



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS DE CRATEÚS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MAYARA CRISTINA LIMA DO NASCIMENTO

**ANÁLISE DA DIFUSÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO**

CRATEÚS - CE

2026

MAYARA CRISTINA LIMA DO NASCIMENTO

ANÁLISE DA DIFUSÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO

Trabalho de Conclusão do curso apresentado à Universidade Federal do Ceará em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Soares Moreira

CRATEÚS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N196a Nascimento, Mayara Cristina Lima do.
Análise da Difusão de Cloretos em Estruturas de Concreto Armado / Mayara Cristina Lima do Nascimento. – 2026.
66 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Leandro Soares Moreira.
1. Difusão de Cloretos. 2. Corrosão das armaduras. 3. Modelos matemáticos. I. Título.
CDD 620
-

MAYARA CRISTINA LIMA DO NASCIMENTO

ANÁLISE DA DIFUSÃO DE CLORETOS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO

Trabalho de Conclusão do curso apresentado à
Universidade Federal do Ceará em Engenharia
Civil da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leandro Soares Moreira (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra Heloína Nogueira da Costa

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra Janaína Lopes Leitinho

Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

À minha mãe Cristiana, que abriu mão dos próprios sonhos para que os meus pudessem existir. Tudo o que sou carrega o seu amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por ter sido meu amparo nos momentos de dificuldade, minha força nas horas de cansaço e minha luz ao longo de toda essa caminhada. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

À minha mãe, Cristiana, por todo amor, dedicação e renúncia. Por ter acreditado em mim mesmo quando eu duvidei e por ter sido meu maior exemplo de força e perseverança.

Em memória do meu pai, Luís, conhecido como Sucesso. Onde quer que esteja, espero que esteja orgulhoso de mim. Enquanto eu viver, o senhor sempre estará vivo em minha memória e em meu coração.

Ao meu padrasto, Francivaldo, pelo apoio, incentivo e presença constantes ao longo dessa trajetória. À minha irmã, Melyssa, pelo carinho, companheirismo e por ser fonte de alegria nos momentos mais desafiadores. Aos meus avós, Antonieta e Francisco Inácio, por todo amor, ensinamentos e por serem base da minha família e da minha formação como pessoa. Ao meu esposo, Paulo César, pelo apoio incondicional, paciência, compreensão e por caminhar ao meu lado em todos os momentos. Aos meus colegas de curso, que tornaram essa caminhada mais leve e significativa; eles sabem quem são.

Ao meu orientador, Leandro Soares, pela orientação, disponibilidade, conhecimentos compartilhados e contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e às avaliadoras Heloína Nogueira e Janaina Leitinho, pelas valiosas contribuições, sugestões e pela disponibilidade em participar da banca examinadora.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho, minha sincera gratidão.

“A penetração de íons cloreto no concreto é um dos principais mecanismos responsáveis pelo início do processo de corrosão das armaduras.” (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 312).

RESUMO

A difusão de íons cloreto em estruturas de concreto armado é um dos principais mecanismos responsáveis pelo início da corrosão das armaduras, afetando diretamente a durabilidade e a vida útil das estruturas. Nesse contexto, a estimativa adequada do coeficiente de difusão de cloretos torna-se fundamental para análises de desempenho e durabilidade. Este trabalho teve como objetivo analisar os mecanismos de transporte de cloretos no concreto, identificar os principais fatores que influenciam sua penetração e avaliar, de forma comparativa, o desempenho de diferentes modelos matemáticos utilizados na estimativa do coeficiente de difusão. A metodologia adotada baseou-se em uma revisão sistemática e crítica da literatura, com abordagem teórica e comparativa, contemplando cinco modelos amplamente empregados: Chalee et al. (2009), Luciano e Miltenberger (1999), Riding et al. (2013), Caré (2003) e Oh e Jang (2004). Os modelos foram aplicados a uma base de dados experimental composta por mais de 160 misturas de concreto, abrangendo diferentes idades, relações água/material cimentício, teores de adições minerais e condições de exposição. A avaliação do desempenho foi realizada por meio da razão entre os coeficientes de difusão estimados e experimentais (DM/DE), complementada por análises estatísticas de média, desvio padrão e coeficiente de variação, além da interpretação gráfica da distribuição dos resultados. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre os modelos, associadas aos parâmetros dominantes considerados em cada formulação, resultando em distintos níveis de conservadorismo, dispersão e representatividade dos dados experimentais. Conclui-se que a escolha do modelo de difusão deve considerar o objetivo da análise, a disponibilidade de dados e as condições de exposição, sendo essencial para avaliações confiáveis de durabilidade e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção da corrosão em estruturas de concreto armado.

Palavras-chave: difusão de cloretos; corrosão das armaduras; durabilidade; modelos matemáticos.

ABSTRACT

Chloride ion diffusion in reinforced concrete structures is one of the main mechanisms responsible for the initiation of reinforcement corrosion, directly affecting structural durability and service life. In this context, an accurate estimation of the chloride diffusion coefficient is essential for durability and performance assessments. This study aimed to analyze chloride transport mechanisms in concrete, identify the main factors influencing chloride penetration, and comparatively evaluate the performance of different mathematical models used to estimate the diffusion coefficient. The methodology was based on a systematic and critical literature review, adopting a theoretical and comparative approach and considering five widely used models: Chalee et al. (2009), Luciano and Miltenberger (1999), Riding et al. (2013), Caré (2003), and Oh and Jang (2004). The models were applied to an experimental database comprising more than 160 concrete mixtures, including different ages, water-to-binder ratios, mineral addition contents, and exposure conditions. Model performance was evaluated using the ratio between estimated and experimental diffusion coefficients (DM/DE), supported by statistical analyses of mean value, standard deviation, and coefficient of variation, as well as graphical interpretation of result distributions. The results revealed significant differences among the models, related to the dominant parameters adopted in each formulation, leading to distinct levels of conservatism, dispersion, and representativeness of experimental data. It is concluded that the selection of a diffusion model should consider the purpose of the analysis, data availability, and exposure conditions, being essential for reliable durability assessments and for the development of effective corrosion prevention strategies in reinforced concrete structures.

Keywords: chloride diffusion; reinforcement corrosion; durability; mathematical models.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 01 – Modelo de corrosão por pilha. | 22 |
| Figura 02 - Representação esquemática das zonas no concreto. | 23 |
| Figura 03 – Tabela de valores limites para a fissuração do concreto. | 41 |
| Figura 04 – Tabela de valores mínimos de cobrimento. | 42 |
| Figura 05 – Tabela das classes de agressividades ambientais. | 43 |
| Figura 06 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Chalee et al. | 47 |
| Figura 07 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Luciano e Miltenberg. | 48 |
| Figura 08 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Riding et al. | 48 |
| Figura 09 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Caré. | 49 |
| Figura 10 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Oh e Jang. | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 01 - Variáveis primárias e secundárias consideradas nos modelos..... | 37 |
| Tabela 02 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Chalee et al..... | 43 |
| Tabela 03 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Luciano e Miltenberger.... | 43 |
| Tabela 04 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Riding et al..... | 44 |
| Tabela 05 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Caré..... | 45 |
| Tabela 06 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Caré..... | 45 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

C₃A – Aluminato tricálcico

C₄AF – Ferroaluminato tetracálcico

Cl⁻ – Íon cloreto

CV – Coeficiente de variação

D – Coeficiente de difusão

D_a – Coeficiente de difusão aparente

D_e – Coeficiente de difusão experimental

D_{ef} – Coeficiente de difusão efetivo

DM/DE – Razão entre coeficiente de difusão modelado e experimental

FA – Cinza volante (*Fly Ash*)

GGBFS – Escória de alto-forno moída (*Ground Granulated Blast Furnace Slag*)

ITZ – Zona de Transição Interfacial (*Interfacial Transition Zone*)

MK – Metacaulim

NBR – Norma Brasileira

NT BUILD – Norma Técnica Escandinava

SCMs – Materiais Cimentícios Suplementares (*Supplementary Cementitious Materials*)

SF – Sílica ativa (*Silica Fume*)

UFFA – Cinza volante ultrafina (*Ultra Fine Fly Ash*)

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c – Relação água/cimento

a/cm – Relação água/material cimentício

Cl⁻ – Íon cloreto

Cm – Consumo de cimento (kg/m³)

CV – Coeficiente de variação (%)

D – Coeficiente de difusão (m²/s)

Da – Coeficiente de difusão aparente (m²/s)

De – Coeficiente de difusão experimental (m²/s)

Def – Coeficiente de difusão efetivo (m²/s)

DM – Coeficiente de difusão modelado (m²/s)

DM/DE – Razão entre coeficiente de difusão modelado e experimental (-)

Dp – Coeficiente de difusão da pasta de cimento (m²/s)

Dult – Coeficiente de difusão limite (m²/s)

m – Fator de envelhecimento do concreto (-)

t – Tempo (dias)

T – Temperatura absoluta (K)

Va – Fração volumétrica de agregados (-)

VITZ – Fração volumétrica da zona de transição interfacial (-)

τ – Tortuosidade da rede de poros (-)

φ – Porosidade capilar (-)

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2 OBJETIVOS..... | 18 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 18 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 18 |
| 3 METODOLOGIA..... | 19 |
| 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 22 |
| 4.1 Corrosão..... | 22 |
| Figura 01 – Modelo de corrosão por pilha..... | 23 |
| 4.2 Corrosão por íons de cloreto..... | 23 |
| 4.3 Estrutura dos poros do concreto..... | 24 |
| Figura 02 - Representação esquemática das zonas no concreto..... | 24 |
| 4.4 Principais mecanismos de transporte de cloretos no concreto..... | 25 |
| 4.4.1 Permeabilidade..... | 25 |
| 4.4.2 Absorção capilar..... | 25 |
| 4.4.3 Difusão..... | 26 |
| 4.4.4 Migração Iônica..... | 27 |
| 4.5 Modelos para quantificar o coeficiente de difusão de cloretos no concreto..... | 27 |
| 4.5.1 Modelo Chalee et al. (2009)..... | 27 |
| 4.5.2 Modelo Luciano e Miltenberger (1999)..... | 29 |
| 4.5.3 Modelo Riding et al. (2013)..... | 31 |
| 4.4.4 Modelo Caré (2003)..... | 34 |
| 4.4.5 Modelo Oh e Jang (2004)..... | 36 |
| Tabela 01 - Variáveis primárias e secundárias consideradas nos modelos..... | 40 |
| 4.6 Principais fatores que influenciam a penetração de cloretos no concreto..... | 40 |
| 4.6.1 Temperatura..... | 41 |
| 4.6.2 Presença de fissuras..... | 41 |
| Figura 03 – Tabela de valores limites para a fissuração do concreto..... | 42 |
| 4.6.3 Tipo de cimento e adições minerais..... | 42 |
| 4.6.4 Cobrimento das armaduras..... | 43 |
| Figura 04 – Tabela de valores mínimos de cobrimento..... | 43 |
| 4.6.5 Relação água/cimento..... | 43 |
| 4.6.6 Ambiente de exposição..... | 44 |
| Figura 05 – Tabela das classes de agressividades ambientais..... | 44 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 45 |
| 5.1 Resultados dos modelos teóricos..... | 45 |
| 5.1.1 Modelo de Chalee et al..... | 45 |
| Tabela 02 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Chalee et al..... | 45 |
| 5.1.2 Modelo de Luciano e Miltenberger..... | 46 |
| Tabela 03 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Luciano e | |

| | |
|--|-----------|
| Miltenberger..... | 46 |
| 5.1.3 Modelo de Riding et al..... | 46 |
| Tabela 04 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Riding et al..... | 46 |
| 5.1.4 Modelo de Caré..... | 47 |
| Tabela 05 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Caré..... | 47 |
| 5.1.5 Modelo de Oh e Jang..... | 48 |
| Tabela 06 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Caré..... | 48 |
| 5.2 Comparação entre os modelos..... | 48 |
| Figura 06 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Chalee et al..... | 50 |
| Figura 07 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Luciano e Miltenberg..... | 50 |
| Figura 08 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Riding et al..... | 50 |
| Figura 09 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Caré..... | 51 |
| Figura 10 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Oh e Jang..... | 51 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 52 |
| REFERÊNCIAS..... | 53 |
| ANEXOS..... | 56 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material heterogêneo, de comportamento complexo, composto por cimento, agregados miúdos (areia), agregados graúdos (pedra ou brita), água e, em alguns casos, adições minerais, como cinza volante, pozolanas e sílica ativa, além de aditivos químicos. Esse material apresenta baixa resistência à tração, porém elevada resistência à compressão. Para resistir aos esforços de tração, são adicionadas barras de aço que constituem as armaduras da estrutura.

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados na construção civil, devido à sua facilidade de moldagem em diferentes formas e à capacidade de proteger as armaduras contra ações externas, contribuindo para sua durabilidade. A associação entre o concreto e o aço resulta em um material com boa resistência mecânica e elevada durabilidade, o que justifica sua ampla aplicação em estruturas de pequeno, médio e grande porte (Morais, 2020).

A partir da segunda metade do século XX, intensificaram-se as discussões no setor da construção civil acerca dos problemas relacionados à deterioração das estruturas. Embora as armaduras estejam inseridas no interior do concreto, elas permanecem suscetíveis a manifestações patológicas, especialmente à corrosão. Segundo Otieno et al. (2019), as principais causas desse fenômeno são a carbonatação e a penetração de íons cloreto, sendo esta última considerada a mais prejudicial.

De acordo com Dodds et al. (2017), a corrosão induzida por cloretos é um processo eletroquímico que ocorre quando esses íons atravessam a camada de concreto e atingem a armadura, rompendo a película passivadora que a protege. Esse mecanismo é particularmente relevante em ambientes costeiros, industriais ou em regiões onde há utilização de sais de degelo, nos quais a exposição aos cloretos é mais intensa.

Entre os mecanismos de transporte de cloretos no concreto, a difusão destaca-se como um dos mais importantes. Esse processo ocorre devido à diferença de concentração entre duas regiões, promovendo o deslocamento dos íons de áreas mais concentradas para áreas menos concentradas. No contexto do concreto armado, a difusão de cloretos assume papel fundamental na durabilidade das estruturas, uma vez que sua progressiva penetração pode desencadear a corrosão das armaduras, comprometendo a integridade estrutural ao longo do tempo.

Diante desse cenário, o estudo da difusão de cloretos no concreto justifica-se pela sua relevância para a durabilidade e a segurança das construções. A corrosão das armaduras representa um dos maiores desafios da engenharia civil, não apenas pelos riscos estruturais associados, mas também pelos elevados custos econômicos decorrentes da necessidade de manutenção e reparos frequentes. Assim, a compreensão dos mecanismos envolvidos no transporte de cloretos contribui para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de prevenção e controle da corrosão, promovendo estruturas mais duráveis, seguras e economicamente sustentáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o processo da difusão de cloretos em estruturas de concreto armado, buscando entender os mecanismos que estão envolvidos, os fatores que influenciam na sua penetração e os impactos na durabilidade das estruturas, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento de estratégias de prevenção e diminuição dessa patologia.

2.2 Objetivos específicos

1. Entender como funciona o mecanismo de difusão de cloretos no concreto e a relação do mesmo com as propriedades físicas e químicas do material.
2. Identificar as causas que influenciam na difusão de cloretos, como a porosidade, relação água/cimento, tipo de aglomerante e presença de aditivos.
3. Analisar métodos e modelos utilizados para determinar a difusividade de cloretos no concreto e prever sua progressão ao longo do tempo.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho adotou uma abordagem metodológica de natureza teórica e comparativa, fundamentada em uma revisão sistemática e crítica da literatura, com o objetivo de analisar o desempenho de diferentes modelos matemáticos empregados na estimativa da difusão de íons cloreto em estruturas de concreto armado. A estratégia metodológica permitiu identificar, organizar e confrontar modelos consagrados, bem como avaliar sua capacidade de reproduzir resultados experimentais reportados na literatura especializada.

A pesquisa bibliográfica foi conduzida a partir da consulta a artigos científicos publicados em periódicos nacionais e internacionais, indexados em bases de dados reconhecidas, com destaque para o Portal de Periódicos da CAPES. Como suporte ao gerenciamento das referências bibliográficas, utilizou-se o software Mendeley. Adicionalmente, foram consultados livros técnicos, teses e dissertações, priorizando estudos amplamente citados e diretamente relacionados ao fenômeno da difusão de cloretos no concreto armado.

A metodologia foi estruturada em três etapas principais, interdependentes entre si, conforme descrito a seguir.

a) Identificação, seleção e caracterização dos modelos de difusão de cloretos;

Na primeira etapa, realizou-se a identificação e seleção de cinco modelos matemáticos amplamente empregados na literatura para a estimativa do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, a saber: modelo de Chalee et al., modelo de Riding et al., modelo de Luciano e Miltenberger, modelo de Caré e modelo de Oh e Jang.

A escolha desses modelos fundamentou-se em critérios como: relevância científica, recorrência de aplicação em estudos anteriores, diversidade conceitual das formulações (empíricas, semiempíricas e analíticas) e consideração de diferentes variáveis associadas à composição do concreto, às condições ambientais e à microestrutura do material.

Cada modelo foi analisado quanto às hipóteses assumidas, às variáveis de entrada consideradas e à forma como o fenômeno da difusão de cloretos é representado matematicamente. Essa análise permitiu uma compreensão crítica das diferentes abordagens propostas na literatura e subsidiou a comparação entre os modelos selecionados.

b) Implementação dos modelos e organização da base de dados;

Na segunda etapa, os modelos selecionados foram implementados individualmente, respeitando-se rigorosamente as formulações originais propostas por seus respectivos autores, bem como as hipóteses e limitações inerentes a cada abordagem.

A base de dados utilizada nesta pesquisa foi composta por informações extraídas de estudos experimentais previamente publicados na literatura especializada, reunindo resultados de 169 misturas de concreto, com idades variando entre 28 e 182 dias. Esses dados experimentais foram originalmente empregados para a determinação dos coeficientes de difusão efetiva e aparente de íons cloreto, obtidos por meio dos ensaios NT BUILD 492 (1999) e NT BUILD 443 (1996), respectivamente. Parte significativa do banco de dados foi coletada a partir do estudo conduzido por Shafikhani e Chidiac (2019), que realizou uma revisão crítica de modelos para a quantificação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos, reunindo resultados experimentais provenientes de diferentes condições de mistura, materiais constituintes e métodos de ensaio. As tabelas contendo os dados experimentais extraídos desse estudo e utilizados na presente pesquisa encontram-se apresentadas nos Anexos, servindo de base para a análise comparativa e para a avaliação do desempenho dos modelos matemáticos investigados neste trabalho.

A base de dados contempla variáveis relevantes para o fenômeno de difusão, tais como: relação água/cimento (variando de 0,30 a 0,70), tipo e teor de materiais cimentícios suplementares (fumaça de sílica, cinza volante, escória de alto-forno moída e calcário), fração volumétrica de agregados, teor de cimento, tamanho máximo do agregado e idade do concreto. Quando determinadas propriedades físicas não eram explicitamente informadas nos estudos originais, foram adotados valores de referência amplamente aceitos na literatura.

Os dados experimentais foram organizados e padronizados de modo a possibilitar a aplicação consistente dos diferentes modelos. Nessa etapa, também se procedeu à distinção entre as variáveis consideradas explicitamente nas formulações dos modelos e aquelas incorporadas de forma implícita, como parâmetros relacionados à porosidade, à microestrutura do concreto, ao tempo de exposição e às condições ambientais. Essa sistematização assegurou a comparabilidade direta entre os resultados obtidos.

c) Avaliação do desempenho dos modelos e análise dos resultados.

Na etapa final, os valores do coeficiente de difusão estimados por meio da implementação dos modelos teóricos foram comparados com os valores experimentais reportados na literatura. Para essa finalidade, foi calculada a razão entre o coeficiente de difusão estimado pelo modelo e o coeficiente de difusão experimental, expressa pelo indicador DM/DE , o qual foi adotado como medida de desempenho e de aderência dos modelos aos dados experimentais.

Além da análise do indicador DM/DE , foram calculadas medidas estatísticas descritivas, incluindo média, desvio padrão e coeficiente de variação (CV), com o objetivo de avaliar a dispersão dos resultados e a consistência das estimativas fornecidas por cada modelo. Essa abordagem permitiu uma análise comparativa abrangente, possibilitando identificar tendências, limitações e níveis de confiabilidade associados às diferentes formulações avaliadas.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

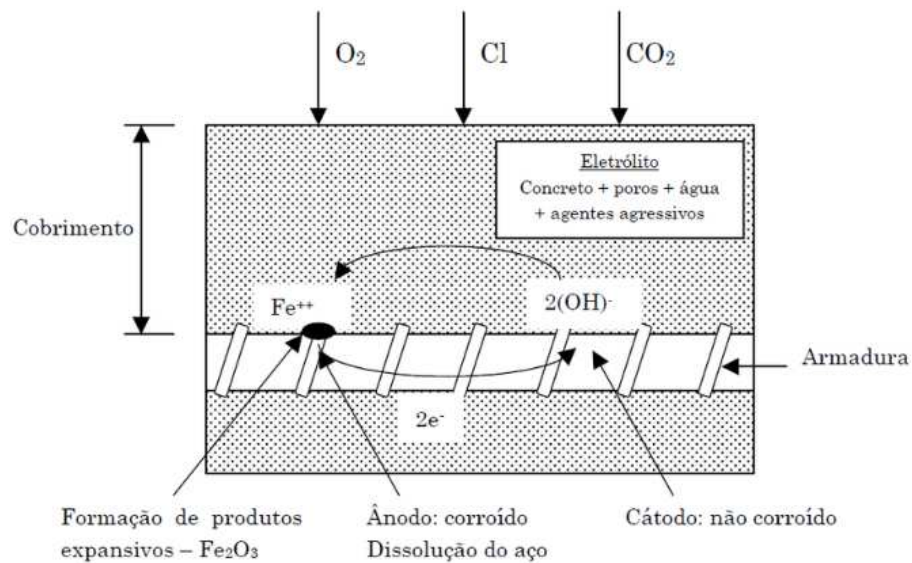
4.1 Corrosão

Segundo Helene (1993), a corrosão é um processo que ocorre quando um material interage com o ambiente à sua volta. Esse fenômeno origina-se de reações químicas ou eletroquímicas, que podem ser intensificadas ou não por fatores físicos ou mecânicos que adiantam sua deterioração.

A corrosão dos metais pode acontecer de duas maneiras: corrosão química, conhecida como oxidação e a corrosão eletroquímica, que ocorre em metais que são expostos a meios aquosos. A corrosão eletroquímica, que é mais frequente em estruturas de concreto armado, possui um caráter expansivo e assim pode reduzir a durabilidade dessas estruturas ao longo dos anos (Gentil, 1996; Andrade, 2001).

Segundo Helene (1993), essa corrosão ocorre devido ao movimento de elétrons e íons entre as regiões catódicas e anódicas por meio do eletrólito, ou seja, quando há formação de pilhas de corrosão, como é ilustrado na figura 01. Esse deslocamento é resultante da diferença de potencial devido ao contato de dois materiais de natureza química diferentes, que se estabelece entre essas regiões. Esse processo resulta em duas reações: uma de oxidação e outra de redução. Uma vez que no concreto armado, os elétrons liberados durante a oxidação percorrem o metal até a outra região, onde participam da redução do oxigênio. Em resumo, quando o metal oxida, ele perde elétrons e se transforma em um cátion, que se desprende da estrutura metálica, iniciando a dissolução do metal (Meira, 2017; Ribeiro et al., 2018).

Figura 01 – Modelo de corrosão por pilha.



Fonte: Cobenge (2019).

4.2 Corrosão por íons de cloreto

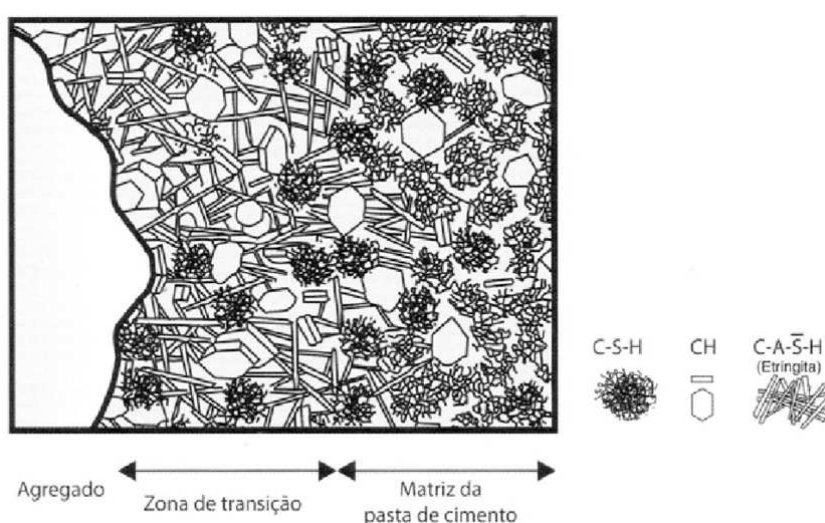
Quando os cloretos penetram no concreto, uma parte deles se liga quimicamente a compostos que contêm aluminatos, como o C3A (aluminato tricálcico) que é a fase mais reativa e domina a reação de hidratação durante as primeiras horas. E ao C4AF (ferroaluminato tetracálcico ou ferrita) que é essencial na resistência química do concreto, formando o sal de Friedel (formando o sal de Friedel ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)). Outra parte é absorvida pelo gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), enquanto o restante permanece livre, podendo provocar processos corrosivos. A entrada e a disseminação desses cloretos no concreto ocorrem por meio de um mecanismo duplo: primeiro, por sucção e, em seguida, por difusão. A difusão desses íons pelo concreto segue as diretrizes das leis de Fick.

Dentro da microestrutura do concreto, os cloretos podem estar presentes de três formas (Puyate et al, 1998), cloretos livres que são os mais preocupantes, pois podem se mover livremente pelo concreto e atingir a armadura, causando a ruptura da camada protetora e iniciando o processo de corrosão, cloretos francamente ligados que formam ligações físicas com componentes da matriz do concreto, mas de forma menos estável e cloretos fortemente ligados que interagem quimicamente com compostos do cimento. Eles também podem estabelecer ligações físicas com os hidratos de silicato de cálcio (CSH), que são a principal fase do cimento hidratado (Shakouri; Trejo, 2017).

4.3 Estrutura dos poros do concreto

A microestrutura do concreto é bem complexa e pode ser dividida em três zonas diferentes: a matriz (ou pasta), o agregado e a zona de transição, que tem um papel essencial na durabilidade do material, como ilustrado na figura 02. Essa zona de transição, apesar de ser semelhante à matriz, acaba sendo a parte mais frágil do concreto. Isso acontece porque, na interface com o agregado, forma-se uma película de água que eleva a relação água/cimento nessa região, resultando em uma porosidade maior (Mehta; Monteiro, 2014).

Figura 02 - Representação esquemática das zonas no concreto.



Fonte: Mehta & Monteiro (2014).

Esses caminhos e vazios na estrutura são causados pelo uso de mais água do que o necessário para a hidratação do cimento. Assim, quando o excesso de água evapora, ele deixa pequenos vazios na estrutura, junto com o ar inevitavelmente incorporado durante a mistura (Ribeiro, 2018).

O tamanho e a distribuição desses poros, determinam como os agentes externos entram e se movimentam na estrutura. Como explica Freire (2005), esses poros podem ser classificados em poros de ar incorporado (obtidos quando há emprego de aditivos incorporadores de ar), poros capilares (oriundos da saída de água livre do concreto) e poros de gel (formados pelo silicato de cálcio hidratado, C-S-H). Os poros capilares são os maiores responsáveis por favorecer a entrada dos agentes externos, já que criam caminhos interligados que facilitam a entrada de água e outras substâncias. Esses poros possibilitam o

transporte desses agentes, através do mecanismo de transporte do concreto, como a permeabilidade, absorção capilar e a difusão (Ribeiro, 2018).

4.4 Principais mecanismos de transporte de cloretos no concreto

Os mecanismos de transporte dos íons de cloreto para o concreto são os diferentes caminhos que esses íons percorrem para entrar na estrutura. Esse processo é preocupante porque os cloretos podem atingir a armadura e acelerar sua corrosão, comprometendo a durabilidade da construção. Isso pode acontecer de várias formas:

4.4.1 Permeabilidade

A permeabilidade é o movimento de um fluido através de um sólido poroso, causado por um gradiente de pressão, ou seja, pela facilidade com que o fluido atravessa o material sob diferentes pressões (Ribeiro, 2018). No caso do concreto, os cloretos podem penetrar por meio desse mecanismo, desde que estejam dissolvidos em uma solução salina (Santos, 2016). Assim, o transporte de cloretos depende tanto do fluxo de líquido que atravessa o concreto quanto da concentração de cloretos nesse líquido.

A adição de agregados ao concreto na pasta de cimento tende a aumentar sua permeabilidade, devido à formação de zonas de transição e microfissuras associadas. Quando se utilizam agregados densos, a permeabilidade do concreto de cobertura é fortemente influenciada pela permeabilidade da pasta de cimento, que, por sua vez, depende da relação água/cimento (a/c) e do grau de hidratação da pasta (Ribeiro, 2018).

A porosidade do concreto está intimamente ligada à sua permeabilidade. Isso significa que os fatores que afetam a compactação e a qualidade do concreto também têm impacto direto nessas propriedades. De acordo com Helene (1993), os poros que mais contribuem para a permeabilidade possuem dimensões que variam entre 0,1 μm e 1000 μm . O transporte de fluidos no concreto só ocorre quando os poros capilares formam um sistema contínuo. Em concretos com baixa relação água/cimento, essa continuidade é reduzida, o que diminui a permeabilidade.

4.4.2 Absorção capilar

A absorção capilar é o processo de movimentação de um fluido por meio dos poros do concreto, impulsionado por um gradiente de umidade. Esse fenômeno está diretamente

relacionado à microestrutura do concreto e ao seu grau de saturação. Conforme Helene (1993), a absorção capilar não ocorre em concretos totalmente saturados, para que ela aconteça, os poros precisam estar total ou parcialmente secos.

Teoricamente, poros menores geram maior pressão capilar e permitem uma maior altura de sucção, enquanto poros maiores resultam em menores alturas, mas em volumes absorvidos mais elevados. No entanto, Basheer, Kropp e Cleland (2001) observam que concretos com baixa relação água/cimento apresentam poros menores e menos interconectados, o que reduz tanto a altura de sucção quanto o volume absorvido.

Cascudo (1997) também enfatiza que a absorção depende principalmente da interconexão e do diâmetro dos poros. Segundo ele, poros com diâmetros menores exercem maior força de sucção capilar. Para Helene (1993), a relação água/cimento, o grau de hidratação e a composição do cimento (modificada com adições minerais) são os principais fatores que controlam o diâmetro dos poros no concreto.

4.4.3 Difusão

A difusão é um processo no qual as substâncias se deslocam de uma região para outra devido a uma diferença de potencial químico, geralmente de concentração (Ribeiro, 2018). Esse fenômeno pode ocorrer tanto em meios líquidos quanto em meios gasosos. Segundo Ribeiro (2018), trata-se de um transporte espontâneo de massa lançado por gradientes de concentração, em que a substância se movimenta entre dois meios em contato direto, buscando equilibrar as concentrações.

No concreto, para que os íons se desloquem, é necessário que haja um nível mínimo de umidade. Se os íons encontrarem uma região seca, sua difusão é interrompida. Por isso, os maiores coeficientes de difusão acontecem quando o concreto está saturado, diminuindo conforme a umidade reduz (Calçada, 2004).

A difusão é o principal mecanismo de entrada de agentes agressivos no concreto e tem grande influência no período inicial da corrosão (Stanish; Hooton; Thomas, 2000). Esse processo pode ser dividido em dois estágios, o estágio estacionário, onde o fluxo de substâncias em difusão é constante e uniforme e o estágio não estacionário onde o fluxo depende do tempo e da profundidade de penetração, variando ao longo do processo.

Esses estágios são representados pelas Leis de Fick (1855). No caso da difusão de cloretos no concreto, o estágio não estacionário ocorre quando os íons são transportados pelo concreto enquanto parte deles se fixa às fases do cimento. Já o estágio estacionário representa o momento em que não há mais fixação significativa, e o fluxo de íons cloreto passa a ocorrer de maneira constante (Ribeiro, 2018).

4.4.4 Migração Iônica

Para Ribeiro (2018), a migração é um processo de transporte que acontece quando existe um potencial elétrico que facilita o deslocamento dos íons que estão presentes para que se neutralize a consequência da diferença de potencial. Nepomuceno (2005), também define a migração como o movimento dos íons sob a influência de um campo elétrico, causado por uma diferença de voltagem. Esse processo é utilizado em testes rápidos para medir a permeabilidade de íons.

A diferença de potencial geralmente surge entre dois eletrodos, um positivo e outro negativo, fazendo com que os íons se movimentam em direção ao eletrodo com carga diferente. Assim, a migração iônica permite a passagem de íons de áreas com maiores tensões para áreas com menores tensões. Nas estruturas de concreto, essa diferença de potencial que promove a migração de cloretos ocorre entre as regiões catódica e anódica, especialmente quando um processo corrosivo se instala (Calçada, 2004).

Na prática, esses mecanismos de transporte no concreto podem ocorrer de forma isolada ou de forma conjunta. Quando atuam de forma conjunta, é comum considerarmos o mecanismo predominante para simplificar a compreensão desse processo (Medeiros, 2008).

4.5 Modelos para quantificar o coeficiente de difusão de cloretos no concreto

4.5.1 Modelo Chalee et al. (2009)

Quando pensamos em proteger nossas estruturas contra a corrosão, entender como os cloretos penetram no concreto ao longo dos anos é essencial. Chalee et al. (2009) propuseram um modelo que nos ajuda justamente nisso, ao estimar como o coeficiente de difusão de cloretos se comporta em concretos com cinzas volantes expostos a ambientes marinhos por longos períodos.

O modelo utiliza uma relação exponencial entre o tempo e a difusão de cloretos, permitindo acompanhar a redução da difusividade com o avançar dos anos, refletindo o efeito da hidratação e do refino dos poros no concreto.

Este modelo foi validado experimentalmente, considerando: Relações água/cimento (a/c) de 0,45 a 0,65; Teores de cinzas volantes de 0% a 50% em massa do aglomerante.

As bases experimentais utilizadas por Chalee et al. (2009) para a determinação do coeficiente de difusão (difusividade) são apresentadas em diversos estudos da literatura. Entre eles, destacam-se os trabalhos de Elahi et al. (2010), Dousti et al. (2013) e Frederiksen et al. (1997), que fornecem conjuntos de dados amplamente reconhecidos e utilizados em modelos preditivos de transporte de cloretos.

Dessa forma, ele consegue trazer para a prática os benefícios das cinzas volantes na redução da difusão de cloretos, mesmo sem exigir dados complexos como teor de cimento ou outros materiais cimentícios suplementares além das cinzas volantes, o que facilita sua aplicação em projetos reais.

A equação que representa o modelo é:

$$Da = (86400 * t)^{-m}$$

onde o expoente m é calculado a partir de:

$$m = (a1 * (\frac{a}{cm}) + a2) * FA + (a3 * (\frac{a}{cm}) + a4)$$

em que:

Da : Coeficiente de difusão aparente em função do tempo (m²/s);

t : Tempo (dias);

FA : Fração de cinzas volantes em massa do ligante (% por cm);

a/cm : Relação água/aglomerante;

a1, a2, a3 e a4: coeficientes ajustados em laboratório.

De maneira prática, o modelo de Chalee et al. (2009) permite que engenheiros visualizem a redução do coeficiente de difusão ao longo do tempo em estruturas expostas a ambientes agressivos, auxiliando no planejamento da durabilidade e no dimensionamento de cobrimentos para estruturas de concreto em zonas costeiras.

4.5.2 Modelo Luciano e Miltenberger (1999)

Luciano e Miltenberger (1999) desenvolveram um modelo estatístico para estimar o coeficiente de difusão efetivo de íons cloreto (D_{ef}) em concretos, a partir de um extenso banco de dados contendo 420 amostras de concretos comerciais e de laboratório produzidos em diferentes regiões dos Estados Unidos. Os autores determinaram o coeficiente de difusão utilizando a equação de Nernst-Einstein e um ensaio de migração em regime permanente, conduzido sob uma diferença de potencial elétrico de 12V (volts).

O banco de dados considerou uma ampla variação de parâmetros relacionados à composição e às condições de cura do concreto, incluindo: Relação água/cimento entre 0,25 e 0,65; Teor de cimento variando de 250 a 600 kg/m³; Níveis de substituição por sílica ativa (entre 0 e 10%), cinza volante (entre 0 e 45%) e escória granulada de alto-forno moída (entre 0 e 70%); Tempos de cura entre 3 e 1100 dias; Temperatura de mistura variando entre 10 e 38 °C.

Com base nesses dados, os autores ajustaram um modelo estatístico multivariado não linear que permite estimar o coeficiente de difusão efetivo a partir das principais variáveis que influenciam a microestrutura do concreto e, conseqüentemente, sua permeabilidade aos íons cloreto.

A expressão geral proposta por Luciano e Miltenberger pode ser representada como:

$$D_{cl} = 3.171 * 10^{-14} * \exp (a_1 + a_2 x_1 + a_3 x_2 + a_4 x_3 + a_5 x_4 + a_6 x_5 + a_7 x_6 + a_8 x_7 + a_9 x_8 + a_{10} x_1 x_4 + a_{11} x_1 x_6 + a_{12} x_4 x_6)^2$$

onde:

D_{cl} : Coeficiente de difusão efetivo de cloretos (m²/s);

a_1, a_2, \dots, a_{12} : Coeficientes de regressão obtidos empiricamente;

x_1, x_2, \dots, x_8 : Variáveis adimensionais normalizadas, que representam as características do concreto e as condições de ensaio.

As variáveis do modelo foram padronizadas para eliminar diferenças de escala entre os parâmetros e permitir a comparação direta de seus efeitos. A normalização foi realizada em torno dos valores médios e faixas típicas observadas no conjunto de dados, conforme as seguintes expressões:

Relação água/cimento (w/cm):

$$x_1 = \frac{w/cm - 0.45}{0.20}$$

Teor de cimento (kg/m³):

$$x_2 = \frac{cm - 425}{175}$$

Teor de sílica ativa (SF, %):

$$x_3 = \frac{SF - 5}{5}$$

Teor de cinza volante (FA, %):

$$x_4 = \frac{FA - 22.5}{22.5}$$

Teor de escória de alto-forno moída (GGBFS, %):

$$x_5 = \frac{GGBFS - 35}{35}$$

Tempo de cura (dias):

$$x_6 = \frac{\log(t) - 2}{3}$$

Temperatura (K):

$$x_7 = \frac{T - 297}{14}$$

Angularidade do agregado graúdo:

$x_8 = 1$ para agregado angular e 0 para agregado arredondado.

O modelo também reforça como a difusão de íons cloreto no concreto resulta da ação combinada de diversos parâmetros. A relação água/cimento e o conteúdo de ligante, por exemplo, estão diretamente associados à formação da porosidade capilar. Relações água/cimento mais elevadas geram um sistema de poros mais contínuo e interligado, favorecendo o transporte dos íons. Da mesma forma, a incorporação de materiais pozolânicos como sílica ativa, cinza volante e escória contribui para o refinamento da microestrutura, reduzindo a permeabilidade e, conseqüentemente, o coeficiente de difusão.

Além disso, o período de cura e a temperatura de exposição influenciam o progresso da hidratação e o preenchimento progressivo dos poros; em geral, tempos maiores de cura e temperaturas moderadamente elevadas promovem estruturas menos permeáveis, resultando em menores valores de D_e (difusividade Efetiva). Por fim, características relacionadas aos agregados, como a morfologia do agregado graúdo (mais angular ou mais arredondado), também interferem na conectividade dos poros da zona de transição pasta-agregado, impactando de forma perceptível o processo difusivo.

Por se tratar de um modelo empírico estatístico, sua aplicação deve ser restrita ao intervalo de variabilidade dos dados utilizados no estudo original. As variáveis consideradas são bons indicadores da porosidade e da estrutura interna do concreto, mas não capturam integralmente todos os mecanismos que controlam a difusão de íons, como o efeito de carbonatação ou a saturação da amostra.

Assim, o modelo de Luciano e Miltenberger (1999) fornece uma ferramenta prática para estimar a difusividade de concretos com diferentes composições, desde que respeitados os limites experimentais dentro dos quais foi desenvolvido.

4.5.3 Modelo Riding et al. (2013)

Riding et al. (2013) desenvolveu um modelo preditivo para estimar a variação temporal e térmica do coeficiente de difusão aparente de íons cloreto em concretos contendo diferentes tipos e teores de materiais cimentícios suplementares (SCMs). O modelo incorpora tanto o efeito do tempo de exposição quanto o da temperatura, assim definindo um valor limite final (D_{ult}) para o coeficiente de difusão, correspondente ao valor estimado para 100 anos de idade.

O modelo considera que o coeficiente de difusão decresce com o tempo e tende assintoticamente a um valor limite D_{ult} . Essa variação é descrita pela seguinte expressão geral:

$$D_a(t, T) = [D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m + D_{ult} \left(1 - \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m\right)] \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \right]$$

Na qual, a expressão D_{ult} é obtida por meio da equação:

$$D_{ult} = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{36500}\right)^m$$

onde:

$D_a(t, T)$: Coeficiente de difusão em função do tempo e da temperatura (m^2/s);

D_{ref} : Coeficiente de difusão de referência, medido a uma idade padrão ($t_{ref} = 28 \text{ dias e } T_{ref} = 20^\circ C$);

D_{ult} : Coeficiente de difusão limite, correspondente ao valor aos 100 anos;

a_1 : Parâmetro de ajuste empírico;

m : Fator de envelhecimento, que representa a taxa de redução de D ao longo do tempo;

U : Energia de ativação (J/mol);

R : Constante universal dos gases ($8,314 J/mol \cdot K$);

T : Temperatura absoluta durante o período de exposição (K);

T_{ref} : Temperatura de referência ($293 K$, equivalente a $20^\circ C$).

Assim, o termo $\exp[-U/R(1/T - 1/T_{ref})]$ corrige o coeficiente de difusão em função da temperatura, enquanto o termo exponencial em t^m representa a redução temporal da difusividade devido à hidratação progressiva e à formação de produtos pozolânicos.

O coeficiente de difusão de referência aos 28 dias (D28d) e o fator de envelhecimento (m) são determinados a partir da relação água/cimento e dos níveis de substituição por SCMs (sílica ativa (SF), cinza volante (FA), escória de alto-forno (GGBFS), metacaulim (MK) e cinza volante ultra fina (UFFA)).

O banco de dados utilizado pelos autores abrangeu concretos com grande amplitude de propriedades: Relação água/cimento entre 0,20 e 0,80; Teor de ligante total entre 225 e 725 kg/m³; Sílica ativa (SF) (entre 0 e 12%) ; UFFA Cinza volante ultra fina (entre 0 e 16%); Metacaulim (MK) de (entre 0 e 16%); Cinza volante (FA) (entre 0 e 50%); Escória de alto-forno moída (GGBFS) (entre 0 e 70%).

Os ensaios experimentais foram conduzidos com base no teste de imersão ASTM C1556, com a modificação sugerida por Stanish e Thomas (2003), que permite levar em conta a redução do coeficiente de difusão ao longo do próprio ensaio, superando a limitação do método padrão que assume difusividade constante.

Riding et al (2013). propuseram relações empíricas específicas para calcular Dref conforme a presença e o tipo de SCM, e para estimar m em função da água/cimento e das adições minerais.

Alguns exemplos dessas relações são:

Concretos sem SCMs (referência):

$$D_{28d} = D_{ref} = a_1 e^{\frac{(a/cm)}{a_2}}$$

Com sílica ativa (SF):

$$D_{SF} = D_{ref} = D_{28d} (a_3 + a_4 e^{-\frac{SF}{a_5}})$$

Com cinza volante ultra fina (UFFA):

$$D_{UFFA} = D_{ref} = D_{28d} (a_6 + a_7 e^{\frac{UFFA}{a_8}})$$

Com metacaulim (MK):

$$D_{MK} = D_{ref} = D_{28d} (a_9 + a_{10} e^{-\frac{MK}{a_{11}}})$$

O fator de envelhecimento (m) também foi expresso como uma função linear da substituição por cinza volante e escória, conforme:

$$m = a_{12} + a_{13} \left(\frac{FA}{50} \right) + \left(\frac{GGBFS}{70} \right); 0 < m < 1$$

onde os coeficientes empíricos (a_{12} e a_{13}) foram ajustados por regressão com base nos dados experimentais.

O modelo de Riding et al. (2013) representa um avanço importante em relação a modelos anteriores, pois combina os efeitos do tempo, da temperatura e da composição do concreto, incluindo os materiais pozolânicos. Contudo, algumas variáveis microestruturais, como o volume de agregados, o teor total de material cimentício e a espessura média da pasta, não são consideradas explicitamente, sendo absorvidas indiretamente pelos parâmetros empíricos.

Os autores também assumem que os efeitos da sílica ativa (SF) e do metacaulim (MK) sobre o fator de envelhecimento (m) são negligenciáveis, limitando a precisão do modelo para concretos com altos teores dessas adições.

4.4.4 Modelo Caré (2003)

Caré (2003), desenvolveu um modelo semi-analítico destinado à estimativa do coeficiente de difusão efetivo de íons cloreto no concreto, considerando explicitamente a influência dos agregados e da zona de transição interfacial (ITZ). O modelo baseia-se nas formulações teóricas de Xi e Bazant (1999) e nos princípios de compósitos difusivos descritos por Christensen (1979), sendo estruturado para representar o concreto como um material trifásico composto por pasta de cimento, agregados e ITZ.

O objetivo central do modelo é capturar dois efeitos antagônicos sobre a difusão de cloretos: (i) a redução da difusividade causada pela presença dos agregados, que aumentam a tortuosidade do caminho de difusão (efeito geométrico), e (ii) o aumento da difusividade global provocado pela ITZ, que constitui uma região mais porosa e permeável em torno dos agregados (efeito microestrutural). Dessa forma, o modelo de Caré incorpora simultaneamente aspectos geométricos e microestruturais do concreto.

A equação proposta por Caré é expressa como:

$$D_{cl} = D_p [a_1 + a_2 V_{ITZ}]$$

$$a_2 = 1 - V_a$$

$$\tau\tau = \frac{2}{2+V_a}$$

onde,

D_{cl} : Coeficiente de difusão efetivo do concreto (m²/s);

D_p : Coeficiente de difusão da pasta de cimento;

a_1 : Parâmetro empírico associado à matriz da pasta de cimento;

a_2 : Parâmetro empírico relacionado à influência da zona de transição interfacial (ITZ) na difusão dos cloretos;

V_a : Fração volumétrica de agregados no concreto;

V_{ITZ} : Fração volumétrica da zona de transição interfacial;

$\tau\tau$: Tortuosidade da rede de poros do concreto.

Nesta formulação, o termo (a1) está associado ao efeito geométrico dos agregados, traduzindo a redução da difusividade devido ao aumento da tortuosidade ($\tau\tau$) do meio. Assim, a1 é dependente da fração volumétrica de agregado V_a , de modo que o aumento de V_a tende a reduzir o valor de a1 e, conseqüentemente, o coeficiente de difusão global. Por outro lado, o termo a2 e V_{ITZ} representa o efeito microestrutural da ITZ, responsável por elevar a difusividade devido à maior porosidade e conectividade dessa região em comparação à pasta de cimento. Dessa forma, o modelo equilibra matematicamente a ação oposta dessas duas fases, o agregado e a ITZ sobre a difusão de íons cloreto.

A fração volumétrica da ITZ (V_{ITZ}) é determinada por meio de uma formulação geométrica baseada em modelos estatísticos de compósitos, sendo expressa como função da

fração volumétrica de agregados (V_a), da distribuição granulométrica e da espessura média da ITZ (δITZ). Esta espessura foi aproximada por Caré como o dobro do tamanho médio das partículas de cimento, o que fornece uma estimativa simplificada, porém coerente, da extensão da região de transição ao redor dos agregados.

A partir dessa abordagem, o modelo de Caré permite estimar a relação entre a difusividade do concreto e a da pasta de cimento por meio da seguinte forma adimensional:

$$\frac{D_{cl}}{D_p} = a_1 + a_2 V_{ITZ}$$

Essa equação mostra que, para um determinado valor de D_p , a difusividade efetiva do concreto aumenta linearmente com o volume de ITZ, enquanto o parâmetro a_1 reduz o valor de D_{cl} conforme cresce a fração de agregado, refletindo o aumento da tortuosidade. Assim, o modelo representa de forma simplificada, porém fisicamente fundamentada, o comportamento difusivo de compósitos cimentícios, conciliando efeitos de geometria e microestrutura.

A calibração experimental de a_1 e a_2 foi realizada com base em dados obtidos de pastas de cimento e argamassas com relação água/cimento de 0,45, frações volumétricas de agregado variando entre 0 e 50%, e diferentes distribuições de tamanho de agregado. O modelo, portanto, é aplicável a uma ampla faixa de misturas e fornece uma estimativa coerente da influência dos agregados e da ITZ sobre a difusão de cloretos no concreto. No entanto, deve-se ressaltar que a formulação não considera explicitamente a difusividade própria da ITZ, o conteúdo total de material cimentício ou a espessura média da pasta, que são assumidos como constantes nas análises.

4.4.5 Modelo Oh e Jang (2004)

Oh e Jang (2004) desenvolveram um modelo analítico para estimar a difusividade efetiva de íons na pasta de cimento e no concreto, considerando explicitamente a influência da microestrutura do material. O modelo parte da premissa de que a pasta de cimento pode ser representada como um compósito bifásico, formado por poros capilares, responsáveis pelo transporte predominante dos íons, e por uma fase sólida porosa, constituída principalmente pelos produtos de hidratação do cimento.

Para descrever o transporte nesse meio heterogêneo, os autores empregaram a aproximação de meios efetivos generalizados (Generalized Effective Medium – GEM). Essa abordagem permite estimar uma propriedade macroscópica, como a difusividade, a partir das propriedades das fases individuais e da forma como elas se distribuem e se conectam no material.

A difusividade efetiva da pasta de cimento, representada por D_p , é obtida a partir de uma equação analítica derivada do modelo GEM, originalmente formulada para a condutividade elétrica e posteriormente convertida em coeficiente de difusão por meio da relação de Nernst–Einstein.

De forma geral, a equação de D_p pode ser expressa como:

$$D_p = D_0 \left[m_\phi + \sqrt{m_\phi^2 + \frac{\phi_c^p}{1-\phi_c^p} \left(\frac{D_s}{D_0}\right)^{1/n}} \right]^n$$

onde,

D_p : Coeficiente de difusão efetivo da pasta de cimento (m²/s);

D_0 : Coeficiente de difusão do cloreto em solução livre (água) (m²/s);

D_s : Coeficiente de difusão da fase sólida porosa da pasta de cimento (m²/s).

Essa expressão fornece a difusividade da pasta de cimento em função da estrutura da rede de poros e da difusividade relativa da fase sólida.

O termo m_ϕ é definido como:

$$m_\phi = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{D_s}{D_0}\right)^{1/n} + \frac{\phi_{cap}^p}{1-\phi_c^p} \left(1 - \left(\frac{D_s}{D_0}\right)^{1/n}\right) - \frac{\phi_c^p}{1-\phi_c^p} \right]$$

onde,

m_ϕ : Parâmetro auxiliar do modelo GEM, que combina os efeitos da porosidade capilar atual, da porosidade crítica e da difusividade da fase sólida;

n : Expoente de percolação, que descreve a conectividade da rede de poros capilares. É determinado experimentalmente;

ϕ_{cap}^p : Porosidade capilar da pasta de cimento, calculada a partir da estequiometria das reações de hidratação e das reações pozolânicas;

ϕ_c^p : Porosidade capilar crítica da pasta de cimento. Representa o limiar de percolação da rede de poros capilares. No modelo, é assumida igual a 0,18.

Fisicamente, $m\phi$ atua como um termo de transição entre dois regimes de transporte: Um regime não percolado, em que os poros capilares ainda não formam uma rede contínua; e um regime percolado, em que a difusão ocorre predominantemente pelos poros interconectados.

A difusividade efetiva do concreto, indicada DCL, é calculada a partir da difusividade da pasta D_p , considerando a presença dos agregados e da zona de transição interfacial (ZTI). Para isso, os autores empregaram o modelo esférico composto, originalmente proposto por Hashin (1962).

No modelo esférico composto, a zona de transição interfacial (ZTI) é representada como uma camada mais porosa ao redor dos agregados, assumindo-se uma porosidade igual a 1,5 vezes a porosidade capilar da pasta e uma espessura média de 20 μm , de modo a incorporar seu efeito como caminho preferencial para a difusão.

$$D_{cl} = D_p \left(1 + \frac{V_a}{\frac{1-V_a}{3} + \frac{1}{2(D_{ITZ}/D_p)-1}} \right)$$

onde,

D_{cl} : Coeficiente de difusão efetivo de cloretos no concreto (m²/s);

V_a : Fração volumétrica de agregados no concreto;

D_{ITZ} : Coeficiente de difusão da zona de transição interfacial (ITZ) (m²/s).

Essa formulação considera os agregados como inclusões esféricas envolvidas por uma camada de ZTI, que apresenta difusividade superior à da pasta devido à sua maior porosidade.

O modelo de Oh e Jang (2004) apresenta como principal vantagem a integração entre microestrutura da pasta, porosidade capilar, conectividade dos poros e efeito da ZTI, permitindo uma estimativa mais realista da difusividade do concreto. Variáveis como relação água/cimento, teor de cimento e adições minerais são consideradas implicitamente por meio da porosidade capilar.

Por outro lado, o modelo não considera explicitamente a tortuosidade real do caminho de difusão nem a espessura efetiva da pasta de cimento, o que pode limitar sua aplicação em concretos com microestruturas muito heterogêneas.

A Tabela 01 apresenta uma síntese das variáveis primitivas e secundárias consideradas nos modelos de difusão de cloretos analisados, destacando a forma como cada abordagem incorpora os principais fatores que influenciam o transporte dos íons no concreto. Observa-se que variáveis globais, como a relação água/material cimentício e o tempo de exposição, são consideradas diretamente pela maioria dos modelos, enquanto aspectos microestruturais, como porosidade da pasta, zona de transição interfacial e caminhos preferenciais de difusão, são, em geral, introduzidos de forma indireta ou apenas em modelos de maior complexidade. Assim, a comparação evidencia que os modelos diferem principalmente quanto ao nível de detalhamento adotado, refletindo um equilíbrio entre simplicidade de aplicação e representatividade física dos mecanismos de difusão.

Tabela 01 - Variáveis primárias e secundárias consideradas nos modelos.

| Variáveis primárias e secundárias consideradas nos modelos | | | | | |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------|
| Variáveis | Modelos | | | | |
| Primárias | Chalee et al. (2009) | Luciano e Miltenberger (1999) | Riding et al. (2013) | Caré (2003) | Oh e Jang (2004) |
| Relação água/material cimentício (a/cm) | X | X | X | | |
| Materiais cimentícios suplementares (SCMs) | X | X | X | | |
| Consumo de cimento (Cm) | | X | | | |
| Tempo de exposição | X | X | X | | |
| Volume de agregados (Va) | | | | X | X |
| Distribuição granulométrica | X | | | X | |
| Secundárias | Chalee et al. (2009) | Luciano e Miltenberger (1999) | Riding et al. (2013) | Caré (2003) | Oh e Jang (2004) |
| Caminho preferencial de difusão | X | X | | | X |
| Porosidade da pasta de cimento | | | | | X |
| Porosidade efetiva | | | | | X |
| Coefficiente de Difusão da pasta (Dp) | | | | | X |
| Volume e espessura da zona de transição interfacial (ITZ) | | | | | X |
| Coefficiente de difusão da ITZ | | | | | X |

Fonte: Autores (2026).

4.6 Principais fatores que influenciam á penetração de cloretos no concreto

Vários elementos podem acelerar ou dificultar a penetração de cloretos no concreto armado, impactando diretamente a corrosão das armaduras quando esses agentes agressivos chegam até elas. A seguir, vamos explorar os principais fatores que influenciam esse processo.

4.6.1 Temperatura

A temperatura influencia a penetração de cloretos de diferentes formas. Quando elevada, acelera a corrosão, aumenta a mobilidade dos íons e facilita seu transporte na microestrutura do concreto. Já em temperaturas mais baixas, há maior condensação e acúmulo de umidade, o que também pode favorecer esse transporte (Casudo, 1997; Andrade, 1992; Figueiredo, 2005).

Além disso, a temperatura durante a cura do concreto tem um papel importante. Estudos mostram que concretos com cimento CP II F e CP IV curados em temperaturas mais altas apresentam menor penetração de cloretos e maior resistência à compressão (Pereira, 2001). Por outro lado, temperaturas baixas durante a cura aumentam a difusão de cloretos, um efeito que pode ser amenizado, mas não completamente eliminado, com um tempo de cura prolongado Gjörv (2015).

4.6.2 Presença de fissuras

A fissuração no concreto facilita a entrada e movimentação de agentes agressivos, como os cloretos, que podem atingir a armadura e causar corrosão. Estruturas expostas à água, vapor ou solo contendo cloretos são especialmente vulneráveis, pois as fissuras funcionam como portas de entrada para esses agentes.

Calçada (2004) apresentou estudos em que fissuras foram induzidas por tração em corpos de prova de concreto com fibras de aço, que depois passaram por ciclos de molhagem e secagem. Os resultados mostraram que, em elementos fissurados, a concentração de cloretos aumentou de forma mais acentuada ao longo do tempo.

Além disso, observou-se que, quanto maior a resistência do concreto, maior o aumento na difusão dos cloretos devido à fissuração. Para concretos com resistência de 45, 80 e 100 MPa, os coeficientes de difusão cresceram 33%, 38% e 48%, respectivamente. A taxa de penetração dos cloretos depende tanto da abertura da fissura quanto da qualidade do concreto.

A NBR 6118 (2014) explica que as fissuras em estruturas de concreto armado são inevitáveis, principalmente devido à baixa resistência do concreto à tração e à sua grande variabilidade. Para garantir a durabilidade das estruturas, a norma estabelece limites para a

abertura das fissuras (w_k), levando em conta fatores como a classe de agressividade ambiental, o tipo de concreto estrutural e as condições de uso, como é ilustrado na Figura 03.

Figura 03 – Tabela de valores limites para a fissuração do concreto.

Tabela 13.4 – Exigências de durabilidade relacionadas à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

| Tipo de concreto estrutural | Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão | Exigências relativas à fissuração | Combinação de ações em serviço a utilizar |
|--|---|------------------------------------|---|
| Concreto simples | CAA I a CAA IV | Não há | – |
| Concreto armado | CAA I | ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm | Combinação frequente |
| | CAA II e CAA III | ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm | |
| | CAA IV | ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm | |
| Concreto protendido nível 1 (protensão parcial) | Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II | ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm | Combinação frequente |
| Concreto protendido nível 2 (protensão limitada) | Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV | Verificar as duas condições abaixo | |
| | | ELS-F | Combinação frequente |
| | | ELS-D ^a | Combinação quase permanente |
| Concreto protendido nível 3 (protensão completa) | Pré-tração com CAA III e IV | Verificar as duas condições abaixo | |
| | | ELS-F | Combinação rara |
| | | ELS-D ^a | Combinação frequente |

Fonte: NBR 6118 (2014).

4.6.3 Tipo de cimento e adições minerais

Segundo Cascudo (1997), os cimentos com adições de escória de alto-forno e materiais pozolânicos, como cinza volante e sílica ativa, aumentam a compacidade do concreto, tornando-o menos propenso à penetração de líquidos, gases e íons. No caso das escórias de alto-forno, elas não só reduzem a taxa de difusão dos íons, mas também se combinam com os cloretos, formando o sal de Friedel, que se fixa de forma estável ao concreto.

Ferreira (2003) também aponta que as adições minerais melhoram a durabilidade do concreto, reduzindo a penetração dos íons cloreto, a absorção capilar e aumentando a resistividade, o que aumenta a vida útil das estruturas.

4.6.4 Cobrimento das armaduras

De acordo com Cascudo (1997), o concreto que cobre a armadura desempenha um papel essencial como primeira linha de defesa contra agentes agressivos, oxigênio e umidade, além de criar um ambiente alcalino que contribui para a proteção química da armadura. Por isso, quanto mais espessa for a camada de cobrimento, maior será a proteção oferecida às armaduras. A NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece valores mínimos de cobrimento, variando conforme a classe de agressividade do ambiente, conforme detalhado na figura 04.

Figura 04 – Tabela de valores mínimos de cobrimento.

Tabela 7.2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

| Tipo de estrutura | Componente ou elemento | Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1) | | | |
|----------------------------------|--|--|----|-----|-----------------|
| | | I | II | III | IV ^c |
| | | Cobrimento nominal mm | | | |
| Concreto armado | Laje ^b | 20 | 25 | 35 | 45 |
| | Viga/pilar | 25 | 30 | 40 | 50 |
| | Elementos estruturais em contato com o solo ^d | 30 | | 40 | 50 |
| Concreto protendido ^a | Laje | 25 | 30 | 40 | 50 |
| | Viga/pilar | 30 | 35 | 45 | 55 |

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118 (2023).

4.6.5 Relação água/cimento

De acordo com Cascudo (1997), a relação água/cimento (a/c) é um dos principais fatores que influencia diretamente a densidade e a porosidade da pasta de cimento. Uma relação baixa entre água e cimento ajuda a retardar a penetração de cloretos e dificulta a entrada de umidade e outros agentes agressivos.

Nepomuceno (2005) e Pereira (2001) também destacam que, quanto maior a relação a/c, maior será a porosidade e a permeabilidade do concreto, o que facilita a entrada de

cloretos. Olliver e Torrenti (2014) explicam que a permeabilidade e a difusão dependem da interconexão dos poros capilares, que estão diretamente ligadas à relação água/cimento e à hidratação do cimento. No entanto, tentar reduzir essa interconexão pode não ser eficaz, pois pode resultar no surgimento de microfissuras.

4.6.6 Ambiente de exposição

O ambiente desempenha um papel fundamental no risco de uma estrutura ser atacada por íons cloretos, além de poder apresentar outros tipos de agressões. A norma NBR 6118 (ABNT, 2023) trata da proteção das estruturas, classificando os níveis de agressividade ambiental, conforme apresentado na Figura 05. Essa tabela serve como referência para estabelecer critérios mínimos de cobrimento, resistência, relação a/c e fissuração. Segundo Gjörv (2015), em áreas com atmosfera marítima, o grau de saturação capilar pode atingir entre 80% e 90% na camada de 40 a 50 mm, uma espessura comum para o concreto de cobrimento em ambientes agressivos. Esse alto teor de umidade favorece a difusão iônica.

Figura 05 – Tabela das classes de agressividades ambientais.

Tabela 6.1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

| Classe de agressividade ambiental | Agressividade | Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto | Risco de deterioração da estrutura |
|-----------------------------------|---------------|--|------------------------------------|
| I | Fraca | Rural | Insignificante |
| | | Submersa | |
| II | Moderada | Urbana ^{a, b} | Pequeno |
| III | Forte | Marinha ^a | Grande |
| | | Industrial ^{a, b} | |
| IV | Muito forte | Industrial ^{a, c} | Elevado |
| | | Respingos de maré | |

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte:

NBR 6118 (2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados dos modelos teóricos

A avaliação dos modelos teóricos foi realizada a partir da razão DM/DE, considerando não apenas os valores médios, mas também o desvio padrão e o coeficiente de variação, de modo a analisar simultaneamente a tendência dos modelos e sua robustez estatística.

As diferenças observadas entre os modelos estão diretamente associadas aos parâmetros dominantes adotados em cada formulação, bem como à forma como fatores ambientais, microestruturais e temporais são ponderados.

De maneira geral, observa-se que modelos com maior peso atribuído a parâmetros ambientais e ao tempo de exposição tendem à superestimação do coeficiente de difusão, enquanto modelos baseados predominantemente em parâmetros microestruturais do concreto apresentam tendência à subestimação.

5.1.1 Modelo de Chalee et al.

Tabela 02 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Chalee et al.

| Modelo Chalee et al. | | |
|----------------------|---------------|-----------------------------|
| Média (Dm/De) | Desvio Padrão | Coeficiente De Variação (%) |
| 1,6613 | 0,6527 | 39,29 |

Fonte: Autores (2026).

O modelo de Chalee et al. apresentou média de DM/DE=1,6613, indicando superestimação dos valores experimentais. Esse comportamento está fortemente relacionado ao predomínio de parâmetros ambientais, especialmente temperatura e umidade, que exercem influência direta no aumento do coeficiente de difusão.

O elevado desvio padrão e o coeficiente de variação de 39,29% indicam que o modelo é altamente sensível às variações desses parâmetros, o que resulta em grande dispersão dos resultados. Quando comparado a modelos com maior controle microestrutural, como o de Luciano e Miltenberger, observa-se que o modelo de Chalee et al. apresenta maior conservadorismo, porém com menor estabilidade estatística.

Assim, trata-se de um modelo que privilegia a segurança, mas cuja aplicação deve ser cautelosa devido à elevada variabilidade.

5.1.2 Modelo de Luciano e Miltenberger

Tabela 03 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Luciano e Miltenberger.

| Modelo Luciano e Miltenberger | | |
|--------------------------------------|---------------|-----------------------------|
| Média (Dm/De) | Desvio Padrão | Coeficiente De Variação (%) |
| 0,1303 | 0,0127 | 9,77 |

Fonte: Autores (2026).

O modelo de Luciano e Miltenberger apresentou média de $DM/DE=0,1303$, caracterizando forte subestimação do coeficiente de difusão. Esse comportamento está associado ao fato de o modelo ser fortemente governado por parâmetros microestruturais, como relação água/cimento e grau de hidratação, atribuindo menor peso às condições ambientais externas.

O baixo desvio padrão e o coeficiente de variação reduzido (9,77%) evidenciam alta consistência estatística, indicando que o modelo responde de forma previsível às variações de entrada. Em comparação com modelos ambientalmente sensíveis, como Chalee et al. e Riding et al., observa-se que a estabilidade é alcançada à custa de uma subestimação sistemática.

Dessa forma, embora estatisticamente robusto, o modelo tende a avaliações não conservadoras da durabilidade.

5.1.3 Modelo de Riding et al.

Tabela 04 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Riding et al.

| Modelo Riding et al. | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| Média (Dm/De) | Desvio Padrão | Coeficiente De Variação (%) |
| 1,4016 | 0,6456 | 46,06 |

Fonte: Autores (2026).

O modelo de Riding et al. apresentou média de $DM/DE=1,4016$, indicando superestimação moderada. No entanto, o coeficiente de variação de 46,06% revela a maior dispersão entre os modelos analisados.

Essa elevada variabilidade decorre da combinação simultânea de múltiplos parâmetros, incluindo idade do concreto, propriedades do material e fatores ambientais, sem que haja um parâmetro claramente dominante. Quando comparado ao modelo de Chalee et al., observa-se comportamento igualmente conservador, porém ainda mais instável.

Assim, apesar da tendência média à superestimação, o modelo apresenta baixa robustez estatística, o que compromete sua confiabilidade para aplicações generalizadas.

5.1.4 Modelo de Caré

Tabela 05 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Caré.

| Modelo Caré | | |
|--------------------|---------------|------------------------------|
| Média (Dm/De) | Desvio Padrão | Coefficiente De Variação (%) |
| 3,4299 | 0,1584 | 4,62 |

Fonte: Autores (2026).

O modelo de Caré apresentou média de $DM/DE=3,4299$, sendo o que mais superestimou o coeficiente de difusão. Esse comportamento está diretamente relacionado à forte influência do tempo de exposição, considerado o parâmetro dominante do modelo, enquanto os efeitos microestruturais exercem papel secundário.

Apesar da superestimação acentuada, o desvio padrão reduzido e o coeficiente de variação de apenas 4,62% indicam altíssima consistência estatística. Em comparação com outros modelos conservadores, como Chalee et al. e Riding et al., o modelo de Caré se diferencia por apresentar superestimação sistemática e previsível, e não dispersa.

Esse comportamento o caracteriza como altamente conservador, porém potencialmente excessivo em termos de projeto.

5.1.5 Modelo de Oh e Jang

Tabela 06 – Valores do coeficiente DM/DE obtidos pelo modelo de Caré.

| Modelo Oh e Jang | | |
|------------------|---------------|-----------------------------|
| Média (Dm/De) | Desvio Padrão | Coeficiente De Variação (%) |
| 1,3885 | 0,3058 | 22,02 |

Fonte: Autores (2026).

O modelo de Oh e Jang apresentou média de $DM/DE=1,3885$, com coeficiente de variação intermediário (22,02%). Esse desempenho reflete a combinação equilibrada entre parâmetros ambientais e propriedades do concreto, com destaque para a temperatura, porém ponderada por características do material.

Quando comparado aos demais modelos, observa-se que Oh e Jang evita tanto a superestimação extrema do modelo de Caré quanto a subestimação do modelo de Luciano e Miltenberger. Além disso, apresenta menor dispersão que Chalee et al. e Riding et al., indicando melhor compromisso entre segurança e estabilidade.

5.2 Comparação entre os modelos

A comparação entre os modelos teóricos foi aprofundada por meio da análise da distribuição gráfica da razão DM/DE . A utilização dos gráficos permitiu avaliar de forma visual a tendência, a dispersão e a presença de valores extremos, complementando a análise estatística baseada nos valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação. De maneira geral, observa-se que os modelos apresentam padrões de distribuição distintos, refletindo as diferenças nos parâmetros dominantes adotados em cada formulação teórica.

Na Figura 06, referente ao modelo de Chalee et al., nota-se uma distribuição ampla dos valores de DM/DE , com ocorrência de valores significativamente superiores à unidade. Essa dispersão visual confirma o elevado coeficiente de variação obtido para o modelo e evidencia sua alta sensibilidade aos parâmetros ambientais, principalmente temperatura e umidade. Quando comparado a modelos mais estáveis, como Luciano e Miltenberger ou Caré, o modelo de Chalee et al. apresenta comportamento conservador, porém com baixa previsibilidade.

A Figura 07, correspondente ao modelo de Luciano e Miltenberger, apresenta uma distribuição fortemente concentrada em valores inferiores a 1. Essa concentração gráfica

confirma o baixo desvio padrão e o reduzido coeficiente de variação, indicando elevada estabilidade estatística. No entanto, a posição sistemática dos dados abaixo da unidade evidencia a subestimação do coeficiente de difusão, resultado do predomínio de parâmetros microestruturais, como a relação água/cimento, em detrimento das condições ambientais. Em comparação com os demais modelos, este é o que apresenta menor conservadorismo.

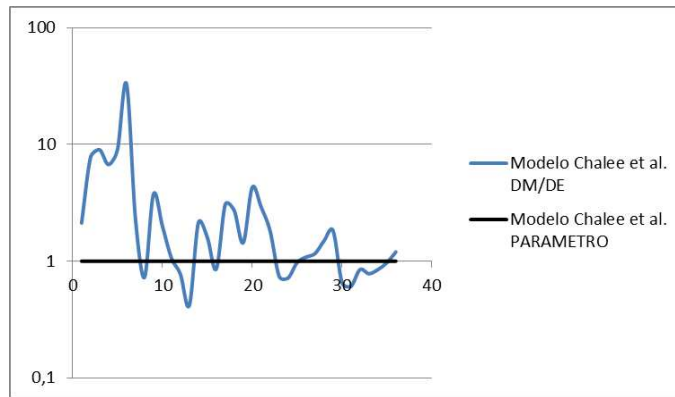
Na Figura 08, referente ao modelo de Riding et al., observa-se a maior dispersão entre todos os modelos analisados, com valores distribuídos em uma faixa bastante ampla. Esse comportamento gráfico confirma que se trata do modelo mais heterogêneo, resultado da combinação simultânea de diversos parâmetros, sem a predominância clara de um fator controlador. Quando comparado ao modelo de Chalee et al., nota-se que ambos apresentam tendência à superestimação, porém o modelo de Riding et al. apresenta maior instabilidade visual, reforçando sua baixa robustez estatística.

A Figura 09, que representa o modelo de Caré, evidencia uma distribuição bastante concentrada em valores elevados de DM/DE, com baixa dispersão. Esse comportamento confirma visualmente o baixo coeficiente de variação observado numericamente e demonstra que a superestimação do modelo é sistemática e previsível. A forte influência do tempo de exposição, parâmetro dominante do modelo, explica o deslocamento da distribuição para valores significativamente superiores aos experimentais. Em comparação com os demais, o modelo de Caré destaca-se como o mais conservador, porém também o mais consistente.

Por fim, a Figura 10, correspondente ao modelo de Oh e Jang, apresenta uma distribuição intermediária, com valores concentrados próximos da unidade e dispersão moderada. Visualmente, observa-se que este modelo evita tanto a subestimação observada no modelo de Luciano e Miltenberger quanto a superestimação excessiva do modelo de Caré. Esse comportamento gráfico reflete a combinação equilibrada entre parâmetros ambientais e propriedades do concreto, resultando em melhor representatividade dos dados experimentais.

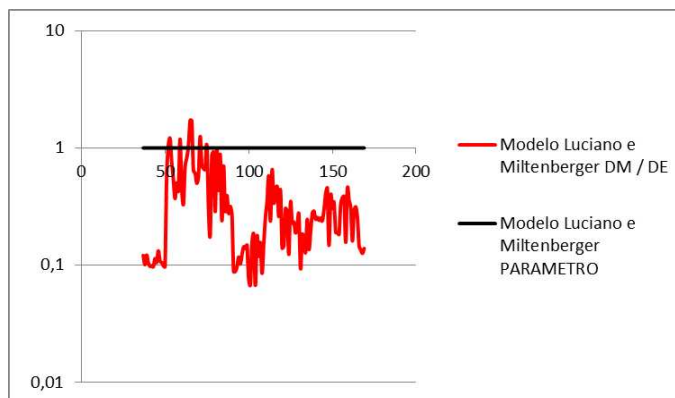
De forma integrada, a análise das Figuras 06 a 10 confirma que os modelos diferem não apenas em termos de valores médios, mas também quanto à forma de distribuição dos resultados. Assim, os gráficos evidenciam que modelos governados predominantemente por parâmetros ambientais e temporais tendem à superestimação, enquanto aqueles baseados em parâmetros microestruturais tendem à subestimação. O modelo de Oh e Jang apresenta o melhor compromisso entre segurança e estabilidade, enquanto o modelo de Caré se destaca pelo elevado conservadorismo e consistência.

Figura 06 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Chalee et al.



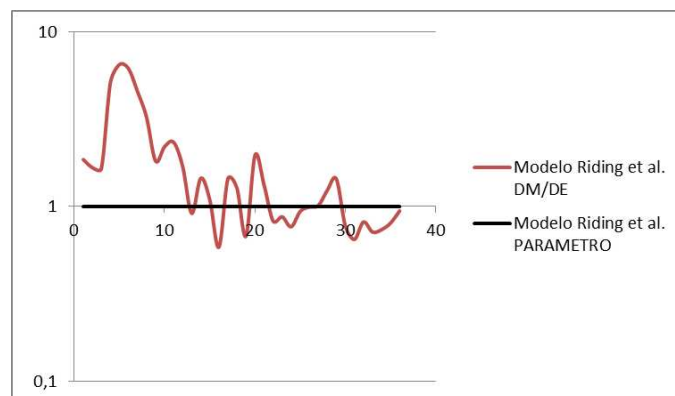
Fonte: Autores (2026).

Figura 07 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Luciano e Miltenberg.



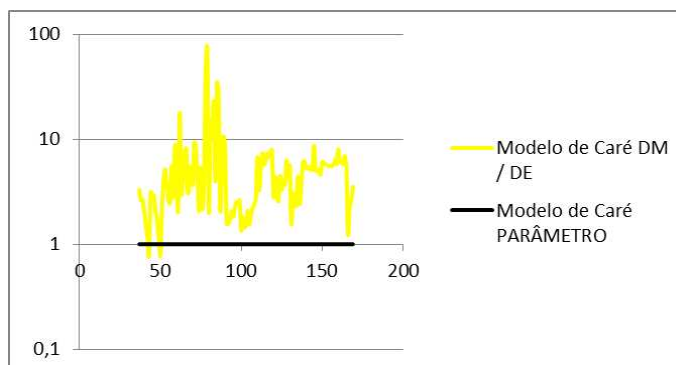
Fonte: Autores (2026).

Figura 08 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Riding et al.



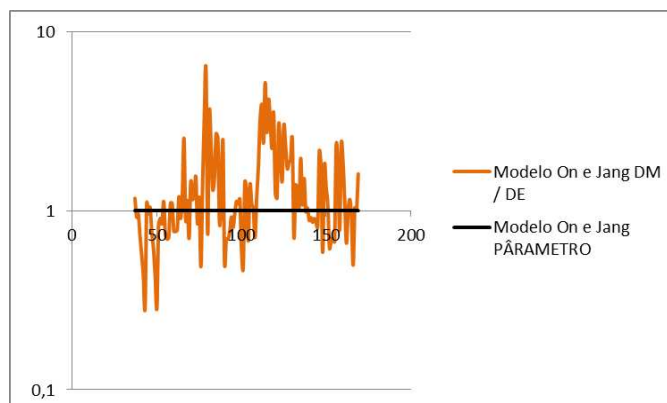
Fonte: Autores (2026).

Figura 09 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Caré.



Fonte: Autores (2026).

Figura 10 – Distribuição da razão DM/DE para o modelo de Oh e Jang.



Fonte: Autores (2026).

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de diferentes modelos teóricos para a estimativa do coeficiente de difusão de cloretos no concreto, a partir da razão DM/DE, utilizando valores médios, desvio padrão, coeficiente de variação e análise gráfica das distribuições.

Os resultados evidenciaram que os modelos apresentam comportamentos distintos, diretamente associados aos parâmetros dominantes considerados em suas formulações. Modelos com maior influência de parâmetros ambientais e do tempo de exposição apresentaram tendência à superestimação, enquanto modelos baseados predominantemente em parâmetros microestruturais mostraram subestimação dos valores experimentais, apesar de maior estabilidade estatística.

A análise estatística e gráfica permitiu identificar que o conservadorismo não está necessariamente associado à robustez do modelo. Nesse contexto, o modelo de Caré destacou-se pelo elevado conservadorismo e consistência, enquanto os modelos de Chalee et al. e Riding et al. apresentaram elevada dispersão. O modelo de Oh e Jang apresentou o melhor desempenho global, por combinar valores médios próximos da unidade com dispersão moderada.

Conclui-se que a escolha do modelo deve considerar o objetivo da análise, o nível de segurança desejado e as condições de exposição, sendo a análise conjunta dos indicadores estatísticos e gráficos fundamental para uma avaliação adequada da durabilidade do concreto.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. C. C.; CARVALHO, L. G. S. Corrosão: Estudo de caso sobre ruptura do concreto. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 04, p. 16–28, 2019.

ANDRADE, J. J. O. Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos. 2001. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, C. Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras. São Paulo: PINI, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento 3 ed. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto. 4 ed. 2023.

BASHEER, L.; KROPP, J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, v.15, p. 93- 103, 2001.

CALÇADA, L. M. L. Estudo da eficácia do ensaio de migração em condições de fluxo não estacionário na previsão da penetração de cloretos em concreto. Florianópolis, 2004, 214p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini; Goiânia: Ed. UFG, 1997.

CARÉ, Sabine. Influência dos agregados no coeficiente de difusão de cloretos em argamassa. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n. 7, p. 1021–1028, 2003.

DODDS, W., C. CHRISTODOULOU, C. GOODIER, S. AUSTIN, D. DUNNE. Desempenho de durabilidade do concreto estrutural sustentável: Efeito do agregado de concreto britado grosso na migração rápida de cloreto e corrosão acelerada. *Constr. Construir. Mater.* , 155 (2017), pp. 511 – 521; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.073>. Acesso em 11 dez. 2024.

FERREIRA, R. B. Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de armadura induzida por cloretos. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*, São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2.

FREIRE, K.R.R (2005) Avaliação do Desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto. Dissertação (Mestrado em estruturas) - Universidade Federal do Paraná. 192 p.

GENTIL, V. Corrosão. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996. 345 p.

GJØRV, O. E. Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HELENE, P. R. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 14 p. Tese (Doutorado), 1993.

J. LUCIANO, M. MILTENBERGER, Predição de coeficientes de difusão de cloretos a partir das proporções da mistura de concreto, (1999).

K.A. RIDING, M.D.A. THOMAS, K.J. FOLLIARD, Modelo de difusividade aparente para concreto contendo materiais cimentícios suplementares, (2013).

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. (2014) Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo, IBRACON, 250 p.

MEIRA, G. R. Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção. IFPB. João Pessoa, 2017.

MEDEIROS, M. H. F. Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente á ação de íons de cloreto. Tese de Doutorado em engenharia civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MORAIS, João Marcos Pereira et al. Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão. Research, Society and Development, v. 9, n. 7, p. e759974964-e759974964, 2020.

NEPOMUCENO, A.A. Mecanismos de transporte de fluidos no concreto. In. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, v.2. p. 793-827., 2005.

OLLIVER, J. P. TORRENTI, J. M. A estrutura porosa dos concretos e as propriedades de transporte. In: Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: IBRACON, 2014.

OTIENO, MIKE, IKOTUN, JACOB, BALLIM, YUNUS. Investigações experimentais sobre a influência da profundidade de recobrimento e da qualidade do concreto no tempo para cobrir a fissuração por corrosão induzida por carbonatação do aço em estruturas de concreto armado em ambiente urbano, interior. Construction and Building Materials; v. 198, 20 de fevereiro de 2019 , Páginas 172-181; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.215>
Acesso em: 8 nov. 2024.

OH, Byung Hwan; JANG, Seung Yup. Predição da difusividade do concreto baseada em equações analíticas simples. *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 3, p. 463–480, 2004.

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. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PUYATE, Y. et al. Chloride transport models for wick action in concrete at large peclet number. *Physics of fluids*, American Institute of Physics, v. 10, n. 3, p. 566–575, 1998.

RIBEIRO. Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018. 416 p.

SHAKOURI, M.; TREJO, D. A time-variant model of surface chloride build-up for improved service life predictions. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 84, p. 99–110, 2017.

STANISH, K.D.;HOOTON, R.D.;THOMAS, M.D.A (2000) Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review. University of Toronto. 32 p. Disponível em: <<http://www.tfsrc.gov/hnr20/pubs/chlconcrete.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2024.

SHAFIKHANI, M.; CHIDIAC, S. E. *Quantification of concrete chloride diffusion coefficient – A critical review*. *Cement and Concrete Composites*, v. 99, p. 225–250, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.03.011.

ANEXOS

Tabela A.1 – Dados experimentais utilizados no modelo de Chalee et al.

| Modelo Chalee et al. | | | | | | | | |
|----------------------|----------|-------------------------|---------------|------------------|---------------|--------|----------|-------|
| * | w/cm [-] | Cm [Kg/m ³] | FA [% por cm] | GGBFS [% por cm] | SF [% por cm] | Va [-] | t [dias] | T [K] |
| 1 | 0,30 | 485 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 44 | 293 |
| 2 | 0,30 | 485 | 0 | 0 | 8 | 0,69 | 44 | 293 |
| 3 | 0,30 | 485 | 0 | 0 | 15 | 0,68 | 44 | 293 |
| 4 | 0,30 | 485 | 0 | 50 | 0 | 0,69 | 44 | 293 |
| 5 | 0,30 | 485 | 0 | 70 | 0 | 0,68 | 44 | 293 |
| 6 | 0,30 | 485 | 0 | 50 | 8 | 0,68 | 44 | 293 |
| 7 | 0,30 | 485 | 20 | 0 | 0 | 0,69 | 44 | 293 |
| 8 | 0,30 | 485 | 40 | 0 | 0 | 0,68 | 44 | 293 |
| 9 | 0,30 | 485 | 20 | 0 | 8 | 0,68 | 44 | 293 |
| 10 | 0,30 | 485 | 40 | 0 | 8 | 0,67 | 44 | 293 |
| 11 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 150 | 295 |
| 12 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 150 | 308 |
| 13 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 150 | 323 |
| 14 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 5 | 0,69 | 150 | 295 |
| 15 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 5 | 0,69 | 150 | 308 |
| 16 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 5 | 0,69 | 150 | 323 |
| 17 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 10 | 0,69 | 150 | 295 |
| 18 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 10 | 0,69 | 150 | 308 |
| 19 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 10 | 0,69 | 150 | 323 |
| 20 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 13 | 0,69 | 150 | 295 |
| 21 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 13 | 0,69 | 150 | 308 |
| 22 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 13 | 0,69 | 150 | 323 |
| 23 | 0,7 | 265 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 24 | 0,6 | 292 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 25 | 0,5 | 327 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 26 | 0,45 | 348 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 27 | 0,4 | 374 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 28 | 0,35 | 398 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 29 | 0,3 | 434 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 30 | 0,7 | 265 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 31 | 0,6 | 292 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |

| | | | | | | | | |
|----|------|-----|---|---|---|------|----|-----|
| 32 | 0,5 | 327 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 33 | 0,45 | 348 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 34 | 0,4 | 374 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 35 | 0,35 | 398 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 36 | 0,3 | 434 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |

Tabela A.2 – Dados experimentais utilizados no modelo de Riding et al.

| Modelo Riding et al. | | | | | | | | |
|----------------------|----------|-------------------------|---------------|------------------|---------------|--------|----------|-------|
| * | w/cm [-] | Cm [Kg/m ³] | FA [% por cm] | GGBFS [% por cm] | SF [% por cm] | Va [-] | t [dias] | T [K] |
| 1 | 0,30 | 485 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 44 | 293 |
| 2 | 0,30 | 485 | 0 | 0 | 8 | 0,69 | 44 | 293 |
| 3 | 0,30 | 485 | 0 | 0 | 15 | 0,68 | 44 | 293 |
| 4 | 0,30 | 485 | 0 | 50 | 0 | 0,69 | 44 | 293 |
| 5 | 0,30 | 485 | 0 | 70 | 0 | 0,68 | 44 | 293 |
| 6 | 0,30 | 485 | 0 | 50 | 8 | 0,68 | 44 | 293 |
| 7 | 0,30 | 485 | 20 | 0 | 0 | 0,69 | 44 | 293 |
| 8 | 0,30 | 485 | 40 | 0 | 0 | 0,68 | 44 | 293 |
| 9 | 0,30 | 485 | 20 | 0 | 8 | 0,68 | 44 | 293 |
| 10 | 0,30 | 485 | 40 | 0 | 8 | 0,67 | 44 | 293 |
| 11 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 150 | 295 |
| 12 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 150 | 308 |
| 13 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 150 | 323 |
| 14 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 5 | 0,69 | 150 | 295 |
| 15 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 5 | 0,69 | 150 | 308 |
| 16 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 5 | 0,69 | 150 | 323 |
| 17 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 10 | 0,69 | 150 | 295 |
| 18 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 10 | 0,69 | 150 | 308 |
| 19 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 10 | 0,69 | 150 | 323 |
| 20 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 13 | 0,69 | 150 | 295 |
| 21 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 13 | 0,69 | 150 | 308 |
| 22 | 0,4 | 400 | 0 | 0 | 13 | 0,69 | 150 | 323 |
| 23 | 0,7 | 265 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 24 | 0,6 | 292 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 25 | 0,5 | 327 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |

| | | | | | | | | |
|----|------|-----|---|---|---|------|----|-----|
| 26 | 0,45 | 348 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 27 | 0,4 | 374 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 28 | 0,35 | 398 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 29 | 0,3 | 434 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 30 | 0,7 | 265 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 31 | 0,6 | 292 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 32 | 0,5 | 327 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 33 | 0,45 | 348 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 34 | 0,4 | 374 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 35 | 0,35 | 398 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |
| 36 | 0,3 | 434 | 0 | 0 | 0 | 0,73 | 28 | 296 |

Tabela A.3 – Dados experimentais utilizados no modelo de Luciano e Miltenberger.

| Modelo Luciano e Miltenberger | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|-------------------------|--------------|-----------------|--------------|--------|----------|-------|
| * | w/c [-] | Cm [kg/m ³] | FA [% of cm] | GGBFS [% of cm] | SF [% of cm] | Va [-] | T [dias] | T [K] |
| 37 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 165 | 293 |
| 38 | 0,45 | 387 | 15 | 0 | 0 | 0,68 | 163 | 293 |
| 39 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 163 | 293 |
| 40 | 0,45 | 387 | 50 | 0 | 0 | 0,67 | 173 | 293 |
| 41 | 0,45 | 387 | 0 | 15 | 0 | 0,68 | 162 | 293 |
| 42 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 168 | 293 |
| 43 | 0,45 | 387 | 0 | 50 | 0 | 0,68 | 171 | 293 |
| 44 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 151 | 293 |
| 45 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 149 | 293 |
| 46 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 150 | 293 |
| 47 | 0,55 | 316 | 0 | 0 | 0 | 0,71 | 150 | 293 |
| 48 | 0,35 | 497 | 30 | 0 | 0 | 0,7 | 158 | 293 |
| 49 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 165 | 293 |
| 50 | 0,45 | 387 | 15 | 0 | 0 | 0,68 | 163 | 293 |
| 51 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 163 | 293 |
| 52 | 0,45 | 387 | 50 | 0 | 0 | 0,67 | 173 | 293 |
| 53 | 0,45 | 387 | 0 | 15 | 0 | 0,68 | 162 | 293 |
| 54 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 168 | 293 |
| 55 | 0,45 | 387 | 0 | 50 | 0 | 0,68 | 151 | 293 |
| 56 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 149 | 293 |

| | | | | | | | | |
|----|------|-----|----|----|---|------|-----|-----|
| 57 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 150 | 293 |
| 58 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 150 | 293 |
| 59 | 0,55 | 316 | 0 | 0 | 0 | 0,71 | 150 | 293 |
| 60 | 0,35 | 497 | 0 | 0 | 0 | 0,7 | 158 | 293 |
| 61 | 0,35 | 497 | 30 | 0 | 0 | 0,65 | 166 | 293 |
| 62 | 0,35 | 497 | 0 | 30 | 0 | 0,65 | 166 | 293 |
| 63 | 0,55 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 64 | 0,55 | 320 | 0 | 50 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 65 | 0,55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 66 | 0,55 | 320 | 10 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 67 | 0,55 | 320 | 10 | 50 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 68 | 0,55 | 320 | 10 | 70 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 69 | 0,55 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 70 | 0,45 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 71 | 0,45 | 400 | 0 | 50 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 72 | 0,45 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 73 | 0,45 | 400 | 10 | 0 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 74 | 0,45 | 400 | 10 | 50 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 75 | 0,45 | 400 | 10 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 76 | 0,45 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 77 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 78 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 79 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 80 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 81 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 82 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 83 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 84 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 85 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 86 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 87 | 0,40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,77 | 28 | 293 |
| 88 | 0,55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,65 | 28 | 293 |
| 89 | 0,55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 90 | 0,40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,71 | 28 | 293 |
| 91 | 0,55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,68 | 28 | 293 |
| 92 | 0,47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,68 | 28 | 293 |
| 93 | 0,47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,74 | 28 | 293 |
| 94 | 0,40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,74 | 28 | 293 |
| 95 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 96 | 0,40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,77 | 28 | 293 |
| 97 | 0,55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,65 | 28 | 293 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|---|----|---|------|-----|-----|
| 98 | 0.55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 99 | 0.40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.71 | 28 | 293 |
| 100 | 0.55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 101 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 102 | 0.47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 103 | 0.47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 104 | 0.40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 105 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 106 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 107 | 0.40 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.77 | 28 | 293 |
| 108 | 0.55 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.65 | 28 | 293 |
| 109 | 0.55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 110 | 0.40 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.71 | 28 | 293 |
| 111 | 0.55 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 112 | 0.47 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 113 | 0.47 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 114 | 0.40 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 115 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 116 | 0.45 | 360 | 0 | 71 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 117 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 118 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 119 | 0.45 | 360 | 0 | 65 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 120 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 121 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 122 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 123 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 124 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 125 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 126 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 127 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 128 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 129 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 130 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 131 | 0.40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.77 | 182 | 293 |
| 132 | 0.55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.65 | 182 | 293 |
| 133 | 0.55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 134 | 0.40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.71 | 182 | 293 |
| 135 | 0.55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 136 | 0.47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 137 | 0.47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 138 | 0.40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|---|----|---|------|-----|-----|
| 139 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 140 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 141 | 0.40 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.77 | 182 | 293 |
| 142 | 0.55 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.65 | 182 | 293 |
| 143 | 0.55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 144 | 0.40 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.71 | 182 | 293 |
| 145 | 0.55 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 146 | 0.47 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 147 | 0.47 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 148 | 0.40 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 149 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 150 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 151 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 152 | 0.30 | 471 | 0 | 0 | 0 | 0.69 | 28 | 301 |
| 153 | 0.38 | 500 | 0 | 0 | 0 | 0.62 | 28 | 301 |
| 154 | 0.45 | 414 | 0 | 0 | 0 | 0.68 | 28 | 301 |
| 155 | 0.54 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.62 | 28 | 301 |
| 156 | 0.55 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.63 | 28 | 301 |
| 157 | 0.56 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.64 | 28 | 301 |
| 158 | 0.57 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.65 | 28 | 301 |
| 159 | 0.58 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.66 | 28 | 301 |
| 160 | 0.59 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.67 | 28 | 301 |
| 161 | 0.60 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.68 | 28 | 301 |
| 162 | 0.61 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.69 | 28 | 301 |
| 163 | 0.62 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.70 | 28 | 301 |
| 164 | 0.63 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.71 | 28 | 301 |
| 165 | 0.64 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.72 | 28 | 301 |
| 166 | 0.65 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.73 | 28 | 301 |
| 167 | 0.66 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.74 | 28 | 301 |
| 168 | 0.67 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.75 | 28 | 301 |
| 169 | 0.68 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.76 | 28 | 301 |

Tabela A.4 – Dados experimentais utilizados no modelo de Caré.

| Modelo de Caré | | | | | | | | |
|----------------|---------|-------------------------|--------------|-----------------|--------------|--------|----------|-------|
| * | w/c [-] | Cm [kg/m ³] | FA [% of cm] | GGBFS [% of cm] | SF [% of cm] | Va [-] | T [dias] | T [K] |
| 37 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 165 | 293 |
| 38 | 0,45 | 387 | 15 | 0 | 0 | 0,68 | 163 | 293 |
| 39 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 163 | 293 |
| 40 | 0,45 | 387 | 50 | 0 | 0 | 0,67 | 173 | 293 |
| 41 | 0,45 | 387 | 0 | 15 | 0 | 0,68 | 162 | 293 |
| 42 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 168 | 293 |
| 43 | 0,45 | 387 | 0 | 50 | 0 | 0,68 | 171 | 293 |
| 44 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 151 | 293 |
| 45 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 149 | 293 |
| 46 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 150 | 293 |
| 47 | 0,55 | 316 | 0 | 0 | 0 | 0,71 | 150 | 293 |
| 48 | 0,35 | 497 | 30 | 0 | 0 | 0,7 | 158 | 293 |
| 49 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 165 | 293 |
| 50 | 0,45 | 387 | 15 | 0 | 0 | 0,68 | 163 | 293 |
| 51 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 163 | 293 |
| 52 | 0,45 | 387 | 50 | 0 | 0 | 0,67 | 173 | 293 |
| 53 | 0,45 | 387 | 0 | 15 | 0 | 0,68 | 162 | 293 |
| 54 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 168 | 293 |
| 55 | 0,45 | 387 | 0 | 50 | 0 | 0,68 | 151 | 293 |
| 56 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 149 | 293 |
| 57 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 150 | 293 |
| 58 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 150 | 293 |
| 59 | 0,55 | 316 | 0 | 0 | 0 | 0,71 | 150 | 293 |
| 60 | 0,35 | 497 | 0 | 0 | 0 | 0,7 | 158 | 293 |
| 61 | 0,35 | 497 | 30 | 0 | 0 | 0,65 | 166 | 293 |
| 62 | 0,35 | 497 | 0 | 30 | 0 | 0,65 | 166 | 293 |
| 63 | 0,55 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 64 | 0,55 | 320 | 0 | 50 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 65 | 0,55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 66 | 0,55 | 320 | 10 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 67 | 0,55 | 320 | 10 | 50 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 68 | 0,55 | 320 | 10 | 70 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 69 | 0,55 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 70 | 0,45 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 71 | 0,45 | 400 | 0 | 50 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 72 | 0,45 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|----|----|---|------|----|-----|
| 73 | 0,45 | 400 | 10 | 0 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 74 | 0,45 | 400 | 10 | 50 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 75 | 0,45 | 400 | 10 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 76 | 0,45 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 77 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 78 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 79 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 80 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 81 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 82 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 83 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 84 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 85 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 86 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 87 | 0.40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.77 | 28 | 293 |
| 88 | 0.55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.65 | 28 | 293 |
| 89 | 0.55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 90 | 0.40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.71 | 28 | 293 |
| 91 | 0.55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 92 | 0.47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 93 | 0.47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 94 | 0.40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 95 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 96 | 0.40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.77 | 28 | 293 |
| 97 | 0.55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.65 | 28 | 293 |
| 98 | 0.55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 99 | 0.40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.71 | 28 | 293 |
| 100 | 0.55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 101 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 102 | 0.47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 103 | 0.47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 104 | 0.40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 105 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 106 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 107 | 0.40 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.77 | 28 | 293 |
| 108 | 0.55 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.65 | 28 | 293 |
| 109 | 0.55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 110 | 0.40 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.71 | 28 | 293 |
| 111 | 0.55 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 112 | 0.47 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 113 | 0.47 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|---|----|---|------|-----|-----|
| 114 | 0.40 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 115 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 116 | 0.45 | 360 | 0 | 71 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 117 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 118 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 119 | 0.45 | 360 | 0 | 65 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 120 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 121 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 122 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 123 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 124 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 125 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 126 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 127 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 128 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 129 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 130 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 131 | 0.40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.77 | 182 | 293 |
| 132 | 0.55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.65 | 182 | 293 |
| 133 | 0.55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 134 | 0.40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.71 | 182 | 293 |
| 135 | 0.55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 136 | 0.47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 137 | 0.47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 138 | 0.40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 139 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 140 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 141 | 0.40 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.77 | 182 | 293 |
| 142 | 0.55 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.65 | 182 | 293 |
| 143 | 0.55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 144 | 0.40 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.71 | 182 | 293 |
| 145 | 0.55 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 146 | 0.47 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 147 | 0.47 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 148 | 0.40 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 149 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 150 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 151 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 152 | 0.30 | 471 | 0 | 0 | 0 | 0.69 | 28 | 301 |
| 153 | 0.38 | 500 | 0 | 0 | 0 | 0.62 | 28 | 301 |
| 154 | 0.45 | 414 | 0 | 0 | 0 | 0.68 | 28 | 301 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|---|---|---|------|----|-----|
| 155 | 0.54 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.62 | 28 | 301 |
| 156 | 0.55 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.63 | 28 | 301 |
| 157 | 0.56 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.64 | 28 | 301 |
| 158 | 0.57 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.65 | 28 | 301 |
| 159 | 0.58 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.66 | 28 | 301 |
| 160 | 0.59 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.67 | 28 | 301 |
| 161 | 0.60 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.68 | 28 | 301 |
| 162 | 0.61 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.69 | 28 | 301 |
| 163 | 0.62 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.70 | 28 | 301 |
| 164 | 0.63 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.71 | 28 | 301 |
| 165 | 0.64 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.72 | 28 | 301 |
| 166 | 0.65 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.73 | 28 | 301 |
| 167 | 0.66 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.74 | 28 | 301 |
| 168 | 0.67 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.75 | 28 | 301 |
| 169 | 0.68 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.76 | 28 | 301 |

Tabela A.5 – Dados experimentais utilizados no modelo de Oh e Jang.

| Modelo Oh e Jang | | | | | | | | |
|------------------|---------|-------------------------|--------------|-----------------|--------------|--------|----------|-------|
| * | w/c [-] | Cm [kg/m ³] | FA [% of cm] | GGBFS [% of cm] | SF [% of cm] | Va [-] | T [dias] | T [K] |
| 37 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 165 | 293 |
| 38 | 0,45 | 387 | 15 | 0 | 0 | 0,68 | 163 | 293 |
| 39 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 163 | 293 |
| 40 | 0,45 | 387 | 50 | 0 | 0 | 0,67 | 173 | 293 |
| 41 | 0,45 | 387 | 0 | 15 | 0 | 0,68 | 162 | 293 |
| 42 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 168 | 293 |
| 43 | 0,45 | 387 | 0 | 50 | 0 | 0,68 | 171 | 293 |
| 44 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 151 | 293 |
| 45 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 149 | 293 |
| 46 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 150 | 293 |
| 47 | 0,55 | 316 | 0 | 0 | 0 | 0,71 | 150 | 293 |
| 48 | 0,35 | 497 | 30 | 0 | 0 | 0,7 | 158 | 293 |
| 49 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 165 | 293 |
| 50 | 0,45 | 387 | 15 | 0 | 0 | 0,68 | 163 | 293 |
| 51 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 163 | 293 |
| 52 | 0,45 | 387 | 50 | 0 | 0 | 0,67 | 173 | 293 |
| 53 | 0,45 | 387 | 0 | 15 | 0 | 0,68 | 162 | 293 |
| 54 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 168 | 293 |
| 55 | 0,45 | 387 | 0 | 50 | 0 | 0,68 | 151 | 293 |
| 56 | 0,45 | 387 | 0 | 0 | 0 | 0,68 | 149 | 293 |

| | | | | | | | | |
|----|------|-----|----|----|---|------|-----|-----|
| 57 | 0,45 | 387 | 30 | 0 | 0 | 0,67 | 150 | 293 |
| 58 | 0,45 | 387 | 0 | 30 | 0 | 0,68 | 150 | 293 |
| 59 | 0,55 | 316 | 0 | 0 | 0 | 0,71 | 150 | 293 |
| 60 | 0,35 | 497 | 0 | 0 | 0 | 0,7 | 158 | 293 |
| 61 | 0,35 | 497 | 30 | 0 | 0 | 0,65 | 166 | 293 |
| 62 | 0,35 | 497 | 0 | 30 | 0 | 0,65 | 166 | 293 |
| 63 | 0,55 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 64 | 0,55 | 320 | 0 | 50 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 65 | 0,55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 66 | 0,55 | 320 | 10 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 67 | 0,55 | 320 | 10 | 50 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 68 | 0,55 | 320 | 10 | 70 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 69 | 0,55 | 320 | 0 | 0 | 0 | 0,72 | 90 | 293 |
| 70 | 0,45 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 71 | 0,45 | 400 | 0 | 50 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 72 | 0,45 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 73 | 0,45 | 400 | 10 | 0 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 74 | 0,45 | 400 | 10 | 50 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 75 | 0,45 | 400 | 10 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 76 | 0,45 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0,69 | 90 | 293 |
| 77 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 78 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 79 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 80 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 81 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 82 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 83 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 84 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 85 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 86 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 87 | 0,40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,77 | 28 | 293 |
| 88 | 0,55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,65 | 28 | 293 |
| 89 | 0,55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 90 | 0,40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,71 | 28 | 293 |
| 91 | 0,55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,68 | 28 | 293 |
| 92 | 0,47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,68 | 28 | 293 |
| 93 | 0,47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,74 | 28 | 293 |
| 94 | 0,40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,74 | 28 | 293 |
| 95 | 0,45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0,72 | 28 | 293 |
| 96 | 0,40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0,77 | 28 | 293 |
| 97 | 0,55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0,65 | 28 | 293 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|---|----|---|------|-----|-----|
| 98 | 0.55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 99 | 0.40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.71 | 28 | 293 |
| 100 | 0.55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 101 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 102 | 0.47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 103 | 0.47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 104 | 0.40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 105 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 106 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 107 | 0.40 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.77 | 28 | 293 |
| 108 | 0.55 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.65 | 28 | 293 |
| 109 | 0.55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 110 | 0.40 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.71 | 28 | 293 |
| 111 | 0.55 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 112 | 0.47 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 28 | 293 |
| 113 | 0.47 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 114 | 0.40 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 28 | 293 |
| 115 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 116 | 0.45 | 360 | 0 | 71 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 117 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 118 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 119 | 0.45 | 360 | 0 | 65 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 120 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 121 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 122 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 123 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 28 | 293 |
| 124 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 125 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 126 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 127 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 128 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 129 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 130 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 131 | 0.40 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.77 | 182 | 293 |
| 132 | 0.55 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.65 | 182 | 293 |
| 133 | 0.55 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 134 | 0.40 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.71 | 182 | 293 |
| 135 | 0.55 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 136 | 0.47 | 400 | 0 | 66 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 137 | 0.47 | 320 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 138 | 0.40 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |

| | | | | | | | | |
|-----|------|-----|---|----|---|------|-----|-----|
| 139 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 140 | 0.45 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 141 | 0.40 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.77 | 182 | 293 |
| 142 | 0.55 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.65 | 182 | 293 |
| 143 | 0.55 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 144 | 0.40 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.71 | 182 | 293 |
| 145 | 0.55 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 146 | 0.47 | 400 | 0 | 70 | 0 | 0.68 | 182 | 293 |
| 147 | 0.47 | 320 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 148 | 0.40 | 360 | 0 | 70 | 0 | 0.74 | 182 | 293 |
| 149 | 0.45 | 360 | 0 | 64 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 150 | 0.45 | 360 | 0 | 67 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 151 | 0.45 | 360 | 0 | 66 | 0 | 0.72 | 182 | 293 |
| 152 | 0.30 | 471 | 0 | 0 | 0 | 0.69 | 28 | 301 |
| 153 | 0.38 | 500 | 0 | 0 | 0 | 0.62 | 28 | 301 |
| 154 | 0.45 | 414 | 0 | 0 | 0 | 0.68 | 28 | 301 |
| 155 | 0.54 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.62 | 28 | 301 |
| 156 | 0.55 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.63 | 28 | 301 |
| 157 | 0.56 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.64 | 28 | 301 |
| 158 | 0.57 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.65 | 28 | 301 |
| 159 | 0.58 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.66 | 28 | 301 |
| 160 | 0.59 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.67 | 28 | 301 |
| 161 | 0.60 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.68 | 28 | 301 |
| 162 | 0.61 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.69 | 28 | 301 |
| 163 | 0.62 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.70 | 28 | 301 |
| 164 | 0.63 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.71 | 28 | 301 |
| 165 | 0.64 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.72 | 28 | 301 |
| 166 | 0.65 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.73 | 28 | 301 |
| 167 | 0.66 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.74 | 28 | 301 |
| 168 | 0.67 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.75 | 28 | 301 |
| 169 | 0.68 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0.76 | 28 | 301 |