

DURABILIDADE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE SÍLICA DA CASCA DE ARROZ OBTIDA EM LEIRO FLUIDIZADO À PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS

Mendes, G. G.¹; Martins, R. P.¹; Soares, E. L.¹; Marangon, E.²; Oliveira, M. J. D.³.

1:Aluno de Graduação, Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa

2:Professor Doutor, Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa

3:Engenheiro Civil, Mestrando em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria.

E-mail: gabrielgmendes@hotmail.com; p.rafael.m@gmail.com;
evertonsoaresemail@gmail.com; ederlimarangon@gmail.com; marcelodoliveira@gmail.com.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto, Sílica de casca de arroz, Cloretos, Durabilidade.

RESUMO. Os íons cloretos são os principais agentes iniciadores de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado, isso se deve a sua capacidade de destruir a película passivadora gerada pelo cimento Portland. O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos da adição de sílica da casca de arroz, obtida por meio de queima em leito fluidizado, na durabilidade de concretos, a base de cimento CII-Z, frente à penetração de íons cloretos. Neste trabalho foram analisadas, além da mistura referência, outras três misturas, nas quais foi substituído o cimento Portland por sílica de casca de arroz, nos teores de 3%, 5% e 10%. Para a avaliação da durabilidade destes concretos a penetração de íons cloretos foram adotados dois métodos; ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, conforme ASTM [1] e o ensaio de penetração de íons cloretos por imersão em solução salina. Também foram realizados ensaios de resistência à compressão axial para análise do comportamento mecânico dos concretos estudados. Os ensaios foram realizados aos 56 dias e aos 91 dias de idade. As amostras provenientes das misturas contendo sílica da casca de arroz apresentaram uma redução da profundidade média da penetração de íons cloretos e da carga passante, sendo que a mistura contendo 5% de sílica foi a que apresentou resultados mais satisfatórios, reduzindo em aproximadamente 25% o valor da carga passante no ensaio acelerado, realizado aos 91 dias. A profundidade de penetração da solução salina nos ensaios de imersão foi de aproximadamente 15% menor para as misturas contendo sílica de casca de arroz em relação à mistura de referência.

INTRODUÇÃO

O aquecimento do setor da construção civil no país acarreta um aumento substancial na demanda do uso de concretos, devido a sua grande importância para o setor. Segundo Helene e Andrade [2] o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade, podendo ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida. O cimento Portland é o principal material constituinte do concreto, porém, seu custo é expressivo e sua produção gera impactos ambientais. Tendo em vista a necessidade da redução do consumo de cimento, tanto do ponto de vista ambiental como econômico, sem que haja perda das propriedades físicas, químicas e de durabilidade que esse oferece ao concreto, estudos vêm utilizando adições minerais ao cimento de diversos rejeitos industriais e agroindustriais com o intuito de manter e até mesmo melhorar as propriedades físico-mecânicas dos concretos. Dentre estas adições minerais pode-se citar a utilização de cinza volante, escória de alto forno e cinza da casca de arroz [3]. Pode-se atribuir, efeitos físicos e químicos as mudanças nas propriedades de produtos cimentícios produzidos com adições minerais. O principal

efeito físico das adições minerais ao concreto é o efeito fíler. É atribuído ao efeito fíler a redução do número de vazios, devido a adição de pequenas partículas, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o das partículas de cimento[4]. Segundo Dal Molin [5] o efeito químico das adições minerais está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , formado durante a hidratação do cimento Portland, para formar os silicatos de cálcio hidratado adicionais (C-S-H). Estes silicatos formados tendem a preencher os vazios capilares, aumentando a resistência da pasta de cimento, na zona de transição, que é a principal fonte de microfissuras nos concretos. A substituição parcial de cimento por sílica da casca de arroz tornou-se uma alternativa interessante para a redução dos custos das estruturas e do impacto ambiental, tanto o gerado na produção do Cimento Portland, quanto o do descarte inadequado da casca do arroz ou da cinza, utilizada na geração de energia. Porém, sua eficiência como material pozolânico está associada ao controle adequado da temperatura de queima do material e o processo de moagem. A sílica de casca de arroz que foi utilizada neste trabalho é proveniente de um processo de moagem controlada e combustão em leito fluidizado, onde existe um controle do gradiente de temperatura, gerando uma sílica amorfa. Marangon et al. [6] estudaram o potencial pozolânico da sílica da casca de arroz utilizada neste trabalho e obtiveram índices de atividade pozolânica superiores aos mínimos prescritos por norma para caracterização como material pozolânico.

MATERIAIS

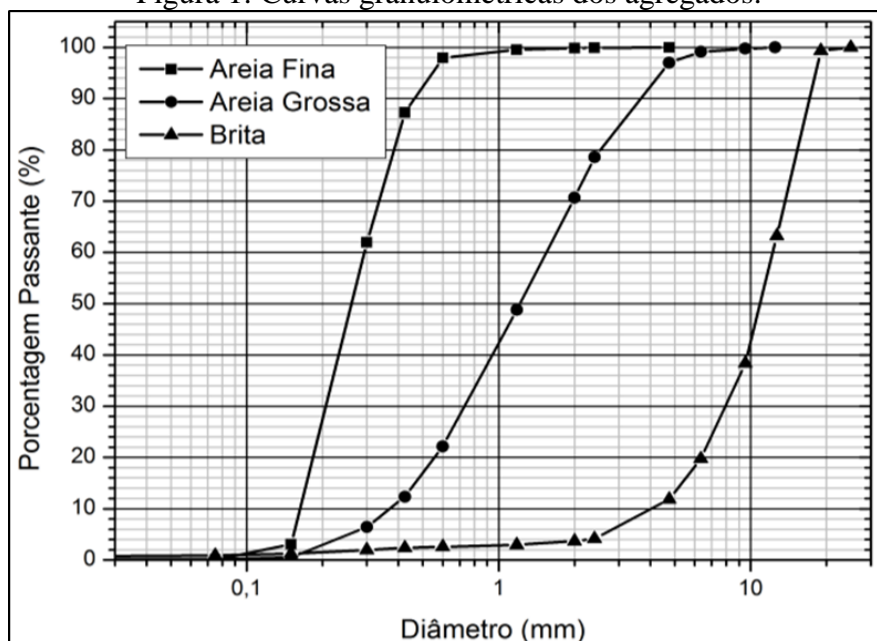
Agregados

O agregado graúdo utilizado neste trabalho é de origem basáltica e é comercializado no município de Alegrete-RS. O agregado miúdo foi obtido no leito do Rio Ibicuí no município de Manoel Viana-RS. Os resultados obtidos na caracterização física dos agregados são apresentados na Tabela 1. Na Figura 1 são mostradas as respectivas curvas granulométricas. Os ensaios seguiram as prescrições descritas na ABNT.

Tabela 1: Características físicas dos agregados.

Ensaio	Areia Fina	Areia Grossa	Brita
Módulo de Finura	1,37	3,47	6,38
Dimensão Máxima Característica (mm)	0,60	4,75	19,00
Massa Específica (kg/dm^3)	2,63	2,62	2,89
Massa Unitária (kg/dm^3)	1,53	1,59	1,45

Figura 1: Curvas granulométricas dos agregados.



Sílica de casca de arroz e cimento Portland

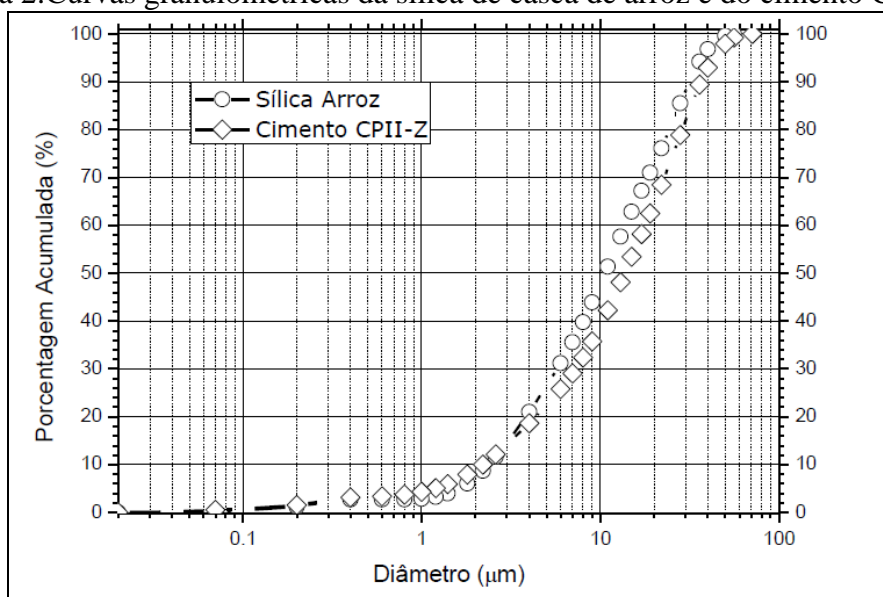
A sílica utilizada é da marca SILCCA NOBRE, comercializada no município de Alegrete-RS pela empresa Pilecco Nobre Alimentos LTDA. A sílica de casca de arroz é obtida através de um processo de controle de combustão por meio de leito fluidizado. Esse processo melhora a eficiência da queima, resultando em uma sílica mais amorfa. O Cimento Portland utilizado é do tipo CPII Z de fabricação da Supremo Cimentos. Esse tipo de cimento foi utilizado, uma vez que é o tipo de cimento Portland brasileiro comercializado na região. A Tabela 2 apresenta as características físico-químicas da sílica de casca de arroz e do cimento Portland.

Tabela 2: Características físico-químicas da sílica de casca de arroz e do cimento Portland.

Sílica de Casca de Arroz		Cimento Portland CP II-Z	
Perda ao fogo	3,50%	Perda ao fogo	5,34%
Dióxido de Silício - SiO ₂	91,48%	Óxido de Magnésio - MgO	5,87%
Óxido de Cálcio - CaO	0,36%	Anidrido Sulfúrico - SO ₃	2,70%
Óxido de Magnésio - MgO	0,32%	Anidrido Carbônico - SO ₃	4,37%
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	0,05%	Resíduo Insolúvel - RI	12,80%
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	0,00%	Equivalente Alcalino em Na ₂ O	0,74%
Óxido de Sódio - Na ₂ O	0,04%	Finura - Peneira 0,075 mm	3,10%
Óxido de Potássio - K ₂ O	1,40%	Água da Pasta de Consistência Normal	26,80%
Óxido de Manganês - MnO	0,32%	Início de Pega (min)	246
Anidrido Sulfúrico - SO ₃	0,15%	Fim de Pega (min)	330
Pentóxido de Difósforo - P ₂ O ₅	0,45%	Expansibilidade de Le Chatelier - a quente (mm)	0,55
Área Específica	21142m ² /kg	Área Específica	374m ² /kg

A Figura 2 mostra a análise granulométrica a laser da sílica de casca de arroz e do cimento CP II-Z.

Figura 2: Curvas granulométricas da sílica de casca de arroz e do cimento CP II-Z.



Aditivo

O aditivo utilizado é do tipo redutor de água – Polifuncional, e tem massa específica igual à 1,18 g/cm³. Este aditivo pode reduzir o consumo de água em até 15%, é produzido pela empresa GRACE com o nome comercial de MIRA 34.

MÉTODOS

Método de dosagem

A dosagem dos concretos foi realizada segundo o método IPT/EPUSP, de Helene e Terzian [7]. O cimento foi substituído, parcialmente, em volume por sílica de casca de arroz. As porcentagens de substituição foram definidas de acordo com as porcentagens utilizadas por concreteiras da região para tornar o trabalho mais fidedigno ao uso do material. A Tabela 3 apresenta as misturas estudadas e o consumo de materiais por m³.

Tabela 3: Misturas produzidas.

Misturas	Consumo de materiais em kg/m ³					
	Cimento	Areia Fina	Areia Grossa	Brita	Sílica de casca de arroz	Água
Ref.	359,28	493,85	404,6	1070,95	-	179,64
3%	348,50	493,85	404,6	1070,95	7,47	179,64
5%	341,32	493,85	404,6	1070,95	12,44	179,64
10%	323,35	493,85	404,6	1070,95	24,89	179,64

Ensaio acelerado de penetração de cloretos

O ensaio foi realizado conforme descrito na ASTM [1], que consiste em acoplar um corpo de prova cilíndrico, de 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura, entre duas células de acrílico. Em uma dessas células contém solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,3N, e na outra contém solução de 3% cloreto de sódio (NaCl). Em uma das células aplica-se uma diferença de potencial de 60V e são realizadas leituras da corrente passante a cada trinta minutos em um intervalo de seis horas, então, é obtida a carga passante através da Equação 1. Posteriormente as amostras são classificadas, qualitativamente, conforme será apresentado na tabela 4.

$$Q = 900 (I_0 + 2 I_{60} + \dots + 2 I_{330} + I_{360}) \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

Q= Carga total passante, em Coulomb(C).

I₀= Corrente logo após a aplicação da diferença de potencial, em Ampères.

I_t= Corrente em “t” minutos depois da aplicação da diferença de potencial, em Ampères.

Tabela 4: Classificação da penetração de íons cloretos com base na carga passante

Carga Total Passante (C)	Penetração De Íons Cloretos
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baixa
100-1000	Muito Baixa
<100	Desprezível

Fonte: ASTM [1]

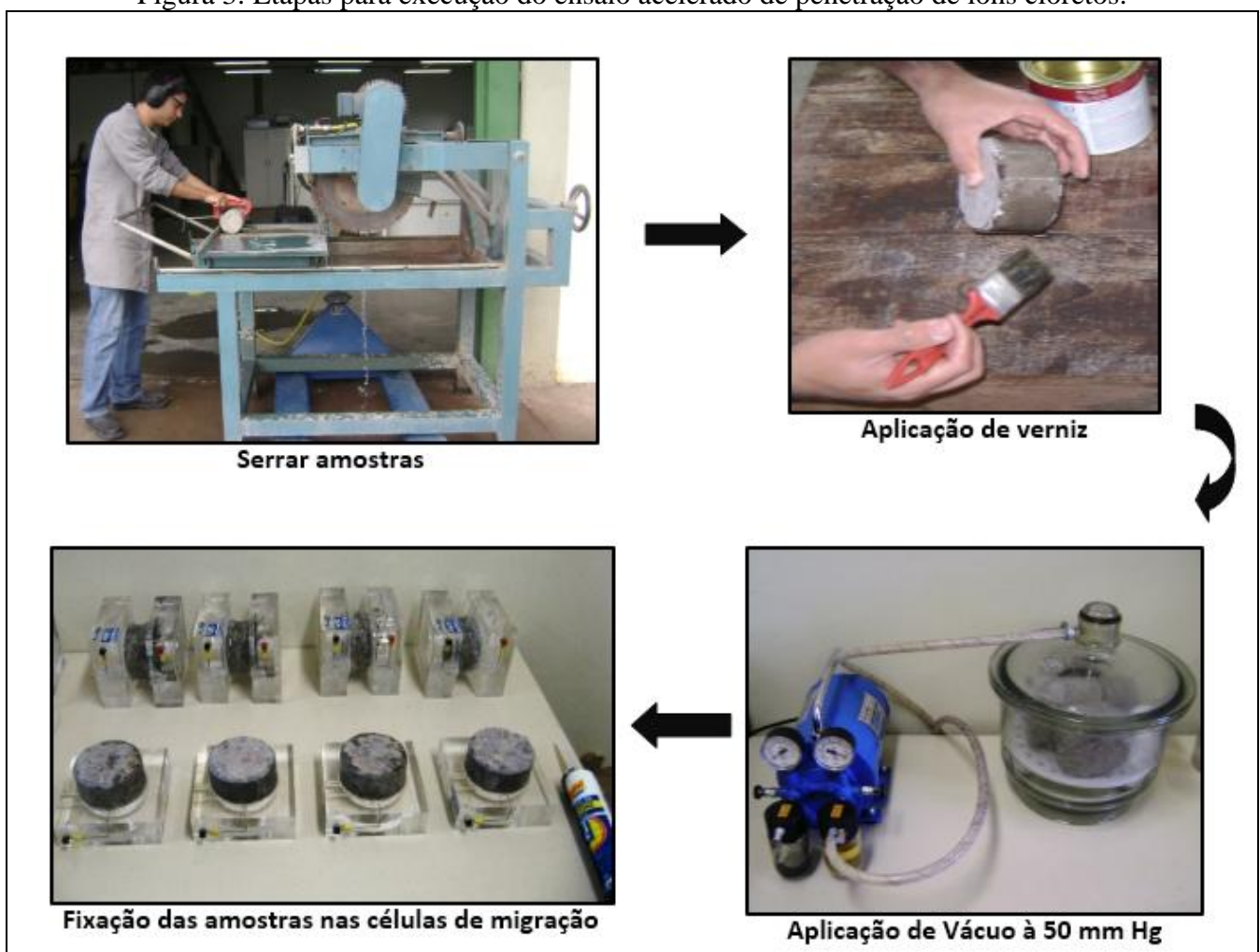
Usualmente é retirada apenas uma fatia do meio de cada corpo de prova moldado. No caso de corpos-de-prova de dimensões 100x200mm são eliminados 75% da amostra. Porém, Medeiros [8] comprovou em seu trabalho que não existe influência significativa nos resultados de penetração de cloretos em ensaios retirando mais de uma fatia da porção central de um único corpo-de-prova de 100x200mm. Sendo assim, neste trabalho optou-se pela retirada de duas fatias centrais de cada corpo-de-prova. Para a determinação da penetração de cloretos por meio do ensaio acelerado, foram moldados 16 corpos de prova com dimensões de 100x200mm, divididos em 4 por mistura, 2 para

ensaio aos 56 dias de idade e 2 aos 91. Após 55 dias de cura por imersão, do centro de cada amostra foram extraídas 2 fatias de 50x100mm, totalizando 4 fatias por mistura. Esses procedimentos foram repetidos aos 90 dias de idade para uma segunda avaliação. Ao completarem 55 e 90 dias de cura imersa, todas as amostras foram submetidas ao pré-condicionamento prescrito na ASTM [1], que consiste em:

- Aplicação e secagem de uma camada de verniz poliuretânico na face curva das amostras;
- Aplicação de vácuo, por 3 horas, a uma pressão de 50 mm Hg;
- Aplicação de vácuo submerso em água deionizada, por 1 hora, a uma pressão de 50 mm Hg;
- Imersão em água deionizada por um período de 18 + ou - 2 horas.

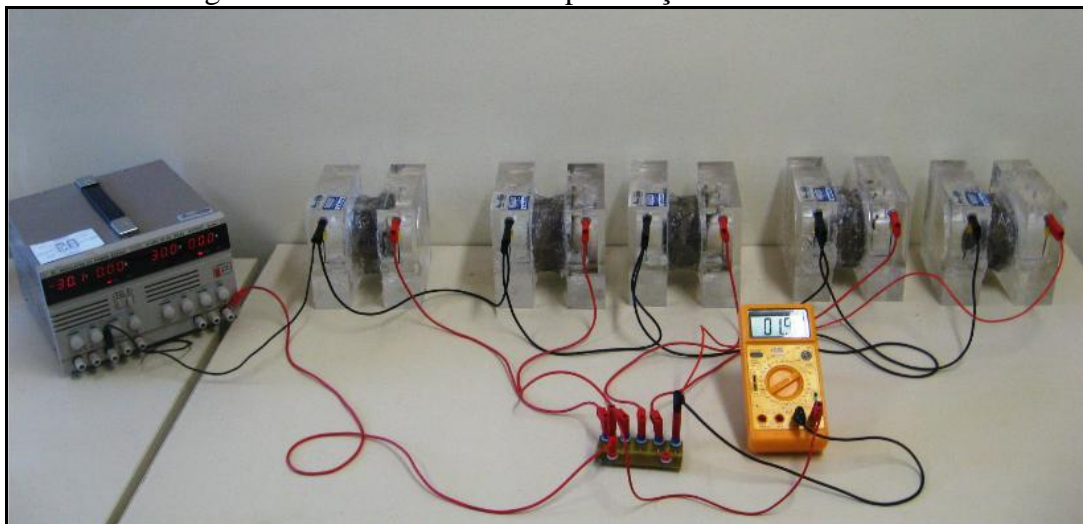
A figura 3 mostra as etapas de preparo e de pré-condicionamento das amostras que foram utilizadas no ensaio acelerado de penetração de íons cloretos desta pesquisa, no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA.

Figura 3: Etapas para execução do ensaio acelerado de penetração de íons cloretos.



A Figura 4 mostra o ensaio acelerado de penetração de íons cloretos em andamento, para obtenção da carga passante.

Figura 4: Ensaio acelerado de penetração de íons cloretos.



Após o ensaio acelerado todas as amostras foram rompidas por compressão diametral. Em seguida, foi aspergido nitrato de prata, que ao entrar em contato com a região que possui cloretos livres adquire coloração clara. A Figura 5 mostra a reação do nitrato de prata com a região atacada por cloretos, tornado possível à medida da profundidade da penetração de íons cloretos.

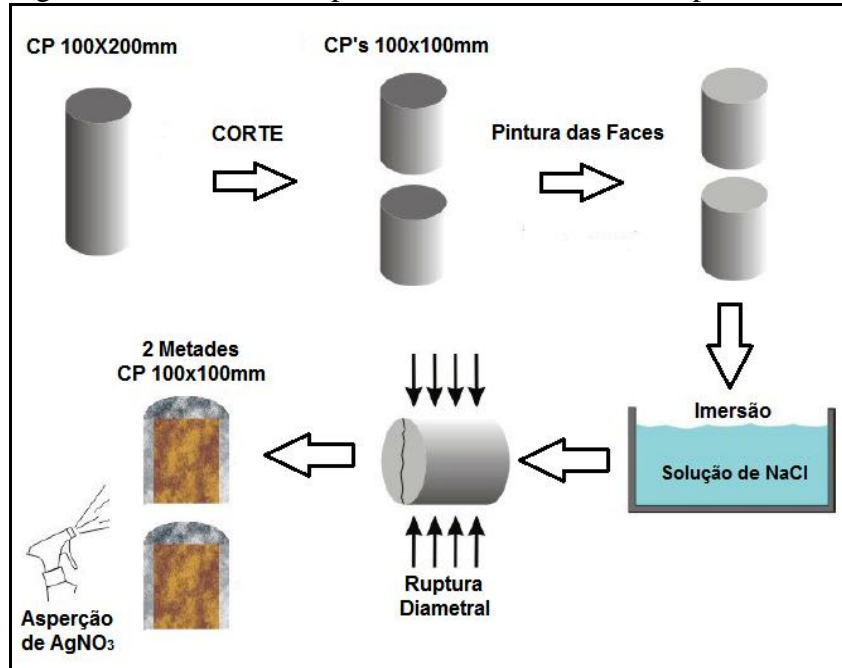
Figura 5: Profundidade da penetração de íons cloretos após ensaio acelerado.



Ensaio de penetração de cloretos por imersão em solução salina

Este ensaio consiste em moldar corpos-de-prova de 100x200mm, que são cortados ao meio com o auxílio de uma serra diamantada obtendo assim amostras de 100x100mm. Estas amostras têm suas duas faces retas impermeabilizadas com verniz poliuretânico, permitindo que a penetração de íons cloretos ocorra apenas na face curva da amostra. Posteriormente são submersas completamente em solução salina de 31,94 g de NaCl por litro de água deionizada, em condições semelhantes a encontradas no mar. Ao serem retiradas do período de imersão, as amostras devem lavadas superficialmente em água corrente e rompidas por compressão diametral. Nessas fatias rompidas diametralmente é aspergido uma solução de nitrato de prata (AgNO_3). Este procedimento faz com que seja gerada duas regiões de coloração bem definidas na amostra. Uma de coloração marrom corresponde à região livre da ação de cloretos e outra esbranquiçada que representa a região que contém cloretos. Essa diferença colorimétrica possibilita a verificação da profundidade da penetração dos íons cloretos por meio de imagens digitais e o auxílio do software *AutoCAD*. A Figura 6 mostra esquematicamente o funcionamento do ensaio de penetração de íons cloretos por imersão em solução salina.

Figura 6: Procedimentos para ensaio de íons cloretos por imersão.



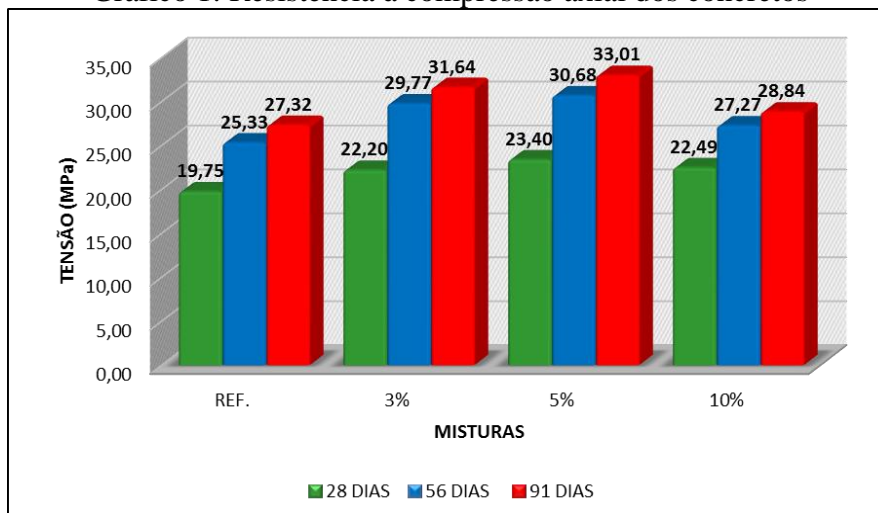
Fonte: SACIOTO [9]

Para verificação da profundidade média da penetração de cloretos, foi realizada a moldagem de 4 corpos-de-prova de 100x200mm, para cada uma das quatro misturas, totalizando 16 corpos-de-prova. Logo após a moldagem os corpos de prova foram submetidos a cura por imersão em água durante 28 dias. Após esse período de cura imersa, estes foram serrados, obtendo-se 32 amostras de 100x100mm. Foram utilizadas 4 amostras por mistura para ensaio aos 28 dias de imersão em solução salina (56 dias de idade). O processo foi repetido após as amostras completarem 56 dias imersos em solução salina (91 dias de idade). Os procedimentos dos ensaios foram de acordo com AASHTO [10]

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores de resistência à compressão foram obtidos por meio de média aritmética de 5 amostras, sendo que, foram desprezados valores com coeficiente de variação superior à 10%. O Gráfico 1 mostra os valores de resistência à compressão axial dos concretos para as diferentes idades.

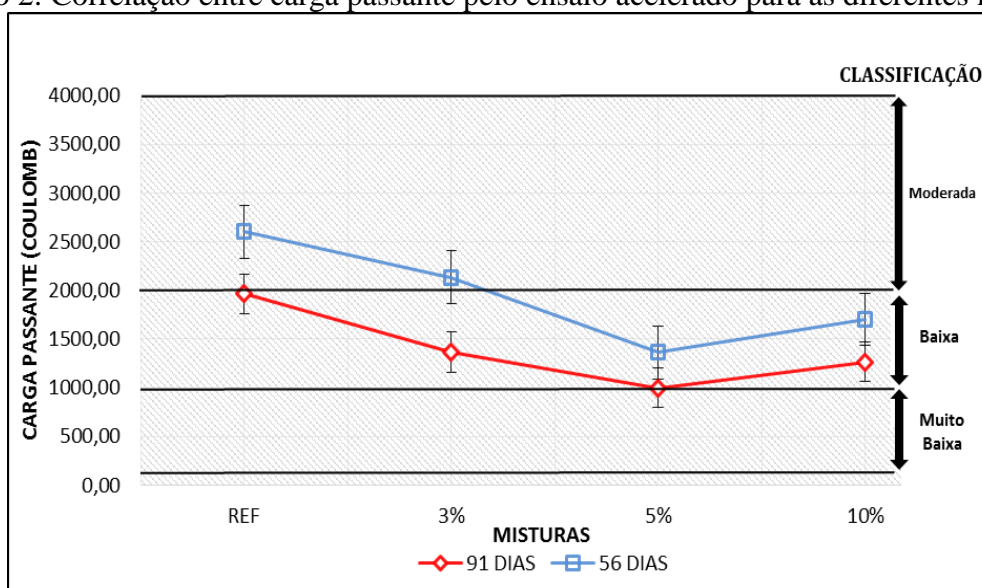
Gráfico 1: Resistência à compressão axial dos concretos



No Gráfico 1 é possível observar um ganho de resistência aos 56 dias em todas as misturas analisadas. Pode-se verificar também que as misturas que possuem substituição parcial do cimento por sílica de casca de arroz obtiveram um acréscimo de resistência ao concreto em todas as idades estudadas. Além disso, é possível observar que a mistura que apresentou o maior ganho de resistência à compressão foi a contendo 5% de sílica de casca do arroz.

O Gráfico 2 mostra os resultados obtidos da carga passante para todas as misturas analisadas e a classificação qualitativa indicada pela norma ASTM [1], apresentada na tabela 4. Após a obtenção dos resultados da corrente passante ao longo das seis horas de ensaio acelerado, foi calculada a carga passante conforme a equação 1, apresentada anteriormente.

Gráfico 2: Correlação entre carga passante pelo ensaio acelerado para as diferentes misturas.

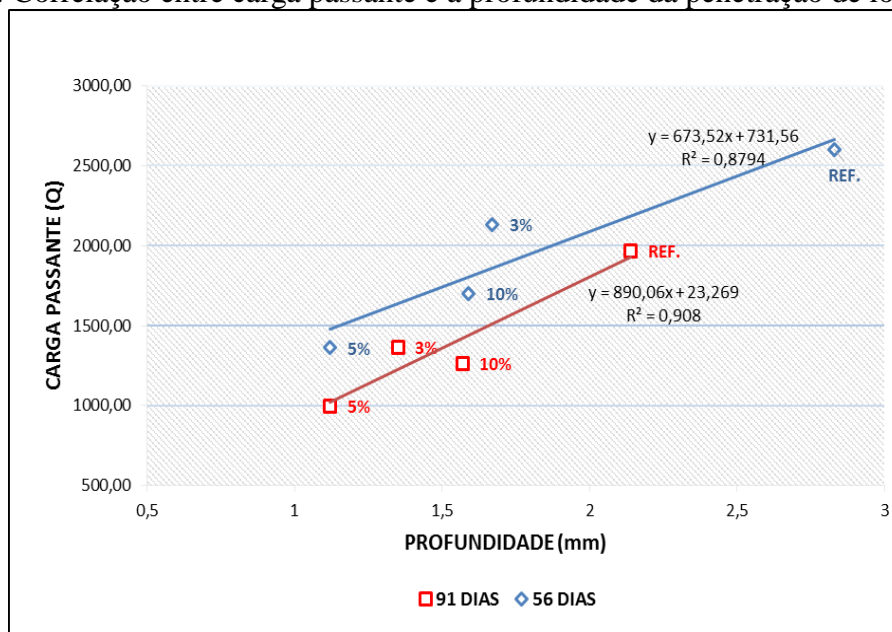


O Gráfico 2 mostra que apenas a mistura de 5% ensaiada aos 91 dias pode ser classificada como “muito baixa” quanto à susceptibilidade de penetração de íons cloretos, tendo em vista que apresentou um valor de carga passante igual à 998,69 Coulomb. Portanto, esse valor encontra-se abaixo de 1000 Coulomb, onde é o limite máximo para a classificada como “muito baixa”. Analisando os resultados obtidos das amostras ensaiadas aos 91 dias é possível observar que todas as misturas são classificadas como “baixa” e “muito baixa”. Cabe salientar que os resultados com substituição de 5% convergem, uma vez que para a maior resistência à compressão foi obtida a menor carga passante, ou seja, pode-se concluir que quanto maior a resistência menor a carga passante e mais durável a penetração de íons cloretos é o concreto.

Após os ensaios acelerados de penetração de íons cloretos, as amostras foram rompidas por compressão diametral, e em seguida foi aspergido a solução de nitrato de prata, para que reagisse com a região contaminada por cloretos, tornando possível medir a profundidade da penetração de cloretos.

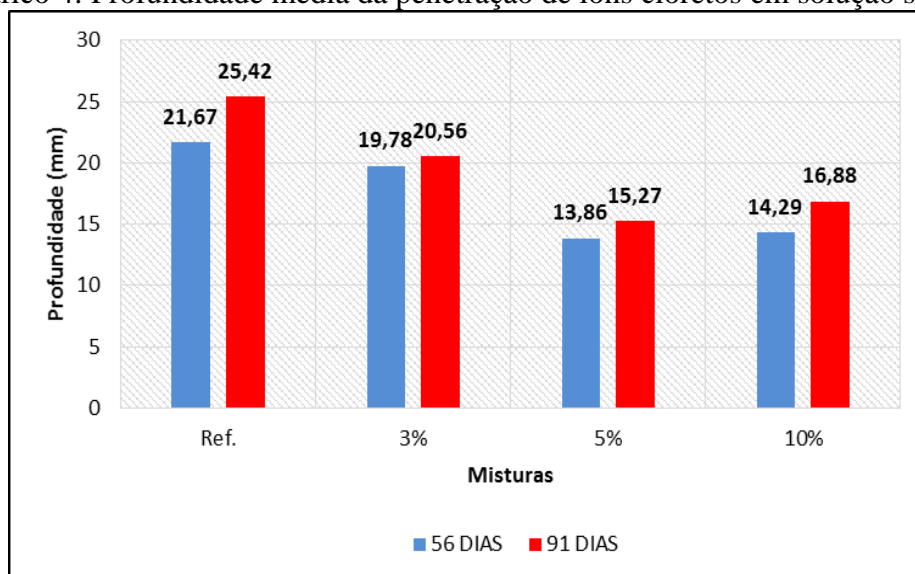
No gráfico 3 são mostradas as correlações de carga passante e a profundidade da penetração de íons cloretos para as diferentes idades de ensaio. Também é possível observar que a menor profundidade de penetração ocorreu para a mistura contendo 5% de substituição, seguida da mistura contendo 3%. Importante salientar, que todas as misturas contendo sílica de casca de arroz apresentaram profundidades de penetração menores que a mistura de referência para ambas as idades estudadas. Dessa forma justifica-se o uso desse resíduo no concreto, pelo benefício proporcionado.

Gráfico 3: Correlação entre carga passante e a profundidade da penetração de íons cloretos.



Os valores obtidos no ensaio de penetração de íons cloretos por imersão em solução salina são mostrados no Gráfico 4. Fica evidenciado o acréscimo da profundidade de imersão da região atacada pela ação de íons cloretos quanto maior o tempo que as amostras ficaram imersas em solução salina. Também pode-se observar no gráfico a redução da profundidade da penetração de íons cloretos em todas as misturas que contém sílica da casca do arroz, sendo que a mistura contendo 5% de sílica de casca de arroz apresentou uma redução da profundidade da penetração de aproximadamente 57% quando exposta por 28 dias em solução salina.

Gráfico 4: Profundidade média da penetração de íons cloretos em solução salina.



CONCLUSÕES

As principais conclusões referentes ao presente trabalho são listadas a seguir.

- Os resultados de resistência à compressão axial mostraram-se inversamente proporcionais aos de penetração de íons cloretos, tanto no ensaio acelerado como no ensaio de imersão em solução salina, ou seja, quanto maior a resistência à compressão axial menor é a suscetibilidade deste concreto a ação de íons cloretos.

- As misturas contendo teores de 3 e 10% de sílica da casca do arroz obtiveram resultados semelhantes e demonstraram uma pequena vantagem em relação ao concreto produzido apenas com cimento Portland. A mistura com substituição parcial de cimento Portland por sílica da casca de arroz no teor de 5%, foi a que apresentou melhores resultados, sendo que, o concreto produzido com este teor pode ser descrito como um concreto com capacidade de penetração de íons cloretos “muito baixa”, segundo a classificação da ASTM[1].
- A profundidade média da penetração de íons cloretos em solução salina, foi aproximadamente 15% menor para as misturas contendo sílica de casca de arroz em relação à mistura de referência.
- Os resultados comprovam que as misturas contendo sílica de casca de arroz trouxeram benefícios aos concretos quanto à proteção ao ataque por íons cloretos, tornando a sílica de casca de arroz uma alternativa para aumentar a durabilidade de estruturas de concreto.
- O uso de sílica da casca do arroz, em teores adequados, pode ser uma alternativa sustentável e tecnicamente viável para o desenvolvimento de estruturas de concreto mais duráveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Pilecco Nobre Alimentos Ltda e GEEA-Geradora de Energia de Alegrete pelo apoio financeiro para a realização destes estudos, bem como pelo auxílio das bolsas concedidas aos alunos da UNIPAMPA, que fazem parte de um projeto de pesquisa que envolve estudos da durabilidade de concretos produzidos com substituição parcial do cimento por sílica de casca de arroz, Silcca Nobre.

REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), C 1202-12. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration. ASTM C-1202.
- [2] Helene, P. R. L. ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: Ibracon, 2007. V2, Cap. 27, p. 905 -944.
- [3] MISSAU, F. Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz. 2004. 146p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.
- [4] CORDEIRO, G. C. Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-De-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Mineraiis em Concreto. 2006. 485p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [5] DAL MOLIN, D. C. C. Adições Mineraiis. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 8, p. 261-309.
- [6] MARANGON, E. et al. Atividade Pozolânica da Sílica da Casca de Arroz Produzida por Combustão em Leito Fluidizado. 55º Congresso Brasileiro do Concreto, Gramado (2013).
- [7] Helene, P., Terzian, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Editora Pini, 1993.
- [8] MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias. Andrade, Tibério. HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Editora Ibracon, 2011. V1. Cap. 22, p. 773-806.

[9] SACIOTO, Adriano Pedroso. Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura. 2005. 180p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

[10] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 259: Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, Washington. D. C, EUA. 2006.