



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

FRANCISCO ITALO DE PAIVA CAXIAS

**ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO**

**CRATEÚS
2025**

FRANCISCO ITALO DE PAIVA CAXIAS

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Leandro Soares Moreira

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

C377a Caxias, Francisco Italo de Paiva.

Análise da propagação da corrosão em estruturas de concreto armado:
Revisão e avaliação dos modelos matemáticos existentes na literatura / Francisco
Italo de Paiva Caxias. – 2025.

68 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará,
Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2025.
Orientação: Prof. Me. Leandro Soares Moreira.

1. Corrosão. 2. Concreto. 3. Taxa de corrosão.. I. Título.

CDD 620

FRANCISCO ITALO DE PAIVA CAXIAS

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS
DE CONCRETO ARMADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 06/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Leandro Soares Moreira.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Heloína Nogueira da Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Janaina Lopes Leitinho
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

RESUMO

Este trabalho realiza uma análise comparativa de modelos empíricos relevantes da literatura utilizados para prever a taxa de corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado. Foram selecionados nove modelos com base em sua recorrência em estudos técnicos e científicos, sendo apresentados com suas respectivas fórmulas e variáveis. A avaliação foi conduzida com uma base experimental composta por 199 conjuntos de dados obtidos em ensaios laboratoriais e de campo, disponíveis na literatura. Os modelos empíricos foram aplicados a essa base de dados e seus resultados comparados com os valores experimentais correspondentes. A análise estatística baseou-se nos parâmetros de valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação da razão entre os valores observados experimentalmente e os calculados pelos modelos, permitindo avaliar tanto a tendência média dos modelos quanto sua variabilidade. Gráficos foram elaborados para representar visualmente o desempenho de cada modelo. O estudo destaca ainda as características, limitações e áreas de aplicação dos modelos analisados, reforçando a importância de uma seleção criteriosa das equações em estudos de durabilidade e previsão de vida útil. Conclui-se que o desempenho varia significativamente entre os modelos, e que a análise conjunta desses três indicadores estatísticos é fundamental para avaliar a confiabilidade das estimativas de corrosão em estruturas de concreto armado. A precisão dos modelos varia conforme as condições ambientais e que a análise probabilística dos erros é fundamental para aumentar a confiabilidade das previsões

Palavras-chave: corrosão; concreto; taxa de corrosão.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of empirical models from the literature used to predict the corrosion rate of reinforcement in reinforced concrete structures. Nine models were selected based on their recurrence in technical and scientific studies, and are presented along with their respective formulas and variables. The evaluation was conducted using an experimental database comprising 199 data sets obtained from both laboratory and field tests, as reported in the literature. The empirical models were applied to this database, and their results were compared with the corresponding experimental values. The statistical analysis was based on the mean value, standard deviation, and coefficient of variation of the ratio between the experimentally observed values and those calculated by the models, enabling an assessment of both the average prediction tendency and the variability of each model. Graphs were prepared to visually represent the performance of each model. The study also highlights the characteristics, limitations, and application domains of the analyzed models, emphasizing the importance of a careful selection of equations in durability assessments and service life prediction. It is concluded that model performance varies significantly, and that a combined analysis of the three statistical indicators is essential to evaluate the reliability of corrosion rate estimations in reinforced concrete structures. The accuracy of the models depends on environmental conditions, and a probabilistic error analysis is fundamental to enhance the reliability of predictions.

Keywords: corrosion; concrete; corrosion rate.

A Deus.

A minha mãe Francisca.

A minha avó Santuza.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial à minha mãe Francisca, à minha avó Santuza, ao meu irmão Jhons, à minha irmã Kevilly, ao meu padrasto José Edvan, ao meu tio Glaydson e a minha tia Livramento e à minha esposa Daniela, pelo apoio incondicional, carinho e incentivo em todos os momentos desta jornada. Ao professor Leandro Soares Moreira, meu orientador, pela orientação dedicada, pelos ensinamentos, paciência e apoio fundamentais para a realização deste trabalho. Às professoras Heloína Nogueira da Costa e Janaina Lopes Leitinho, integrantes da banca examinadora, pelo tempo disponibilizado, pelas valiosas contribuições e sugestões oferecidas para o aprimoramento deste estudo. Aos colegas da graduação, pelas reflexões, críticas e colaborações que enriqueceram meu percurso acadêmico. Em especial, agradeço aos amigos Lucas, Elane, Geanderson e Frankecion, cuja amizade e apoio foram fundamentais ao longo dessa trajetória.

"Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas aquele que vai acompanhado com certeza vai mais longe." (Clarice Lispector)

LISTA DE GRÁFICOS

<u>Grafico 01 – PIB dos países referente ao ano de 2023.....</u>	15
<u>Gráfico 02- Análise do modelo Liu an Weyers</u>	34
<u>Gráfico 03- Análise do modelo Vu e Stewart.....</u>	35
<u>Gráfico 04- Análise do modelo Jung et al.....</u>	36
<u>Gráfico 05- Análise do modelo Li(2004a).....</u>	38
<u>Gráfico 06- Análise do modelo Li(2004b).....</u>	39
<u>Gráfico 07- Análise do modelo Kong et al.....</u>	41
<u>Gráfico 08- Análise do modelo Pour-Ghaz et al.....</u>	42
<u>Gráfico 09- Análise do modelo Giovanni Pais et al.....</u>	44
<u>Gráfico 10- Análise do modelo Melchers et al.....</u>	46

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1 - Custos estimados da corrosão de diferentes países referente ao ano de 2023</u>	16
<u>Tabela 2 - Modelos matemáticos selecionados</u>	20
<u>Tabela 3 - Constantes na equação (11) (Pour-Ghaz et al.[17])</u>	27
<u>Tabela 4 - Resistividade do concreto como uma função da relação água/cimento em diferentes graus de saturação (Gjørve et al.[5], 1977).</u>	28
<u>Tabela 5: Comparação de Modelos Empíricos de Previsão.....</u>	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

NACE National association of Corrosion Engineers

PIB Produto interno bruto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Justificativa Da Pesquisa.....	14
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo geral.....	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Metodologia.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1. Resumo das formulações.....	20
2.2. Processo eletroquímico.....	21
2.3. Modelos selecionados.....	22
2.3.1. Liu e Weyers (1998).....	22
2.3.2. Vu e Stewart (2000).....	23
2.3.3. Jung (2003).....	24
2.3.4. Li (2004a).....	24
2.3.5. Li (2004b).....	25
2.3.6. Kong (2006).....	25
2.3.7. Pour-Ghaz (2009).....	26
2.3.8. Giovanni Pais (2015).....	30
2.3.9. Lu (2019).....	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
3.1. Análise do erro do modelo.....	33
3.2. Análise dos resultados.....	33
3.3. Análise comparativas dos resultados.....	47
4. CONCLUSÃO.....	49
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
ANEXO A - DADOS DE ENSAIO DA TAXA DE CORROSÃO EXPERIMENTAL.....	52
ANEXO B - GRÁFICOS COMPLETOS.....	59

1. INTRODUÇÃO

Num aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir a corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos [1]. No âmbito da engenharia civil, a corrosão das armaduras de aço no interior do concreto representa um dos principais fatores de degradação estrutural. Esse processo ocorre de forma progressiva, comprometendo a aderência entre o aço e o concreto, reduzindo a seção transversal das armaduras e, em situações críticas, podendo culminar no colapso da estrutura.

Assim, compreender os mecanismos que conduzem à corrosão é fundamental para prevenir seus efeitos e prolongar a vida útil das edificações. Os sinais dessa deterioração se manifestam inicialmente por manchas superficiais, decorrentes dos produtos da corrosão, evoluindo para fissuras longitudinais, destacamento do concreto cobrindo as armaduras e, com o avanço do processo, perda da seção resistente do aço, rompimento de estribos e redução significativa da aderência das armaduras principais. Esses danos comprometem tanto a estética quanto a segurança estrutural da obra ao longo do tempo.

As armaduras presentes nos elementos estruturais de concreto são, inicialmente, protegidas e passivadas contra a corrosão. Essa proteção é garantida pelo cobrimento do concreto, que atua como uma barreira física contra agentes externos, além de oferecer proteção química devido à alta alcalinidade da solução aquosa nos poros do concreto. Contudo, a ruptura ou perda dessa proteção, mesmo que em áreas localizadas, pode iniciar um processo de deterioração progressivo e autoacelerante, sendo os cloretos uma das principais causas dessa contaminação [2]. A corrosão afeta diretamente o desempenho estrutural, influenciando a flexão, o cisalhamento e a interação entre aço e concreto, o que pode resultar em maior fissuração e deformações na estrutura.

A crescente preocupação com a durabilidade e a segurança das construções destaca a relevância de compreender, de forma detalhada, o processo de corrosão em estruturas de concreto armado. Este estudo tem como objetivo analisar os fundamentos teóricos e práticos associados à corrosão, com ênfase na investigação dos modelos disponíveis na literatura e na avaliação de soluções que possam otimizar a previsão e prolongar a vida útil das estruturas.

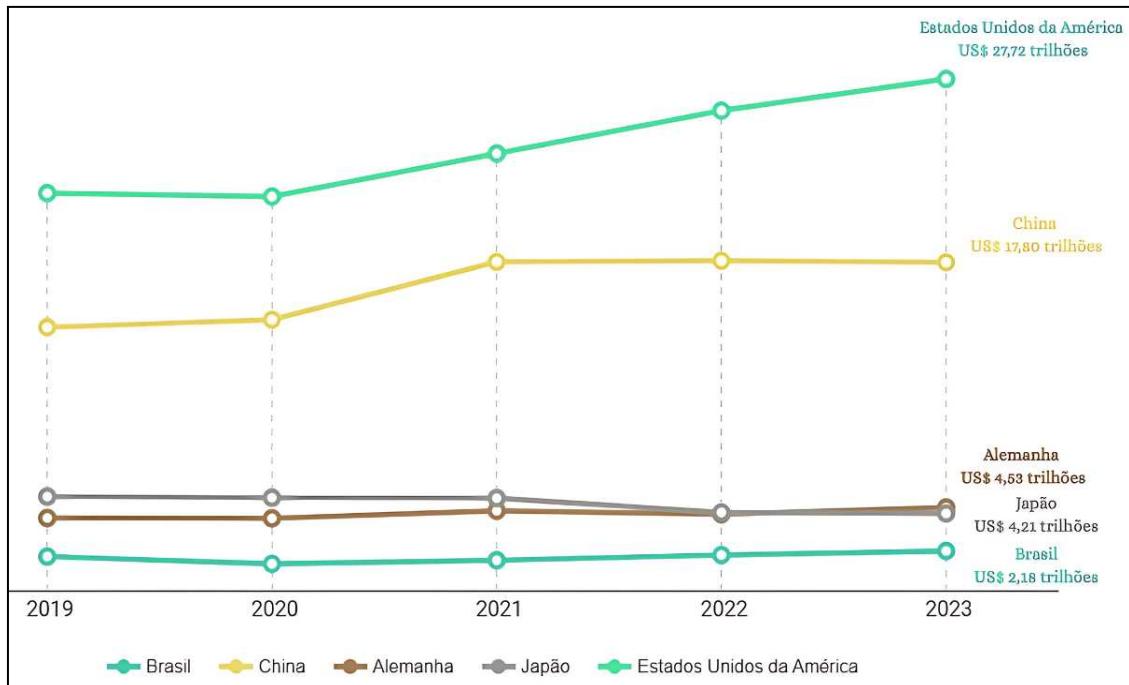
1.1. Justificativa Da Pesquisa

Com o desenvolvimento econômico, os custos associados à corrosão em estruturas de concreto armado tem se tornado cada vez mais elevados. Assim, o emprego de metodologias preventivas deve ser considerado já na fase de projeto, com a finalidade de minimizar a probabilidade de processos corrosivos. Essa investigação é particularmente relevante no contexto brasileiro, onde as condições ambientais, como altas temperaturas, elevada umidade e presença de agentes agressivos, tornam as estruturas especialmente vulneráveis à corrosão. Assim, este estudo visa colaborar para o avanço do conhecimento científico na área e oferecer subsídios técnicos para a prática da engenharia civil, fortalecendo a durabilidade e a qualidade das obras realizadas no país.

O problema da corrosão metálica é bastante significativa, de acordo com a National association of Corrosion Engineers (NACE International), o custo global da corrosão é estimado em US\$ 2,5 trilhões, o que equivale a 3,4% do PIB mundial (2015), podendo chegar a 5% da receita de uma nação industrializada. Ao usar as práticas de controle de disponíveis, estima-se que a economia entre 15 e 35% do custo da corrosão possam ser realizadas, ou seja, entre US\$ 375 e US\$ 875 bilhões anualmente, em uma base global. Esses custos normalmente não incluem segurança individual ou consequências ambientais [3].

Gentil [4] afirma que os gastos envolvendo a prevenção, manutenção e substituição de materiais devido à corrosão assumem valores mais elevados nos países com maior grau de desenvolvimento tecnológico, correspondendo a aproximadamente 3,5 % do PIB. O gráfico a seguir apresenta os valores de PIB encontrados para alguns desses países no ano de 2023.

Gráfico 01 – PIB dos países referente ao ano de 2023.



Fonte: World Development Indicators. The World Bank. <<https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>>

Na falta de dados estatísticos e estimando-se o custo da corrosão em 3,5% do PIB, do ano de 2023, pôde-se apresentar a Tabela 1. Deve-se considerar que, nos valores constantes da Tabela 1, estão inclusos não somente os gastos com reposição de materiais, mas também os gastos com prevenção de corrosão como emprego de materiais mais resistentes aos processos corrosivos, medidas de proteção e com manutenção. A Tabela 1 expõe o panorama mundial referente aos custos gerados pela corrosão em alguns países, em que os dados referem-se ao ano de 2023.

Tabela 1 – Custos estimados da corrosão de diferentes países referente ao ano de 2023.

País	PIB (US\$ trilhões)	Corrosão (US\$ trilhões)
Estados Unidos	27,72	0,97
China	17,80	0,62
Alemanha	4,53	0,16
Japão	4,21	0,15
Reino Unido	3,38	0,12
França	3,06	0,11
Itália	2,30	0,08
Brasil	2,18	0,08
Austrália	1,73	0,06
Espanha	1,45	0,05

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Os valores dessa tabela, embora estimados, permitem também concluir que quanto mais avançado tecnologicamente for um país, mais elevado o seu gasto com corrosão, daí poder-se considerar que a corrosão avança paralelamente ao desenvolvimento tecnológico, por isso as medidas para sua prevenção e combate não podem ser relegadas a plano secundário.

A corrosão é um processo complexo e multifatorial, influenciado por parâmetros como a penetração de cloretos, a carbonatação do concreto e a exposição a ambientes agressivos. Modelos de propagação da corrosão têm sido desenvolvidos ao longo dos anos para compreender e prever o comportamento das estruturas diante dessas condições adversas. No entanto, ainda não há consenso na literatura sobre um modelo amplamente aceito, o que reflete as incertezas associadas aos parâmetros envolvidos. Motiva-se esta pesquisa pela necessidade de investigar e analisar modelos existentes, buscando identificar suas limitações e potenciais melhorias.

Além disso, compreender melhor os fatores que influenciam o processo corrosivo pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de projeto, execução e manutenção de estruturas, promovendo maior segurança, sustentabilidade e redução de custos ao longo do ciclo de vida das construções.

Desse modo, este estudo tem como objetivo principal analisar as formulações matemáticas existentes na literatura para modelagem da propagação da corrosão em estruturas de concreto armado, realizando uma análise estatística. Busca-se, assim, fornecer subsídios que orientem os profissionais do setor da construção civil na análise e previsão da vida útil das estruturas durante a fase de projeto. Cabe destacar que, no Brasil, grande parte das edificações presentes nas principais metrópoles foi construída entre as décadas de 1970 e 1980, completando atualmente entre 40 e 50 anos, período em que os efeitos prejudiciais da fase de propagação da corrosão se tornam mais evidentes. Esse contexto reforça a relevância e atualidade do tema abordado nesta dissertação.

Diversos estudos têm se dedicado à identificação e análise dos principais parâmetros que influenciam o processo de corrosão, utilizando ensaios experimentais e análises de sensibilidade das variáveis envolvidas. Além disso, ao considerar as incertezas intrínsecas aos parâmetros que caracterizam o fenômeno corrosivo, a aplicação de parâmetros matemáticos relacionados à corrosão amplia a compreensão desse tema. Nesse contexto, a revisão bibliográfica concentrou-se no estudo analítico nessas formulações presentes na literatura, na caracterização dos parâmetros corrosivos e na análise de confiabilidade aplicada à corrosão, servindo como base para avaliar os modelos disponíveis e compreender suas implicações.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Investigar modelos matemáticos presentes na literatura que descrevem a propagação da corrosão em estruturas de concreto armado, com o intuito de avaliar sua aplicabilidade e capacidade preditiva em diferentes condições de exposição.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos incluem a identificação e apresentação dos principais modelos encontrados, bem como a realização de uma análise probabilística desses modelos. Essa análise considera a influência de diversas variáveis que afetam diretamente o comportamento do concreto armado. A abordagem adotada ressalta a significativa incerteza associada aos parâmetros que regem o fenômeno corrosivo. Adicionalmente, destaca-se a ausência de modelos amplamente validados que representem com precisão a propagação da

corrosão nas armaduras e suas múltiplas implicações, incluindo aquelas que determinam o término da vida útil das estruturas de concreto armado.

1.3. Metodologia

A metodologia deste trabalho foi estruturada em três etapas complementares, descritas a seguir:

- a) Levantamento e seleção de modelos empíricos: Foi realizada uma revisão bibliográfica sistemática com o objetivo de identificar os principais modelos empíricos disponíveis na literatura para estimar a taxa de corrosão em armaduras de concreto armado. A seleção foi baseada na relevância e recorrência dos modelos em estudos técnicos e científicos, resultando em um total de nove modelos com diferentes abordagens, variáveis envolvidas e níveis de complexidade.
- b) Coleta e organização da base de dados experimental: Foram compilados 199 conjuntos de dados experimentais extraídos da literatura especializada, abrangendo ensaios laboratoriais e de campo que envolvem condições reais de exposição e diferentes combinações de variáveis. Os dados incluem parâmetros como: espessura do cobrimento (c , mm), o diâmetro da armadura (d , cm), a relação água/cimento (a/c , adimensional), a temperatura ambiente (K), a umidade relativa (HR, %), o teor de cloreto (C_t , % ou kg/m³), o tempo de exposição à corrosão (t , anos) e a taxa de corrosão (i_{corr} , $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Esses conjuntos de dados foram organizados em tabelas conforme os seguintes autores e respectivas quantidades de ensaios: Lopez et al. (27 ensaios), Morris et al. (4), Otieno et al. (2), Jee e Pradhan (3), Luping (6), Liu (13), Yang (125) e Kong (19). As informações detalhadas dos ensaios, bem como os parâmetros associados, encontram-se organizadas nas tabelas subsequentes deste trabalho, servindo como base para a aplicação e avaliação dos modelos empíricos de propagação da corrosão. Para os casos em que determinados modelos exigem variáveis não explicitamente disponibilizadas nos dados originais, foram adotadas estimativas e complementações extraídas da literatura especializada, conforme discutido na análise individual de cada modelo. A sistematização completa dos dados utilizados pode ser consultada no Anexo A.

c) Aplicação dos modelos e análise estatística dos resultados: Cada modelo empírico selecionado foi aplicado à base de dados utilizando as variáveis correspondentes exigidas por suas equações. A taxa de corrosão calculada por cada modelo foi comparada com os valores experimentais reportados. Para avaliar o desempenho dos modelos, foram empregados os seguintes indicadores estatísticos:

- Erro médio (ME): diferença média entre os valores calculados e observados;
- Coeficiente de variação (CV): relação percentual entre o desvio padrão e a média dos erros;
- Desvio padrão (DP): medida da dispersão dos erros;

Esses indicadores permitiram avaliar a acurácia e a variabilidade de cada modelo, além de identificar suas limitações e potencial de aplicação em diferentes cenários. A análise estatística foi complementada com gráficos comparativos que ilustram visualmente a distribuição dos erros para cada modelo. Essas etapas foram desenvolvidas de forma complementar, visando proporcionar uma compreensão abrangente e embasada do fenômeno da corrosão em estruturas de concreto armado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado tem sido objeto de numerosos estudos ao longo das últimas décadas. Com base na literatura técnica especializada, este trabalho reúne e analisa os principais modelos empíricos desenvolvidos para prever a taxa de corrosão das armaduras. Esses modelos consideram variáveis como teor de cloretos, temperatura, umidade relativa, resistividade elétrica do concreto, tempo de exposição e características físicas da estrutura. A seguir, apresenta-se uma síntese dos modelos selecionados para análise.

2.1. Resumo das formulações

Tabela 2 – Modelos matemáticos selecionados.

Modelo da Literatura	Fórmula Principal	Análise do modelo
Liu e Weyers (1998)	$I_{corr} = 0,926 \cdot \exp\left(7,98 + 0,7771 \cdot \ln(1,69C_t) - \frac{3006}{T} - 0,000116R_c + 2,24t^{-0,215}\right)$	Modelo amplamente utilizado em estudos internacionais. Apresenta boa aderência à corrosão natural, mas ignora a umidade relativa, o que limita sua precisão em ambientes com alta variabilidade climática.
Vu e Stewart (2000)	$I_{corr}(1) = 37,8 \cdot (1 - a/c)^{-1,64} \cdot c^{-1}$ $I_{corr}(t_p) = I_{corr}(1) \cdot 0,85 \cdot t_p^{-0,29}$	De estrutura simples e fácil implementação, é adequado para cenários com baixa variabilidade ambiental. No entanto, sua limitação está na exclusão de variáveis externas como temperatura e umidade.
Jung et al. (2003)	$I_{corr} = 0,01169 \cdot \exp(2,8899 \cdot C_t + 0,0120 \cdot c + 0,0269 \cdot HR)$	Embora conte com variáveis relevantes, o modelo não incorpora fatores essenciais, como a temperatura e a relação água/cimento, cuja influência é significativa no processo corrosivo. Essa limitação indica a necessidade de ajustes antes de sua aplicação em ambientes de elevada agressividade ambiental.
Li (2004a)	$I_{corr} = 0,3683 \cdot \ln(t_p) + 1,1305$	Baseado exclusivamente na variável tempo, oferece aplicação direta. Contudo, sua baixa sensibilidade a fatores ambientais reduz a precisão, exigindo calibração para contextos específicos.
Li (2004b)	$I_{corr}(t) = 2,486 \cdot \left(\frac{HR}{45}\right)^{1,6072} \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^{0,3879} \cdot \left(\frac{a/c}{0,35}\right)^{0,4447} \cdot \left(\frac{c}{10}\right)^{0,2761} \cdot C_t^{1,7376}$	Incorpora múltiplos fatores, o que amplia a sensibilidade do modelo, entretanto, depende de variáveis nem sempre disponíveis, o que pode limitar sua aplicação prática.

Kong et al. (2006)	$\ln I_{corr}(t) = 8,617 + 0,618 \cdot \ln C_t - \frac{3034}{T} - 5103$	Aplicado em normas técnicas chinesas. Apesar da ampla adoção, não considera variáveis como umidade relativa, o que compromete sua aplicabilidade em ambientes com variação hídrica significativa.
Pour-Ghaz et al. (2009)	$i_{corr} = 100 \left\{ \frac{1}{\tau_p} \left[\eta T c^{\kappa \lambda} i_L^\lambda + \mu T v^\varpi + \theta (T i_L)^\vartheta + \chi p^\gamma + \zeta \right] \right\}$	Considera diversos fatores, o que aumenta significativamente sua sensibilidade, entretanto, essa complexidade pode dificultar sua aplicação em condições de campo. Além disso, é necessário extremo cuidado na inserção dos dados, pois qualquer imprecisão pode exercer grande influência nos resultados.
Giovanni Pais et al. (2015)	$\ln(I_{corr}) = 0,0312 \cdot HR - \frac{4736}{T} - 1,695 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) - 0,391 \cdot c + 14,589$	Apresenta fatores importantes, mas não considera o índice de cloreto, o que representa uma limitação significativa para uma formulação voltada à comparação da propagação da corrosão. No entanto, pode ser aplicado de forma satisfatória, desde que devidamente calibrado para o cenário analisado.
Lu et al. (2019)	$I_{corr} = \exp \left(A + 8,617 + 0,6181 \cdot \ln(C_t) - \frac{3034}{T} \right) \cdot f(HR) \cdot f(t)$	Trata-se de um modelo recente, contudo, não considera a relação água/cimento nem a espessura de cobertura do concreto, fatores de grande relevância para a estimativa da propagação da corrosão. Sua utilização é recomendada apenas após a realização de ajustes corretivos.

2.2. Processo eletroquímico

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto é resultado de um processo eletroquímico, caracterizado por reações de oxidação e redução que ocorrem na presença simultânea de umidade e oxigênio. Esse fenômeno se inicia quando o aço embutido no concreto perde sua condição de passividade, permitindo o surgimento de regiões anódicas e catódicas, que promovem a transferência de elétrons e o consequente desgaste do metal.

Nessa situação, formam-se dois tipos de regiões no metal: uma onde o ferro se desgasta (chamada ânodo) e outra onde ocorrem reações que consomem oxigênio (chamada cátodo). O ferro da armadura se transforma em ferrugem ao perder elétrons, que viajam por dentro do próprio aço até a outra região. Ao mesmo tempo, íons se movimentam dentro da água presente nos poros do concreto, completando o circuito.

Esse processo pode ser acelerado quando o concreto está muito úmido, com pH baixo (mais ácido), ou quando contém substâncias agressivas como o cloreto (presente na água do mar, por exemplo) ou gás carbônico. Esses agentes conseguem romper a camada protetora natural que envolve o aço e iniciar ou intensificar a corrosão. Por isso, entender esse mecanismo é essencial para prevenir danos e aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado.

2.3. Modelos selecionados

2.3.1. Liu e Weyers (1998)

Em uma pesquisa abrangente, Liu e Weyers [5], com base em resultados experimentais de 2927 conjuntos de dados obtidos a partir de sete séries de amostras expostas a cloretos em condições externas ao longo de cinco anos, propuseram o seguinte modelo de previsão da taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), apresentado na Equação (1):

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$I_{corr} = 0,926 \cdot \exp\left(7,98 + 0,7771 \cdot \ln\left(1,69C_t\right) - \frac{3006}{T} - 0,000116R_c + 2,24t^{-0,215}\right) \quad (1)$$

A Equação mostra que o processo de corrosão das armaduras em ambientes de serviço regulares está relacionado ao teor de cloretos (C_t , kg/m^3), à temperatura (T , K) na superfície da armadura, à resistividade elétrica do cobrimento de concreto (R_c , $\Omega \cdot \text{cm}$) e ao tempo de corrosão (t , anos). Essa equação foi desenvolvida a partir de ensaios com amostras expostas à ação de íons cloreto, sendo portanto representativa de uma fase avançada do processo corrosivo, geralmente a fase de propagação. No entanto, o modelo apresenta limitações importantes: desconsidera parâmetros cruciais como a espessura do cobrimento de concreto e a umidade relativa do ambiente, ambos determinantes para a difusão de agentes agressivos. Além disso, não diferencia entre os dois estágios fundamentais da corrosão (iniciação e propagação), o que pode comprometer a sua aplicabilidade em análises de durabilidade em longo prazo.

A resistividade elétrica do concreto pode ser estimada pela seguinte expressão empírica (2):

$$R_c = \exp[803054 \cdot \ln(1 + 169C_t)] \quad (2)$$

A equação evidencia que a resistividade elétrica do concreto apresenta dependência direta do teor de cloreto (C_t , kg/m³).

2.3.2. Vu e Stewart (2000)

Vu e Stewart [6] apresentaram um modelo baseado na hipótese de que a taxa de corrosão está associada à absorção de oxigênio na superfície da armadura. O modelo distingue duas fases: o início da propagação da corrosão e sua progressão. A equação preditiva para a taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), no início da fase de propagação, sob temperatura de 20 °C e umidade relativa de 75%, é apresentada na Equação (3):

Fórmula para o início da propagação:

$$I_{corr}(1) = 37,8 \cdot (1 - a/c)^{-1,64} \cdot c^{-1} \quad (3)$$

Na fase de propagação da corrosão, a taxa de corrosão $I_{corr}(t_p)$ é estimada por meio da Equação (4), a qual descreve sua evolução ao longo do tempo.

$$I_{corr}(t_p) = I_{corr}(1) \cdot 0,85 \cdot t_p^{-0,29} \quad (4)$$

A equação mostra que o processo de corrosão das armaduras em ambientes de serviço regulares depende de parâmetros do concreto, como a relação água/cimento (a/c , adimensional), a espessura do cobrimento (c , mm) e o tempo de exposição à corrosão (t_p , anos). O modelo, proposto por Vu e Stewart, descreve a evolução da corrosão ao longo do tempo e considera explicitamente variáveis físicas relevantes. Além disso, distingue os estágios da corrosão (iniciação e propagação) e inclui a influência do oxigênio na superfície da armadura.

Apesar dos avanços apresentados, o modelo possui limitações relevantes. A presença de íons cloreto, variável fundamental em ambientes agressivos, não é considerada, e a umidade relativa é assumida como constante em 75%, desconsiderando sua variabilidade ao longo do tempo ou entre diferentes condições de exposição. Essas simplificações podem comprometer a aplicabilidade do modelo em análises de durabilidade de estruturas submetidas

a contextos severos, como regiões costeiras ou expostas a sais descongelantes, onde a difusão de cloretos representa o principal mecanismo para a propagação da corrosão.

2.3.3. *Jung (2003)*

Jung, Yoon e Sohn [7] desenvolveram um modelo empírico para estimar a taxa de corrosão do aço em estruturas de concreto armado, fundamentado em variáveis ambientais e características dos materiais, como a concentração de íons cloreto, a espessura do cobrimento e a umidade relativa do ambiente. O modelo proposto permite avaliar a taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) com base nessas condições de exposição e é representado pela Equação (5):

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$I_{corr} = 0,01169 \cdot \exp(2,8899 \cdot C_t + 0,0120 \cdot c + 0,0269 \cdot HR) \quad (5)$$

A equação indica que a taxa de corrosão das armaduras está relacionada ao teor de cloretos no concreto (C_t , em kg/m^3), a espessura do cobrimento (c , em mm) e à umidade relativa do ambiente (HR , em %). O modelo combina variáveis ambientais e materiais, sendo especialmente útil para estimativas em ambientes agressivos. Ao considerar tanto o teor de cloretos quanto a umidade, ele permite uma previsão mais realista do processo de corrosão em estruturas expostas a atmosferas hostis, como regiões costeiras ou industriais.

2.3.4. *Li (2004a)*

Li (2004a) [8] desenvolveu um modelo simplificado para estimar a densidade de corrente de corrosão com base no tempo de propagação do processo corrosivo. A proposta visa avaliar a taxa de corrosão das armaduras ($\text{em } \mu\text{A}/\text{cm}^2$) a partir das condições ambientais de exposição, especialmente em atmosferas agressivas. A equação correspondente ao modelo é apresentada a seguir:

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$I_{corr} = 0,3683 \cdot \ln(t_p) + 1,1305 \quad (6)$$

A equação mostra que o processo de corrosão das armaduras em ambientes de serviço regulares está relacionado ao tempo de corrosão (t_p , anos). No entanto, ao revisarmos a formulação e o artigo de origem, nota-se que essa equação considera apenas o tempo de

propagação da corrosão. É uma função logarítmica do tempo, o que significa que a taxa de corrosão aumenta em função do logaritmo do tempo desde o início da corrosão. O modelo foi proposto com base em dados experimentais de armaduras expostas, e ajustado para representar a variação da taxa de corrosão ao longo do tempo.

2.3.5. *Li (2004b)*

Dando continuidade aos estudos anteriores, Li (2004b) [9] propôs um segundo modelo voltado especificamente para estruturas expostas a ambientes com elevada presença de íons cloreto. O modelo fornece uma estimativa da densidade de corrente de corrosão (em $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) com base em variáveis ambientais e estruturais, como umidade relativa, temperatura, relação água/cimento, cobrimento da armadura e teor de cloretos. A equação correspondente é apresentada a seguir:

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$I_{corr}(t) = 2,486 \cdot \left(\frac{HR}{45}\right)^{1,6072} \cdot \left(\frac{T}{10}\right)^{0,3879} \cdot \left(\frac{a/c}{0,35}\right)^{0,4447} \cdot \left(\frac{c}{10}\right)^{0,2761} \cdot C_t^{1,7376} \quad (7)$$

onde $i_{corr}(t)$ é a taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) no tempo t , C_t é a concentração de cloretos na posição da armadura (% em peso do concreto, limitada entre 0,14–0,43%), T é a temperatura em graus Kelvin na posição da armadura, HR é a umidade relativa (expressa em %), c é o cobrimento do concreto (mm) e a/c é a relação água/cimento. O modelo é aplicável principalmente em cenários de exposição agressiva, como zonas marítimas ou regiões contaminadas por sais.

2.3.6. *Kong (2006)*

Kong et al. (2006) [10], com base no estudo de Liu e Weyers (1998), propuseram um modelo empírico no qual a taxa de corrosão varia em função do teor de cloretos no concreto, da temperatura ambiente na profundidade da armadura e da resistividade elétrica do concreto.

O modelo é aplicável à previsão do comportamento de estruturas expostas a ambientes agressivos e considera os principais fatores físico-químicos que controlam a corrosão. A equação proposta é apresentada a seguir:

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$\ln i_{corr} = 8,617 + 0,618 \cdot \ln C_t - \frac{3034}{T} - 5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho \quad (8)$$

onde $i_{corr}(t)$ é a taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), C_t é a concentração de cloretos na posição da armadura (% em peso do concreto), T é a temperatura em graus Kelvin na posição da armadura, e ρ a resistividade elétrica ($\text{k}\Omega\cdot\text{m}$)

A resistividade elétrica ρ ($\text{k}\Omega\cdot\text{m}$) é determinada de acordo com a relação água/cimento, o teor de cloretos e a umidade relativa, conforme a seguinte expressão:

$$\rho = \left[27,5 \left(0,35 - \frac{a}{c} \right) + 11,1 \right] \cdot (1,8 - C_t) + 100 \left(1 - \frac{HR}{100} \right)^2 + 40, \text{ se } C_t \leq 3,6 \quad (9)$$

$$\rho = 10, \text{ se } C_t > 3,6$$

Este modelo incorpora, em suas formulações, a resistividade elétrica do concreto como um dos parâmetros de influência no processo de corrosão, e embora não incorpore diretamente o efeito do tempo nem da umidade relativa sobre a corrosão ao longo dos anos, fornece uma abordagem útil para estimativas em condições específicas de exposição. Onde i_{corr} é a taxa de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$); C_t é o teor total de cloretos (kg/m^3); T é a temperatura ambiente na profundidade da superfície do aço (K) e ρ é a resistividade ôhmica do cobrimento de concreto ($\text{k}\Omega\cdot\text{m}$).

2.3.7. Pour-Ghaz (2009)

Pour-Ghaz et al. [11] investigaram o efeito da temperatura na taxa de corrosão do aço no concreto usando experimentos simulados de resistência de polarização. Os experimentos simulados foram baseados na solução numérica da equação de Laplace com condições de contorno predefinidas do problema e foram projetados para estabelecer correlações independentes entre taxa de corrosão, temperatura, parâmetros cinéticos, resistividade do concreto e densidade de corrente limite para uma ampla gama de distribuições possíveis de ânodo/cátodo (A/C) na armadura. Os resultados capturam com sucesso os mecanismos de controle por resistência e difusão da corrosão, bem como o efeito da temperatura sobre os parâmetros cinéticos e as propriedades do concreto, e foram usados para desenvolver um

modelo de regressão em forma fechada na Eq. (11) para a previsão das taxas média de corrosão do aço no concreto.

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$i_{corr} = \frac{1}{\tau\rho^\gamma} \left(\eta T c^\kappa i_L^\lambda + \mu T v^{\omega} + \theta (T i_L)^{\vartheta} + \chi \rho^\gamma + \zeta \right) \quad (11)$$

onde τ , γ , η , κ , λ , μ , v , ω , θ , ϑ , χ e ζ são os coeficientes da equação, que são fornecidos na tabela abaixo; i_{corr} é a densidade de corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$); T é a temperatura ambiente (K); ρ é a resistividade do concreto ($\Omega \cdot \text{m}$); i_L é a taxa de corrosão limitada (A/m^2); e c é a profundidade do cobrimento do concreto (m).

Tabela 3 – Constantes na equação (11) (Pour-Ghaz et al [11])

Constante	Valor
τ	$1.181102362 \times 10^{-3}$
η	$1.414736274 \times 10^{-5}$
ζ	-0.00121155206
κ	0.0847693074
λ	0.130025167
σ	0.800505851
μ	$1.23199829 \times 10^{-11}$
θ	-0.000102886027
v	0.475258097
χ	$5.03368481 \times 10^{-7}$
ν	90487
Φ	0.0721605536

Para obter a resistividade do concreto usando os dados experimentais disponíveis, o seguinte procedimento é implementado: sob as condições de equilíbrio assumidas, o grau de saturação correspondente para cada umidade relativa é calculado utilizando a isotérmica de adsorção proposta por Xi et al. [12].

$$\rho = \rho_0 e^{\frac{\Delta U_p}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (12)$$

Onde:

$$\Delta U_p = \frac{26.753349}{1 - 4.3362256 \cdot e^{-5.24885635_r}} \quad (13)$$

Se a razão a/c e a saturação do concreto forem fornecidas, a resistividade do concreto à temperatura de 20 °C é calculada usando os dados experimentais obtidos por Gjørve et al. [13], conforme mostrado na Tabela 2. A resistividade do concreto sob uma determinada temperatura ambiente (T) é então calculada por:

Tabela 4 - Resistividade do concreto como uma função da relação água/cimento em diferentes graus de saturação (Gjørve et al.[13], 1977).

Saturação (S_r)	Razão a/c de 0,4 a 0,48
Saturação	Equação da resistividade ρ ($\Omega \cdot m$)
40%	$\rho = -1,366 \times 10^7 \cdot (a/c)^3 + 2,419 \times 10^7 \cdot (a/c)^2 - 1,415 \times 10^7 \cdot (a/c) + 2,737 \times 10^6$
60%	$\rho = -2,197 \times 10^5 \cdot (a/c)^3 + 3,936 \times 10^5 \cdot (a/c)^2 - 2,335 \times 10^5 \cdot (a/c) + 4,612 \times 10^4$
80%	$\rho = -1,728 \times 10^4 \cdot (a/c)^3 + 3,078 \times 10^4 \cdot (a/c)^2 - 1,819 \times 10^4 \cdot (a/c) + 3,640 \times 10^3$
100%	$\rho = -3,145 \times 10^3 \cdot (a/c)^3 + 5,643 \times 10^3 \cdot (a/c)^2 - 3,382 \times 10^3 \cdot (a/c) + 711,0$
Saturação (S_r)	Razão a/c de 0,48 a 0,7
Saturação	Equação da resistividade ρ ($\Omega \cdot m$)
40%	$\rho = -16.500 + 112.500 \cdot (a/c) - 125.000 \cdot (a/c)^2$
60%	$\rho = 1837,72 - 4197,72 \cdot (a/c) + 2613,63 \cdot (a/c)^2$
80%	$\rho = 156,55 - 149,55 \cdot (a/c) + 22,73 \cdot (a/c)^2$
100%	$\rho = 77,10 - 99,10 \cdot (a/c) + 45,45 \cdot (a/c)^2$

Onde R é a constante universal dos gases, cujo valor é aproximadamente 8,314 J/(mol·K); $\rho_0 = 1250,0 \Omega \cdot m$ é a resistividade à temperatura de referência $T_0 = 293,15 \text{ K}$; ΔU_p (KJ/mol) é a energia de ativação da relação de Arrhenius (Chrisp et al. [14]); S_r é o grau de saturação do concreto.

A limitação da densidade de corrente i_L (A/m^2) é determinada pelos seguintes parâmetros:

- Espessura do cobrimento do concreto, d (m);
- Coeficiente de difusão de oxigênio, D_{O_2} (m^2/s);
- Quantidade de oxigênio dissolvido na superfície do concreto, $C_{O_2}^s$ (mol/m^3).

Expressa por (Böhni, 2005):

$$i_L = \frac{z_c F D_{O_2} C_{O_2}^s}{d} \quad (14)$$

Entre esses fatores, o coeficiente de difusão de oxigênio pode ser representado como função da umidade relativa e da porosidade da pasta de cimento:

$$D_{O_2} = 1,92 \times 10^{-6} \cdot \varepsilon_p^{1,8} \cdot (1 - UR)^{2,2} \quad (15)$$

Onde UR é a umidade relativa e ε_p é a porosidade da pasta de cimento, cujo cálculo é baseado no traço e nas propriedades do concreto, conforme Papadakis et al. [15].

Admite-se que a temperatura ambiente influencia a quantidade de oxigênio dissolvido na água ($C_{O_2}^s$), sendo essa relação descrita por:

$$\ln C_{O_2}^s = -139,344 + \left(\frac{1,575 \times 10^5}{T} \right) - \left(\frac{6,642 \times 10^7}{T^2} \right) + \left(\frac{1,244 \times 10^{10}}{T^3} \right) - \left(\frac{8,622 \times 10^{11}}{T^4} \right) \quad (16)$$

onde $C_{O_2}^s$ (mol/m^3) é a quantidade de oxigênio dissolvido na água sob pressão padrão.

Esse modelo foi desenvolvido com base na teoria eletroquímica. No entanto, as equações que estimam a densidade de corrente efetiva e a resistividade do concreto são bastante complexas, o que pode dificultar sua aplicação em projetos de engenharia. O modelo de Pour-Ghaz et al. incorpora diversos modelos auxiliares, extraídos de outros estudos, para estimar a densidade de corrente limite e a resistividade do concreto. Esses modelos consideram variáveis como porosidade, grau de saturação e relação água-cimento, mas não incluem o teor de cloretos, um fator relevante no processo de corrosão. Como resultado, as

estimativas podem apresentar erros significativos devido a limitações do próprio modelo, como a ausência de parâmetros influentes e incertezas inerentes às equações utilizadas. Além disso, os cálculos exigidos pelo modelo de Pour-Ghaz et al. [11] são mais complexos quando comparados a outras abordagens disponíveis na literatura.

2.3.8. *Giovanni Pais (2015)*

Breysse et al. [16] (2018) propuseram um modelo empírico baseado em uma análise de regressão múltipla considerando diversos parâmetros onde mostrou que a umidade relativa (UR), temperatura (T), profundidade do cobrimento (c) e relação água/cimento (a/c) têm efeito significativo sobre a taxa de corrosão.

Fórmula proposta por Breysse et al. [16]:

$$\ln(I_{corr}) = 0,0444 \cdot UR - \frac{3346}{T} + 2,506 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) - 0,3928 \cdot c + constant \quad (17)$$

Partindo de um extenso conjunto de dados experimentais e de campo, conduziu-se uma regressão multilinear para obter a expressão matemática. Aplicando os dados encontrados no trabalho do Giovanni Pais Pellizzer [17] procedeu-se à adaptação da fórmula de Breysse, resultando na seguinte equação:

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$\ln(I_{corr}) = 0,0312 \cdot HR - \frac{4736}{T} - 1,695 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) - 0,391 \cdot c + 14,589 \quad (18)$$

A equação evidencia que o processo de corrosão das armaduras, sob condições típicas de exposição, está associado à umidade relativa do ar (HR, em %), à temperatura na superfície da armadura (T, em Kelvin) e a profundidade do cobrimento (c, em cm). O modelo integra variáveis ambientais e propriedades físicas do concreto, permitindo estimativas mais realistas do avanço da corrosão em condições naturais. No entanto, a ausência da consideração explícita do tempo como variável independente limita a capacidade do modelo de representar a progressão da corrosão ao longo dos anos, restringindo sua aplicabilidade em análises preditivas de durabilidade estrutural.

2.3.9. Lu (2019)

Lu et al. (2019) [18] propuseram um modelo empírico para estimar a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) com base em variáveis como teor de cloretos, temperatura, umidade relativa, resistividade elétrica do concreto e tempo de corrosão ativa. Desenvolvido a partir de dados experimentais, o modelo busca representar a influência combinada desses fatores na taxa de corrosão. Os autores destacaram que modelos anteriores não consideravam de forma explícita os efeitos da duração da corrosão e da umidade relativa, o que motivou a formulação deste novo modelo empírico, apresentado a seguir:

Fórmula para a taxa de corrosão:

$$i_{corr} = \frac{1}{\sqrt[3]{1+t}} \cdot \exp \left[1,23 + 0,618 \cdot \ln C_t - \frac{3034}{T \cdot (2,5+HR)} - 5 \times 10^{-3} \cdot \rho \right] \quad (19)$$

A equação mostra que o processo de corrosão das armaduras em ambientes de serviço regulares está relacionado ao teor de cloretos (C_t , kg/m³), à temperatura (T, K) na superfície da armadura, à umidade relativa do ar (HR, em %) e a resistividade elétrica do cobrimento de concreto (ρ , Ω·cm) e ao tempo de corrosão (t, anos).

A resistividade elétrica ρ é calculada segundo Yang [19]:

$$\rho = (2,22 \times 10^{-4} \cdot c^2 - 0,18848 \cdot c + 48,3516) \cdot K_{w/b} \cdot K_{Cl} \cdot K_T \cdot K_{MA} \cdot K_{p,E} \quad (20)$$

Onde c representa o teor de material gelificado no concreto (kg/m³) e os fatores de correção $K_{w/b}$, K_{Cl} , K_T , K_{MA} , $K_{p,E}$ consideram, respectivamente, os efeitos da relação água/aglomerante (w/b), do teor de cloretos, da temperatura ambiente, das adições minerais e do ambiente de exposição sobre a resistividade elétrica do concreto, sendo esses fatores definidos pelas equações apresentadas a seguir.

Fatores de Correção:

Para a relação água/aglomerante:

$$K_{w/b} = 20,895 \cdot (w/b)^2 - 19,551 \cdot (w/b) + 5,4774 \quad (21)$$

Para o teor de cloretos:

$$K_{Cl} = 607480 \cdot C_t^2 - 2242,3 \cdot C_t + 2,9926 \quad (22)$$

Para a temperatura:

$$K_T = -0,0133 \cdot T + 4,8945 \quad (23)$$

Para adições minerais:

$$K_{MA} = \begin{cases} 3438,34 \cdot C_t + 1,115 \cdot y + 0,967, & \text{para concreto com cinzas volantes} \\ 3759,9 \cdot C_t - 1,3 \cdot y^2 + 1586,2 \cdot C_t + 2,29 \cdot y + 1, & \text{para concreto com escória} \\ 21113,92 \cdot C_t + 30,189 \cdot y + 1, & \text{para concreto com sílica ativa} \\ 1, & \text{para concreto com cimento Portland comum} \end{cases}$$

Para o ambiente de exposição:

$$K_{p,E} = \begin{cases} 1, & \text{zona atmosférica ou } C_t > 2,5 \text{ kg/m}^3 \\ 0,88, & \text{zona de respingos (splash zone)} \\ 0,67, & \text{zona de maré (tidal zone)} \end{cases}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise do erro do modelo

Como os dados de ensaio constituem a base fundamental para os modelos empíricos de previsão, e esses dados apresentam um certo grau de dispersão intrínseca, torna-se essencial investigar a incerteza associada ao erro dos modelos avaliados. Para isso, analisam-se os sete modelos empíricos de previsão mencionados anteriormente, utilizando a seguinte expressão para quantificar o erro do modelo (ME):

$$ME = \frac{\text{Taxa de corrosão experimental}}{\text{Taxa de corrosão calculada}}$$

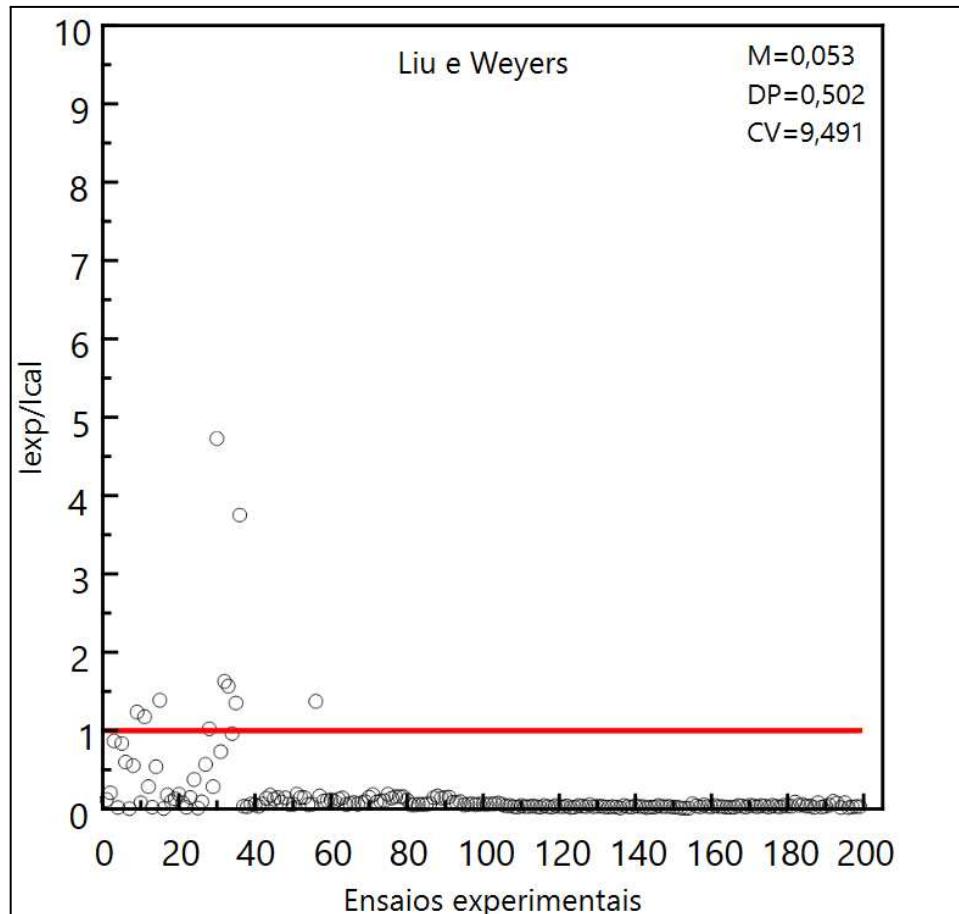
O parâmetro ME, definido como a razão entre os valores experimentais e os valores previstos pelos modelos empíricos, foi utilizado para avaliar o erro relativo das previsões. Com base nas 199 combinações experimentais analisadas, foram determinados 199 valores de ME para cada modelo. A partir desses dados, foi construído um gráfico representando a quantidade de ensaios correspondente a cada faixa de ME, o que possibilita visualizar a distribuição dos erros e identificar possíveis tendências de subestimação ($ME > 1$) ou superestimação ($ME < 1$) das taxas de corrosão. Além disso, foram calculados os principais parâmetros estatísticos: valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação para cada modelo, de forma a quantificar, respectivamente, a tendência central, a dispersão dos resultados e a consistência relativa das previsões.

3.2. Análise dos resultados

3.2.1. Liu e Weyers (1998)

O modelo elaborado por Liu e Weyers considera variáveis essenciais, como o teor de cloreto, a temperatura, a resistividade elétrica do concreto e o tempo de exposição, o que proporciona grande flexibilidade para sua aplicação em diferentes condições ambientais. O gráfico 02 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos a partir da aplicação desse modelo, evidenciando sua capacidade preditiva em relação aos dados experimentais analisados. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 02- Análise do modelo Liu and Weyers



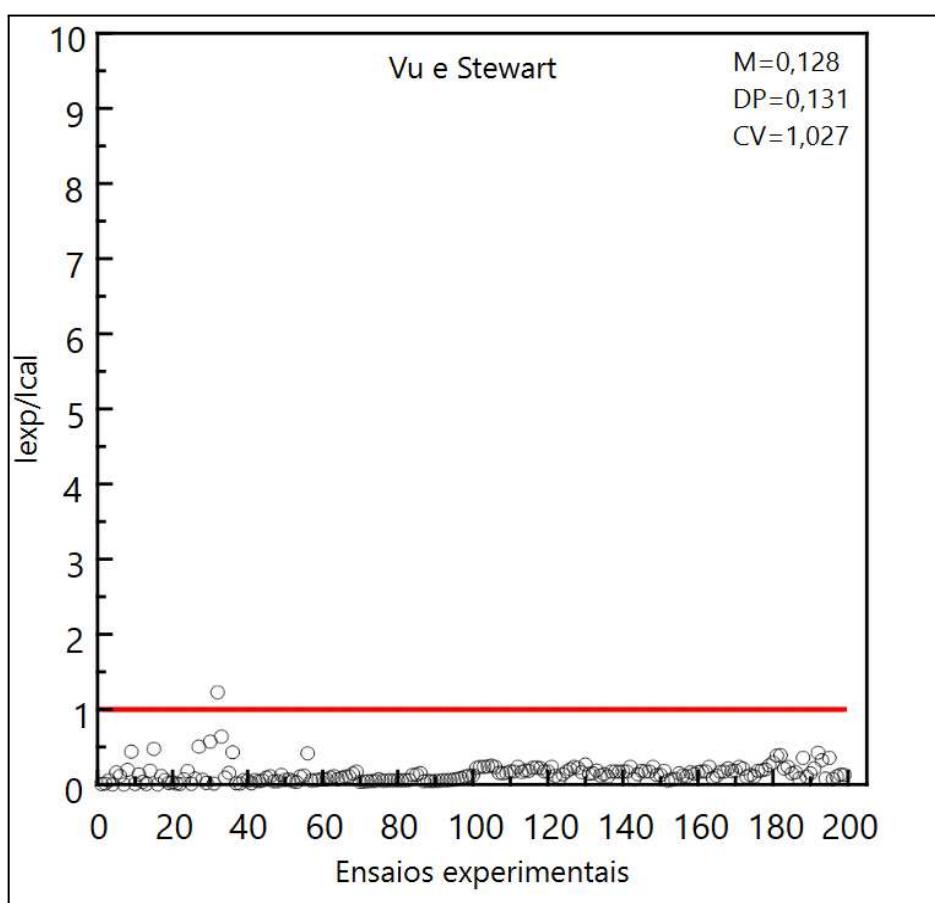
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Amplamente empregado em simulações de durabilidade de estruturas de concreto armado, o modelo apresentou, conforme ilustrado na imagem acima, um valor médio de ME igual a 0,053, evidenciando uma tendência clara de superestimação das taxas de corrosão, ou seja, as previsões são, em média, superiores aos valores experimentais, o que indica que, sem ajustes, o modelo pode não fornecer estimativas absolutas precisas. Por outro lado, o coeficiente de variação (CV) de 9,491, calculado a partir de um desvio padrão de 0,502, revela uma dispersão extremamente elevada dos resultados em relação à média, caracterizando baixa estabilidade estatística e significativa variabilidade interna. Esse comportamento indica que, além do erro médio relevante, há grande flutuação nas previsões, o que limita a confiabilidade do modelo e reforça a necessidade de calibrações ou ajustes mais robustos para aplicações práticas.

3.2.2. Vu e Stewart (2000)

O modelo proposto por Vu e Stewart possui uma estrutura matemática simples, o que facilita sua implementação computacional e favorece sua utilização em contextos com baixa variabilidade climática ou exposição ambiental moderada. O gráfico 03 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 03- Análise do modelo Vu e Stewart.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

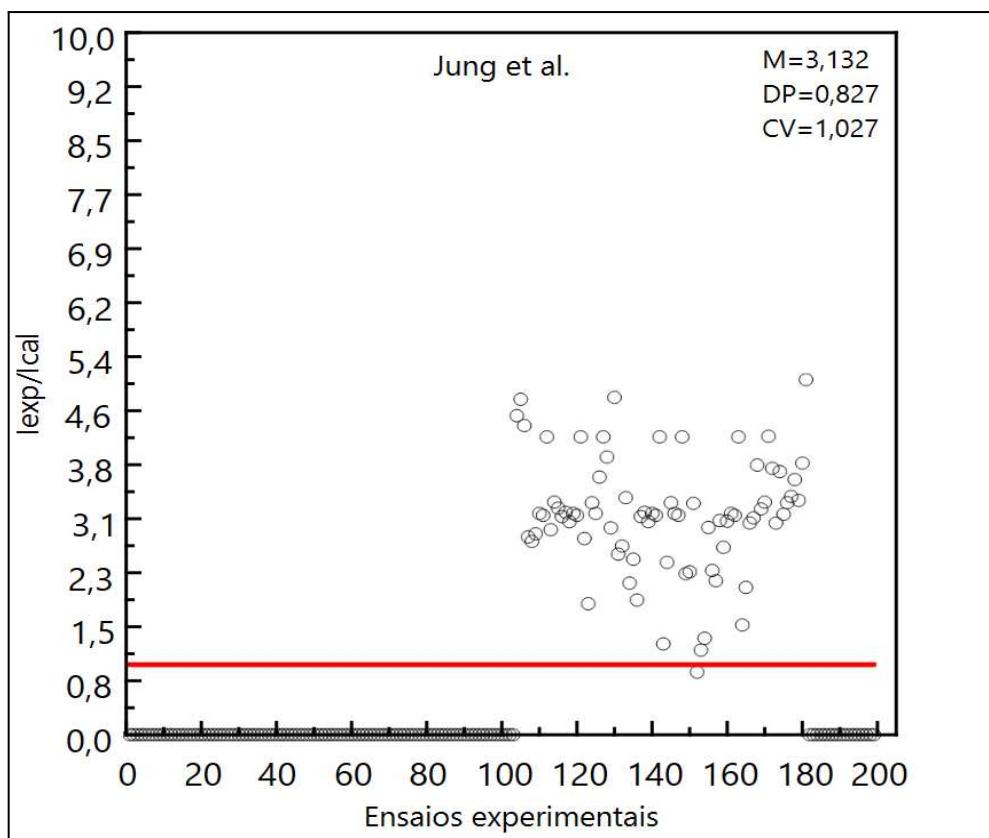
Conforme ilustrado no gráfico 03, o valor médio de ME igual a 0,128 evidencia uma acentuada tendência à superestimação das taxas de corrosão, ou seja, os valores calculados pelo modelo foram, em média, consideravelmente superiores aos observados experimentalmente, caracterizando um viés sistemático. Em complemento, o coeficiente de variação (CV) de 1,027, obtido a partir de um desvio padrão de 0,131, revela elevada dispersão relativa dos resultados em torno da média, o que indica baixa estabilidade estatística

e variabilidade significativa entre os ensaios. Essa combinação de erro médio positivo e alta variabilidade compromete a confiabilidade do modelo para uso direto, tornando necessária a aplicação de ajustes ou calibrações mais robustas para garantir previsões consistentes e próximas dos valores reais.

3.2.3. Jung (2003)

O gráfico 04 apresenta a distribuição dos valores de erro médio (ME) resultantes da aplicação do modelo de Jung, destacando a capacidade preditiva do modelo ao comparar suas estimativas com os dados experimentais disponíveis. Esse modelo se caracteriza por considerar variáveis ambientais e materiais relevantes para a corrosão, proporcionando uma abordagem robusta para a previsão da taxa de corrosão em diferentes condições de exposição. O gráfico 04 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 04- Análise do modelo Jung et al.



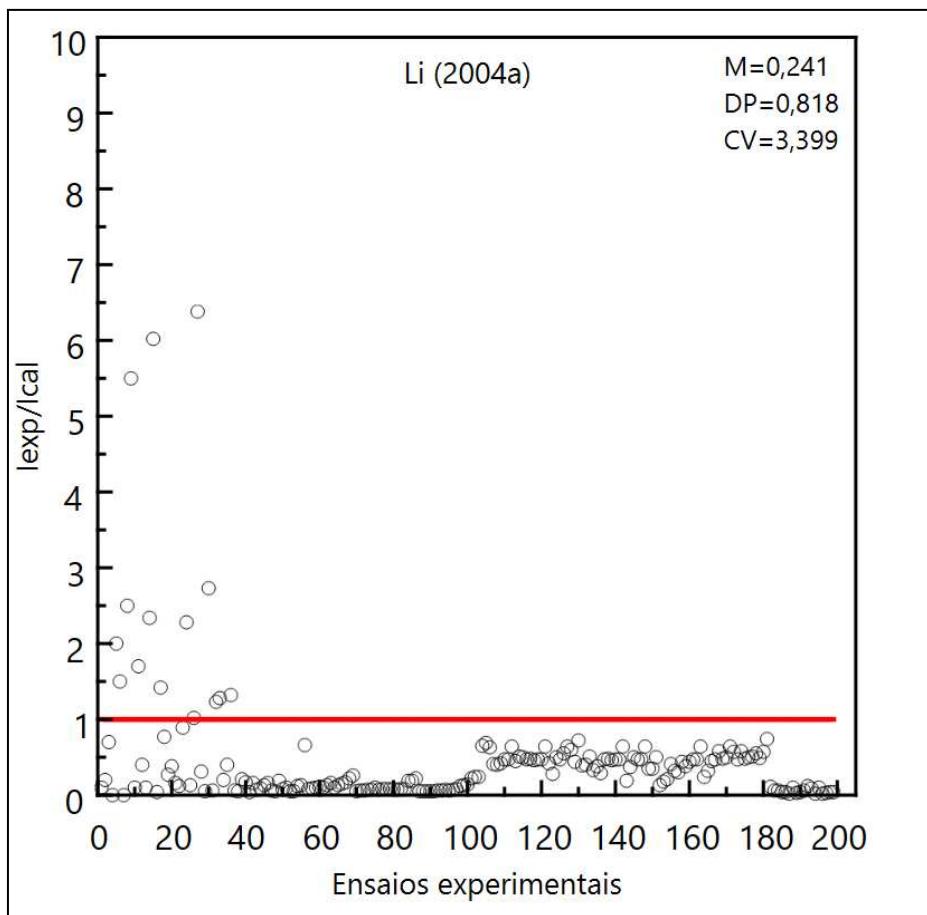
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo empírico de Jung foi aplicado com restrições significativas. Dos 199 pontos experimentais disponíveis, apenas cerca de 77 puderam ser utilizados na avaliação, pois certas condições de ensaio não atendiam aos parâmetros exigidos pela equação, limitando de forma direta sua aplicabilidade, aspecto claramente evidenciado no Gráfico 04. Para o subconjunto de dados em que a aplicação foi possível, o modelo apresentou um valor médio de ME igual a 3,132, evidenciando uma acentuada tendência à subestimação das taxas de corrosão, ou seja, os valores calculados foram substancialmente inferiores aos observados experimentalmente, caracterizando um viés sistemático negativo. Complementarmente, o coeficiente de variação (CV) de 0,264, obtido a partir de um desvio padrão de 0,827, indica um nível moderado a elevado de dispersão relativa, sugerindo baixa consistência estatística nas previsões. Essa combinação de erro médio elevado e variabilidade considerável compromete a confiabilidade do modelo para uso direto, tornando necessária a aplicação de calibrações ou ajustes específicos para o cenário analisado. A distribuição gráfica dos valores de ME reforça essa conclusão, mostrando ampla variação entre os pontos e diferenças significativas no erro relativo entre os ensaios, o que restringe sua utilização prática em análises de durabilidade sem prévia adaptação aos dados reais, sobretudo em condições ambientais mais agressivas.

3.2.4. Li (2004a)

O modelo proposto por Li (2004a) foi avaliado quanto à sua capacidade preditiva das taxas de corrosão experimentais, com a análise dos valores de erro médio (ME) evidenciando tendências, dispersões e limitações do modelo em diferentes condições de ensaio. O gráfico 05 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados que se baseia exclusivamente na variável tempo, oferecendo uma abordagem simplificada para a previsão da taxa de corrosão ao longo do período de exposição. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 05- Análise do modelo Li(2004a).



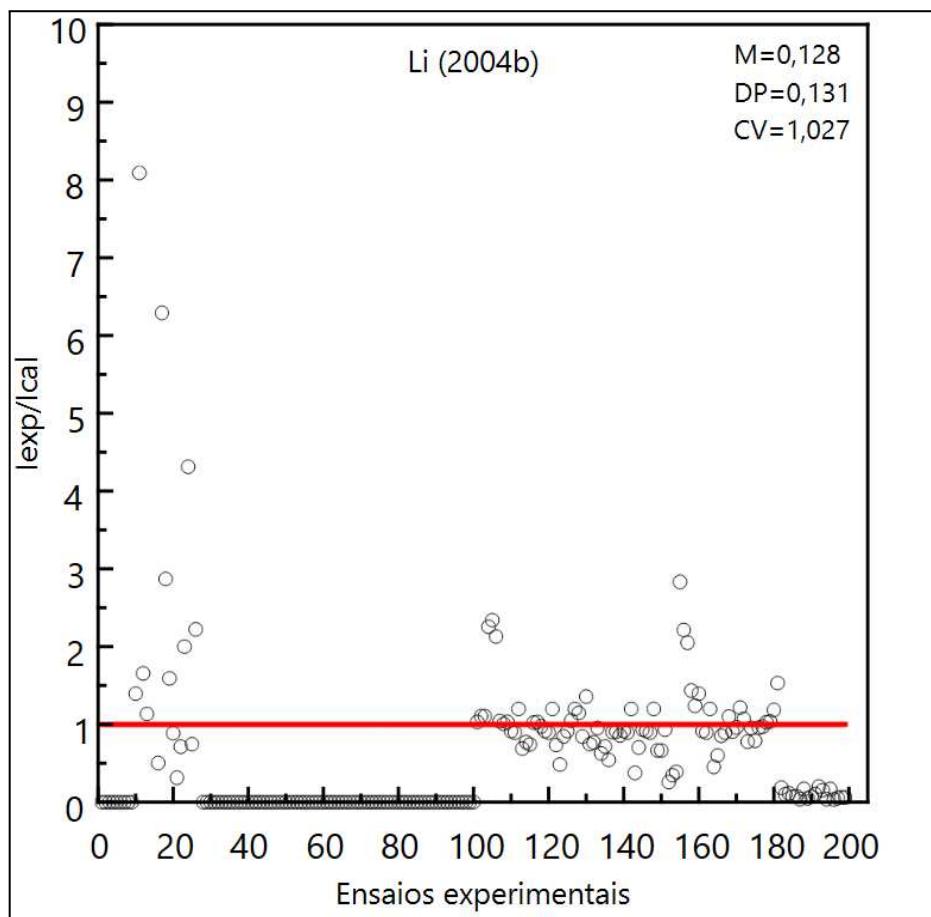
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo proposto por Li (2004a) apresentou, conforme ilustrado no gráfico 05, um valor médio de ME igual a 0,241, indicando de forma evidente uma tendência à superestimação das taxas de corrosão, ou seja, os valores calculados pelo modelo foram, em média, superiores aos dados experimentais, o que compromete a acurácia direta do modelo sem uma calibração adequada, tornando-o menos confiável para uso imediato. Em relação à dispersão relativa, o coeficiente de variação de 3,399, associado a um desvio padrão de 0,818, revela que a variabilidade proporcional dos resultados é elevada, impactando negativamente a estabilidade estatística das previsões. A análise gráfica mostra que, embora a maioria dos pontos esteja concentrada abaixo da linha de referência ($ME = 1$), persistem outliers de grande magnitude, especialmente nos primeiros ensaios experimentais, onde se observam valores de ME superiores a 6,0. A presença de valores extremos limita a consistência do modelo e demonstra que, apesar de contemplar variáveis relevantes da corrosão, sua aplicação prática demanda calibração e validação frente a dados reais.

3.2.5. Li (2004b)

O modelo proposto por Li (2004b) representa uma extensão e aprimoramento do modelo anterior (Li, 2004a), ao incorporar múltiplos fatores que influenciam a taxa de corrosão. Sua capacidade preditiva foi avaliada com base nos dados experimentais disponíveis, permitindo a identificação de tendências sistemáticas, dispersões e limitações sob diferentes condições de ensaio. O gráfico 06 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados, cuja abordagem multifatorial proporciona maior sensibilidade às condições específicas de exposição, embora também exija calibração cuidadosa para assegurar a confiabilidade das previsões. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 06- Análise do modelo Li(2004b).



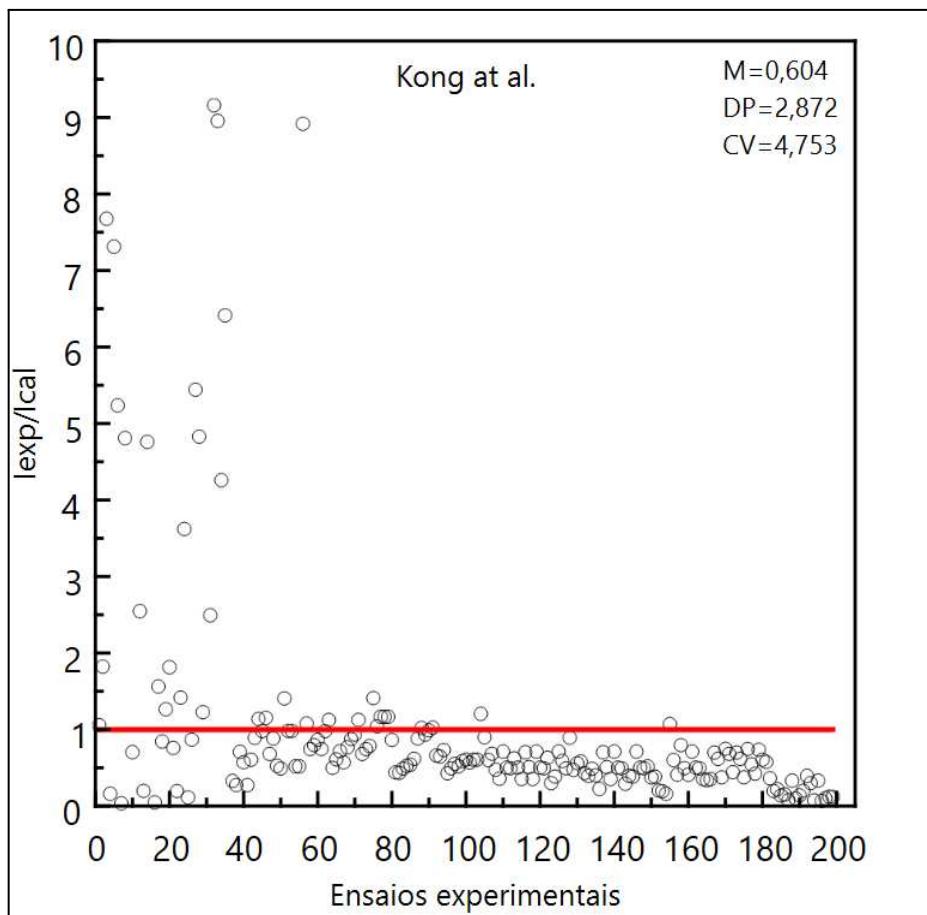
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo empírico de Li (2004b) foi aplicado com restrições significativas conforme evidenciado no gráfico 06. Dos 199 pontos experimentais disponíveis, apenas cerca de 96 puderam ser utilizados na avaliação, uma vez que certas condições de ensaio não atendiam aos parâmetros exigidos pela equação, limitando diretamente sua aplicabilidade, aspecto claramente evidenciado no Gráfico 05. O modelo apresentou um valor médio de ME igual a 0,954, evidenciando uma tendência à superestimação das taxas de corrosão, ou seja, os valores previstos foram, em média, superiores aos observados experimentalmente ($ME < 1$), comprometendo sua acurácia preditiva sem calibração específica para o contexto de aplicação. O coeficiente de variação (CV) elevado de 2,968 indica forte variabilidade relativa aos valores médios, revelando baixa consistência e robustez estatística do modelo. Em complemento, o desvio padrão de 2,830 confirma a ampla dispersão dos erros absolutos, refletindo a presença marcante de outliers. A distribuição gráfica dos resultados evidencia essa instabilidade, com diversos pontos ultrapassando $ME > 10$ e máximos próximos de 20, especialmente nos ensaios iniciais, demonstrando sensibilidade do modelo a determinadas condições experimentais. Dessa forma, embora o modelo possa capturar tendências em contextos restritos, sua aplicação prática requer ajustes locais rigorosos ou a utilização de modelos estatisticamente mais estáveis para fornecer estimativas confiáveis em análises de durabilidade estrutural.

3.2.6. Kong (2006)

O modelo proposto por Kong foi avaliado quanto à sua capacidade preditiva das taxas de corrosão observadas experimentalmente. A análise dos valores de erro médio (ME) permitiu identificar tendências sistemáticas, dispersões e limitações do modelo em diferentes condições de ensaio. O gráfico 07 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados, que adota uma formulação empírica de caráter multifatorial, resultando em maior sensibilidade às variações nas condições de exposição. No entanto, essa mesma sensibilidade implica a necessidade de calibração cuidadosa para que o modelo alcance níveis adequados de confiabilidade em aplicações práticas. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 07- Análise do modelo Kong et al.



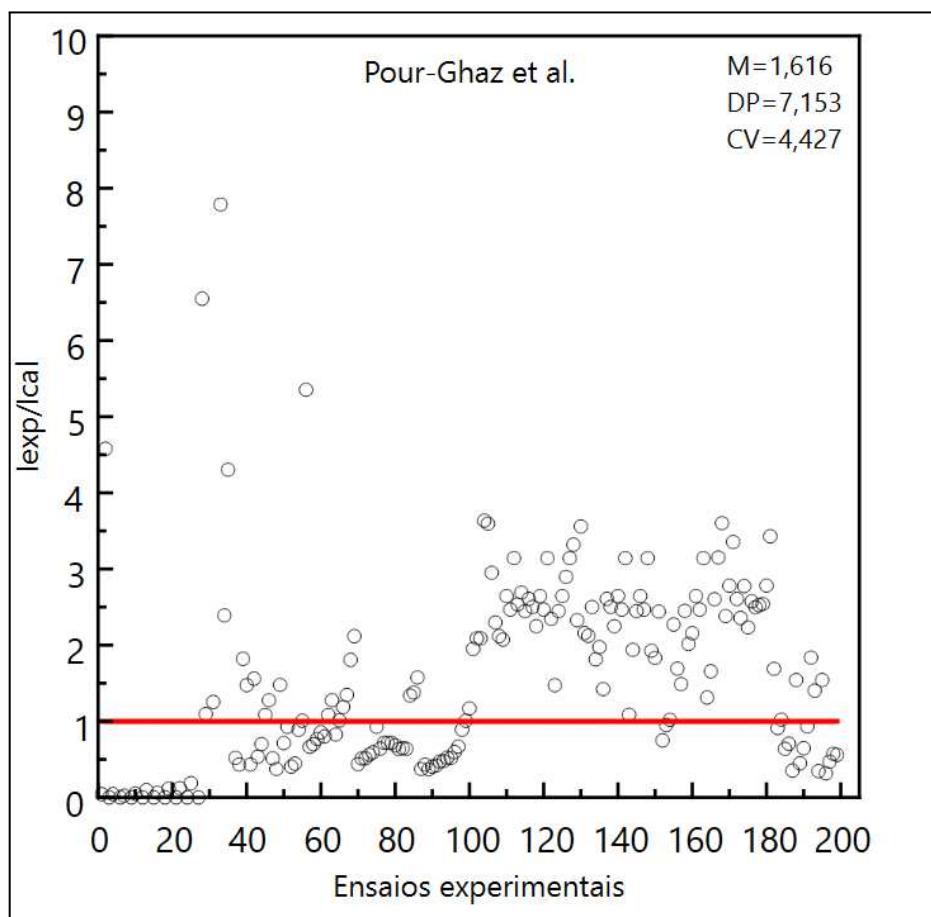
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Conforme pode-se verificar no gráfico 07, o modelo de Kong apresentou um valor médio de ME igual a 0,604, evidenciando uma clara tendência à superestimação das taxas de corrosão, ou seja, os valores previstos foram, em média, substancialmente superiores aos observados experimentalmente ($ME < 1$), comprometendo sua acurácia preditiva sem calibração específica para o contexto de aplicação. O coeficiente de variação (CV) extremamente elevado de 4,753 indica forte variabilidade relativa aos valores médios, revelando baixa consistência e robustez estatística do modelo. Em complemento, o desvio padrão de 2,872 confirma a ampla dispersão dos erros absolutos, refletindo a presença marcante de outliers. A distribuição gráfica dos resultados evidencia essa instabilidade, com diversos pontos ultrapassando $ME > 10$ e máximos próximos de 27, especialmente nos ensaios iniciais, mostrando sensibilidade do modelo a determinadas condições experimentais. Dessa forma, embora o modelo possa capturar tendências em contextos restritos, sua aplicação prática requer ajustes locais rigorosos ou a utilização de modelos estatisticamente mais estáveis para fornecer estimativas confiáveis em análises de durabilidade estrutural.

3.2.7. Pour-Ghaz (2009)

O modelo proposto por Pour-Ghaz foi avaliado quanto à sua capacidade preditiva das taxas de corrosão observadas experimentalmente. A análise dos valores de erro médio (ME) permitiu identificar tendências sistemáticas, dispersões e limitações do modelo em diferentes condições de exposição. O gráfico 08 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados, que adota uma formulação empírica de caráter multifatorial. Essa complexidade confere maior sensibilidade às variações nas condições ambientais, permitindo captar influências importantes, mas implica também na necessidade de calibração cuidadosa para que o modelo alcance níveis adequados de confiabilidade em aplicações práticas. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 08- Análise do modelo Pour-Ghaz et al.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo de Pour-Ghaz apresentou um valor médio de ME igual a 1,616, indicando uma clara tendência à subestimação das taxas de corrosão, ou seja, os valores previstos pelo modelo foram, em média, inferiores aos observados experimentalmente, comprometendo sua acurácia preditiva em aplicações diretas sem ajustes. A análise considerou 190 dos 199 pontos experimentais, pois apenas esses atenderam às condições necessárias para aplicação da equação. O coeficiente de variação (CV) de 4,427 evidencia elevada variabilidade relativa aos valores médios, revelando baixa consistência e robustez estatística do modelo. Em complemento, o desvio padrão de 7,153 confirma a ampla dispersão dos erros absolutos, refletindo a presença significativa de outliers, especialmente concentrados nos primeiros 50 ensaios, com alguns valores de ME ultrapassando 10. Embora a maioria dos pontos esteja abaixo de $ME = 5$, a ocorrência de valores extremos contribui para a elevação da média e do desvio padrão, mascarando o desempenho do modelo na maior parte dos casos. A distribuição assimétrica reforça que o modelo apresenta viés sistemático aliado a altíssima variabilidade, tornando-o estatisticamente instável e inadequado para uso direto sem calibração. Entretanto, sua aplicação pode ser considerada em cenários conservadores, nos quais a previsão de menores taxas de corrosão não comprometa a segurança estrutural; para contextos mais exigentes, recomenda-se filtragem de outliers e calibração específica conforme o material e o ambiente de exposição.

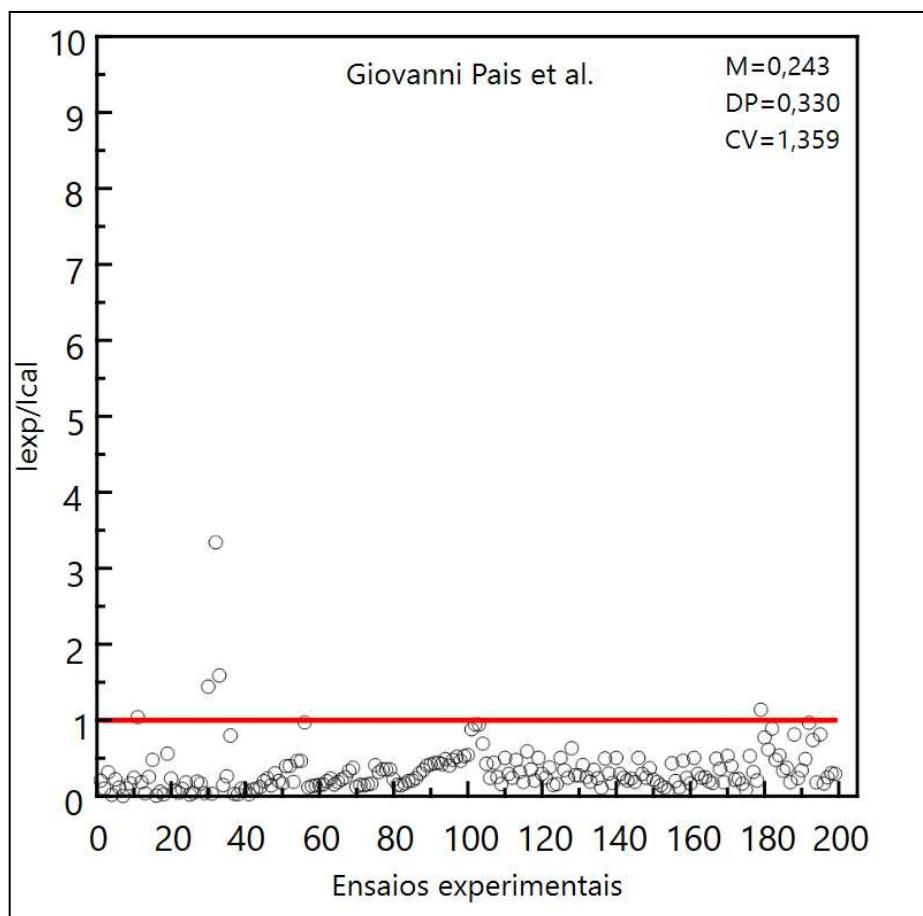
3.2.8. Giovanni Pais (2015)

O modelo elaborado por Giovanni Pais foi submetido a uma rigorosa avaliação quanto à sua precisão na predição das taxas de corrosão observadas experimentalmente. A análise dos valores do erro médio (ME) revelou a existência de padrões sistemáticos, evidenciando tanto subestimações quanto superestimações em determinados intervalos de dados, além de demonstrar a variabilidade inerente e as limitações do modelo quando aplicado a diferentes condições ambientais e parâmetros de exposição.

O gráfico 09 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados, que se fundamenta em uma formulação empírica multifatorial, incorporando variáveis como a temperatura, umidade relativa, relação água/cimento e profundidade do cobrimento. Essa complexidade metodológica confere ao modelo uma maior capacidade de captar variações ambientais significativas que influenciam o processo de corrosão. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

No entanto, a sua aplicação prática requer ajustes calibrados, pois a sensibilidade a certos parâmetros pode resultar em desvios consideráveis em ambientes extremos ou não contemplados na base original de dados, especialmente em estruturas expostas a condições ambientais agressivas ou variáveis.

Gráfico 09- Análise do modelo Giovanni Pais et al.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

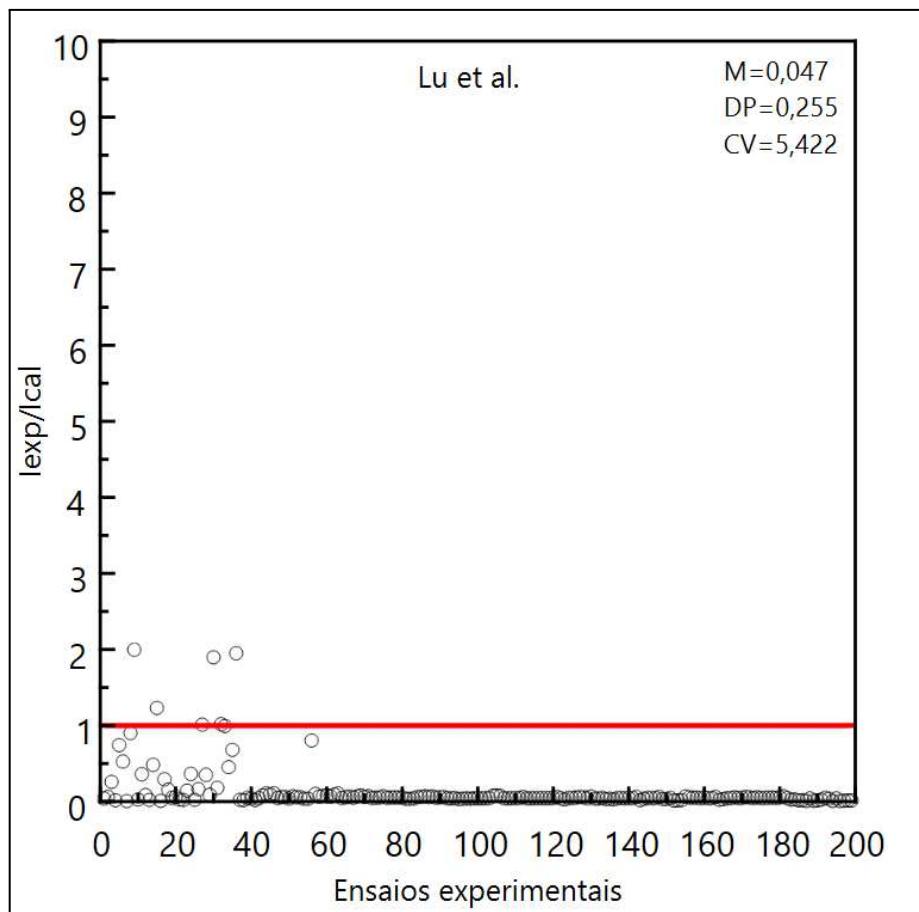
O modelo de Giovanni Pais apresentou um valor médio de ME igual a 0,243, indicando uma superestimação sistemática das taxas de corrosão, ou seja, os valores previstos foram, em média, significativamente superiores aos observados experimentalmente, comprometendo sua acurácia preditiva em aplicações diretas sem ajustes. Em relação à dispersão, o coeficiente de variação (CV) de 1,359 evidencia consistência interna elevada, revelando baixa variabilidade relativa aos valores médios. Complementarmente, o desvio padrão de 0,330 confirma que a amplitude dos erros absolutos é limitada, refletindo

estabilidade estatística e baixa presença de outliers. A distribuição gráfica reforça essa regularidade, com a maioria dos pontos concentrada abaixo de $ME = 1$ e apenas alguns valores dispersos acima de 1,2, indicando que a tendência sistemática de superestimação não compromete o comportamento geral do modelo. Dessa forma, o modelo de Giovanni Pais se mostra estatisticamente confiável e promissor para aplicações práticas, especialmente em simulações de durabilidade estrutural, desde que seja complementado por calibração contextual e controle das variáveis de entrada.

3.2.9. Lu (2019)

O modelo desenvolvido por Lu et al. (2019) foi submetido a uma avaliação criteriosa quanto à sua capacidade preditiva das taxas de corrosão observadas experimentalmente, e a análise dos valores de erro médio (ME) indicou a presença de padrões sistemáticos, evidenciando tanto subestimações quanto superestimações em determinados intervalos, além de revelar a variabilidade e as limitações inerentes ao modelo quando aplicado em diferentes condições de exposição.

O gráfico 10 apresenta, no intervalo de 0 a 10, a distribuição dos valores de erro médio (ME) obtidos na aplicação do modelo, evidenciando seu desempenho preditivo em comparação com os dados experimentais analisados, cuja formulação empírica multifatorial integra variáveis como temperatura e umidade relativa, ampliando a capacidade de representar variações ambientais relevantes que influenciam o processo corrosivo, embora se trate de um modelo recente que não considera a relação água/cimento nem a espessura de cobrimento do concreto, fatores de grande relevância para a estimativa da propagação da corrosão, de modo que sua utilização é recomendada apenas após a realização de ajustes corretivos, especialmente em condições ambientais distintas das contempladas na base original de dados. A versão completa do gráfico encontra-se disponível no Anexo B.

Gráfico 10- Análise do modelo Lu et al.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O modelo empírico de Lu apresentou um valor médio de ME igual a 0,047, indicando uma forte tendência à superestimação das taxas de corrosão, ou seja, os valores previstos foram, em média, significativamente superiores aos observados experimentalmente, o que pode levar a avaliações conservadoras da durabilidade caso não seja aplicada calibração. O coeficiente de variação (CV) extremamente elevado de 5,422 evidencia forte dispersão relativa aos valores médios, indicando baixa consistência e repetibilidade das previsões. Em complemento, o desvio padrão de 0,255 confirma que, apesar da alta variabilidade relativa, a amplitude dos erros absolutos é limitada. A análise visual dos resultados evidencia concentração dos valores abaixo de $ME = 1$, com poucos outliers, reforçando que a tendência sistemática de superestimação se mantém consistente, mesmo diante da variabilidade relativa elevada. Assim, apesar do viés sistemático, o modelo de Lu é aplicável mediante calibração, sobretudo em estimativas conservadoras, mas sua instabilidade, refletida pelo alto CV, exige cautela.

3.3. Análise comparativas dos resultados

Os modelos empíricos utilizados para prever a taxa de corrosão são, em sua maioria, desenvolvidos com base em dados experimentais obtidos em contextos específicos, definidos conforme os objetivos de cada pesquisa. Dada a complexidade do fenômeno da corrosão em estruturas de concreto armado influenciado por uma multiplicidade de fatores, como temperatura, umidade relativa, profundidade de cobrimento, teor de cloretos, entre outros torna-se inviável incorporar todas essas variáveis em um único modelo. Por essa razão, cada estudo seleciona os parâmetros considerados mais relevantes de acordo com as condições experimentais adotadas. Como resultado, são obtidos valores distintos de erro médio, desvio padrão e coeficiente de variação, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Comparação de Modelos Empíricos de Previsão

Modelo	Valor Médio	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Valor Máximo	Valor Mínimo
Liu e Weyers (1998)	0,053	0,502	9,491	4,728	0,004
Vu e Stewart (2000)	0,128	0,131	1,027	1,227	0,001
Jung et al. (2003)	3,132	0,827	0,264	5,058	0,893
Li (2004a)	0,241	0,818	3,399	6,378	0,018
Li (2004b)	0,954	2,830	2,968	22,994	0,259
Kong et al. (2006)	0,604	2,872	4,753	26,031	0,034
Pour-Ghaz et al. (2009)	1,616	7,153	4,427	57,124	0,025
Giovanni Pais et al. (2015)	0,243	0,330	1,359	3,341	0,003
Lu et al. (2019)	0,047	0,255	5,422	1,997	0,007

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A análise comparativa dos modelos apresentados na Tabela 5 evidencia diferenças expressivas nos valores médios de erro médio (ME), parâmetro central para avaliar a tendência de superestimação ou subestimação das taxas de corrosão. De modo geral, a maioria dos modelos apresenta médias inferiores a 1, caracterizando superestimação dos valores experimentais. Entre eles, destacam-se Lu e Liu e Weyers, com médias extremamente baixas (0,047 e 0,053, respectivamente), o que indica um viés acentuado de superestimação.

Outros modelos com médias igualmente baixas incluem Vu e Stewart (0,128) e Giovanni Pais (0,243), que, embora superestimem, o fazem de forma mais moderada. Já Li (2004a) e Kong apresentaram médias de 0,241 e 0,604, também no campo da superestimação, mas mais próximas da neutralidade.

Em contrapartida, os modelos de Jung (3,132) e Pour-Ghaz (1,616) indicam subestimação sistemática, com valores acima de 1, sendo que o modelo de Li (2004b) apresentou a maior média entre todos (0,954), ainda próxima da neutralidade, mas com ampla dispersão nos resultados.

Quando se observa o coeficiente de variação (CV), indicador de estabilidade relativa dos resultados, verifica-se que os modelos mais consistentes são Vu e Stewart (1,027), Giovanni Pais (1,359) e Jung (0,264), que associam um nível razoável de precisão a baixa dispersão relativa. Por outro lado, Liu e Weyers (9,491), Lu (5,422), Kong (4,753) e Pour-Ghaz (4,427) apresentaram alta variação relativa, sinalizando menor previsibilidade.

Os casos mais críticos são Li (2004a) (3,399) e Li (2004b) (2,968), cujo desempenho, apesar de médias moderadas, sofre com a elevada dispersão dos dados, comprometendo a robustez estatística. Assim, modelos como Vu e Stewart, Giovanni Pais e Jung surgem como opções de maior estabilidade, enquanto Lu e Liu e Weyers, embora apresentem médias baixas, requerem ajustes para reduzir a variabilidade e melhorar a confiabilidade preditiva.

4. CONCLUSÃO

Para concluir, foi possível verificar e classificar os modelos mais representativos. Segue-se a classificação indicada, organizada com base no desempenho observado na análise, considerando primeiramente o valor médio do erro (ME) mais próximo de 1, o que indica maior precisão em relação aos valores experimentais, e em seguida o coeficiente de variação (CV) mais próximo de 0, que evidencia menor dispersão dos resultados. Dessa forma, destacam-se os modelos com maior precisão e consistência preditiva.

Melhores desempenhos (ME próximo de 1):

- Li (2004b) – ME = 0,954 | CV = 2,968
- Kong – ME = 0,604 | CV = 4,753
- Pour-Ghaz – ME = 1,616 | CV = 4,427

Desempenho intermediário (ME distante de 1):

- Giovanni Pais – ME = 0,243 | CV = 1,359
- Li (2004a) – ME = 0,241 | CV = 3,399
- Vu e Stewart – ME = 0,128 | CV = 1,027

Desempenho fraco (ME muito distante de 1):

- Liu e Weyers – ME = 0,053 | CV = 9,491
- Lu – ME = 0,047 | CV = 5,422
- Jung – ME = 3,132 | CV = 0,264

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BREYSSE, D.; YOTTE, S.; SALTA, M.; SCHOEFS, F.; RICARDO, J.; PEREIRA, E. (2006). [Uncertainties in NDT condition assessment of corroding structures in marine environment.](#) LNEC, Lisboa, Portugal, 2008.
- CHRISP, T.M.; STARRS, G.; MCCARTER, W.J. [Temperature-conductivity relationships for concrete: An activation energy approach.](#) Journal of Materials Science Letters 20, 2001. p. 1085–1087.
- GENTIL, V. [Corrosão](#). 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. p. 306.
- GENTIL, V. [Corrosão](#). 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. p. 306.
- GJØRV, Odd E.; VENNESLAND, Øystein E.; A.H.S. El-Busaidy. [Electrical Resistivity Of Concrete In The Oceans](#). Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1977.
- HELENE, Paulo. Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análises e intervenção. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. p. 1.
- HELENE, Paulo. Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análises e intervenção. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. p. 2.
- Jung, W.-Y., Yoon, Y.-S., & Sohn, Y.-M. [Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion](#). Cement and Concrete Research, 2003. p. 663–677.
- KONG, Qiming et al. The corrosion rate of reinforcement in chloride contaminated concrete. Low Temperature Architecture Technology, 2006. p. 1-2.
- Liu, T., Weyers, R. W. [Modeling the Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures](#). Cement and Concrete Research, 1998. p. 365–379.
- LI, G. (2004b). Durability behaviour and basic models of reinforced concrete deterioration under climate environments. China University of Mining and Technology, Xuzhou, 2004.
- Lu Z-H, Lun P-Y, Li W, Luo Z, Li Y, Liu P. [Empirical model of corrosion rate for steel reinforced concrete structures in chloride-laden environments](#). Advances in Structural Engineering. 2018. p. 223-239.
- LU, Z.-H.; ZHAO, Y.-G.; YU, Ke. Stochastic modeling of corrosion propagation for service life prediction of chloride contaminated RC structures. In: Life-Cycle Civil Engineering. CRC Press, 2008. p. 215-222.
- Lu Z-H, Lun P-Y, Li W, Luo Z, Li Y, Liu P. [Empirical model of corrosion rate for steel reinforced concrete structures in chloride-laden environments](#). Advances in Structural Engineering. 2018. p. 223-239.
- Lu Z-H, Lun P-Y, Li W, Luo Z, Li Y, Liu P. [Empirical model of corrosion rate for steel reinforced concrete structures in chloride-laden environments](#). Advances in Structural Engineering. 2018. p. 223-239.

Melchers, R. E., Li, C. Q., & Lawanwisut, W. [Probabilistic modeling of structural deterioration of reinforced concrete beams under saline environment corrosion](#). Structural Safety, 2008. p. 447–460.

Pour-Ghaz, M., Isgor, O. B., Ghods, P. [The effect of temperature on the corrosion of steel in concrete. Part 1: Simulated polarization resistance tests and model development](#). Corrosion Science, 2009. p. 415–425.

Pellizzer, Giovanni Pais. (2015).[Análise mecânica e probabilística da corrosão de armaduras de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos](#). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PINHEIRO, Sayonara Maria de Moraes. [Impacto da colonização do fungo Cladosporium sphaerospermum sobre a argamassa do concreto](#). Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.

QING LI, Chun. (2004a). [Reliability based service life prediction of corrosion affected concrete structures](#). Journal of Structural Engineering, 2004. p. 1570-1577.

RIBEIRO, Daniel Véras. [Corrosão e degradação em estruturas de concreto: teoria, controle e técnicas de análises e intervenção](#). 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. p. 125.

SANTOS, Camila Freitas dos. Patologia de estruturas de concreto armado. [Patologia de estruturas de concreto armado](#). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

Vagelis Papadakis, Costas Vayenas, Michael Fardis. [Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete](#). Materials Journal, 1991. p. 186-196.

Vu, K.A.T., Stewart, M. G. [Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models](#). Structural Safety, 2000. p. 313–333.

XI, Yunping; BAŽANT, Zdeněk P.; JENNINGS, Hamlin M. [Moisture diffusion in cementitious materials adsorption isotherms](#). Advanced cement based materials, 1994. p. 248-257.

YANG, Y. T. Research on concrete resistivity and reinforced concrete steel corrosion rate. Dalian University of Technology, Liaoning, China, 2009.

ANEXO A - DADOS DE ENSAIO DA TAXA DE CORROSÃO EXPERIMENTAL.

Ensaio	c (mm)	d (cm)	a/c	T (K)	HR (%)	C_t (kg/m³)	t_p (anos)	i _{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
1	7,00	0,60	0,50	273	50	2,00	1,00	0,110
2	7,00	0,60	0,50	273	90	2,00	1,00	0,190
3	7,00	0,60	0,50	273	100	2,00	1,00	0,800
4	7,00	0,60	0,50	303	50	2,00	1,00	0,050
5	7,00	0,60	0,50	303	90	2,00	1,00	2,290
6	7,00	0,60	0,50	303	100	2,00	1,00	1,640
7	7,00	0,60	0,50	323	50	2,00	1,00	0,020
8	7,00	0,60	0,50	323	90	2,00	1,00	2,800
9	7,00	0,60	0,50	323	100	2,00	1,00	6,260
10	7,00	0,60	0,50	273	50	4,00	1,00	0,130
11	7,00	0,60	0,50	273	90	4,00	1,00	1,940
12	7,00	0,60	0,50	273	100	4,00	1,00	0,470
13	7,00	0,60	0,50	303	50	4,00	1,00	0,110
14	7,00	0,60	0,50	303	90	4,00	1,00	2,640
15	7,00	0,60	0,50	303	100	4,00	1,00	6,800
16	7,00	0,60	0,50	323	50	4,00	1,00	0,050
17	7,00	0,60	0,50	323	90	4,00	1,00	1,610
18	7,00	0,60	0,50	323	100	4,00	1,00	0,870
19	7,00	0,60	0,50	273	50	6,00	1,00	0,300
20	7,00	0,60	0,50	273	90	6,00	1,00	0,430
21	7,00	0,60	0,50	273	100	6,00	1,00	0,180
22	7,00	0,60	0,50	303	50	6,00	1,00	0,140
23	7,00	0,60	0,50	303	90	6,00	1,00	1,010
24	7,00	0,60	0,50	303	100	6,00	1,00	2,580
25	7,00	0,60	0,50	323	50	6,00	1,00	0,150
26	7,00	0,60	0,50	323	90	6,00	1,00	1,150

Tabela 2.Cont.

27	7,00	0,60	0,50	323	100	6,00	1,00	7,210
28	15,00	1,00	0,60	287	81	0,78	2,73	0,470
29	15,00	1,00	0,40	287	81	0,43	2,73	0,079
30	15,00	1,00	0,60	287	81	1,65	2,73	4,100
31	15,00	1,00	0,60	287	81	0,16	2,73	0,090
32	40,00	1,00	0,40	298	50	1,28	2,34	1,780
33	20,00	1,00	0,40	298	50	1,40	2,34	1,850
34	25,00	1,20	0,45	300	65	0,20	1,72	0,270
35	25,00	1,20	0,50	300	65	0,30	1,72	0,530
36	25,00	1,20	0,55	300	65	0,37	1,72	1,750
37	30,00	1,00	0,48	293	85	1,50	0,70	0,060
38	30,00	1,00	0,48	293	85	1,50	0,70	0,050
39	30,00	1,00	0,48	293	85	3,00	0,70	0,210
40	30,00	1,00	0,48	293	85	3,00	0,70	0,170
41	30,00	1,00	0,48	293	85	1,50	1,00	0,050
42	30,00	1,00	0,48	293	85	3,00	1,00	0,180
43	51,00	1,60	0,45	299	70	0,31	0,90	0,072
44	51,00	1,60	0,45	300	70	0,31	0,90	0,095
45	51,00	1,60	0,42	300	70	0,78	0,90	0,147
46	51,00	1,60	0,42	300	70	0,78	0,90	0,173
47	51,00	1,60	0,42	291	70	0,63	0,90	0,065
48	70,00	1,60	0,45	290	63	0,31	1,00	0,052
49	51,00	1,60	0,44	306	70	2,45	1,00	0,210
50	51,00	1,60	0,41	295	70	1,43	1,00	0,093
51	51,00	1,60	0,44	282	70	0,78	1,00	0,111
52	70,00	1,60	0,45	286	63	0,36	0,90	0,055
53	51,00	1,60	0,45	286	63	0,36	0,90	0,055
54	70,00	1,60	0,44	292	75	2,45	0,90	0,129
55	70,00	1,60	0,44	292	75	2,45	0,90	0,146

Tabela 2.Cont.

56	51,00	1,60	0,45	299	70	0,31	0,90	0,720
57	51,00	1,60	0,45	300	70	0,31	0,90	0,090
58	51,00	1,60	0,42	299	70	0,63	0,90	0,094
59	51,00	1,60	0,42	300	70	0,63	0,90	0,104
60	51,00	1,60	0,42	301	70	0,63	0,90	0,117
61	51,00	1,60	0,42	299	70	0,78	0,90	0,108
62	51,00	1,60	0,42	300	70	0,78	0,90	0,147
63	51,00	1,60	0,42	300	70	0,81	0,90	0,173
64	51,00	1,60	0,41	300	70	1,43	0,90	0,112
65	51,00	1,60	0,41	300	70	1,43	0,90	0,137
66	51,00	1,60	0,41	300	70	1,43	0,90	0,161
67	51,00	1,60	0,44	299	70	2,45	0,90	0,181
68	51,00	1,60	0,44	299	70	2,45	0,90	0,243
69	51,00	1,60	0,44	300	70	2,45	0,90	0,287
70	51,00	1,60	0,45	290	70	0,31	1,00	0,055
71	51,00	1,60	0,45	289	70	0,31	1,00	0,064
72	51,00	1,60	0,42	291	70	0,63	0,90	0,065
73	51,00	1,60	0,42	291	70	0,63	0,90	0,071
74	51,00	1,60	0,42	291	70	0,63	0,90	0,075
75	51,00	1,60	0,42	282	70	0,78	1,00	0,111
76	51,00	1,60	0,42	280	70	0,78	1,00	0,076
77	51,00	1,60	0,42	280	70	0,78	1,00	0,085
78	51,00	1,60	0,42	280	70	0,78	1,00	0,085
79	51,00	1,60	0,42	280	70	0,78	1,00	0,085
80	51,00	1,60	0,42	288	70	0,78	1,00	0,085
81	51,00	1,60	0,41	295	70	1,43	1,00	0,083
82	51,00	1,60	0,41	296	70	1,43	1,00	0,085
83	51,00	1,60	0,41	295	70	1,43	1,00	0,093
84	51,00	1,60	0,44	306	70	2,45	1,00	0,210

Tabela 2.Cont.

85	51,00	1,60	0,44	306	70	2,45	1,00	0,216
86	51,00	1,60	0,44	306	70	2,45	1,00	0,247
87	70,00	1,60	0,45	290	63	0,31	1,00	0,052
88	70,00	1,60	0,45	290	63	0,31	1,00	0,060
89	70,00	1,60	0,42	285	63	0,36	0,90	0,050
90	70,00	1,60	0,42	286	63	0,36	0,90	0,055
91	70,00	1,60	0,42	286	63	0,36	0,90	0,057
92	70,00	1,60	0,42	288	63	0,78	0,90	0,065
93	70,00	1,60	0,42	289	63	0,78	0,90	0,066
94	70,00	1,60	0,42	288	63	0,78	0,90	0,072
95	70,00	1,60	0,41	292	63	1,43	1,00	0,073
96	70,00	1,60	0,41	292	62	1,43	1,00	0,084
97	70,00	1,60	0,41	292	63	1,43	1,00	0,094
98	70,00	1,60	0,44	292	75	2,45	0,90	0,129
99	70,00	1,60	0,44	292	75	2,45	0,90	0,146
100	70,00	1,60	0,44	292	75	2,45	0,90	0,151
101	70,00	1,60	0,43	293	75	4,92	1,00	0,254
102	70,00	1,60	0,43	293	75	4,92	1,00	0,272
103	70,00	1,60	0,43	293	75	4,92	1,00	0,272
104	50,00	2,00	0,40	293	80	4,14	0,35	0,485
105	50,00	2,00	0,40	303	80	4,14	0,35	0,510
106	50,00	2,00	0,40	313	80	4,14	0,35	0,470
107	50,00	2,00	0,40	293	80	4,97	0,35	0,308
108	50,00	2,00	0,40	303	80	4,97	0,35	0,301
109	50,00	2,00	0,40	313	80	4,97	0,35	0,313
110	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,353
111	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,350
112	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,475
113	50,00	2,00	0,40	293	80	6,62	0,35	0,335

Tabela 2.Cont.

114	50,00	2,00	0,40	303	80	6,62	0,35	0,380
115	50,00	2,00	0,40	313	80	6,62	0,35	0,370
116	50,00	2,00	0,30	293	80	5,80	0,35	0,348
117	50,00	2,00	0,30	303	80	5,80	0,35	0,355
118	50,00	2,00	0,30	313	80	5,80	0,35	0,340
119	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,353
120	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,350
121	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,475
122	50,00	2,00	0,50	293	80	5,80	0,35	0,313
123	50,00	2,00	0,50	303	80	5,80	0,35	0,209
124	50,00	2,00	0,50	313	80	5,80	0,35	0,370
125	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,353
126	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,411
127	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,475
128	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,443
129	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,330
130	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,538
131	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,288
132	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,301
133	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,378
134	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,242
135	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,280
136	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,215
137	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,348
138	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,355
139	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,340
140	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,353
141	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,350
142	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,475

Tabela 2.Cont.

143	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,145
144	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,275
145	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,370
146	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,353
147	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,350
148	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,475
149	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,257
150	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,260
151	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,369
152	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,100
153	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,135
154	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,154
155	50,00	2,00	0,40	293	80	2,77	0,35	0,303
156	50,00	2,00	0,40	303	80	2,77	0,35	0,240
157	50,00	2,00	0,40	313	80	2,77	0,35	0,225
158	50,00	2,00	0,40	293	80	4,28	0,35	0,327
159	50,00	2,00	0,40	303	80	4,28	0,35	0,286
160	50,00	2,00	0,40	313	80	4,28	0,35	0,326
161	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,353
162	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,350
163	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,475
164	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,175
165	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,235
166	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,338
167	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,346
168	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,430
169	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,360
170	50,00	2,50	0,40	293	80	5,80	0,35	0,371
171	50,00	2,50	0,40	303	80	5,80	0,35	0,476

Tabela 2.Cont.

172	50,00	2,50	0,40	313	80	5,80	0,35	0,425
173	30,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,346
174	30,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,430
175	30,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,360
176	50,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,370
177	50,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,380
178	50,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,407
179	70,00	2,00	0,40	293	80	5,80	0,35	0,365
180	70,00	2,00	0,40	303	80	5,80	0,35	0,423
181	70,00	2,00	0,40	313	80	5,80	0,35	0,553
182	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,230
183	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,124
184	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,139
185	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,087
186	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,096
187	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,048
188	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,210
189	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,061
190	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,088
191	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,127
192	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,250
193	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,191
194	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,047
195	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,210
196	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,043
197	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,064
198	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,078
199	65,00	2,00	0,45	287	75	12,25	16,00	0,076

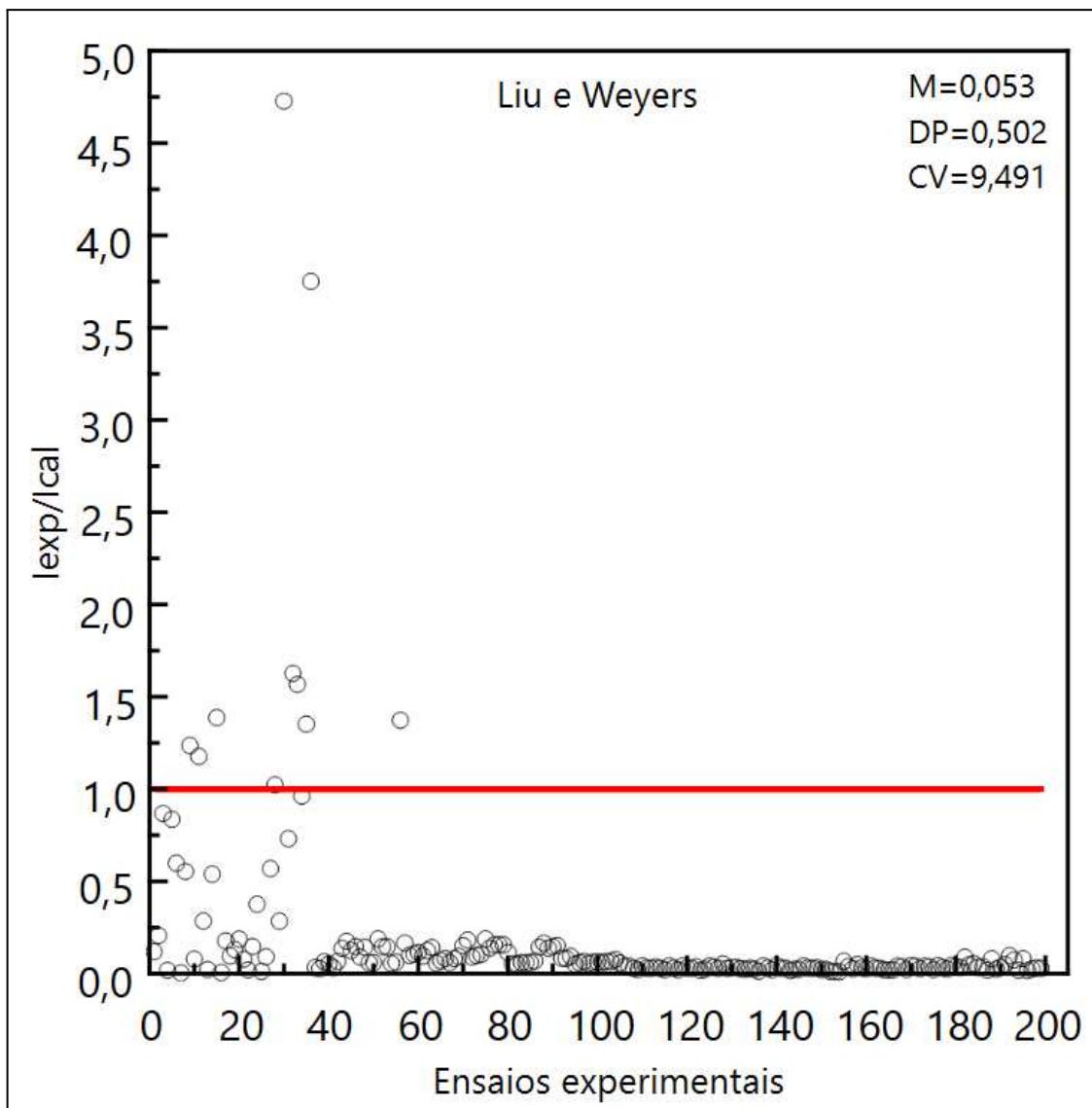
ANEXO B - GRÁFICOS COMPLETOS**Gráfico 02-** Modelo completo da análise do modelo Liu and Weyers.

Gráfico 03- Modelo completo da análise do modelo Vu e Stewart

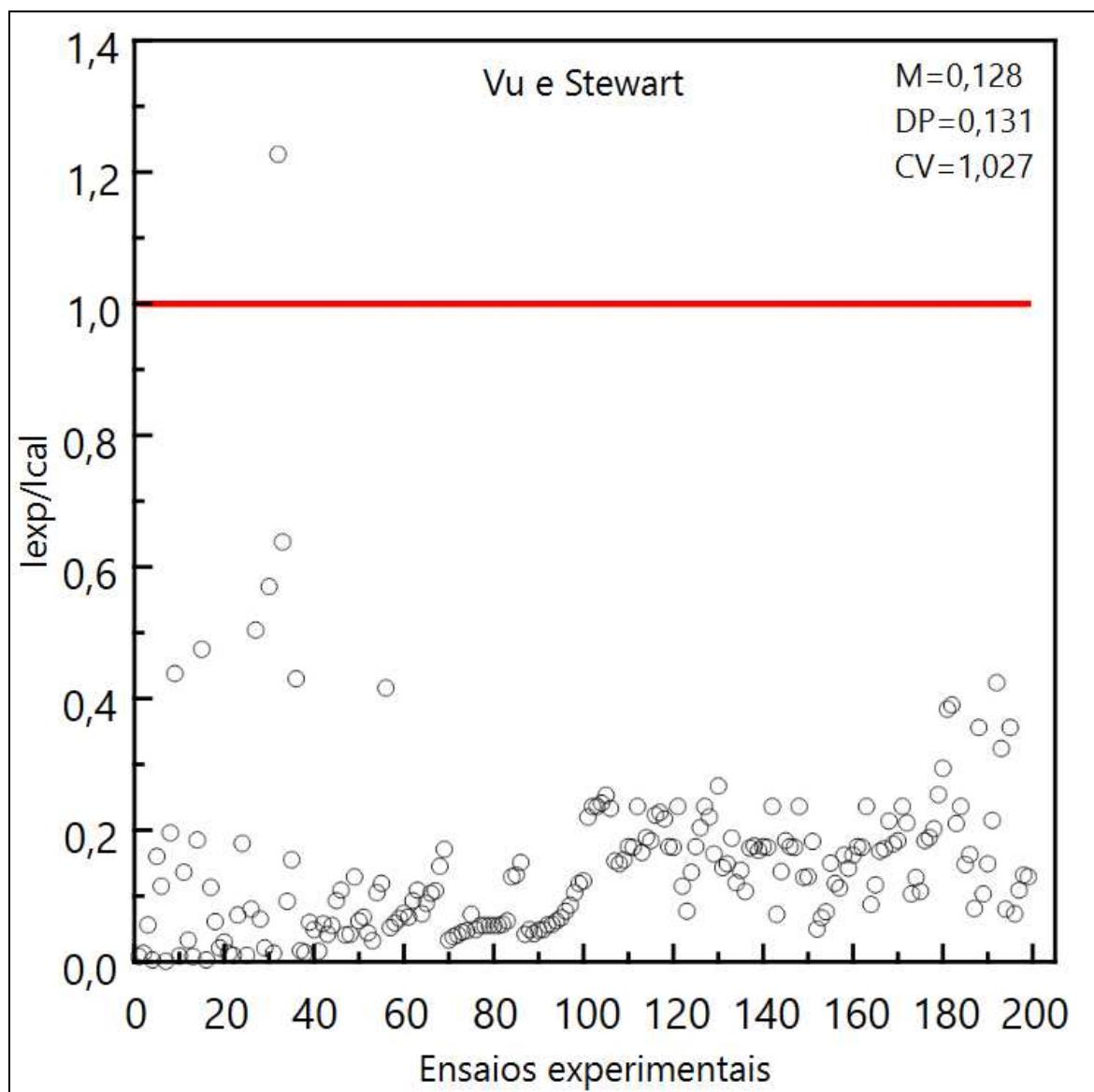


Gráfico 04- Modelo completo da análise do modelo Jung et al.

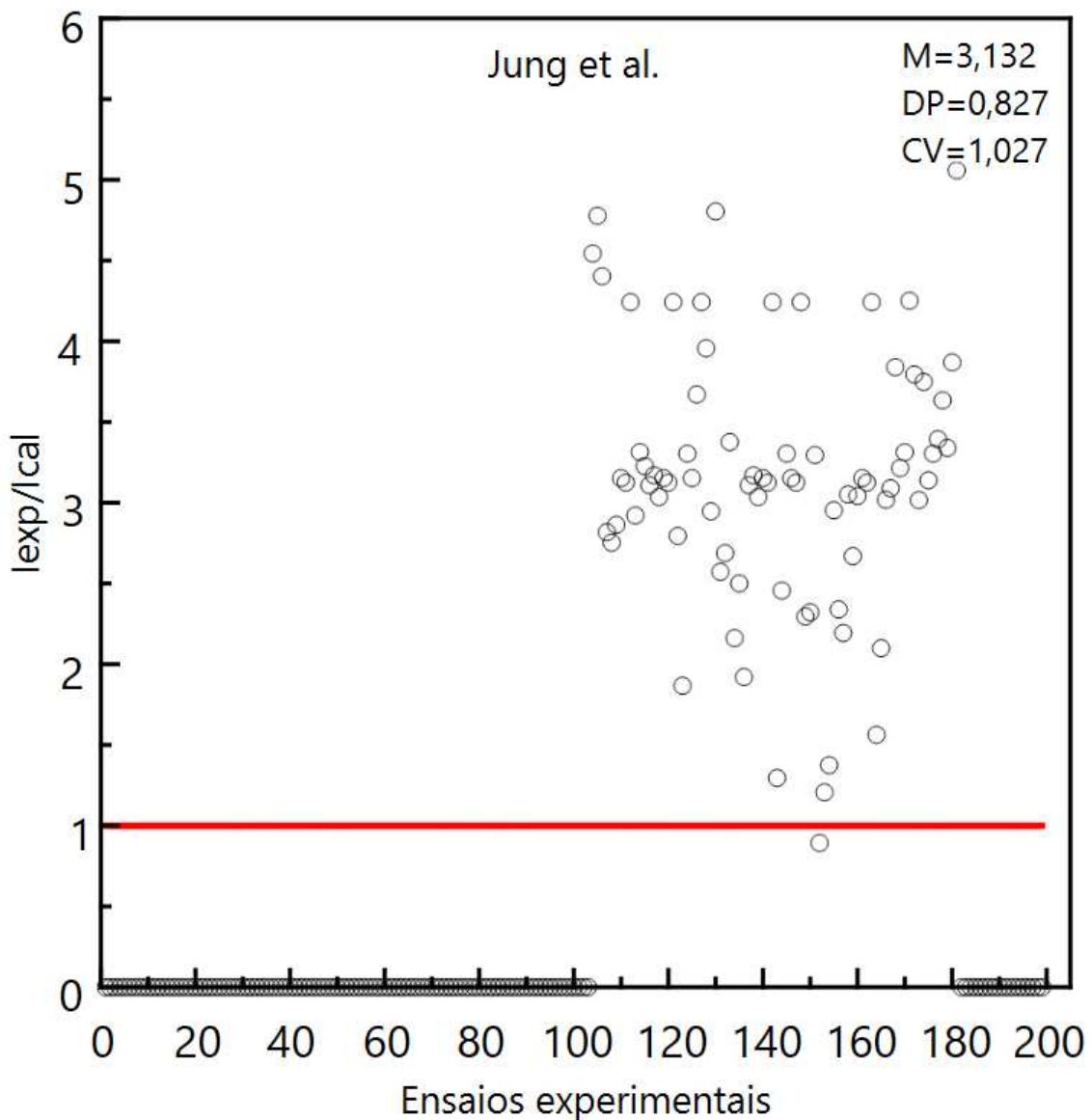


Gráfico 05- Modelo completo da análise do modelo Li (2004a).

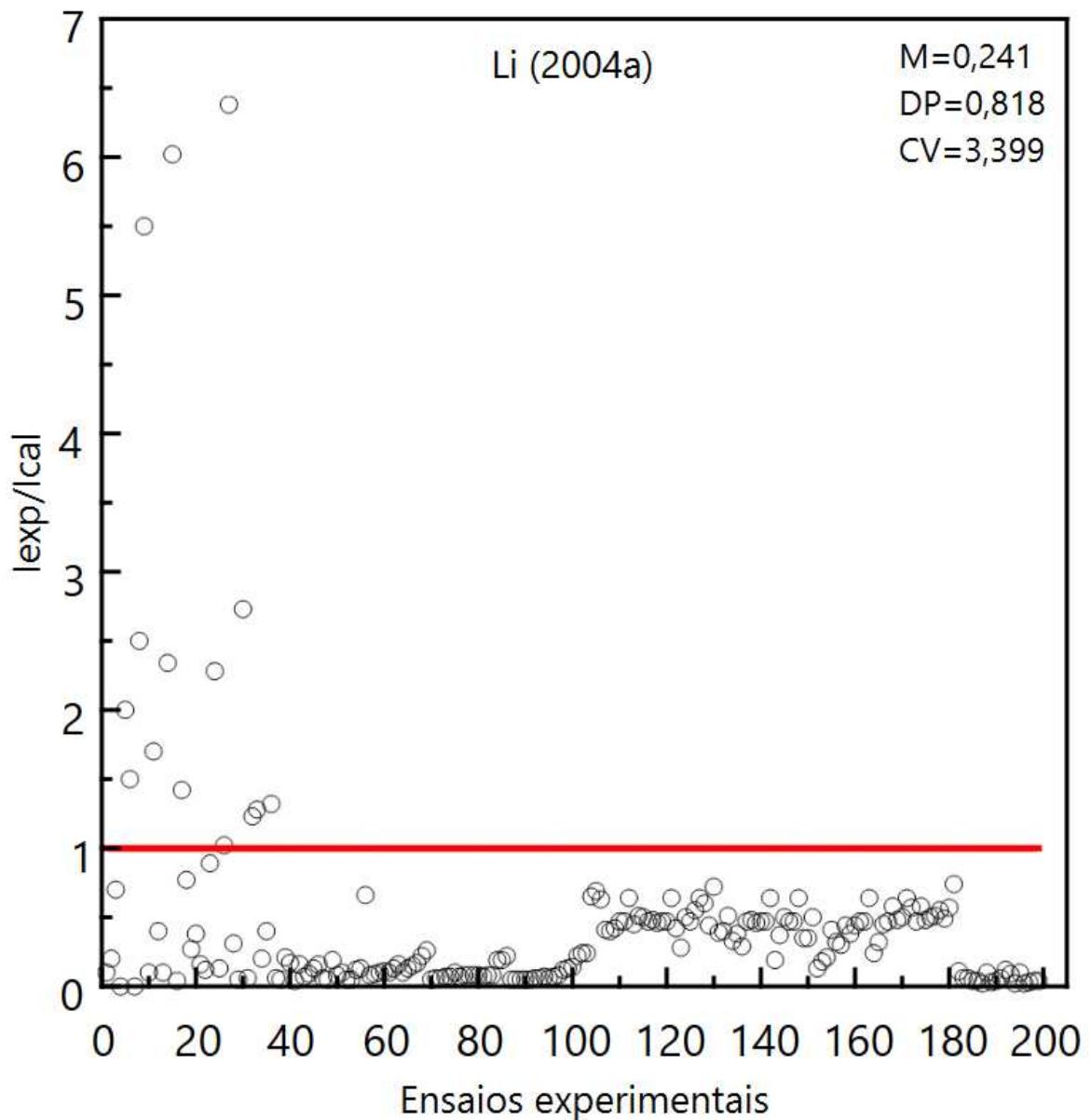


Gráfico 06- Modelo completo da análise do modelo Li (2004b).

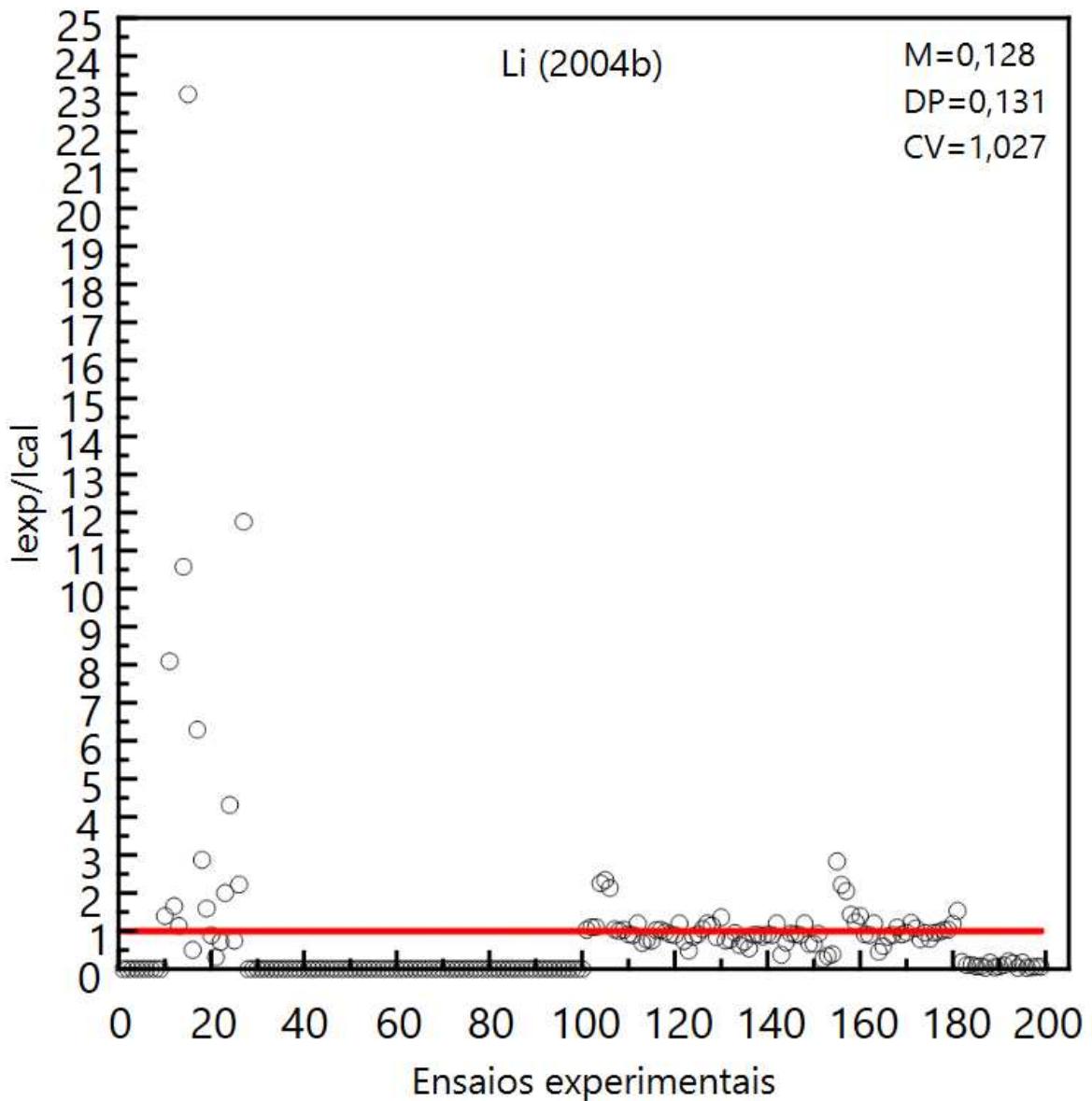


Gráfico 07- Modelo completo da análise do modelo Kong at al.

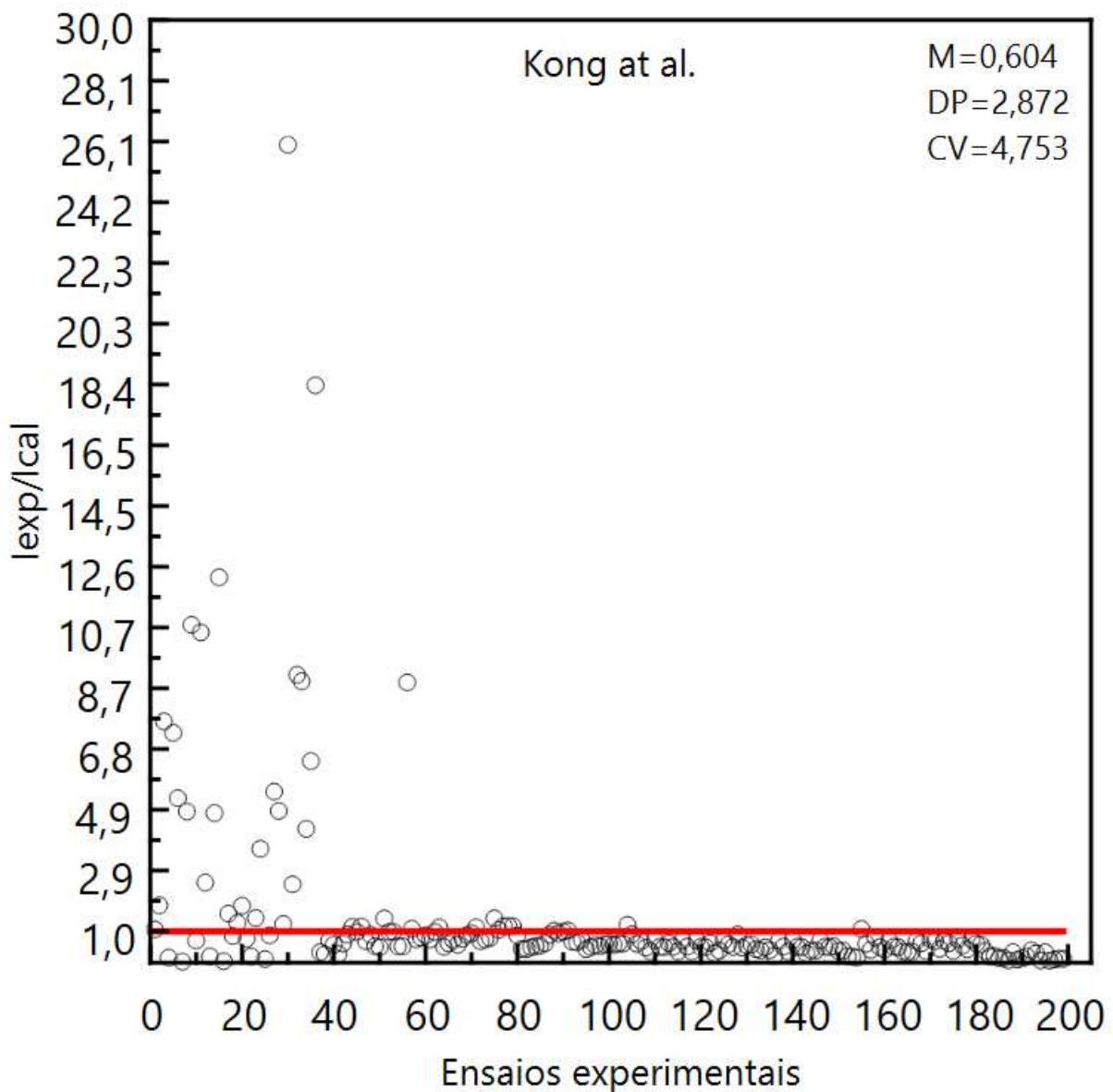


Gráfico 08- Modelo completo da análise do modelo Pour-Ghaz et al.

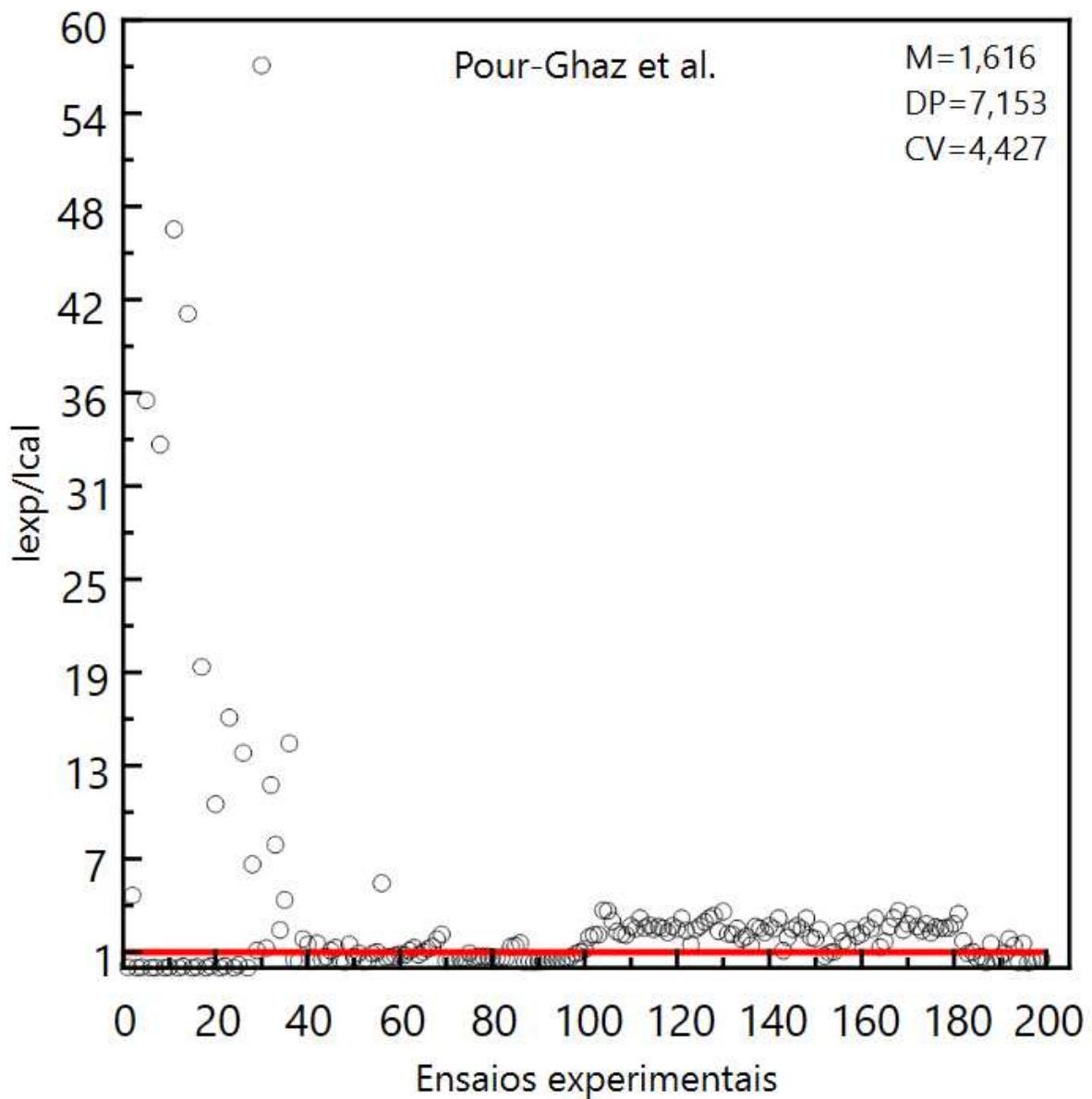


Gráfico 09- Modelo completo da análise do modelo Giovanni Pais et al.

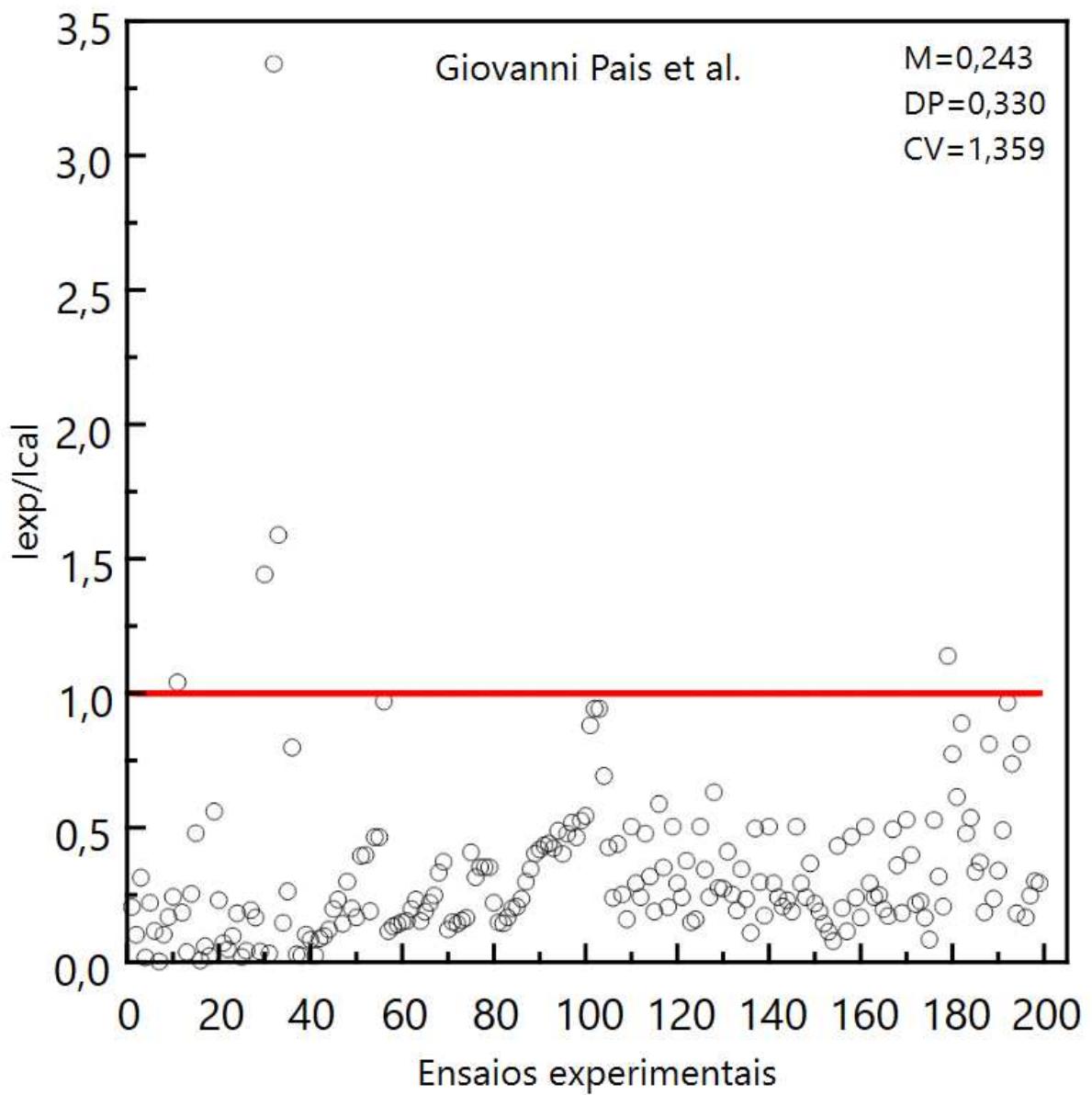


Gráfico 10- Modelo completo da análise do modelo Lu et al.

