RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

Simulação numérica e validação empírica no design estrutural de infraestruturas críticas e ambientes de alta pressão

Numerical simulation and empirical validation in the structural design of critical infrastructures and high-pressure environments

Simulación numérica y validación empírica en el diseño estructural de infraestructuras críticas y ambientes de alta presión

Lucas Emanuel Soeira
Doutor em Ciências (Engenharia Mecânica) pela Universidade de São Paulo (USP);
Mestre em Engenharia Mecânica (USP); Engenheiro Mecânico (UNESP).

RESUMO

Este artigo discorre sobre os fundamentos acadêmicos que sustentam a integração indispensável entre ferramentas de simulação tridimensional (FEA) e os protocolos de ensaios laboratoriais destrutivos. Focado no dimensionamento de cascos e dutos submetidos a ambientes operacionais extremos, o texto analisa a necessidade metodológica de calibrar os modelos elásticos computacionais por meio de uma rigorosa coleta de dados em bancada. O estudo aprofunda-se na aplicabilidade dos critérios de falha ortotrópicos e no cumprimento da normativa internacional. A pesquisa destaca que a predição computacional, quando estritamente ancorada na instrumentação mecânica, viabiliza o projeto seguro de infraestruturas sujeitas à fadiga contínua e ao colapso por pressão.

Palavras-chave: Análise de Elementos Finitos; Validação Empírica; Critérios de Falha; Normas ASME/DNV; Engenharia Estrutural.

ABSTRACT

This article discusses the academic foundations underpinning the indispensable integration of three-dimensional simulation tools (FEA) with destructive laboratory testing protocols. Focused on the design of hulls and pipelines subjected to extreme operational environments, the text analyzes the methodological need to calibrate computational elastic models using rigorous bench data. The study examines the applicability of orthotropic failure criteria and their compliance with international standards. The research highlights that computational prediction, when strictly anchored to mechanical instrumentation, enables the safe design of infrastructures subjected to continuous fatigue and pressure collapse.

Keywords: Finite Element Analysis; Empirical Validation; Failure Criteria; ASME/DNV Standards; Structural Engineering.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de projetos inseridos no escopo da engenharia estrutural de altíssima complexidade lida intrinsecamente com variáveis para as quais a margem estocástica de falhas sistêmicas deve tender rigorosamente a zero. A elaboração de infraestruturas estratégicas, que vão desde malhas dutoviárias submarinas em polímero reforçado até o projeto de cascos navais submetidos a severos regimes hiperbáricos, exige metodologias rigorosas de aprovação. Estas matrizes mecânicas determinam a viabilidade física e a segurança ambiental de ecossistemas operacionais inteiros, o que obriga a ciência dos materiais a aprimorar continuamente suas

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

formas de prever o comportamento a longo prazo sob condições inóspitas.

A ampla consolidação da mecânica computacional impulsionou o abandono progressivo das equações analíticas rudimentares e conservadoras, baseadas em simplificações dimensionais de cascas finas, em favor do uso extensivo da Análise de Elementos Finitos (FEA). O ambiente de modelagem virtual concedeu aos engenheiros calculistas a capacidade inédita de mapear frentes de concentração de tensão, comportamentos transientes e instabilidades de flambagem em geometrias tridimensionais complexas. Esses cenários seriam analiticamente insolúveis caso estivessem restritos aos métodos da resistência dos materiais clássica, desenvolvida no início do século XX.

Contudo, a evolução exponencial dos algoritmos numéricos para matrizes de rigidez não eliminou a necessidade absoluta de validação empírica. Pelo contrário, a comunidade científica e as agências reguladoras reconhecem unanimemente que a predição numérica, operada de forma isolada, carece de confiabilidade legal e estrutural em cenários de não-linearidade material ou de contato fluido-estrutura dinâmico. A simulação virtual requer retroalimentação contínua e fidedigna, fornecida pela instrumentação dos laboratórios de ensaios mecânicos.

Este artigo dedica-se à análise metodológica dessa dualidade complementar que rege o design avançado na engenharia. O objetivo central é elucidar como a correlação fina entre as deformações extraídas de extensômetros físicos e os gradientes de cor gerados no processamento por software atua como o principal eixo de verificação de conformidade na aprovação de equipamentos pesados. A correlação numérico-experimental é aqui tratada não apenas como etapa acadêmica, mas também como ferramenta definitiva para a certificação de operação.

2. REVISÃO TEÓRICA: FORMULAÇÃO COMPUTACIONAL E LIMITES DO GÊMEO DIGITAL

O cerne da confiabilidade analítica em estruturas submetidas a gradientes termomecânicos contínuos reside na exatidão da matriz constitutiva atribuída ao material durante a fase de pré-processamento no software de CAE. A modelagem elástica de ligas metálicas dúcteis apresenta um nível de maturidade analítica sumamente elevado, fundamentado em critérios de escoamento isotrópico amplamente documentados, como as teorias de energia de distorção (von Mises) e de tensão de cisalhamento máxima (Tresca). Nessas condições isotrópicas, a resposta elástica é governada por variáveis reduzidas: o módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

No entanto, quando o escopo do projeto se desloca para o emprego de materiais compósitos laminados em aplicações *offshore* ou de defesa espacial, a complexidade das equações de contorno aumenta exponencialmente. Polímeros reforçados com fibras contínuas possuem características inerentemente ortotrópicas, o que implica que seus módulos de elasticidade à tração e à compressão, bem como os respectivos limites de ruptura, variam em função do eixo de carregamento. O engenheiro necessita imputar ao algoritmo matricial até 9 constantes elásticas independentes para definir corretamente o comportamento tridimensional de uma única camada de material laminado.

A dependência sistêmica de dados de entrada tão específicos realça a relevância crítica da etapa de caracterização material em laboratório físico. O conceito moderno de "gêmeo digital" (*digital twin*) pressupõe que a malha de elementos finitos não seja apenas um rascunho tridimensional elegante, mas uma entidade computacional plenamente parametrizada para espelhar a degradação e o escoamento reais da peça congênere fabricada. Para que essa paridade fenomenológica ocorra, o sistema deve ser treinado e alimentado de forma imperativa com base em laudos provenientes de cupons de ensaio sob tração e de testes hidrostáticos.

O processo de calibração iterativa atua principalmente para mitigar e diluir as incertezas inerentes aos métodos de fabricação industrial. Defeitos transientes, como graus de cura incompletos, tensões longitudinais residuais induzidas por processos de resfriamento e microfissuras interfaciais, não podem ser gerados em formulações ideais puramente matemáticas. A execução paralela de testes empíricos fornece o embasamento numérico exato que corrige as assíntotas de falha do algoritmo, permitindo que a geometria simulada alcance níveis de convergência altamente seguros.

3. METODOLOGIA DE CORRELAÇÃO: INSTRUMENTAÇÃO EM COMPONENTES CRÍTICOS

A sistemática de validação em tubulações industriais e estruturas encapsuladas inicia-se, invariavelmente, pela geração detalhada da topologia digital e pela discretização minuciosa do domínio espacial em elementos de ordem superior. No ambiente de solver, as condições de restrição de graus de liberdade e de cargas térmicas extremas são aplicadas às superfícies internas e externas para emular o ambiente de operação real. Este passo contempla a simulação da pressão colapsante do leito oceânico confrontada simultaneamente com os gradientes de dilatação gerados pelo escoamento de fluidos superaquecidos.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

A etapa subsequente desdobra-se na construção física do aparato em escala real ou como protótipo reduzido, o qual é instrumentado de forma ostensiva, utilizando rosetas de *strain gauges* (extensiometria elétrica), sensores termopares e transdutores de emissão acústica. O vaso de pressão ou duto instrumentado é alocado em pórticos de testes hidrostáticos, governados por sistemas hidráulicos servo-controlados, encarregados de aplicar ciclos de fadiga de baixa ou alta frequência, em estrita obediência aos protocolos das regulamentações de defesa e de óleo/gás.

O cruzamento sistemático e a sobreposição dos históricos de deformação lidos no módulo de aquisição de dados (DAQ) em laboratório com a curva de resposta nodal exportada pelo software de FEA revelam a taxa de correlação intrínseca do projeto. Uma divergência matemática perceptível entre o micro-strain (με) lido pelo sensor afixado na peça e a deformação homóloga na malha indica imediatamente a necessidade de reavaliar os engastes virtuais ou até mesmo recalcular o grau de rigidez à flexão da formulação matemática escolhida para o laminado.

A validação de cascos navais e de tubulações contínuas de compósitos atinge seu clímax por meio do ensaio de colapso até a ruptura (*burst test*). Ao levar a estrutura ao limite catastrófico, o laboratório registra o limiar exato da perda de estabilidade mecânica global. A reinserção deste limite nos parâmetros do solver possibilita a condução de simulações subsequentes voltadas ao estudo mecânico da propagação de trincas (*fracture mechanics*), fornecendo ao engenheiro a capacidade de extrapolar a sobrevida do componente em operação sem a dispendiosa necessidade de romper amostras em larga escala.

4. COMPORTAMENTO EM FADIGA E CRITÉRIOS DE FALHA EM MATERIAIS ORTOTRÓPICOS

Ao contrário dos metais, cujas falhas geralmente se iniciam por escoamento plástico macroscopicamente observável e pelo crescimento de trincas por fadiga dúctil, os materiais compósitos submetidos a esforços combinados falham por meio de uma multiplicidade de microeventos interativos. O colapso de uma estrutura ortotrópica é tipicamente precedido por microfissuras interlaminares (trincamento da matriz), descolamento entre a fibra e a resina (*debonding*), delaminação entre camadas adjacentes e, em última instância estrutural, o rompimento cataclísmico das fibras tensoras. Modelar computacionalmente essa progressão de danos requer teorias de vanguarda.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

Para identificar matematicamente em qual envelope de tensão ocorrerá o primeiro microdefeito, os programas de FEA implementam formulações interativas complexas, com destaque para os critérios clássicos de Tsai-Wu e Hashin. O critério polinomial de Tsai-Wu, por exemplo, fornece um envelope de falha contínuo em forma elipsoidal, indicando se a peça falhará sob combinações complexas de cargas axiais e de cisalhamento. Entretanto, esse polinômio depende visceralmente da inserção precisa dos limites de resistência trativa e compressiva, que devem ser levantados obrigatoriamente por meio de caracterização experimental prévia (ensaios em cupons padronizados).

Já o critério fenomenológico de Hashin (ou os métodos de Puck) vai além de prever apenas o momento do colapso e tenta distinguir qual dos modos mecânicos de ruína está em curso (falha transversal da matriz ou ruptura primária da fibra). A veracidade das predições de Hashin nas malhas nodais tridimensionais sofre tremenda influência da sensibilidade da malha e das considerações de degradação progressiva de rigidez adotadas pelo calculista. Caso esses algoritmos de degradação progressiva de dano (*Progressive Damage Analysis* - PDA) operem sem calibração com base em laudos de emissão acústica de laboratório, seus prognósticos de sobrevida serão fictícios.

O desafio acadêmico e tecnológico em tubulações petrolíferas recai fortemente sobre a fadiga oligocíclica induzida pelas flutuações de pressão internas da bomba ou por movimentos marítimos (vórtices). A resposta à fadiga no laminado reduz, dia após dia, as margens teóricas do critério estático. É neste ponto crítico que a fusão entre o histórico de contagem de ciclos da bancada física e as rotinas de fadiga numéricas (baseadas na regra de dano acumulado de Miner) garante que o sistema de infraestrutura permanecerá íntegro durante as três ou quatro décadas exigidas em contratos de exploração de águas ultraprofundas.

5. NORMATIZAÇÃO INTERNACIONAL E PROTOCOLOS DE CERTIFICAÇÃO (ASME E DNV)

O elo final que legitima a utilização irrestrita das simulações numéricas associadas aos testes empíricos é o arcabouço normativo global imposto por autoridades de classe e pela fiscalização internacional. No setor de dutos e vasos de pressão industriais, o Código *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* (notadamente a Seção X, focada em *Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels*) estabelece regras rigorosas para a aceitação de componentes submetidos à pressão. O código ASME exige explicitamente laudos hidrostáticos exaustivos que amparem qualquer

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

flexibilização nas espessuras mínimas geradas nos relatórios por computador.

No cenário da exploração marítima *offshore*, o órgão independente de qualificação e gerenciamento de risco estrutural, Det Norske Veritas (DNV), define o panorama por meio do padrão *DNV-ST-C501* (Compósitos). Esta norma específica transcende o projeto meramente prescritivo, embasando a engenharia focada no desempenho (*Performance-Based Design*). Ela estipula coeficientes parciais de segurança diretamente atrelados à variância estatística dos dados obtidos a partir de testes destrutivos. Quanto maior a reprodutibilidade dos ensaios de bancada e melhor o casamento com a curva de FEA, menores serão os fatores de penalização por incerteza exigidos, o que propicia projetos significativamente mais leves.

A correlação contínua com estas normas evita falhas interpretativas no dimensionamento. Quando o engenheiro calculista desenvolve a matriz do modelo numérico, levando em conta os limites exatos de aprovação exigidos pelas normas ASCE, API ou DNV, o relatório emitido transforma-se em um documento legal incontestável de validação de campo. Este processo atuarial protege os proprietários dos ativos contra rupturas antecipadas não cobertas por seguros corporativos, blindando os consórcios de investidores contra perdas bilionárias decorrentes do derramamento nocivo de produtos químicos no meio ambiente.

Desta forma, a conformidade baseada em simulação, aliada à prova empírica padronizada, permite acelerar substancialmente a entrada de inovações no mercado (*time-to-market*). Vasos encamisados com tecnologias recentes e blindagens navais híbridas de peso reduzido recebem o aval de entidades estatais em ciclos de verificação técnica mais curtos. A garantia da integridade fundamenta-se não na confiança desmedida em interfaces tridimensionais esteticamente impecáveis, mas na rastreabilidade científica demonstrada pelo casamento exato entre o mundo de dados matemáticos e a irredutível resistência mecânica do material no chão de testes.

CONCLUSÃO

A consolidação teórica e prática do dimensionamento em infraestruturas extremas reafirma que o avanço irrevogável da engenharia se baseia no equilíbrio constante entre o postulado matemático e a refutação empírica. A adoção generalizada da análise por elementos finitos desvelou o comportamento íntimo e tensional das estruturas complexas, extirpando definitivamente o dimensionamento massivo baseado em tateio empírico que predominava na construção macroestrutural do século passado, substituindo-o pela alocação inteligente e

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

topológica de material.

Torna-se evidente na literatura que a operação avançada de pacotes de engenharia auxiliada por computador exige um profissional que domine a mecânica em nível micromolecular. A transposição correta da resistência de uma casca cilíndrica de aramida, carbono ou aço naval para as linhas de código numérico exige uma maestria abrangente das equações diferenciais e da mecânica do dano contínuo. Negligenciar essa base implica o risco de se obter resultados de tensões graficamente impecáveis em software, porém estruturalmente infundados, artificiais e mortais na realidade física.

A comprovação em bancada instrumentada seguirá sendo, inegavelmente, o aval definitivo para inovações nas infraestruturas críticas civis, energéticas e de defesa da pátria. Ao demonstrar cientificamente, em laboratórios com atmosfera e carregamentos severamente controlados, que as predições numéricas ortotrópicas são corretas até as raias do colapso global do corpo de prova, a pesquisa legitima o declínio do uso de superligas metálicas pesadas nas malhas navais e impulsiona a era de transição para o hidrogênio e compostos ultraleves.

As trajetórias futuras deste ramo metodológico indicam a crescente incorporação de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) no pós-processamento numérico e na avaliação não destrutiva. Algoritmos emergentes deverão absorver milhares de horas de ensaios acústicos para recalibrar autonomamente os coeficientes das equações estáticas, permitindo malhas regenerativas que anteveem anomalias com base em estatística preditiva em alto volume, revolucionando os conceitos de monitoramento da fadiga (SHM - *Structural Health Monitoring*).

Em suma, o compromisso inabalável com o rigor da predição estrutural define a confiabilidade técnica nas eras vindouras. A convergência metodológica constante entre o poder exponencial dos clusters de processamento matemático e as leituras elétricas precisas das células de carga prova que o controle rigoroso da integridade tensorial da matéria seguirá sendo o pilar inalienável para viabilizar a expansão de grandes infraestruturas com máxima segurança humana e ambiental.

REFERÊNCIAS

KLAUS-JÜRGEN, Bathe. **Finite Element Procedures**. 2nd ed. Watertown: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.

TSAI, S. W. **Composite Materials Design and Testing**. Lausanne: Tech Science Press, 2008.

HASHIN, Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. **Journal of Applied**

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 08/02/2026 | aceito: 11/02/2026 | publicação: 14/02/2026

Mechanics, v. 47, n. 2, p. 329–334, 1980.

ASME BPVC. **Boiler and Pressure Vessel Code, Section X: Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessels**. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 2023.

DNV-ST-C501. **Composite Components**. Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd, Bærum, Norway, 2013.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.