

EFEITOS DE MISTURAS COMPOSTAS DE POZOLANAS E ESCÓRIA NA PERMEABILIDADE A CLORETO

GASTALDINI, Antônio Luiz Guerra (1); ISAIA, Geraldo Cechella (2)

(1) Arquiteto, Doutor em Eng.Civil UFSM - CT/Deptº de Estruturas e Construção Civil
Rua Appel 655, aptº 303, 97015 - 030 Santa Maria - RS

E-mail : gastaldn @ ct.ufsm.br

(2) Eng.Civil, Doutor em Eng.Civil UFSM - CT/Deptº de Estruturas e Construção Civil
Rua das Camélias 175, 97020 - 120 Santa Maria - RS

E-mail : gisaia @ pro.via-rs.com.br

RESUMO

Neste trabalho verificou-se os efeitos da substituição parcial do cimento por pozolanas e escória de alto forno na resistência à compressão e permeabilidade a cloreto do concreto. Para cada mistura aglomerante investigada, relação água/aglomerante adotada, 0,4, 0,5 e 0,6 e idade de ensaio, 28 e 91 dias, avaliou-se a resistência à compressão axial através de corpos de prova de 10 x 20 cm e a permeabilidade a cloreto segundo procedimento proposto pela norma ASTM C 1202. Dos resultados obtidos, analisados em termos de consumo efetivo de cimento, constata-se que as misturas contendo maior porcentagem de adição mineral foram as que apresentaram maiores valores de resistência à compressão. A ação conjugada de pozolanas e escória na permeabilidade a cloreto resultou numa redução na corrente passante de 2,7 a 12,5 vezes em relação a mistura de referência, estando este comportamento subordinado aos efeitos físico-químicos diferenciados das pozolanas utilizadas.

ABSTRACT

In this work the effects of the partial substitution of the cement by pozzolans and slag on the compressive strength and chloride permeability of concrete were verified. For each investigated binder mixture the following relations water/binder were accepted: 0,4, 0,5 and 0,6 at the age, 28 and 91 days. The resistance was evaluated by the axial compression of specimens of 10 x 20 cm and determination of penetration depths of chloride was performed according to the procedure proposed by the ASTM standard C 1202. The obtained results were analyzed in terms of effective consumption of cement. It was verified that the specimens with larger percentage of mineral additions to the mixtures presented higher resistance values to the compression. The conjugated action of pozzolans and slag on the chloride permeability resulted in a reduction in the electrical charge passing by 2,7 to 12,5 times in relation to reference mixture, depending on the different physical-chemical behavior of the used admixtures.

1. INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras tem sido relatado por vários pesquisadores como uma das principais causas de deterioração das estruturas de concreto armado, seja devido à carbonatação, seja devido à ação de íons cloretos.

Assim, o desempenho do concreto está subordinado a difusão de íons e gases no seu interior, que por sua vez relaciona-se à estrutura da pasta. Esta é sensivelmente alterada quando se substitui parte do cimento pelas adições minerais, escórias e pozolanas, uma vez que promovem alterações na estrutura de poros e na composição da solução aquosa (HELENE, 1993), na relação C/S do C-S-H formado (UCHIKAWA, 1986), e também, na capacidade de fixação do íon cloreto (DHIR 1997), reduzindo o teor de cloreto livre responsável pelo dano às estruturas de concreto.

Resultados experimentais tem comprovado a redução na permeabilidade a cloreto em concretos contendo cinza volante (HAQUE, KAYYALI, 1995), cinza de casca de arroz (ISAIA, 1995), sílica ativa (JOHNSTON, 1993) e escória granulada de alto forno (OLLIVIER, 1998).

Este trabalho tem por objetivo verificar os efeitos da substituição parcial do cimento por escórias e pozolanas, cinza volante, cinza de casca de arroz e sílica ativa, atuando conjuntamente, na resistência à compressão axial e permeabilidade a cloreto.

2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais Utilizados

Foi utilizado um cimento portland de alta resistência inicial, cinza volante da Riocel, moída em laboratório por 1 hora, utilizando-se a fração passante na # 0,3mm; cinza de casca de arroz, queimada em forno de olaria, sem controle de temperatura, moída em laboratório por uma hora, utilizando-se a fração menor do que 0,3 mm; sílica ativa do tipo não densificada fornecida por fabricante nacional; escória granulada de alto forno procedente de siderúrgica nacional, moída na finura Blaine de 400 m²/kg. Na tabela 1 são apresentados as características físicas e na tabela 2 as características químicas do cimento e das adições minerais utilizadas.

Empregou-se areia natural com D_{máx} = 4,8 mm, MF = 2,74 e massa específica de 2,63 kg/dm³ e agregado graúdo proveniente de rocha basáltica, lavado, com D_{máx} = 19 mm, MF = 6,93 e massa específica de 2,49 kg/dm³.

2.2 Misturas Utilizadas – Ensaaios

Foram ensaiadas 9 misturas aglomerantes constituídas de cimento portland de alta resistência, cinza volante, cinza de casca de arroz, sílica ativa e escória granulada de alto forno nas proporções apresentadas na tabela 3 para obtenção de misturas binárias e ternárias.

O proporcionamento do concreto foi realizado segundo a metodologia proposta por Helene e Terzian (1993). O teor de argamassa foi mantido constante, 51 % em volume, e a consistência do concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone em 60 ± 15 mm, variando-se a quantidade de aditivo superfluidificante.

Para a avaliação da resistência à compressão axial, moldou-se 3 c.p. cilíndricos de dimensões 10 x 20 cm, em duas camadas, utilizando-se mesa vibratória para adensamento. Após 24 hs foram desmoldados e conservados em câmara úmida à temperatura de 23 ± 2 °C até a data de ensaio, 28 e 91 dias, procedimento este conforme prescrições das NBR 5738 e 5739.

Os ensaios para a determinação da permeabilidade a cloreto foram realizados conforme a norma ASTM C 1202, em corpos de prova cilíndricos de 95 x 51 mm. Para cada uma das 09 misturas investigadas e relação água/aglomerante adotada, 0,4, 0,5 e 0,6, foram ensaiados dois exemplares nas idades de 28 e 91 dias, adotando-se a média como valor representativo, desde que satisfeitas as prescrições de norma quanto a diferença nestes resultados.

Tabela 1. Propriedades físicas do cimento e das adições minerais (%).

	Resíduo # 0,075 mm	Resíduo # 0,045 mm	Massa Específica (g/cm ³)	Área Específica Blaine (m ² /Kg)	Resistência à Compressão Axial (MPa)
Cimento	0,84	1,32	3,10	457	$f_{c1} = 18,1$
Escória	1,05	2,10	2,90	400	$f_{c3} = 36,0$
C.V.	0,90	2,07	2,20	416	$f_{c7} = 39,0$
C.C.A	0,52	0,64	1,93	1715	$f_{c28} = 50,9$
S.A.	nd	0,6	2,17	2590	

Tabela 2. Componentes químicos do cimento e das adições minerais (%).

	P. F.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R. I.	Na ₂ O eq.
Cimento	3,20	19,24	4,52	3,20	62,43	1,56	3,53	0,04	0,60	0,69	0,43
Escória	0	34,07	12,94	0,55	41,05	8,28	0	0,16	0,55	-	0,52
C.V.	0,91	63,28	24,44	4,07	2,67	0,96	0,26	0,17	1,40	-	1,09
C.C.A	11,57	82,78	0,72	0,74	1,00	0,60	0,04	0,10	1,55	-	1,12
S.A.	2,25	95,14	0,07	0,27	0,44	0,44	0,10	0,18	1,20	-	0,97

Nota : C.V. =Cinza Volante C.C.A = Cinza de Casca de Arroz S.A. = Sílica Ativa

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Ao se substituir parte do cimento pelas adições minerais, observa-se uma alteração nos valores de resistência à compressão em relação a mistura de referência, em função do tipo, da reatividade e da finura desta, tabela 4.

Nas misturas ternárias, em igualdade de relação água/aglomerante, os maiores valores foram obtidos para aquelas contendo sílica ativa, seguidas das com cinza de casca de

arroz e cinza volante. Todavia, sempre inferiores ao concreto de referência.

Tabela 3. Quantidade de materiais empregados.

Série	A/Agl	C kg/m ³	E ₄₀₀ kg/m ³	S.A. kg/m ³	C.V. kg/m ³	C.C.A. kg/m ³	Ag. Miúdo	Aditivo dm ³ /m ³
REF	0,4	448					725	6,2
	0,5	347					824	4,5
	0,6	284					889	2,8
M4E 50	0,4	224	224				711	0,9
	0,5	174	174				813	-
	0,6	142	142				880	-
M4E 70	0,4	224					711	1,8
	0,5	174					813	-
	0,6	142					880	-
M4EA32	0,4	224	134			90	670	6,7
	0,5	174	104			69	782	2,1
	0,6	141	85			56	848	1,1
M4EM32	0,4	224	134	90			684	9
	0,5	174	104	69			793	5,2
	0,6	141	85	56			862	3,6
M4EV32	0,4	224	134		90		685	3,4
	0,5	174	104		69		793	0,7
	0,6	141	85		56		864	0,5
M4EA52	0,4	134	224			90	664	8,1
	0,5	104	174			69	778	3,5
	0,6	85	142			56	850	2,0
M4EM52	0,4	134	224	90			678	13,4
	0,5	104	174	69			788	6,9
	0,6	85	142	56			858	3,1
M4EV52	0,4	134	224		90		680	1,3
	0,5	104	174		69		790	-
	0,6	85	142		56		888	-

NOTA: Quantidade de agregado graúdo 998 kg/m³. Abatimento do Concreto 65±10mm

Entretanto, analisando-se em termos de consumo efetivo de cimento, as misturas contendo maior porcentagem de adição mineral foram as que apresentaram maiores valores de resistência à compressão. Assim, considerando a resistência unitária a relação entre a resistência do concreto com adição mineral dividida pelo seu consumo de cimento, e a resistência do concreto de referência pelo seu correspondente consumo de cimento, e o índice médio de resistência unitária correspondendo à média de resistência destes índices para as relações água/aglomerante 0,4 , 0,5 e 0,6, tabela 4, verifica-se que todas as misturas aglomerantes apresentaram valores de resistência unitária mais elevados que os da série de referência. Aos 28 dias os acréscimos variaram de 34 a 201% e aos 91 dias de 47 a 225%. Os maiores acréscimos foram observados nas misturas ternárias de maior porcentagem de adição mineral, M4EM52, M4EA52 e M4EV52.

Comportamento semelhante constata-se nas misturas binárias ME45 e ME47, onde o aumento no teor de escória, 50 para 70%, resulta em maiores valores de resistência unitária.

3.2 PERMEABILIDADE A CLORETO

Na tabela 4 são apresentados os resultados de permeabilidade a cloreto, total e unitária, das misturas investigadas. A penetração unitária corresponde a relação entre a permeabilidade a cloreto do concreto de referência, pelo seu correspondente consumo de cimento. O índice médio de resistência unitária corresponde à relação entre a média destes índices, para as relações água/aglomerantes 0,4 , 0,5 e 0,6, de uma mistura com adição mineral e o concreto de referência

Destes resultados, constata-se que o aumento da relação água/aglomerante resulta num aumento da corrente passante para todas as misturas investigadas. Assim como, com o aumento do grau de hidratação, de 28 para 91 dias, ocorre uma diminuição nos níveis de corrente passante, figura 1a.

Confrontando-se os resultados obtidos com aqueles constantes na norma ASTM C 1202, que classifica os concretos a partir dos resultados de carga passante, em Coulombs, observa-se que com exceção da mistura de referência, cujos valores se enquadram como de moderada permeabilidade a cloreto, as demais misturas com adições minerais, mesmo aos 28 dias, apresentaram valores que se classificam como de baixa a muito baixa permeabilidade a cloreto.

Das misturas ternárias com 50 a 70% de adição mineral, aquelas contendo 20% de cinza volante, embora tenham apresentado os menores valores de resistência à compressão, quando comparadas com a série de referência, ainda assim apresentaram valor médio de penetração de cloreto igual a 0,32 (M4EV52) e 0,37 (M4EV32), ou seja, 3,1 e 2,7 vezes menos carga passante aos 91 dias de idade. A sílica ativa e a cinza de casca de arroz, nesta ordem, foram mais efetivas na diminuição da permeabilidade a cloreto.

Da figura 1b que correlaciona a carga passante com a resistência à compressão, observa-se claramente que para a mistura de referência ocorre uma queda da corrente passante com o aumento da resistência. Entretanto, para as misturas contendo 50 e 70% de adições minerais, isto não se observa, mostrando que há maior preponderância do tipo e/ou quantidade de adição mineral sobre a redução da corrente elétrica do que sobre o aumento da resistência à compressão, conforme já havia sido apontado por Isaia [1995]. Dessa forma, das misturas investigadas verifica-se que para uma mesma carga passante, diferentes valores de relação água/aglomerante são obtidos e, conseqüentemente, distintos valores de resistência à compressão. Assim, o nível de resistência à compressão por si só não assegura a durabilidade do concreto exposto a íons cloreto e não deve ser o único parâmetro a ser analisado quando da especificação das características do concreto.

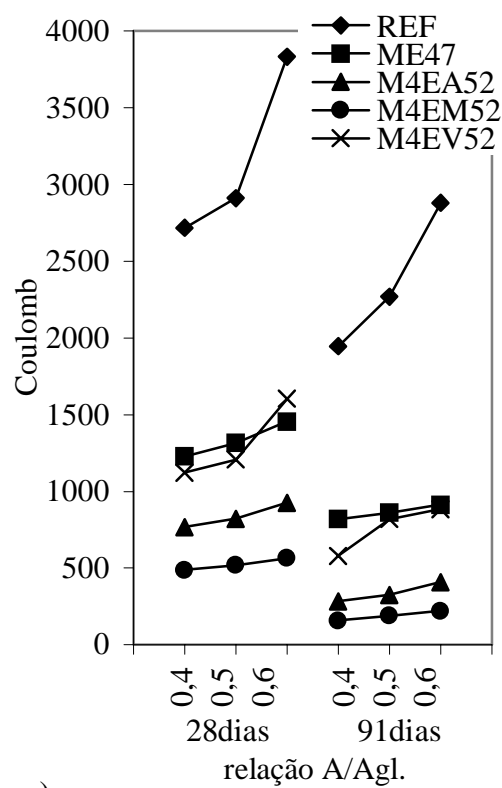
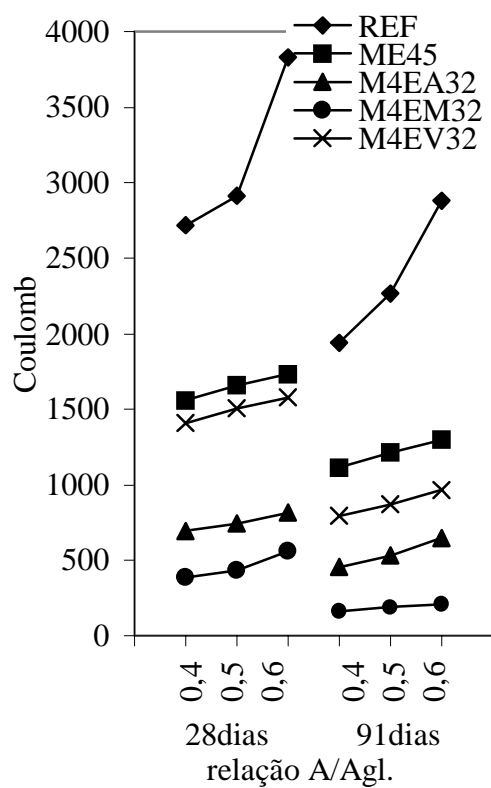
Tabela 4 - Resistência à compressão, resistência unitária Icu, penetração total e média – Ic med.,cl de cloreto aos 28 e 91 dias.

Série	A/ AG	fc28 MPa	fc91 MPa	CP kg/m ³	Fcu 28 MPa/ kg	fcu91 MPa/ kg	Icu28	Icu91	C 28 Coul	C 91 Coul	I _{C28} méd.	I _{C91} méd.
MARI	0,4	62,3	72	448	0,139	0,16	1	1	2717	1943	1	1
	0,5	50,6	63,5	347	0,146	0,18			2912	2267		
	0,6	38,8	45,8	284	0,137	0,16			3832	2880		
ME45	0,4	43,3	52,1	224	0,193	0,23	1,49	1,47	1560	1117	0,53	0,52
	0,5	37	42,4	174	0,213	0,24			1659	1215		
	0,6	31,2	37,5	142	0,220	0,26			1735	1298		
ME47	0,4	39,3	48,9	134	0,292	0,36	2,15	2,26	1229	819	0,43	0,37
	0,5	30,6	38,1	104	0,294	0,37			1316	858		
	0,6	27,1	35,2	85,2	0,318	0,41			1453	911		
M4EA32	0,4	49,8	61,1	224	0,222	0,27	1,59	1,70	695	456	0,24	0,23
	0,5	37,7	48,1	174	0,217	0,28			744	532		
	0,6	32,9	43,8	142	0,232	0,31			816	648		
M4EM32	0,4	57,7	66,8	224	0,258	0,3	1,85	1,87	390	161	0,15	0,08
	0,5	45	55	174	0,259	0,32			436	191		
	0,6	37,5	46,7	142	0,264	0,33			562	210		
M4EV32	0,4	40,5	52,4	224	0,181	0,23	1,34	1,50	1409	796	0,52	0,37
	0,5	36,2	44,2	174	0,209	0,25			1506	871		
	0,6	25	38,5	142	0,176	0,27			1577	967		
M4EA52	0,4	40	58,7	134	0,298	0,44	2,24	2,78	764	283	0,27	0,14
	0,5	36	52,5	104	0,346	0,5			820	324		
	0,6	25,7	39,5	85,2	0,302	0,46			924	408		
M4EM52	0,4	53	70,7	134	0,394	0,53	3,01	3,25	488	158	0,17	0,08
	0,5	48,2	61,9	104	0,463	0,59			520	188		
	0,6	34,9	44,2	85,2	0,410	0,52			564	219		
M4EV52	0,4	38,2	44,2	134	0,284	0,33	2,14	2,30	1120	576	0,41	0,32
	0,5	32	41,7	104	0,307	0,4			1208	818		
	0,6	26,5	36,7	85,2	0,311	0,43			1602	882		

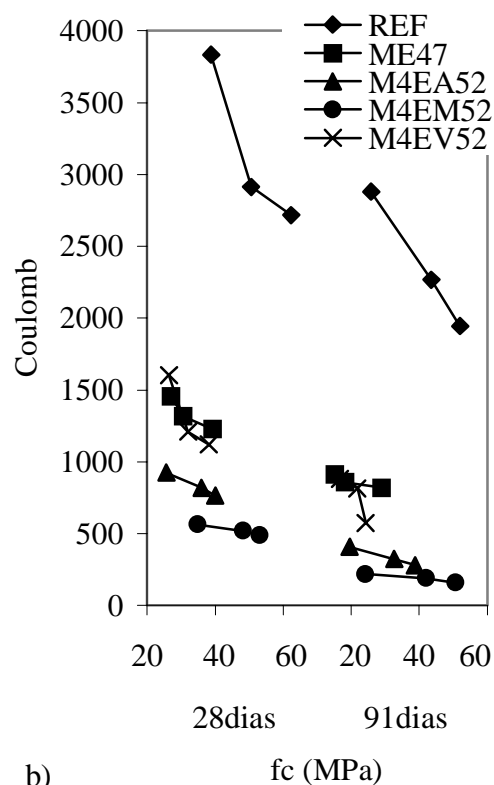
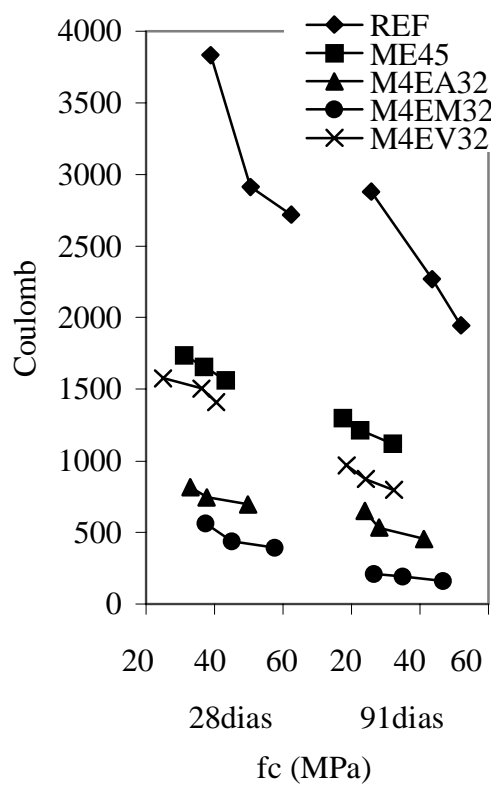
4. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos constata-se modificações no comportamento mecânico e na permeabilidade a cloreto do concreto, quando se substitui parte do cimento por escórias e pozolanas.

Em igualdade de relação água/aglomerante, a substituição parcial do cimento pelas adições minerais resulta numa diminuição dos valores de resistência à compressão. Entretanto, analisando-se pelo consumo de cimento equivalente o aumento no teor de adições resulta em maiores valores de resistência à compressão.



a)



b)

Figura 1. Penetração de cloretos aos 28 e 91 dias das misturas aglomerantes investigadas, de acordo com ASTM C 1202.

Para uma dada idade consegue-se obter níveis semelhantes de resistência à compressão axial a partir de diferentes composições de misturas cimentícias e distintas relações água/aglomerante. Entretanto, a permeabilidade a cloreto dessas misturas são diferentes.

Isso se deve às características físico-químicas e mineralógicas de cada adição mineral, sendo a sua influência mais significativa na carga passante do que na resistência à compressão. Assim, a especificação de um nível de resistência a compressão por si só não assegura a durabilidade de uma estrutura de concreto frente a cloretos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- UCHIKAWA, h. Effect of blending components on hydration and structure formation. In: **International Congress on the Chemistry of Cements, 8th**, Rio de Janeiro, 1986. Proceedings, 1986,v.1,p.249-280
- DHIR, R. K. et al. **Developing Chloride Resisting Concrete Using PFA. Cement and Concrete Research**, v.27,p.1633-1639, 1997.
- ISAIA, G. C. Efeitos de Misturas Binárias e Ternárias de Pozolanas em Concreto de Elevado Desempenho: Um Estudo de Durabilidade Com Vistas à corrosão da Armadura. São Paulo. 1995. **Tese de Doutorado**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P.R.L., TERZIAN,P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. 1 ed. São Paulo: Pini,1992.
- HAQUE, M.N., KAYYALI, O. N. Aspects of chloride ion determination in concrete. **ACI Materials Journal, Michigan**, V.92, n.5, p.532-541, sept/oct.1995.
- JOHNSTON, C.D. Durability of high early strength silica fume concretes subjected to accelerated and normal curing. In: **MALHOTRA,V.M. (ed.) International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, 4th**, Istanbul, 1992. Proceedings. Detroit: American Concrete Institute, 1993, 2v. V.2, p.1167-1188.(SP-132).
- OLLIVIER, J.P. Durability of concrete. São Paulo, EPUSP, 1998. 129 P. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo** – Departamento da Engenharia da Construção Civil,BT, PCC/192

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Construtora Norberto Odebrecht pelo apoio financeiro. A Itabira Agro-Industrial S.A., a Camargo Correa S.A., a Cimento Mauá S.A., a Sika S.A., a Prontomix Tecnologia do Concreto a cedência do material utilizado, e a ABCP pela caracterização dos materiais. Aos acadêmicos José Renato R. Fialho, Leonardo M. dos Santos, Rafael Crespo Muñoz, Tatiana R. Pelizan bolsista de Iniciação científica CNPq e Júlio Emanuel Klafke Sperb bolsista de iniciação científica FAPERGS pelo auxílio na realização dos ensaios. Ao CNPq e a FAPERGS à concessão de bolsas.