi gerada uma diferença de potencial entre as células o que criou uma corrente que induziu o ânion cloreto a se difundir no concreto através de um campo elétrico. Foram registrados o tempo e a corrente, e, através do produto desses dois valores chegou-se às quantidades equivalentes de íons ou massa de ânions que atravessaram o

concreto no período de tempo determinado pela Norma. Esse resultado é expresso em Coulombs e está apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3** Resistência à penetração de cloretos, “slump” de 80 mm, a 28, 63 e 91 dias.

Traço	28 dias		63 dias		91 dias	
	carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos	carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos	carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos
1 : 3 R	2072	moderada	1860	moderada	1304	Alta
1 : 3 M	764	muito alta	809	muito alta	632	muito alta
1 : 4 R	2163	moderada	1897	Alta	1522	Alta
1 : 4 M	943	muito alta	721	muito alta	705	muito alta
1 : 5 R	2282	moderada	2073	Alta	1796	Alta
1 : 5 M	998	muito alta	865	muito alta	736	muito alta

### 3.2 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica nos concretos foi determinada pelo método dos quatro eletrodos, segundo a ASTM G-57, a 28, 63 e 91 dias de idade. Os resultados constam da Tabela 4.

**Tabela 4** Resistividade elétrica / iônica, para “slump” 80 mm

traço	resistividade 28 dias (kΩ.cm)	resistividade 63 dias (kΩ.cm)	resistividade 91 dias (kΩ.cm)
1 : 3 R	30,7	36,5	37,7
1 : 3 M	72,4	92,4	136,8
1 : 4 R	30,5	34,8	34,3
1 : 4 M	71,3	76,7	81,3
1 : 5 R	26,7	31,5	44,7
1 : 5 M	62,2	71,2	74,5

### 3.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

A determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foi realizada seguindo o procedimento de ensaio da método ASTM C 642, a 28 dias de idade. Os resultados constam da Tabela 5.

**Tabela 5** Absorção de água, massa específica e índice de vazios, “slump” de 80 mm

traço	absorção de água (%)	massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	índice de vazios (%)	classificação do concreto
1 : 3 R	5,1	2414	12,5	normal
1 : 3 M	4,0	2420	9,6	durável
1 : 4 R	5,7	2410	13,7	normal
1 : 4 M	4,4	2407	10,5	durável
1 : 5 R	6,1	2408	14,5	deficiente
1 : 5 M	5,2	2400	12,2	normal

## **4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 Resistência à penetração de íons cloreto**

Observou-se que para determinadas faixas, em Coulombs, o concreto está mais ou menos sujeito à corrosão. Segundo a ASTM C 1202, na faixa de 100 a 1000 Coulombs encontram-se os concretos com muito alta resistência à penetração de cloretos, isto é, concretos com baixíssima probabilidade de ocorrer corrosão. Na faixa entre 1000 a 2000 estão os concretos com alta resistência à penetração de cloretos e entre 2000 a 4000 estão os concretos com moderada resistência à penetração de cloretos. Acima desse valor são concretos de baixa resistência à penetração de cloretos.

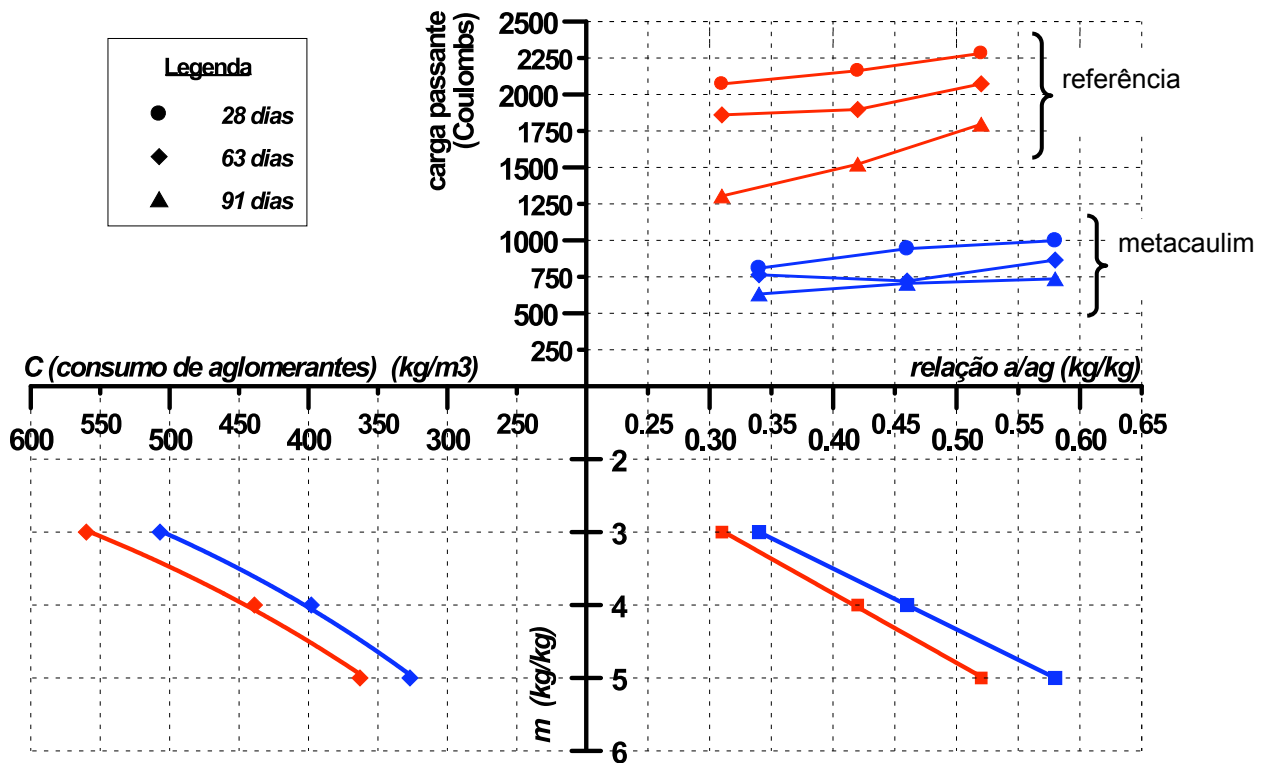
Com os dados da Tabela 3 pode-se construir o diagrama de dosagem para a resistência à penetração de íons cloreto que consta da Figura 1. Através desse diagrama pode-se fazer as observações que seguem:

a) Em todas as idades estudadas os concretos com substituição de 8% de cimento por metacaulim estiveram em patamares de carga passante abaixo de 1000 Coulombs sendo, portanto, considerados de muito alta resistência à penetração de íons cloreto conforme sugerido pela ASTM C 1202 e apresentado acima.

b) Os concretos de referência, sem adição, apresentaram-se inicialmente, aos 28 dias, numa região considerada de moderada resistência à penetração de íons cloreto, independentemente da relação água/aglomerantes estudada. Somente após os 63 dias é que os concretos de referência puderam ser considerados de alta resistência à penetração de íons cloreto.

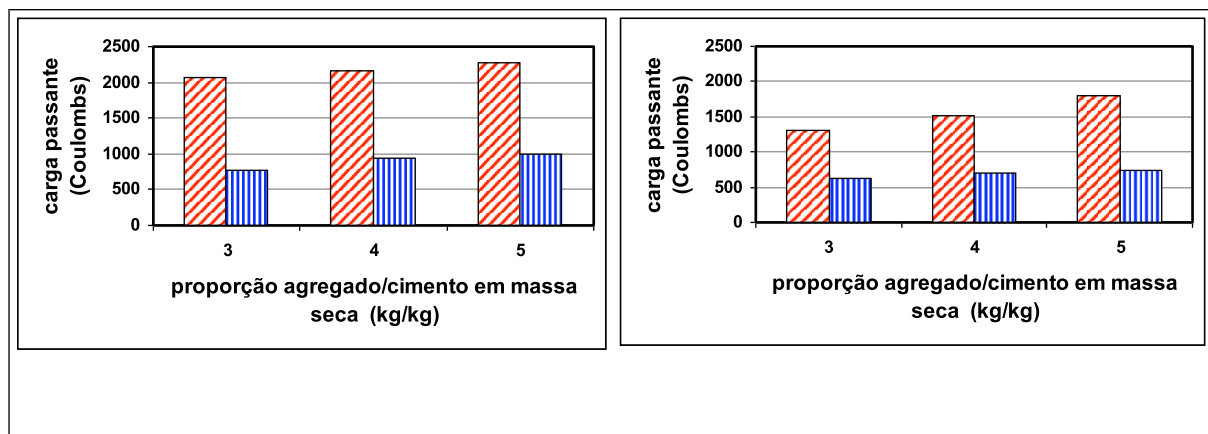
c) Para uma mesma relação cimento/agregados em massa de materiais secos os concretos com metacaulim apresentaram uma maior relação água/aglomerantes e mesmo assim o comportamento frente à penetração de íons cloreto foi melhor que o concreto de referência.

d) Também é de se observar que os concretos com substituição de cimento por metacaulim apresentaram um consumo de aglomerantes menor.



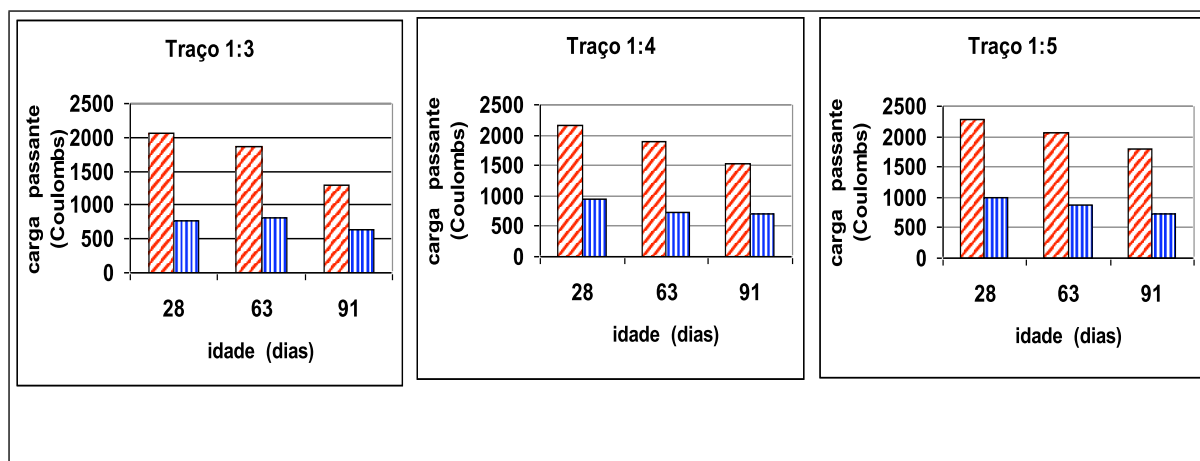
**Figura 1** Diagrama de dosagem, com resistência à penetração de íons cloreto, dos concretos com substituição de cimento por metacaulim e de referência (sem adição).

Ainda com os resultados da Tabela 3 foi construída a Figura 2 que mostra claramente a influência positiva da adição de metacaulim no aumento da resistência à penetração de cloretos nos concretos de cimento Portland.



**Figura 2** Resistência à penetração de cloretos a 28 e 91 dias de idade.

Observa-se na Figura 2 que, com o tempo, de 28 para 91 dias, ocorreu uma redução na carga passante, em Coulombs, em todos os traços de concreto estudados. Isto se deve, de um modo geral, à continuidade das reações internas de hidratação. No caso específico dos concretos com metacaulim o fato é ainda potencializado porque à medida que ocorre hidratação do cimento ocorre liberação de hidróxido de cálcio que reage com metacaulim formando um novo composto aglomerante, que fecha os poros do concreto e, conseqüentemente, impede, ainda mais, a passagem dos íons cloreto.



**Figura 3** Evolução da resistência à penetração de cloretos, para os diferentes traços.

Na Figura 3 apresenta-se a evolução da resistência à penetração de cloretos com a idade para os diferentes traços, podendo-se observar novamente a ação positiva da adição de metacaulim.

Assim sendo, os concretos com metacaulim podem ser considerados duráveis e recomendáveis para aplicações em ambientes agressivos com predominância de cloretos. No entanto os concretos de referência (R), dosados com os mesmos materiais porém sem a adição de metacaulim, apresentaram resistências menores à penetração de cloretos desaconselhando-os para ambientes com cloretos.

#### 4.2 Resistividade elétrica

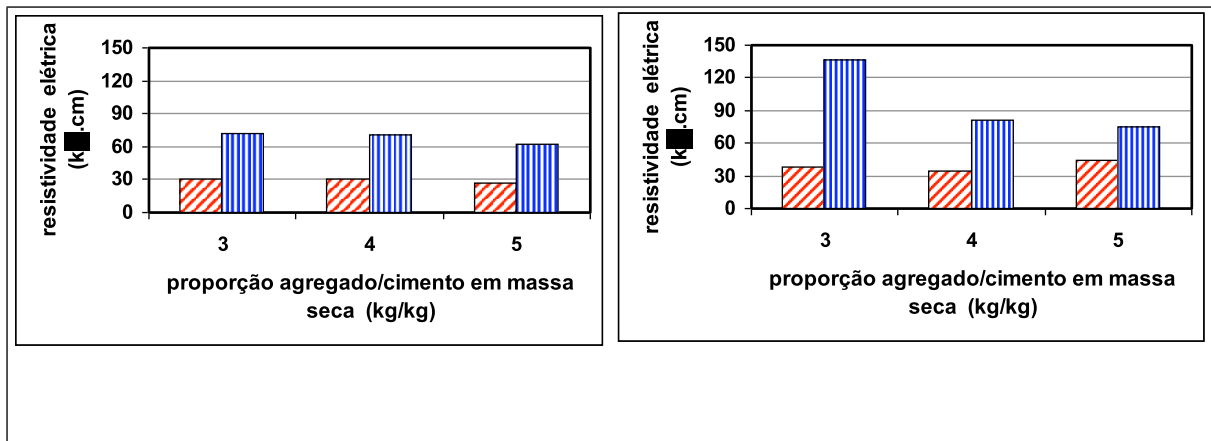
A resistividade elétrica controla o fluxo de íons que se difundem no concreto através da solução aquosa presente nos poros. A sua medida é um parâmetro fundamental e decisivo no controle da velocidade da reação e pode ser efetuada através da adaptação do método “ASTM G 57 Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method”.

Condutividade é o inverso de resistividade. Assim, quanto maior a condutividade, menor a resistividade, e maior o risco de corrosão. Inversamente, quanto menor a condutividade, maior a resistividade, e menor o risco de corrosão. Quanto maior a umidade menor a resistividade elétrica, portanto, maior o risco de corrosão.

O *fib* (CEB-FIP), no seu Boletim de Informação n. 192, de 1989, estabelece que para valores de resistividade superiores a 60 kΩ.cm a taxa de corrosão esperada pode ser considerada desprezível.

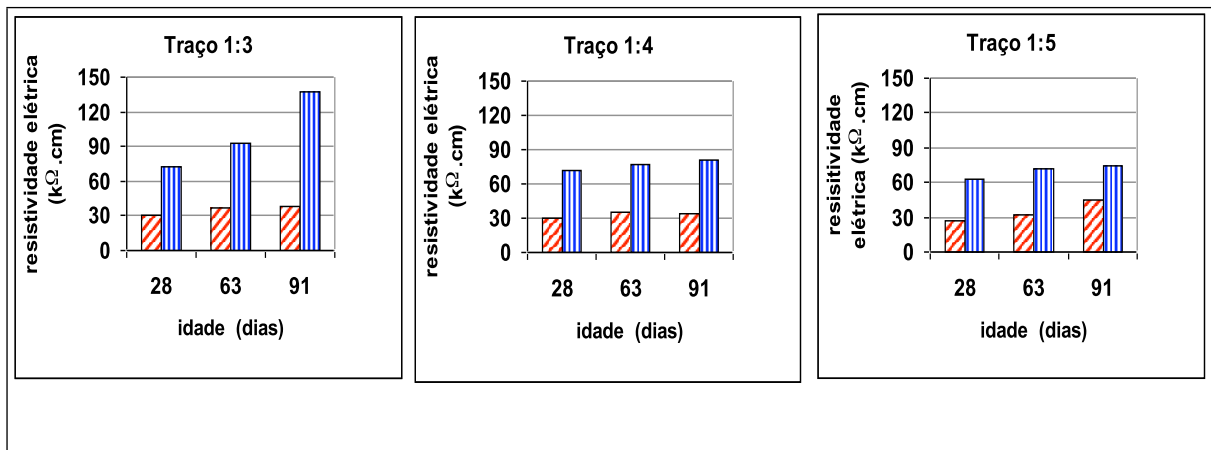
Observando os resultados apresentados na Tabela 4 nota-se que todos os concretos com adições de metacaulim atendem o requisito de resistividade alta e portanto são protetores das armaduras quando estas estão em ambientes agressivos. Portanto, também sob esse aspecto, podem ser considerados concretos duráveis, enquanto os concretos sem adição de metacaulim não podem ser considerados duráveis do ponto de vista de sua resistividade elétrica (iônica).

Com os resultados da Tabela 4 foi construída a Figura 4 que mostra claramente a influência positiva da adição de metacaulim no aumento da resistividade elétrica / iônica dos concretos de cimento Portland.



**Figura 4** Resistividade elétrica / iônica dos concretos a 28 e 91 dias de idade.

Na Figura 5 apresenta-se a evolução da resistividade elétrica / iônica com a idade para os diferentes traços, podendo-se observar novamente a ação positiva da adição de metacaulim com o aumento da resistividade elétrica/iônica com o tempo.



**Figura 5** Evolução da resistência elétrica / iônica do concreto com a idade para os diferentes traços.

#### 4.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

Trata-se de ensaio complementar que fornece informações sobre a qualidade do concreto. É uma forte medida indireta da resistência do concreto à penetração de agentes agressivos em situações submersas ou permanentemente saturadas e úmidas.

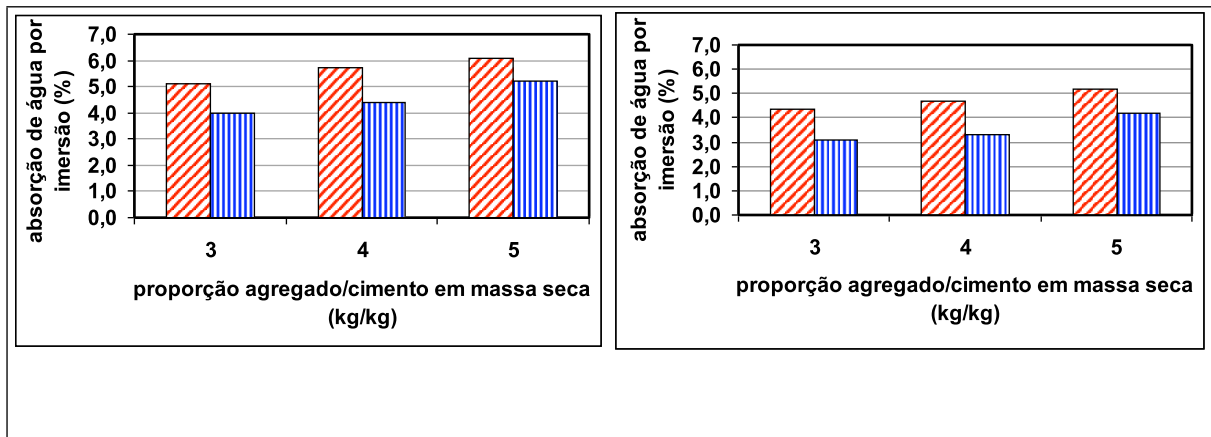
Do ponto de vista da massa específica obtida nos concretos endurecidos e segundo o método ASTM C 642, os concretos podem ser ditos equivalentes uma vez que a média entre eles é de 2.404 kg/m<sup>3</sup> e a diferença percentual entre o valor de cada traço e a média não ultrapassa 1%.

Os valores obtidos de absorção de água, assim como os de índice de vazios, conforme explicitado na Tabela 5, colocam parte dos concretos em estudo numa condição de duráveis e outra na condição de normais. Podem ser considerados concretos duráveis aqueles que apresentem absorção de água inferior a 4,5%, assim como índice de vazios nestas condições de ensaio, inferior a 11%. Os demais podem ser considerados concretos normais não adequados a ambientes agressivos e úmidos.

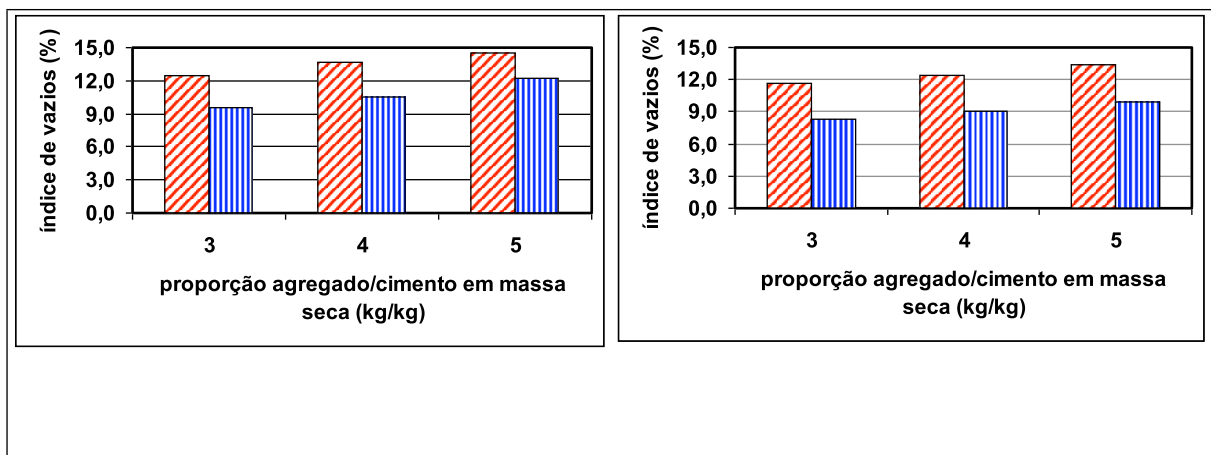


Observa-se claramente que os concretos com adições de metacaulim atendem aos critérios de duráveis enquanto os concretos sem adições apresentam absorção de água bem superior e menor vida útil em ambientes agressivos e úmidos.

Com os resultados da Tabela 5 foram construídas as Figuras 6 e 7 onde se observa a influência positiva da adição de metacaulim na redução da absorção de água por imersão e no índice de vazios, respectivamente, dos concretos de cimento Portland.

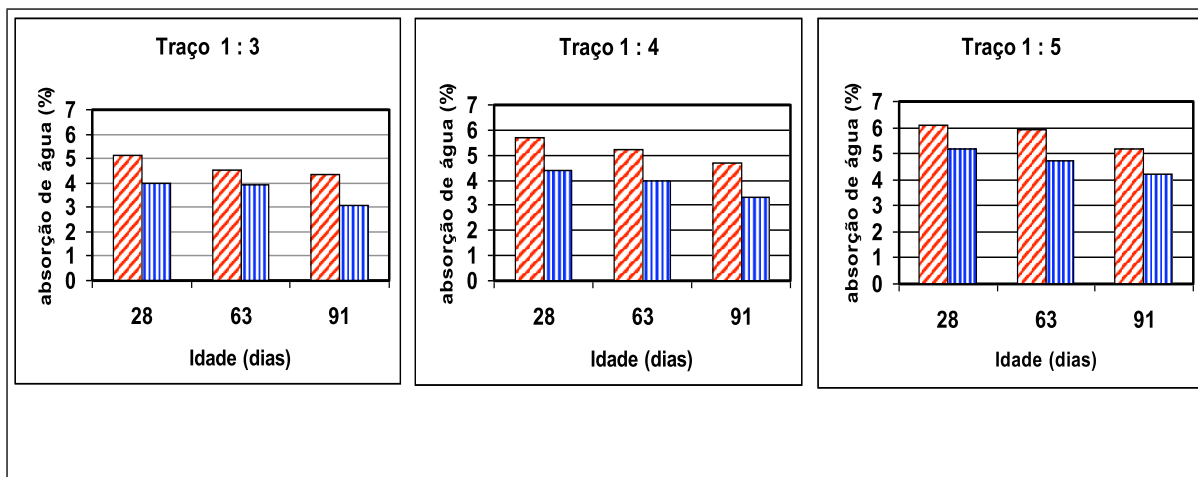


**Figura 6** Absorção de água por imersão a 28 e 91 dias de idade.



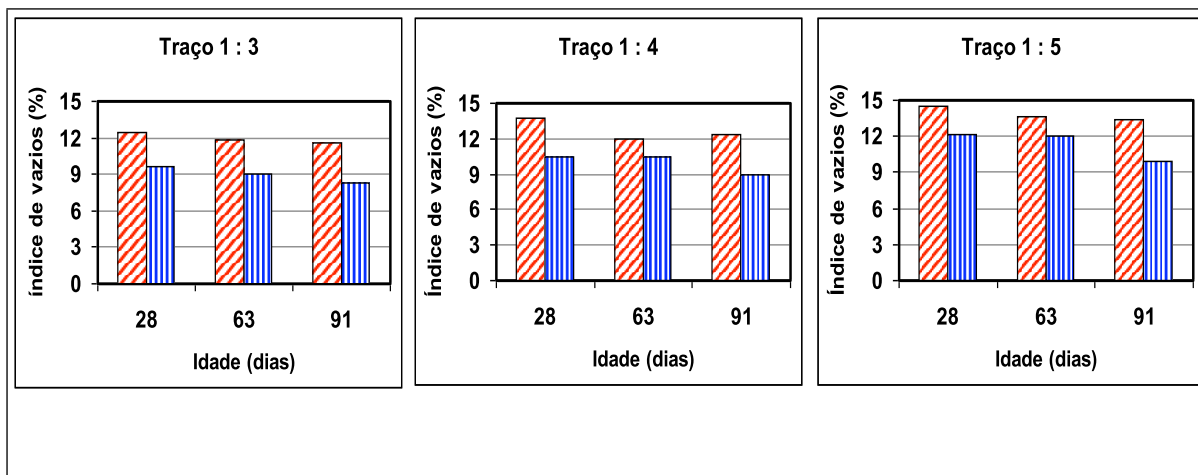
**Figura 7** Índice de vazios a 28 e 91 dias de idade.

Na Figura 8 apresenta-se a evolução da absorção de água por imersão.



**Figura 8** Evolução da absorção de água por imersão com a idade para os diferentes traços.

Na Figura 9 apresenta-se a evolução do índice de vazios, com a idade para os diferentes traços, podendo-se observar novamente a ação positiva da adição de metacaulim.



**Figura 9** Evolução do índice de vazios com a idade para os diferentes traços.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios onde se observou que os concretos com metacaulim apresentaram, em todas as idades pesquisadas, isto é, 28, 63 e 91 dias, muito alta resistência à penetração de íons cloreto. Observou-se, também, que nas demais propriedades pesquisadas, isto é, absorção de água, índice de vazios e resistividade elétrica, os concretos com metacaulim apresentaram melhores resultados em direção a uma maior durabilidade dos concretos principalmente pela redução de sua permeabilidade que vai reduzir a penetração de agentes agressivos de uma forma geral. Assim sendo, os concretos com metacaulim podem ser considerados duráveis e bastante recomendados para obras onde se faz presente o ataque de agentes agressivos caracterizados por íons cloretos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Freyermuth, C.L. **Life-Cycle Cost Analysis** Concrete International, ACI, v. 23, n. 2, Feb. 2001. p.89-95.
2. Mehta, P.K. **Reducing the Environmental Impact of Concrete** Concrete International. ACI, v.23, n. 10, Oct. 2001. p.61-66.
3. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. Editora PINI, São Paulo, 2000.
4. Helene, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado** São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.
5. Guimarães, A.T.C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos** São Paulo, 2000. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.
6. Husni, R.; Benítez, A.; Manzelli, A. ;et al **Acciones sobre las estructuras de hormigón** In: MANUAL DE REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN - REPARACIÓN, REFUERZO Y PROTECCIÓN. CYTED-Rehabilitar Editores: Paulo Helene y Fernanda Pereira, 2003.
7. Andrade, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras** Editora PINI, São Paulo, 2002.
8. Neville, A.M. **Propriedades do concreto** Editora PINI, 2ª.edição, São Paulo, 1997.
9. Khatib, J.M. ; Wild, S. **Pore size distribution of metakaolin paste** Cement and Concrete Research, vol.26, n.10, p.1545-1553, 1996.
10. Boddy, A.; Hooton, R.D.; Gruber, K.A. **Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin** Cement and Concrete Research, vol.31, p.759-765, 2001.
11. Gruber,K.A.; Ramlochan,T.; Boddy,A.; Hooton,R.D.; Thomas,M.D.A. **Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin** Cement and Concrete Composites, vol.23, p.479-484, 2001.
12. Caldarone,M.A.; Gruber,K.A.; Burg, R.G. **High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture** Concrete International, nov/1994.
13. Wild, S; Khatib, J.M. **Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars** *Cement and Concrete Research* 1997, 27 (1), p.137-146.
14. Curcio, F.; DeAngelis, B.A.; Pagliolico, S. **Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars** *Cement and Concrete Research* 1998, 28 (6), p.803-809.
15. Raverdy M., Brivot F., Paillere A.M., Dron R. **Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires** - 7<sup>e</sup>. Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris - 1980, Vol. III, IV, p. 36-41.
16. Helene, P.R.L.; Terzian, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto** PINI / SENAI São Paulo, out/98. (3ª. reimpressão).

