PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS COM DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS PELA ASTM C1202 E IBRACON / NT BUILD 492

Chloride penetration in concretes with different types of cements according to ASTM C1202 and IBRACON / NT BUILD 492

Wanderson Santos de Jesus
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus, BA | wandersonsantosdejesus@outlook.com
Thalles Murilo Santos de Almeida
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus, BA | thalles.almeida94@gmail.com
Suânia Fabiele Moitinho da Silva
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus, BA | suaniafabiele31@hotmail.com
Marcelo Tramontin Souza
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus, BA | mtsouza@uesc.br
Ivan Bezerra Allaman
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus, BA | iballaman@uesc.br
José Renato de Castro Pessôa
Universidade Estadual de Santa Cruz | Ilhéus, BA | jrcpessoa@uesc.br

Resumo.

Com a supressão das deficiências do concreto, este se torna mais durável, o que infere diretamente na Vida Útil de Projeto. A durabilidade está vinculada aos ataques de agentes agressivos presentes no meio ambiente, sendo os íons cloreto um dos principais. Essa pesquisa objetiva estudar a penetração de íons cloreto pela norma ASTM C1202/2019 e IBRACON/NT Build 492 em concreto de classe C40 com diferentes tipos de cimento. Produziu-se 24 amostras cilíndricas de 10x5 cm, utilizando-se 8 tipos de cimentos de resistência de 32 MPa (CP II E, CP II E – RS, CP II F, CP II F – RS, CP II Z, CP III – RS, CP IV e CP IV – RS). Realizou-se ensaios de migração de cloretos prescrito pelos métodos ASTM C1202/2019 e IBRACON/2021 - NT Build 492. Constatou-se em nível de 95% de confiança que, concretos produzidos com cimentos contendo filler majoritariamente como adição, ou seja, CP II F e CP II F – RS, demonstraram semelhança entre si, ambos exibiram baixa eficiência em resistir à penetração de cloretos, enquanto concretos produzidos com cimentos com altos teores de escória e pozolana (CP III – RS, CP – IV e CP – IV – RS) são detentores de maior capacidade resistente média aos cloretos.

Palavras-chave: ASTM C1202; Cimentos; Durabilidade; Íons cloreto; NT Build 492.

ABSTRACT

By eliminating the concrete's shortcomings, it becomes more durable, which has impact on its Design Life. Durability is linked to attacks by aggressive agents present in the environment, chloride ions being one of the main ones. This research aims to study the penetration of chloride ions according to ASTM C1202/2019 and IBRACON/NT Build 492 in class C40 concrete with different types of cement. 24 10x5 cm cylindrical samples were produced, using 8 types of cement with a strength of 32 MPa (CP II E, CP II E - RS, CP II F, CP II F - RS, CP II Z, CP III - RS, CP IV and CP IV - RS). Chloride migration tests were carried out in accordance with ASTM C1202/2019 and IBRACON/2021 - NT Build 492. It was found at the 95% confidence level that concretes produced with cements containing filler mostly as an addition, i.e. CP II F and CP II F - RS, were similar to each other, both exhibiting low efficiency in resisting chloride penetration, while concretes produced with cements with high slag and pozzolan contents (CP III - RS, CP - IV and CP - IV - RS) have a higher average chloride resistance capacity.

Keywords: ASTM C1202; Cements; Durability; Chloride ions; NT Build 492.

1 INTRODUÇÃO

A penetração de íons cloreto é uma das manifestações patológicas mais agressivas às estruturas de concreto armado, desencadeando um processo corrosivo nas armaduras e diminuindo a vida útil dos elementos. Esses íons podem estar presentes em regiões próximas do mar ou ambientes industriais e penetram por meio dos poros do concreto. É válido salientar que este problema é responsável por um grande impacto socioeconômico, pois, um enorme valor financeiro é destinado para realizar a manutenção e reparação de estruturas que sofreram grave deterioração ocasionadas pela corrosão por cloretos [1]. Assim, concretos com menor porosidade caracterizam-se como a melhor forma de combater os ataques de agentes agressores [2]. A vida útil e o desempenho em serviço das estruturas de concreto são influenciados pela seleção dos

materiais que o compõem. Nesse contexto, a escolha do cimento na fabricação do compósito tem grande importância. Há diversos estudos sobre a influência do tipo do aglomerante hidráulico na resistência à penetração de íons cloreto, uma vez que estes interferem diretamente nas propriedades seja no estado fresco ou endurecido dos concretos, pois, diferentes intervalos de composições implicam em diferentes tipos de cimento. Assim, o comportamento do material mediante ataque por cloretos não se apresentará da mesma maneira após hidratação. Para avaliar a penetração de íons cloreto foram realizados ensaios pelo método ASTM C1202/2019 e NT Build 492, cujo Guia prático do IBRACON é baseado. Dessa forma, esse trabalho objetiva estudar a penetração de íons cloreto segundo a ASTM C1202/2019 e IBRACON/NT Build 492 (2021) para concretos fabricados para uma resistência à compressão de 40 MPa utilizando oito tipos de cimento com resistência característica de 32 MPa aos 28 dias: CP II E, CP II E – RS, CP II F, CP II F – RS, CP II Z, CP III – RS, CP IV e CP IV - RS.

2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa foram produzidas 24 amostras cilíndricas de 10x5 cm, utilizando-se 8 tipos de cimentos de resistência de 32 MPa. Os concretos foram dosados pelo método ABCP utilizando areia fina e brita zero. A formulação dos concretos e as propriedades físicas obtidas estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Formulação dos concretos e propriedades físicas.

Tipo de concreto	Formulações dos concretos					Propriedades físicas		
	Cimento (kg/m³)	Areia (kg/m³)	Brita (kg/m³)	Água (L/m³)	Aditivo (L/m³)	Fcm (MPa)	AA (%)	IV (%)
CP II E -32	420,30	330,44	704,20	137,12	0,77	59.12±1,88	3,92±0,68	8,93±1,54
CP II E -32 - RS	420,44	329,21	704,43	137,21	0,96	68,77±3,34	4,44±0,53	10,11±1,18
CP II F -32	420,58	327,98	704,66	137,29	1,16	48,97±0,96	5,23±0,44	11,73±0,93
CP II F -32 - RS	420,30	330,44	704,20	137,12	0,58	52,90±2,13	5,07±0,58	11,52±1,22
CP II Z -32	419,89	334,06	703,51	136,87	0,39	49,45±2,21	4,93±0,33	11,29±0,74
CP III -32 - RS	421,00	324,22	705,37	137,55	0,48	49,46±2,30	3,54±0,25	8,39±0,60
CP IV -32	418,97	342,21	701,98	136,30	0,77	59,14±2,49	3,35±0,14	7,84±0,28
CP IV -32 - RS	420,86	325,48	705,13	137,47	0,58	50,38±1,21	4,28±0,24	10,02±0,54

Fonte: Autor (2023). Fcm: resistência média à compressão do concreto; AA: absorção de água; IV: índice de vazios.

Nesse momento, vale ressaltar o procedimento adotado em cada metodologia de análise. O método IBRACON/NT Build 492 envolve o uso de amostras cilíndricas de concreto previamente condicionadas em solução de $Ca(OH)_2$ ou mantidas em um dessecador. Essas amostras são então colocadas em tubos de PVC selados, com soluções anódicas (0,3M de NaOH) e catódicas (10% de NaCl), utilizando aço inoxidável como ânodo e cátodo. A voltagem inicial é de 30 V, com ajustes adicionais conforme a corrente inicial. No início do ensaio, algumas amostras apresentaram correntes iniciais significativamente diferentes entre si, variando de 6,8 a 84,6 mA. Após o ajuste da tensão (Uf), as amostras foram divididas em sete grupos com tempos de ensaio de 24 horas, exceto para os concretos com CP III - 32 - RS, que necessitaram de uma duração de 48 horas. Em geral, correntes iniciais mais elevadas indicam uma maior velocidade no processo de migração e uma menor resistência à penetração de cloretos. O coeficiente de migração em estado não estacionário (Dns) é calculado com base na duração do ensaio e na profundidade de penetração de cloretos, que é medida após a aplicação de um indicador de nitrato de prata.

Já o método ASTM C1202/2019 utiliza uma solução catódica de 3% de NaCl, uma tensão de 60 V e um ensaio de 6 horas. A corrente é verificada a cada 30 minutos para avaliar a carga total passante, e as correntes medidas instantaneamente após a aplicação da tensão de 60 V variaram de 6,4 a 178,8 mA. O risco de penetração de cloretos nas amostras é classificado com base na Tabela 2.

Tabela 2: Classificação à penetrabilidade de íons cloreto.

Migração de cloretos (D_{28} x 10^{-12} m²/s)	Carga total passante (C)	Risco de penetrabilidade de íons cloreto
> 15	> 4000	Alta
$10 - 15$	$2000 - 4000$	Moderada
$5 - 10$	$1000 - 2000$	Baixa
$2{,}5 - 5$	$100 - 1000$	Muito baixa
$< 2{,}5$	< 100	Desprezível

Fonte: Adaptado de Nilsson, Ngo e GjØrv (1998) e ASTM C1202 (2018).

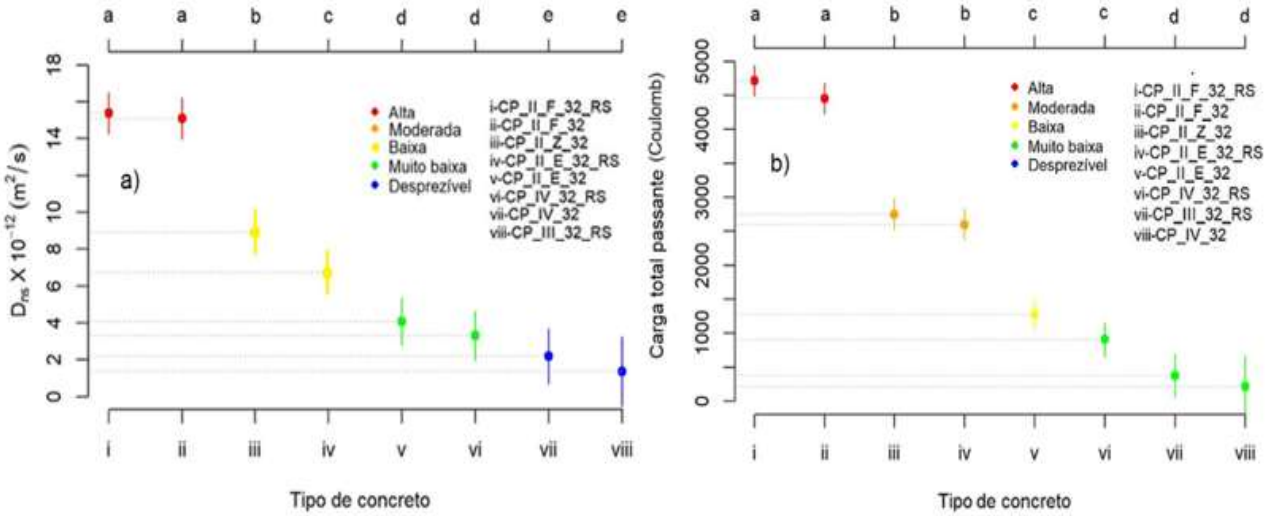
Analisou-se os dados seguindo um delineamento experimental inteiramente ao acaso. Utilizou-se análise de variância para averiguar a existência de diferenças significativas entre tratamentos e, quando detectadas tais diferenças adotou-se o teste de comparações múltiplas de média de Scott-Knott. Todos os pressupostos da análise de variância como normalidade e homocedasticidade de resíduos foram checados. O nível de significância da pesquisa foi de 5%. Foi utilizado o software R (R Core Team, 2023) juntamente com o pacote

ScottKnott, versão 1.3-0 (Jelihovschi et al., 2014) para a análise dos dados, onde letras minúsculas distintas, significam diferenças entre tratamentos conforme teste de Scott-Knott.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em nível de confiança de 95%, a Figura 1 apresenta a classificação da penetração de cloretos (Cl^-) por meio dos coeficientes médios não-estacionários de migração de cloretos ($D_{ns,\ médio}$) e das cargas totais passantes para cada tipo de concreto. Os quadros 1 e 2 apresentam as análises dos resultados. O Quadro 3 apresenta resultados de outras pesquisas.

Figura 1: Classificação quanto aos cloretos e resultados de a) D_{ns} – IBRACON/NT BUILD 492 e b) cargas passantes – ASTM C1202.



Fonte: Autor (2023).

Quadro 1: Análise dos resultados referentes aos ensaios segundo IBRACON/NT BUILD 492.

Análise da Figura 1a (IBRACON / NT BUILD 492)	
Tipo de Cimento / Coeficiente de Migração (D_{ns})	Análise
CP III - RS / (D_{ns}) = 1,37 x 10^{-12} m^2/s	Concretos classificados como tendo uma penetração de cloretos desprezível e que apresentam uma maior capacidade média de resistência aos íons cloreto, tendo resultados semelhantes entre si.
CP IV / (D_{ns}) = 2,20 x 10^{-12} m^2/s	
CP IV - RS / (D_{ns}) = 3,30 x 10^{-12} m^2/s	Concretos classificados como tendo uma resistência à penetração de cloretos muito baixa que apresentaram resultados semelhantes entre si.
CP II E / (D_{ns}) = 4,07 x 10^{-12} m^2/s	
CP II E - RS / (D_{ns}) = 6,76 x 10^{-12} m^2/s	Concretos classificados como tendo baixo risco à penetração de cloretos.
CP II Z / (D_{ns}) = 8,91 x 10^{-12} m^2/s	
CP II F / (D_{ns}) = 15,11 x 10^{-12} m^2/s	Concretos classificados como de alto risco por terem baixa resistência à penetração de cloretos, apresentando resultados semelhantes entre si.
CP II F - RS / (D_{ns}) = 15,39 x 10^{-12} m^2/s	

Fonte: Autor (2023).

Quadro 2: Análise dos resultados referentes aos ensaios segundo ASTM C1202.

Análise da Figura 1b (ASTM C1202)	
Tipo de Cimento / Carga Passante (C)	Análise
CP II F / 4455,27 C	Concretos classificados como tendo alta penetrabilidade de cloretos tendo resultados de carga total passante semelhantes entre si.
CP II F - RS / 4715,82 C	
CP IV / 214,20 C	Concretos classificados com risco muito baixo à penetrabilidade de cloretos. Os cimentos possuem elevado teor de escória e pozolana em sua composição. Apenas os concretos com CP IV e CP III - RS tiveram resultados de carga total passante semelhantes entre si.
CP III - RS / 376,14 C	
CP IV - RS / 906,27 C	
CP IV - RS / 906,27 C	Concretos com média de carga total passante com resultados semelhantes entre si, mas com diferentes classificações de risco à penetrabilidade de cloretos. Concretos produzidos com CP IV - RS foram classificados como de risco muito baixo à penetrabilidade de cloretos e com CP II E classificados como de baixo risco à penetrabilidade de cloretos.
CP II E / 1275,54 C	
CP II E - RS / 1275,54 C	Concretos que apresentaram médias de carga total passante semelhantes, sendo classificados como moderadamente penetráveis por cloretos.
CP II Z / 2600,91 C	

Fonte: Autor (2023).

Quadro 3: Estado da arte – Resultados obtidos em outras pesquisas.

Tipo de Cimento	Referência e Resultados Obtidos
CP II F	[5] produziu concreto de classe C40 com cimento CP II F - 32, obtendo um coeficiente de migração de cloretos de 30,90 x 10^{-12} m^2/s pela NT BUILD 492, e carga total passante de 4930 C pela ASTM C1202, sendo classificado em ambos os ensaios como um concreto de alta penetrabilidade de cloretos.
CP II Z CP IV	[11] mostrou que concretos de classe C45 avaliados com cimentos CP II Z – 32 tiveram carga passante de 3658,5 C, classificados como moderadamente penetráveis, enquanto os com cimento CP IV – 32 tiveram carga passante de 1272 C, classificados como de baixo risco. Também concluiu que a variação de temperatura pode afetar os resultados do teste de carga passante, sugerindo que o método do IBRACON/NT Build 492 pode ser mais eficaz na classificação. Isso ocorre porque ele permite a avaliação da interação entre o cloreto e a matriz cimentícia
CP II F CP IV - RS	[12] produziu concretos com CP II F - 32 que foram classificados como de baixa resistência à penetração de cloretos, enquanto os com CP IV - 32 - RS apresentaram alta resistência. Foi utilizado o método da NT BUILD 492.
CP III - RS	[10] produziu concretos com cimento CP III - RS e relação a/c variando de 0,45 a 0,65 obtendo concretos classificados como de muito baixa penetração de cloretos pelo método ASTM C1202.
CP IV CP II - F	[6] concluiu que o tipo de cimento influencia o coeficiente de migração de cloretos, observando que o cimento CP IV apresentou D_{ns} mais baixos que o CP II – F.

Fonte: Autor (2023).

4 CONCLUSÕES

Com um nível de confiança de 95%, pode-se afirmar que os concretos produzidos com cimentos que contêm filler majoritariamente como adição, ou seja, CP II F e CP II F – RS, apresentaram semelhanças entre si em ambos os métodos de classificação, sendo categorizados como tendo alta penetrabilidade de íons cloreto. Por outro lado, os concretos produzidos com cimentos que têm altos teores de escória e pozolana (CP III – RS, CP – IV e CP – IV – RS) demonstraram maior capacidade média de resistência aos íons cloreto, classificando-os como tendo penetrabilidade desprezível ou muito baixa.

5 AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado com os seguintes apoios: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Modelagem em Materiais (PROCIMM) da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Laboratório de Ensaios Mecânicos e Resistência dos Materiais (LEMER), Gerência de Laboratórios (GERLAB), Laboratório de Física III e AXIS – Engenharia e Tecnologia.

6 REFERÊNCIAS

[1] KIM, Y. J.; BUMADIAN, I. Chemicoelectrical response of concrete bonded with carbon fiber-reinforced polymer sheets in a corrosive environment. **ACI Materials Journal**, v. 114, n. 4, p. 549-558, ago. 2017.
[2] CHANDRAMOULI, K. et al. Rapid chloride permeability test for durability studies on glass fibre reinforced concrete. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 5, n.3, p.67-71, 2010.
[3] ASTM, A. S. F. T. A. M. **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration: ASTM C1202.** West Conshohocken, 2019.
[4] IBRACON. **Procedimento de ensaios de difusão e migração de íons cloretos, visando a estimativa de VUP em concretos**. São Paulo, 2021.
[5] FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da Influência da Cinza da Casca de Arroz no Comportamento de Concretos com Agregado Reciclado de Concreto em Relação a Propriedades Mecânicas e de Durabilidade, com Ênfase no Transportes de Íons de Cloreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Unisinos, São Leopoldo, 2013.
[6] PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura**. 138p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.
[7] TAVARES, L. M. **Estudo do Processo de Corrosão por Íons Cloreto no Concreto Armado Utilizando Armaduras Comuns e Galvanizadas**. Porto Alegre, 2006. Dissertação - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
[8] CRAUS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFSM, Rio Grande do Sul, 100 p. 2010.
[9] MARQUES, S. L.; RIBEIRO, D. V. Influência do tipo de cimento na migração de cloretos em concretos. **Politécnica Instituto Politécnico da Bahia)**, v. 21, p. 21-35, 2014.
[10] HELENE, P. R. L.; GUIGNONE, G.; VIEIRA, G.; RONCETTI, L.; MORONI, F. **Avaliação da Penetração de Cloretos e da Vida Útil de Concretos Autocicatrizantes Ativados por Aditivo Cristalino**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, n. 11, p. 544-563, 2018
[11] JUNIOR, D. M. et al. **Physicochemical evaluation of portland cement produced in Brazil via X-ray fluorescence and mechanical strength**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 41, n. 1, p. 3-12, 2020.
[12] RODRIGUES, W. B. **Influência da resistividade elétrica na migração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), UFCAT, Catalão, 2023.