AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE MATRIZES CIMENTÍCIAS CONFECCIONADAS COM CIMENTOS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Evaluation of mechanical and durability properties of cement matrices made with cement with addition of blast furnace slag

Francisco Luiz Campos Lopes
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | francisco.campos.lopes@gmail.com

Laura Viana de Melo
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | lauravianademelo03@gmail.com

Fernando do Couto Rosa Almeida
Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | fernandocralmeida@gmail.com

RESUMO

A utilização de materiais cimentícios suplementares é uma alternativa para mitigar efeitos negativos da produção do cimento Portland, responsável pela geração de gás carbônico em altos níveis. Umas das alternativas é a escória de alto forno, oriunda da fabricação de ferro-gusa. No Brasil, é regulamentada a utilização desse material, em que os cimentos "CPII E" e "CPIII RS" possuem percentuais dessa adição em substituição ao clinquer. Este trabalho avaliou o comportamento mecânico e de durabilidade de matrizes com cimentos "CPII E", "CPIII RS" e "CPV", com os ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água por capilaridade, resistividade elétrica e migração de íons cloretos. Observou-se que a utilização do CPII E e CPIII RS ocasionou melhores parâmetros de durabilidade, enquanto houve uma perda de resistência. Nesse contexto, nota-se viabilidade da utilização desse material para promoção de concretos mais resistentes à ação dos agentes agressivos água e íons cloretos.

Palavras-chave: Escória de alto forno; Durabilidade; Cimento; Resistência; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of supplementary cementitious materials is an alternative to mitigate the negative effects of Portland cement production, which is responsible for generating high levels of carbon dioxide. One of the alternatives is blast furnace slag, which comes from the production of pig iron. In Brazil, the use of this material is regulated, and the cements "CPII E" and "CPIII RS" have percentages of this addition as replacements for clinker. This study evaluated the mechanical and durability behavior of matrices with cements "CPII E", "CPIII RS" and "CPV", using tests of resistance to axial variation, water analysis by capillarity, electrical resistivity and migration of tense ions. Note that the use of CPII E and CPIII RS resulted in better durability parameters, while there was a loss of strength. In this context, it is necessary to use this material to promote concretes that are more resistant to the action of aggressive agents such as water and chloride ions.

Keywords: Blast furnance slag; Durability, Cement; Resistance; Sustainability

1 INTRODUÇÃO

A produção de cimento é uma das atividades mais impactantes na poluição do planeta, devido ao consumo de combustíveis fósseis e geração de gás carbônico (Lopes; Santos, 2018), um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Dentre as principais etapas de produção do cimento, está a queima do clinquer, que mistura materiais argilosos e calcários, com o alcance 1450°C, processo que demanda energia e extração de materiais (Neville, 2016). Tendo em vista a alta utilização desse material, com uma demanda anual de cerca de 3,6 bilhões de toneladas/ano (Poliusp, 2025), o impacto ambiental torna-se significativo.

Nesse contexto, uma das formas de mitigação dos impactos da produção do cimento encontradas na indústria é a utilização de materiais cimentícios complementares, que visam substituir teores de clinquer por materiais inovadores. No Brasil, a NBR 16697 (ABNT, 2018) expõe as classificações dos tipos de cimento e os teores permitidos para adições. Dentre os tipos de cimento, estão o “CPII-E” e o “CPIII RS”, que possuem como adição a escória de alto forno, proveniente das usinas de siderurgia durante a fabricação do ferro gusa. Além disso, o “CPV”, tornou-se o mais “puro”, sem adições de escória de alto forno, apenas 5% de material pozolânico.

Assim, a utilização da escória de alto forno promove a reutilização dos rejeitos gerados na atividade de mineração (Pimentel *et al.,* 2017), fato que contribui para a sustentabilidade desse setor. Especialmente em Minas Gerais, esta alternativa mostra-se relevante, tendo em vista a expressiva atividade da mineração no estado, que correspondeu a 41,3% do faturamento nacional em 2024 (IBRAM, 2024).

Diante da relevância desta temática, avaliar as propriedades das matrizes cimentícias com a utilização do “CPII E” e “CPIII RS” torna-se proveitoso para análise da viabilidade de sua utilização, em comparação com o material convencional “CPV”, sem adição de escórias. Os principais parâmetros avaliados devem ter relação com o comportamento mecânico e de durabilidade dos compósitos, em busca do conhecimento do seu comportamento. Dessa forma, é conhecido o comportamento e torna-se viável sua utilização.

O objetivo deste trabalho foi estudar composições com “CPII E”, “CPII E” e “CPV”, com a realização de ensaios de resistência mecânica à compressão com base na NBR 5739 (ABNT, 2018) e absorção capilar pela RILEM TC 116 (RILEM, 1999). Com relação à durabilidade, foram avaliadas a resistividade elétrica superficial e volumétrica com base na UNE 83988-2 (UNE, 2014) e ASTM C1876 (ASTM, 2019) e a migração de íons cloretos (NT BUILD 492, 1999). Dessa forma, estudos que geram conhecimento acerca dos materiais alternativos contribuem para o desenvolvimento da sustentabilidade na construção civil.

2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu na utilização de um espaço amostral de concretos moldados com diferentes tipos de cimentos e ensaios para avaliação das suas propriedades. Dessa maneira, avaliar o comportamento das matrizes cimentícias.

Os cimentos utilizados foram CPII, CPIII RS e CPV, da CSN Cimentos. A caracterização físico-química com algumas propriedades estão listadas na tabela abaixo.

Tabela 1: Características físico-químicas dos cimentos utilizados

Parâmetro	CPIII RS	CPII	CPV
Finura na peneira 75 µm	0,13%	0,07%	-
Massa específica	2,99 g/cm³	2,99 g/cm³	-
Óxido de magnésio	4,88%	3,31%	0,61%
Óxido de silício	23,18%	23,10%	17,93%
Óxido de alumínio	7,55%	6,38%	4,77%
Óxido de ferro	1,52%	2,71%	3,03%
Óxido de cálcio	54,18%	53,85%	62,91%
Adição de escória de alto forno	55%	28%	-

Fonte: CSN Cimentos

Para cada tipo de cimento foi moldado um lote de 10 amostras, confeccionados com o traço 1: 1,42: 2,05 (cimento: areia: brita) e relação água cimento de 0,59. A moldagem dos corpos de prova foi feita conforme NBR:5738 (ABNT, 2019). Os ensaios realizados visaram avaliar as propriedades físicas mecânicas e de durabilidade das matrizes. As avaliações forem feitas com base em normas relacionadas, detalhadas no quadro 1.

Quadro 1: Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa

Ensaio	Norma	Quantitativo
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739:2018	2
Absorção capilar de água	RILEM TC 116:1999	3
Resistividade elétrica superficial e volumétrica	ASTM C1876-19 / UNE 83988-2:2014	10
Migração de íons cloretos	NT BUILD 492:1999	3

Fonte: Autores, 2024

Para avaliação dos resultados para resistividade elétrica, algumas referências foram selecionadas com base nas metodologias dos ensaios. A qualidade do concreto será avaliada com base nesses parâmetros.

Tabela 4: Classificação qualitativa mediante resistividade elétrica superficial

Resistividade superficial (KΩcm)	**Permissividade à penetração iônica (P.P.I)** AASTHO (2015)	**Probabilidade de instalação de corrosão (P.I.C)** Balestra *et. al.* (2019)	**Taxa de corrosão (T.C)** Langford e Broomfield (1987)
> 254	Desprezível	Desprezível	Baixa
37 – 254	Muito baixa		
21 – 37	Baixa		
12 – 21	Moderada		
>254	Desprezível		
80 - 254	Muito baixa	Baixa	
55 – 80			
37 - 55	Baixa	Moderada	
21 – 37			
12 – 21	Moderada	Alta	Baixa a moderada
5 - 12	Alta	Muito Alta	Alta
>5			Muito Alta

Fonte: Adaptado de AASTHO (2015), Balestra *et. al*. (2019) e Langford; Broomfield (1987)

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos para os grupos amostrais serão apresentados nessa seção. Cada propriedade foi analisada com base nos critérios de ensaio e classificação.

3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

A resistência à compressão axial dos corpos de prova está relacionada na tabela abaixo.

Tabela 2: Permissividade à penetração do íon cloreto no concreto

Concreto	**Resistência à compressão axial (MPa)**	
	Média	**Desvio Padrão**
CPII E 25	33,16	1,87
CPIII RS 25	29,50	5,72
CPV 25	37,56	0,95

Fonte: Autores, 2024

Observa-se que “CPV” apresentou a maior resistência à compressão axial, esperado devido ao maior teor de clínquer. Os “CPII E” e “CPIII RS” tiveram comportamentos semelhantes, com resultados na mesma faixa pelo desvio padrão. Isso mostra que a adição de materiais cimentícios reduz a resistência pela substituição parcial do clínquer.

3.2 ABSORÇÃO CAPILAR

Para o ensaio de absorção capilar, são apresentados os resultados na tabela abaixo, considerando a classificação com base em parâmetros qualitativos sugeridos por Browne (1991) e Azevedo (2002).

Tabela 3: Resultados do ensaio de absorção capilar da água

Concreto	**Coeficiente de absorção capilar de água (mg/mm². √s)**		**Classificação da qualidade do concreto**
	Média	**Desvio padrão**	
CPII E 25	0,095	0,001	Elevada
CPIII RS 25	0,077	0,007	Elevada
CPV 25	0,183	0,015	Média

Fonte: Autores, 2024

O “CPV” teve maior absorção capilar, seguido de “CPII E” e “CPIII RS”, resultando em concretos de qualidade média e elevada. A presença da escória melhora o desempenho da matriz, reduzindo a porosidade e aprimorando o empacotamento das partículas.

3.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E VOLUMÉTRICA

Os resultados para resistividade elétrica superficial e volumétrica são apresentados na tabela abaixo. Para cada resultado há uma classificação com base nos parâmetros de durabilidade definidos.

Tabela 5: Resultados obtidos para resistividade elétrica superficial e volumétrica

Concreto	Resistividade Elétrica				Classificações		
	Volumétrica (KΩcm)		Superficial (KΩcm)		P.P.I.	P.I.C.	T.C.
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão			
CPII E 25	175,33	11,48	56,7	4,4	Muito baixa	Baixa	Baixa
CPIII RS 25	318,87	16,5	107,2	6,4	Muito baixa	Desprezível	Baixa
CPV 25	38,7	2,06	8,2	0,7	Alta	Muito Alta	Alta

Fonte: Autores, 2024

As matrizes de “CPIII RS” e “CPII E” apresentam baixa a desprezível penetração de cloretos e corrosão, enquanto o “CPV” tem menor resistência, devido à menor resistividade. Assim, as adições em “CPII E” e “CPIII RS” aumentam a durabilidade, reduzindo a permissividade aos cloretos e a corrosão.

A resistividade e a absorção de água estão diretamente relacionadas à porosidade, pois quanto menor, menor presença de fluidos internos e aumento da resistividade. O “CPIII RS” teve o melhor desempenho, seguido de “CPII E” e “CPV”, o que ocorre pela menor porosidade, com redução da absorção e aumento da resistividade.

3.4 MIGRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS

Os resultados para o coeficiente de migração dos íons cloretos para os corpos de prova estão detalhados na tabela abaixo. Para cada resultado, há uma classificação com base nos parâmetros de Gjorv (2017).

Tabela 6: Resultados do ensaio de determinação do coeficiente de migração de íons cloretos no concreto

Concreto	Coeficiente de migração de íons cloretos (m²/s)		Resistência à penetração de íons cloretos (GJORV, 2017)
	Média	Desvio padrão	
CPII E 25	3,374.10-12	3,6.10-13	Muito Alta
CPIII RS 25	1,917.10-12	2,1.10-13	Extremamente Alta
CPV 25	6,438.10-12	5,9.10-13	Alta

Fonte: Autores, 2024

O coeficiente de migração de íons cloretos foi maior para as matrizes de “CPIII RS”, o que levou a uma resistência “extremamente alta” para esse agente agressivo. Em seguida, o “CPII”, classificado como resistência “muito alta” e o “CPV”, como “alta”. Esse resultado demonstra proximidade às tendências já observadas, em que as matrizes com maior resistividade (CPIII RS) demonstraram a maior a resistência à migração interna de íons cloretos. Nesse contexto, a influência da presença da escória de alto forno é positiva em relação à durabilidade dos compósitos.

3.5 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL FRENTE A CLORETOS

A estimativa da vida útil do concreto foi analisada com base no fenômeno da difusividade de íons cloreto, seguindo Lopes (2022) e Gjorv (2017), utilizando a 2º Lei de Fick e adotando um ambiente com baixa agressividade ambiental.

Tabela 7: Parâmetros de entrada para elaboração de modelo de durabilidade

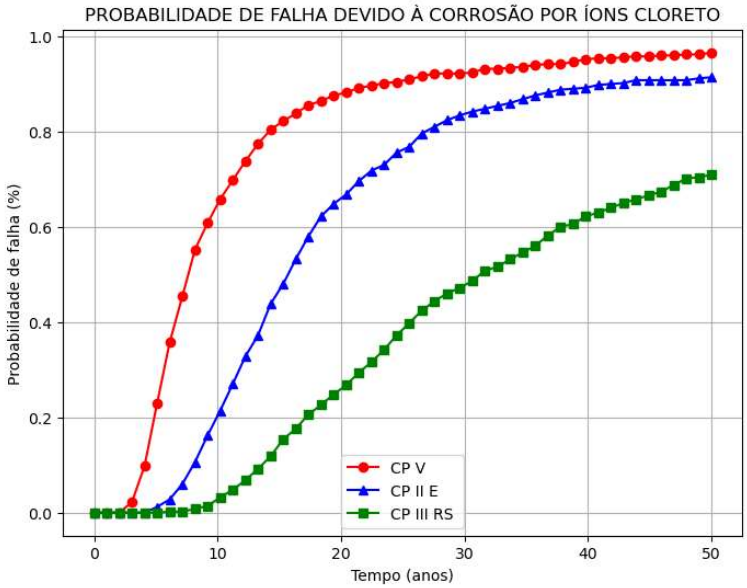
Parâmetros	Média	Desvio padrão
Temperatura (°C)	20	-
Fator tempo (α)	0,4	0,08
Concentração crítica de cloretos (% em relação ao cimento)	0,4	0,1
Concentração superficial de cloretos (% em relação ao cimento)	1,5	0,5
Cobrimento do elemento estrutural (mm)	50	1

Fonte: Autores, 2024

O modelo probabilístico considera 0,4% de íons cloretos livres como limite para despassivação, conforme Hausmann (1967), NBR 15575 (ABNT, 2013) e NBR 6118 (ABNT, 2023). A análise utiliza simulação de Monte Carlo, com 500 cenários em 50 períodos com distribuição gaussiana. A tabela abaixo apresenta os parâmetros adotados para um ambiente de baixa agressividade.

Avalia-se uma probabilidade de falha de 60% aos 10, 20 e 40 anos para os concretos moldados com os cimentos CPV, CPII E e CPIII RS, respectivamente. A análise corrobora com o fato de que a adição de escória de alto forno promove o aumento da vida útil de uma estrutura frente à penetração de íons cloreto.

Figura 1: Parâmetros de entrada para elaboração do modelo de durabilidade



Fonte: Autores

4CONCLUSÕES

A utilização de cimentos com adição de escória de alto forno como material cimentícios suplementar, mostrou ser uma alternativa eficaz para melhoraria da durabilidade do concreto. O CPIII RS, com maior teor de escória, obteve os melhores resultados nos ensaios de durabilidade, seguido pelo CPII e CPV.

Embora esta tenha aumentado, houve redução na resistência à compressão, com o CPV apresentando melhor desempenho devido ao maior teor de clínquer. A adição de escória melhorou parâmetros como absorção de água, migração de cloretos e resistividade elétrica.

A análise da probabilidade de falha devido à corrosão por cloretos reforça a recomendação de cimentos com escória para estruturas expostas a estes agentes, visando maior vida útil e desempenho do concreto. Essa abordagem é vantajosa para a sustentabilidade, pois desonera custos com manutenções prematuras, reduz a demanda por clínquer e proporciona uma destinação útil para os rejeitos de escória de alto forno.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG (Processos APQ-00062-22 e APQ-06746-24) pelo auxílio financeiro. Agradecem à PI Engenharia e Consultoria pelo apoio para realização dos ensaios e pesquisas deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 358- 15**. Standard method of test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington, 10p., 2015.

____ **ASTM C 1202–22**. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. American Society for Testing and Material, Philadelphia 2022.

____ **ASTM C 1556–03**. Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion, 2003.

____ **ASTM C1876-19**. Standard test method for bulk electrical resistivity or bulk conductivity of concrete, 2019.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n.3, p.724-742, 1993.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83988-2**. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica: parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner. Genova, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16697.** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

____ **NBR 5739**. Ensaio de compressão de corpos de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

____ **5738.** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2019.

____ **NBR 15575**. Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

____ **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de janeiro, 2014.

AUDENAERT K., YUAN Q., SCHUTTER G.D. On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 396–402, 2010.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. B**etões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes.** Tese de Doutorado – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2002.

BALESTRA, C. E. T; NAKANO, A. Y. SAVARIS, G. MEDEIROS, R. A. Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures. **Ocean Engineering**, v. 187, 2019.

BROWNE, R.D. **Field investigations: site e laboratoty tests: maintenance repair and rehabilitation of concrete structures**. CEEC, Lisboa, 1991.

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP. **Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO2**. Disponível em: Cimento – Produção mundial pode dobrar sem aumentar CO2 – ESCOLA POLITÉCNICA. Acesso em 20/01/2025.

GJØRV O. E. **Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments**. FL, USA, 2017.

HAUSMANN, D. A. Steel corrosion in Concrete: how does it occur. **Materials Protection**, v.6, n.11, p.19-23, 1967.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **DADOS IBRAM – SETOR MINERAL – 3° trimestre de 2024**. Disponível em: Publicações - IBRAM. Acesso em: 20/01/2025.

LOPES, F. L. C. **Desenvolvimento de protótipo de aplicação mobile para estimativa in situ da vida útil de componentes em concreto armado face corrosão induzida por cloretos, via ensaios não destrutivos**. 104. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2022.

LANGFORD, P., BROOMFIELD, J. Monitoring the Corrosion of Reinforcing Steel. **Construction Repair**, p. 32-36, 1987.

LOPES, F., SANTOS, D. O potencial poluidor da indústria cimenteira. **15° Congresso Nacional do Meio Ambiente**, Minas Gerais, 2018.

NORDTEST. **NT BUILD 492**. Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials, Chloride Migration Coefficient from Non-Steady State Migration Experiments. Esbo, Finland, 1999.

NORDTEST. **NT BUILD 443**. Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration. Approved 1995–11.

PIMENTEL, M. *et al*. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, Belém, PA.

ROSA, L. S. Materiais cimentícios suplementares: Histórico e novas tendências. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 07, p.121-127. Abril de 2020. ISSN: 2448-0959