CAPÍTULO 74 · Parte V · Diagnóstico
DOI do capítulo: https://doi.org/10.67775/ev8sga41
Trabalho apresentado no CBPAT 2026 e publicado nos anais do evento: https://doi.org/10.67775/41jajq84

MÚLTIPLA CAUSALIDADE EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO: APLICAÇÃO DE MODELO INFERENCIAL EM ESTUDO DE CASO

Lorena Mizue Kihara[1]; Vitor Hugo Astun Dionisio[2]; Helena de Souza Santos[3]
*Autor de contato: vitor.dionisio@uel.br

[1] Adenge Engenharia Diagnóstica
[2] Adenge Engenharia Diagnóstica
[3] Adenge Engenharia Diagnóstica

RESUMO

Estruturas de contenção em concreto armado, especialmente em ambiente urbano consolidado, estão sujeitas à atuação simultânea de agentes hidráulicos, deficiências executivas e ausência de manutenção, configurando quadros típicos de causalidade múltipla. A interpretação monocausal desses fenômenos pode conduzir a diagnósticos incompletos e decisões técnicas inadequadas, particularmente em contexto pericial. O presente trabalho apresenta estudo de caso de muro de arrimo com manifestações estruturais relevantes, no qual se aplicou modelo inferencial integrado para análise de múltipla causalidade. A metodologia combinou indução para levantamento de hipóteses, inferência indutiva associada a matriz multicritério para hierarquização causal, análise contrafactual para mensuração da contribuição relativa dos fatores e abordagem de criticidade estrutural baseada em análise de risco. Os resultados evidenciam mecanismo convergente de aumento de demanda (empuxo hidrostático) e redução de capacidade resistente (falhas construtivas), caracterizando causalidade múltipla. O estudo contribui metodologicamente para a engenharia diagnóstica aplicada a estruturas de contenção, especialmente em contextos de litígio técnico.
Palavras-chave: muro de arrimo; múltipla causalidade; inferência diagnóstica; análise contrafactual; engenharia diagnóstica.

ABSTRACT

Reinforced concrete retaining structures, especially in consolidated urban environments, are subject to the simultaneous action of hydraulic agents, construction deficiencies, and lack of maintenance, configuring typical scenarios of multiple causality. A monocausal interpretation of these phenomena can lead to incomplete diagnoses and inadequate technical decisions, particularly in expert contexts. This work presents a case study of a retaining wall with relevant structural manifestations, in which an integrated inferential model was applied for multiple causality analysis. The methodology combined abduction for hypothesis generation, inductive inference associated with a multicriteria matrix for causal hierarchy, counterfactual analysis for measuring the relative contribution of factors, and a structural criticality approach based on risk analysis. The results show a convergent mechanism of increased demand (hydrostatic thrust) and reduced resistance capacity (construction failures), characterizing non-linear multiple causality. The study contributes methodologically to diagnostic engineering applied to retaining structures, especially in contexts of technical litigation.
Keywords: retaining wall; multiple causality; diagnostic inference; counterfactual analysis; diagnostic engineering.

1. INTRODUÇÃO

A estabilidade de estruturas de contenção em concreto armado depende da adequada interação entre concepção estrutural, qualidade executiva e controle das condições hidráulicas do maciço contido. Souza e Ripper (1998) já destacavam, em obra de referência sobre patologia estrutural, que os problemas patológicos em construções raramente possuem causa única, sendo frequente a coexistência de falhas de projeto, deficiências de execução e ausência de manutenção adequada como origens concorrentes de um mesmo quadro patológico.

Em estruturas de contenção, essa complexidade causal é especialmente pronunciada. Genário *et al*. (2020) demonstraram que a grande maioria dos acidentes envolvendo muros de arrimo está relacionada ao acúmulo de água no maciço, podendo a existência de linha freática não drenada duplicar o empuxo atuante sobre a estrutura. Entretanto, a mera saturação do solo não explica, por si só, quadros de instabilidade estrutural, sendo necessária a coexistência de vulnerabilidades construtivas preexistentes para que o mecanismo de dano se complete (BOLINA; TUTIKIAN; HELENE, 2019).

No campo da perícia de engenharia, a abordagem da causalidade múltipla assume papel central. Conforme desenvolvido por Grossi (2025b), a atribuição técnica de responsabilidade exige distinção entre causas determinantes, causas concorrentes e fatores agravantes, evitando conclusões simplificadas que não representem adequadamente a realidade técnica e jurídica do caso. A mensuração proporcional das contribuições causais emerge, nesse contexto, como exigência metodológica e ética.

Para o enfrentamento diagnóstico desses casos, a engenharia diagnóstica, sistematizada no Brasil por Gomide *et al*. (2021), propõe a articulação de métodos inferenciais estruturados, que combinem inspeção sensorial, análise documental e raciocínio probabilístico. Grossi (2023) avança nessa direção ao propor modelo de inferência indutiva com matriz multicritério especificamente aplicado a manifestações multicausais decorrentes de umidade. Grossi e Sala (2025), por sua vez, demonstram como a análise contrafactual permite discriminar a contribuição relativa de cada fator causal em estudos de caso com muro de arrimo.

Sob perspectiva da análise de risco, Cruz *et al*. (2022) desenvolveram aplicação da ferramenta FMEA em estruturas de arrimo em concreto armado, identificando que as falhas de maior criticidade estão invariavelmente associadas a deficiências no sistema drenante e à presença de umidade no maciço. Diante desse cenário, este trabalho propõe a aplicação integrada dessas abordagens em estudo de caso real, demonstrando sua eficácia metodológica na análise de múltipla causalidade em estrutura de contenção urbana.

2. FUNDAMENTAÇÃO METODOLÓGICA

2.1 Raciocínio inferencial e engenharia diagnóstica

A engenharia diagnóstica, conforme sistematizada por Gomide *et al*. (2021), parte da premissa de que o diagnóstico técnico de manifestações patológicas constitui atividade investigativa que demanda método rigoroso, senso crítico e experiência acumulada. Gomide *et al*. distinguem as etapas de inspeção sensitiva, análise de manifestações, formulação de hipóteses e emissão do

diagnóstico, ressaltando que a omissão de qualquer dessas etapas compromete a confiabilidade da conclusão.

Bolina, Tutikian e Helene (2019) reforçam essa perspectiva ao destacar que o patólogo deve articular sistematicamente os sintomas observados, os mecanismos de deterioração reconhecidos na literatura e as evidências coletadas *in loco*, evitando tanto o diagnóstico precipitado quanto a omissão de causas relevantes. Os autores enfatizam que problemas de origem múltipla são a regra, não a exceção, nas manifestações patológicas de estruturas de concreto armado.

Nessa linha, Souza e Ripper (1998) estabeleceram que os fatores geradores de problemas patológicos podem ser agrupados em: falhas de projeto (subdimensionamento, especificações inadequadas), falhas de execução (má concretagem, ausência de cobrimento adequado, armaduras incorretas) e falhas de manutenção (ausência de inspeções periódicas, reparos intempestivos). A contribuição de cada grupo de fatores para o quadro final de deterioração varia caso a caso, exigindo avaliação técnica individualizada.

O diagnóstico técnico de manifestações patológicas pode ser estruturado a partir da lógica inferencial clássica, composta por abdução, indução e dedução. Conforme discutido por Grossi (2023), a abdução permite o levantamento inicial de hipóteses a partir de indícios observados; a indução possibilita generalização probabilística com base nos dados coletados; e o método hipotético-dedutivo viabiliza, quando aplicável, a testagem direta de hipóteses. Esses três modos de raciocínio não se excluem, devendo ser articulados de forma complementar ao longo do processo diagnóstico.

2.2 Inferência indutiva e análise contrafactual

Em contextos onde ensaios destrutivos ou modelagens estruturais completas não são viáveis e situação recorrente em perícias de engenharia, a matriz multicritério permite ponderação sistemática de hipóteses concorrentes, considerando variáveis como mecanismo de transporte, área exposta, tempo de permanência e estanqueidade dos elementos (GROSSI, 2023). A adoção desse instrumento reduz a influência de vieses cognitivos do perito e confere maior rastreabilidade ao raciocínio diagnóstico.

A análise contrafactual, por sua vez, fundamenta-se na simulação de cenários hipotéticos de exclusão de determinado fator, avaliando se o dano ocorreria na sua ausência (GROSSI; SALA, 2025). Tal abordagem é particularmente relevante em quadros de causalidade múltipla, pois permite identificar se um fator é condição necessária, suficiente ou meramente contributiva para o resultado danoso. O método guarda correspondência com o modelo INUS de causalidade (*Insufficient but Necessary part of an Unnecessary but Sufficient condition*), consagrado na filosofia da ciência como framework para análise de causas complexas.

2.3 Análise de risco em estruturas de contenção

Sob perspectiva estrutural, a aplicação de análise de risco em estruturas de arrimo evidencia que a coexistência de aumento de demanda e redução de capacidade resistente eleva exponencialmente a criticidade do sistema. Cruz *et al*. (2022), aplicando a ferramenta FMEA, identificaram 18 modos de falha possíveis em muros de arrimo, agrupados em seis categorias, sendo que as falhas relacionadas à deficiência de drenagem e à umidade apresentaram os maiores índices de risco. Esse

resultado corrobora dado histórico de Costa Nunes (1975 apud Cruz *et al*., 2022), segundo o qual 33% dos sinistros em estruturas de contenção decorrem de deficiência no sistema drenante.

Estudo experimental quantitativo confirma essa criticidade: Genário *et al*. (2020) demonstraram que empuxos ativos e inclinados na condição saturada sofrem acréscimo de até 87% em relação à condição seca. Esse dado evidencia que a saturação do maciço não é um fator marginal, mas um mecanismo de amplificação de demanda de primeira ordem, capaz de elevar as solicitações estruturais a patamares muito superiores aos considerados no dimensionamento original.

No âmbito da mensuração de responsabilidades, Grossi (2025b) propõe metodologia de quantificação proporcional aplicada a casos de causalidade múltipla, baseada na identificação e ponderação das contribuições individuais de cada agente, projetista, executor, incorporador ou usuário, para a produção do dano. Essa abordagem é especialmente relevante em contextos litigiosos, onde a distribuição equânime de responsabilidades exige fundamentação técnica sólida.

3. METODOLOGIA APLICADA

A metodologia estruturou-se em quatro etapas sequenciais e interdependentes:

(i) Levantamento de hipóteses por abdução, com base em inspeção sensorial do muro, análise documental do histórico construtivo e entrevistas com partes envolvidas, visando à formulação das hipóteses causais plausíveis;
(ii) Aplicação de inferência indutiva com matriz multicritério, atribuindo pesos relativos às variáveis de mecanismo de transporte, tempo de permanência, área de exposição e conformidade executiva, para hierarquização das hipóteses levantadas (GROSSI, 2023);
(iii) Aplicação de análise contrafactual, simulando a exclusão individual de cada fator identificado e avaliando a plausibilidade de ocorrência do dano em cada cenário hipotético (GROSSI; SALA, 2025);
(iv) Avaliação da criticidade estrutural sob ótica de risco, identificando a interação entre os fatores de demanda aumentada e de capacidade reduzida, com referência ao modelo FMEA proposto por Cruz *et al*. (2022).

4. ESTUDO DE CASO

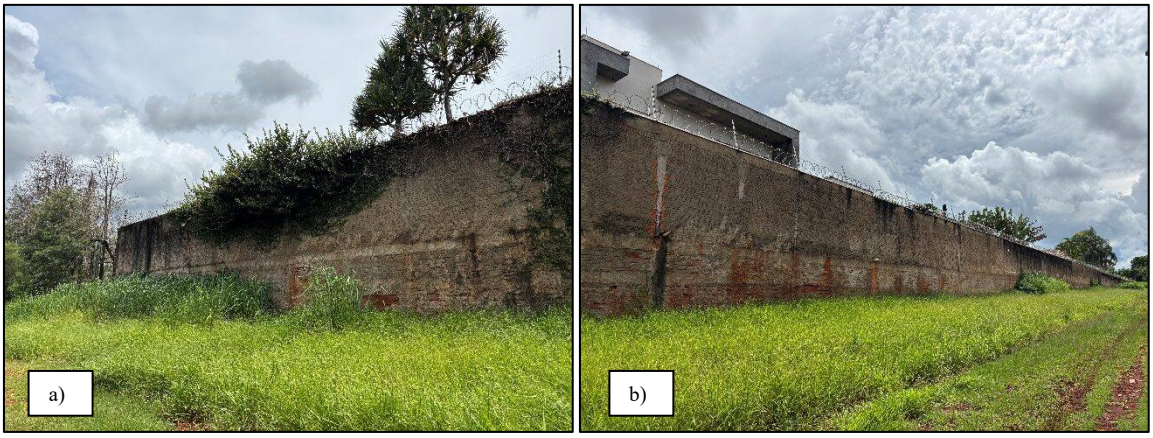
4.1 Caracterização do objeto

O muro de arrimo objeto do estudo localiza-se em área urbana consolidada, sendo parte integrante de condomínio horizontal, executado em concreto armado e blocos de vedação cerâmicos furados, com altura superior a 3,0 m, contendo maciço terroso em terreno aterrado. A estrutura foi construída em desconformidade com o projeto estrutural existente, além de terem sido constatadas falhas de origem endógena na classificação de Souza e Ripper (1998).

À época da vistoria pericial, o muro apresentava deslocamentos horizontais visíveis, fissuração entre elementos construtivos, caracterizando a dessolidarização e movimentação do solo, manchas de umidade extensas na face exposta do aterro e manchas de umidade que indicam a saturação do maciço contido. Não foram identificados drenos funcionais na base ou no corpo da estrutura. A inspeção revelou ainda segregação de concreto em pilares e ninhos de concretagem, sugestivos de

falha na concretagem, consequente exposição de armaduras e corrosão das mesmas, abaulamento do muro e desintegração dos blocos cerâmicos.

Imagem 1 – Vista do muro perimetral aos fundos do condomínio, pelo lado externo. a) Vista do muro aos fundos das casas 02 e 03. b) Vista aos fundos da casa 01



A análise documental não identificou registro de eventos excepcionais isolados, como chuvas anômalas ou sobrecargas pontuais, que pudessem justificar o quadro de forma monocausal. O histórico apontou para degradação progressiva ao longo dos anos, sem intervenções de manutenção preventiva ou corretiva, configurando o que Gomide *et al*. (2021) classificam como falha de manutenção com agravamento progressivo das manifestações patológicas.

Além das anomalias identificadas como de origem endógena, foram constatados dois fatores agravantes: vazamentos recorrentes nas piscinas adjacentes ao muro (todas as residências limítrofes ao muro possuíam piscinas próximas ao muro) e a existência de planta “trepadeira” em partes do muro. Durante a inspeção, foi relatado pelos proprietários das residências que, na Residência 01, houve dois grandes vazamentos, na Residência 02 havia vazamento em investigação, e na Residência 03 foi relatado que, em um curto período de tempo, houve ao menos três vazamentos de grande porte. O rompimento das tubulações em caso de movimentação de solo é comum e coincide com o caso estudado.

Imagem 2 – a) Ninhos de concretagem, armaduras expostas e em estado de corrosão. b) Deslocamento horizontal do muro de arrimo

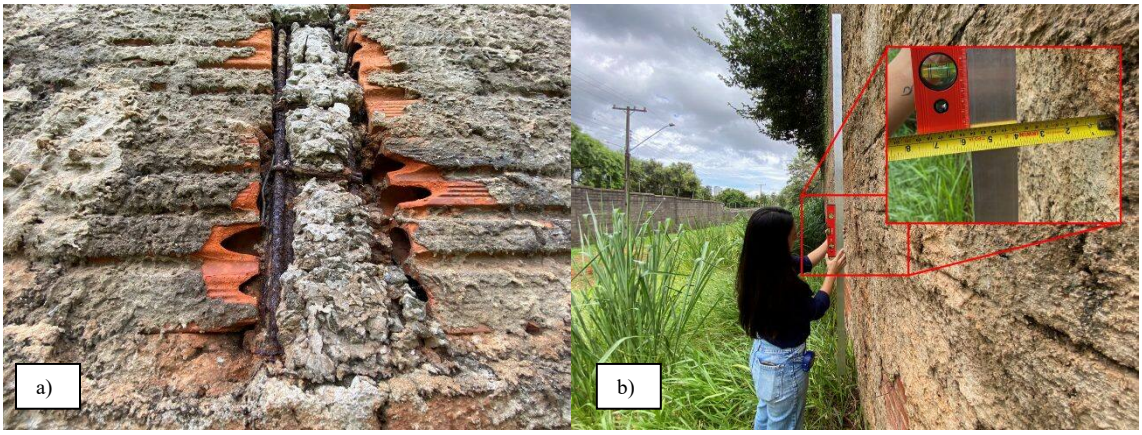
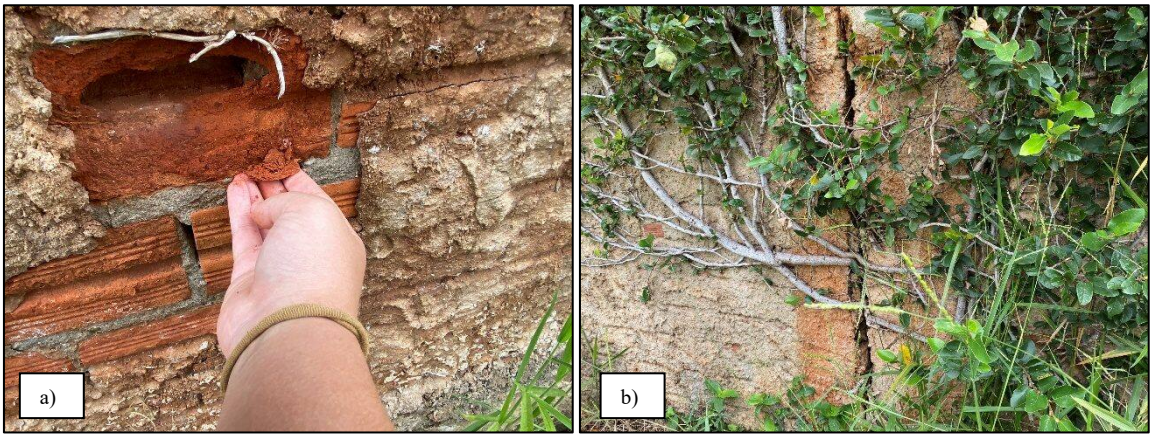


Imagem 3 – Desintegração dos blocos cerâmicos. b) Presença de vegetação advinda da junta de dilatação



Constatou-se também, presença de vegetação bastante desenvolvida nas residências, com origem na Residência 02. A vegetação em questão é a planta *Ficus pumila*, ou "unha de gato", que já apresentava raízes espessas. Além disso, pôde-se observar que seus ramos adentraram nas aberturas que encontraram durante seu desenvolvimento.

4.2 Hipóteses causais identificadas

A validação ou eliminação de hipóteses se deu basicamente por inferência dedutiva ou indutiva, ou seja, demonstração lógica ou empírica.

Hipótese A: refere-se à possibilidade de o tombamento do muro ser decorrente de aumento das pressões hidrostáticas devido ao acúmulo de águas pluviais no tardoz do muro de arrimo (ausência de sistema de drenagem – vício construtivo);
Hipótese B: refere-se à possibilidade de o tombamento do muro ser decorrente das degradações devido ao desenvolvimento da planta "trepadeira".

A Hipótese B foi levantada pelo próprio condomínio e moradores, visto que, caso a Hipótese A se confirmasse, a responsabilidade em relação aos danos seria compartilhada entre condomínio e construtora e, caso a Hipótese B se confirmasse, a responsabilidade recairia sobre o morador da Residência 02.

5. ANÁLISE INFERENCIAL DA MÚLTIPLA CAUSALIDADE

5.1 Inferência indutiva e matriz multicritério

A aplicação da matriz multicritério permitiu hierarquizar as hipóteses com base em quatro variáveis ponderadas: mecanismo de transporte (como a água atingiu a estrutura), tempo de permanência (por quanto tempo o agente atuou), área de exposição (extensão do contato) e conformidade executiva (grau de atendimento às normas técnicas).

A hierarquização resultante é consistente com o padrão observado por Cruz *et al*. (2022) em seu estudo sistemático de modos de falha em muros de arrimo: as falhas associadas à drenagem e à

umidade tendem a apresentar os maiores índices de criticidade justamente porque atuam sobre toda a extensão da estrutura, de forma crônica e de difícil detecção precoce.

5.2 Análise contrafactual

A análise contrafactual foi conduzida pela exclusão hipotética de cada fator, verificando a plausibilidade do cenário resultante, considerando as mesmas hipóteses:

Hipótese A: refere-se à possibilidade de o tombamento do muro ser decorrente de aumento das pressões hidrostáticas devido ao acúmulo de águas pluviais no tardoz do muro de arrimo (ausência de sistema de drenagem – vício construtivo);

Hipótese B: refere-se à possibilidade de o tombamento do muro ser decorrente das degradações devido ao desenvolvimento da planta “trepadeira”.

Tabela 1 - Análise contrafactual

CRITÉRIO TÉCNICO AVALIADO	Hipótese 1	Hipótese 2
Atua diretamente no solo	Sim	Não
Atua diretamente no muro de arrimo	Sim	Sim
Altera o regime de tensões no solo	Sim	Não
Aumenta empuxo lateral	Sim	Não
Induz recalques diferenciais	Sim	Não
Capacidade de gerar tombamento de muro de arrimo	Alta	Muito baixa
Velocidade de progressão do dano	Rápida	Lenta
Papel na instabilidade global do muro	Máxima	Mínima

Sendo assim, é notório que os vícios construtivos são causa necessária para o desencadeamento dos problemas. Em um cenário em que não houvesse falhas construtivas, sistema drenante funcionando corretamente, as tubulações das piscinas não teriam se rompido, gerando acréscimo de empuxo hidrostático sobre a estrutura de contenção.

Os vícios construtivos atuam como causa primária no tombamento do muro, sendo a movimentação do solo e rompimento das tubulações as concausas mais relevantes, ou seja, causas secundárias que retroalimentam o ciclo. As vegetações são consideradas como fatores agravantes secundários, de baixo impacto nesse caso, já que exploraram fissuras e descontinuidades preexistentes, sem, contudo, configurar a causa primária dos danos estruturais.

Ambos são causas concorrentes e determinantes, caracterizando causalidade múltipla convergente, conforme a terminologia adotada por Grossi (2025b). Esse padrão alinha-se à proposição de Souza e Ripper (1998) de que problemas patológicos graves tipicamente resultam da combinação de falhas em mais de uma fase do ciclo de vida da construção.

5.3 Criticidade estrutural e mensuração das contribuições

O mecanismo observado configura convergência entre aumento de demanda (empuxo hidrostático por saturação do maciço devido ao rompimento das tubulações das piscinas) e redução de capacidade resistente (falhas construtivas), coerente com os modelos de criticidade estrutural discutidos por Cruz *et al*. (2022) e com o diagnóstico sistêmico proposto por Gomide *et al*. (2021). Essa convergência é caracteristicamente: o aumento simultâneo de demanda e a redução de resistência produzem efeito sinérgico, amplificando o risco através da soma das contribuições individuais.

Sob perspectiva pericial, trata-se de causalidade múltipla convergente, para a qual a abordagem de mensuração proporcional defendida por Grossi (2025b) é especialmente adequada. Considerando os resultados da matriz multicritério e da análise contrafactual, estimou-se que a deficiência de drenagem responde por parcela preponderante da demanda excedente, agravada pela amplificação dos empuxos em condição saturada, enquanto as falhas construtivas respondem pela redução crítica de capacidade resistente.

6. CONCLUSÃO

O caso analisado evidencia que a instabilidade do muro de arrimo decorre da interação entre deficiência de drenagem, que elevou o empuxo hidrostático a níveis críticos e falhas construtivas graves, que reduziram a capacidade resistente da estrutura aquém do necessário. O rompimento de tubulações das piscinas, causado pela consequente perda de resistência e movimentação do solo, agravou o cenário, tornando-se um ciclo que é retroalimentado. As vegetações são consideradas como fatores agravantes secundários, de baixo impacto nesse caso, já que exploraram fissuras e descontinuidades preexistentes, sem, contudo, configurar a causa primária dos danos estruturais. Esse padrão multicausal é consistente com o que a literatura especializada, de Souza e Ripper (1998) a Bolina, Tutikian e Helene (2019), reportam como característica típica das patologias em estruturas de concreto armado.

A aplicação integrada de inferência indutiva, matriz multicritério e análise contrafactual demonstrou-se eficaz para a discriminação das contribuições causais, conferindo robustez e rastreabilidade ao diagnóstico técnico. A abordagem supera a interpretação monocausal, frequentemente adotada em perícias de engenharia por razões de simplicidade, mas que falha em representar adequadamente a complexidade real dos fenômenos patológicos em estruturas de contenção.

O estudo reforça a necessidade de adoção de modelos inferenciais estruturados na engenharia diagnóstica, nos moldes propostos por Gomide *et al*. (2021), aplicados a estruturas de contenção, especialmente em contextos periciais, onde a correta atribuição de causas e responsabilidades tem consequências técnicas, jurídicas e econômicas relevantes. A metodologia aqui apresentada é replicável e pode ser sistematizada como protocolo de análise em casos similares, contribuindo para o avanço da engenharia diagnóstica forense no Brasil.

REFERÊNCIAS

BOLINA, Fabrício Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo Roberto do Lago. *Patologia de estruturas.* São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 320 p. ISBN 978-85-7975-339-8.

CRUZ, R. B. C.; SANTOS, F. A.; SOUZA, J. B.; KHALIL, J. A.; CARVALHO, R. M. G.; FILHO, A. M. Método para análise do risco em estruturas de arrimo em concreto armado. *Engenharia Civil UM*, Guimarães, n. 57, p. 36–49, 2022. DOI: 10.21814/ecum.4190.

GENÁRIO, D. C. F.; LOPES, P. H. C.; MILLER, C. P.; LIMA, A. C.; SOUZA, V. B. Estrutura de contenção: muro de arrimo por flexão para estabilização de encostas. *Revista Interdisciplinar Pensamento Científico*, v. 5, n. 5, 2020.

GOMIDE, Tito Lívio Ferreira; DELLA FLORA, Stella Marys; BRAGA, Antonio Guilherme Menezes; GULLO, Marco Antonio; FAGUNDES NETO, Jerônimo Cabral Pereira (coord.). *Manual de Engenharia Diagnóstica.* 2. ed. São Paulo: Leud, 2021. 432 p. ISBN 978-85-7456-397-8.

GROSSI, Marcus Vinícius Fernandes. Inferência indutiva para diagnóstico de manifestações patológicas decorrentes de umidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 17., 2023, São Paulo. *Anais [...].* São Paulo: IBI – Instituto Brasileiro de Impermeabilização, 2023.

GROSSI, Marcus Vinícius Fernandes; SALA, Giovanna Apolinário. Métodos diagnósticos na perícia de engenharia: um estudo de caso sobre umidade em muro de arrimo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE IMPERMEABILIZAÇÃO, 18., 2025, São Paulo. *Anais [...].* São Paulo: IBI – Instituto Brasileiro de Impermeabilização, 2025.

GROSSI, Marcus Vinícius Fernandes. Mensuração de responsabilidades em causalidade múltipla em casos de anomalias construtivas: fundamentos, métodos e aplicações práticas. *Revista Brasileira de Engenharia de Avaliações e Perícias*. São Paulo: IBAPE Nacional, 2025b.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.* São Paulo: Pini, 1998. 255 p. ISBN 85-7266-096-8.