Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

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

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

Lucas Emanuel Soeira es

doctor en Ciencias (Ingeniería Mecánica) por la Universidad de São Paulo (USP); posee una maestría en Ingeniería Mecánica (USP); y una licenciatura en Ingeniería Mecánica (UNESP).

RESUMEN

Este artículo analiza los fundamentos académicos que sustentan la integración indispensable entre las herramientas de simulación tridimensional (FEA) y los protocolos de ensayos destructivos de laboratorio. Centrado en el diseño de cascos y tuberías sometidos a entornos operativos extremos, el texto analiza la necesidad metodológica de calibrar modelos elásticos computacionales mediante la recopilación rigurosa de datos de banco. El estudio profundiza en la aplicabilidad de los criterios de fallo ortotrópico y el cumplimiento de las normas internacionales. La investigación destaca que la predicción computacional, cuando se basa rigurosamente en la instrumentación mecánica, permite el diseño seguro de infraestructuras sometidas a fatiga continua y colapso por presión.

Palabras clave: Análisis de elementos finitos; Validación empírica; Criterios de falla; Normas ASME/DNV; Ingeniería estructural.

ABSTRACTO

Este artículo analiza los fundamentos académicos que sustentan la integración indispensable de las herramientas de simulación tridimensional (FEA) con los protocolos de ensayos destructivos de laboratorio.
Centrado en el diseño de cascos y tuberías sometidos a entornos operativos extremos, este texto analiza la necesidad metodológica de calibrar modelos elásticos computacionales mediante datos de banco rigurosos. El estudio examina la aplicabilidad de los criterios de fallo ortotrópico y su conformidad con las normas internacionales. La investigación destaca que la predicción computacional, cuando se basa rigurosamente en la instrumentación mecánica, permite el diseño seguro de infraestructuras sometidas a fatiga continua y colapso por presión.
Palabras clave: Análisis de elementos finitos; Validación empírica; Criterios de falla; Normas ASME/DNV; Ingeniería estructural.

1. INTRODUCCIÓN

Dimensionamiento de proyectos dentro del ámbito de la ingeniería estructural de alta tecnología.

La complejidad trata intrínsecamente con variables para las cuales el margen de fallo estocástico...

Los costos sistémicos deben tender estrictamente hacia cero. El desarrollo de infraestructuras estratégicas, que

Abarcan desde redes de tuberías submarinas de polímero reforzado hasta el diseño de cascos navales.

Sometido a condiciones hiperbáricas severas, esto requiere metodologías de aprobación rigurosas.

Las matrices mecánicas determinan la viabilidad física y la seguridad ambiental de los ecosistemas.

todos los procesos operativos, lo que obliga a la ciencia de los materiales a mejorar continuamente su

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

métodos para predecir el comportamiento a largo plazo en condiciones adversas.

La consolidación generalizada de la mecánica computacional ha impulsado el abandono progresivo de... ecuaciones analíticas rudimentarias y conservadoras, basadas en simplificaciones dimensionales de láminas delgadas, a favor del uso extensivo del análisis de elementos finitos (FEA). El entorno de El modelado virtual ha proporcionado a los ingenieros estructurales una capacidad sin precedentes para trazar mapas de frentes de falla. concentración de tensiones, comportamientos transitorios e inestabilidades de pandeo en geometrías tridimensionales complejas. Estos escenarios serían analíticamente irresolubles si se limitaron a los métodos de resistencia clásica de materiales, desarrollados a principios de siglo del siglo XX.

Sin embargo, la evolución exponencial de los algoritmos numéricos para matrices de rigidez no es Eliminó la necesidad absoluta de validación empírica. Por el contrario, la comunidad científica y los organismos reguladores reconocen unánimemente que la predicción numérica, operada por De forma aislada, carece de fiabilidad jurídica y estructural en escenarios no lineales. Dinámica de contacto entre materiales o fluidos y estructuras. La simulación virtual requiere retroalimentación. Datos continuos y fiables, proporcionados por la instrumentación de los laboratorios de ensayos mecánicos. Este artículo está dedicado al análisis metodológico de esta dualidad complementaria que rige el diseño. avanzado en ingeniería. El objetivo central es dilucidar cómo la fina correlación entre la deformaciones extraídas de galgas extensométricas físicas y los gradientes de color generados en El procesamiento de software actúa como el eje principal para verificar el cumplimiento en Aprobación de maquinaria pesada. La correlación numérico-experimental no se aborda aquí. no solo como un paso académico, sino también como una herramienta definitiva para la certificación de operación.

2. REVISIÓN TEÓRICA: FORMULACIÓN COMPUTACIONAL Y LÍMITES DEL GEMELO DIGITAL

El núcleo de la fiabilidad analítica en estructuras sometidas a gradientes termomecánicos. La naturaleza continua del material reside en la precisión de la matriz constitutiva asignada al material durante la fase previa. procesamiento en software CAE. El modelado elástico de aleaciones metálicas dúctiles presenta un nivel extremadamente alto de madurez analítica, basado en criterios de El flujo isotrópico está ampliamente documentado, como las teorías de energía de distorsión (von Mises) y esfuerzo cortante máximo (Tresca). Bajo estas condiciones isotrópicas, la respuesta La curva elástica se rige por variables reducidas: el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

Sin embargo, cuando el alcance del proyecto cambia al uso de materiales compuestos
laminados en aplicaciones de defensa marítima o espacial, la complejidad de las ecuaciones de
El contorno aumenta exponencialmente. Los polímeros reforzados con fibras continuas tienen
características inherentemente ortotrópicas, lo que implica que sus módulos de elasticidad...
Las tensiones de tracción y compresión, así como sus respectivos límites de rotura, varían en función del eje.
Cargando. El ingeniero debe introducir hasta 9 constantes en el algoritmo matricial.
curvas elásticas independientes para definir correctamente el comportamiento tridimensional de un
una sola capa de material laminado

La dependencia sistémica de estos datos de entrada específicos subraya la importancia crucial de este paso.
de caracterización de materiales en un laboratorio físico. El concepto moderno de "gemelo digital".
(El gemelo digital) parte de la base de que la malla de elementos finitos no es solo un borrador.
elegante tridimensional, pero una entidad computacional totalmente parametrizada para
para reflejar la degradación y el flujo reales de la contraparte fabricada. De modo que esta paridad
Si ocurren eventos fenomenológicos, el sistema debe ser entrenado y alimentado de manera imperativa en función de...
en informes derivados de probetas de ensayo de tracción y ensayos hidrostáticos.
El proceso de calibración iterativo sirve principalmente para mitigar y reducir las incertidumbres.
inherentes a los métodos de fabricación industrial. Defectos transitorios, como grados de curado.
tensiones longitudinales residuales incompletas inducidas por procesos de enfriamiento y
Las microfisuras interfaciales no pueden generarse en formulaciones puramente ideales.
Matemático. La ejecución paralela de pruebas empíricas proporciona la base numérica exacta.
lo que corrige las asíntotas de fallo del algoritmo, permitiendo que la geometría simulada alcance
Niveles de convergencia altamente seguros.

3. METODOLOGÍA DE CORRELACIÓN: INSTRUMENTACIÓN EN COMPONENTES CRÍTICOS

Comienza el proceso de validación de tuberías industriales y estructuras encapsuladas,
invariablemente, a través de la generación detallada de la topología digital y la discretización meticulosa de
dominio espacial en elementos de orden superior. En el entorno del solucionador, las condiciones de
Se aplican restricciones en los grados de libertad y cargas térmicas extremas a las superficies.
Se realizan simulaciones internas y externas para emular el entorno operativo real. Este paso incluye la simulación.
de la presión de colapso del fondo oceánico enfrentada simultáneamente con los gradientes de
Expansión causada por el flujo de fluidos sobrecalentados.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

El siguiente paso implica la construcción física del aparato a escala real, o como...
Un prototipo a escala reducida, ostentosamente instrumentado mediante rosetas de tensión .
Medidores (galgas extensométricas eléctricas), sensores de termopar y transductores de emisión acústica.
Un recipiente a presión o una tubería instrumentada se ubica en pórticos de prueba hidrostática.
gobernado por sistemas hidráulicos servocontrolados, responsables de aplicar ciclos de fatiga
baja o alta frecuencia, en estricto cumplimiento de los protocolos y reglamentos de defensa.
y petróleo/gas.
El cruce y superposición sistemáticos de historias de deformación leídas en el módulo de
Adquisición de datos de laboratorio (DAQ) con la curva de respuesta nodal exportada por
El software FEA revela la relación de correlación intrínseca del diseño. Una divergencia
matemáticas perceptibles entre la microdeformación (με) leída por el sensor unido a la pieza y la
La deformación homóloga en la malla indica inmediatamente la necesidad de reevaluar las restricciones.
virtualizar o incluso recalcular el grado de rigidez a la flexión de la formulación matemática elegida.
para el laminado.
La validación de los cascos navales y las tuberías compuestas continuas alcanza su punto culminante por

El proceso consiste en llevar la estructura al límite de su resistencia catastrófica mediante una prueba de colapso hasta que se produzca la rotura (prueba de estallido).

El laboratorio registra el umbral exacto de pérdida de estabilidad mecánica general. Reinserción
Esta limitación en los parámetros del solucionador permite realizar simulaciones posteriores.
centrado en el estudio mecánico de la propagación de grietas (mecánica de fractura), proporcionando a
la capacidad del ingeniero para extrapolar la vida útil del componente en funcionamiento sin
Resulta costoso tener que analizar muestras a gran escala.

4. Comportamiento ante la fatiga y criterios de fallo en los materiales ORTOTRÓPICA

A diferencia de los metales, cuyas fallas generalmente comienzan con la deformación plástica.
macroscópicamente observables y por el crecimiento de grietas de fatiga dúctil, los materiales
Los materiales compuestos sometidos a esfuerzos combinados fallan a través de múltiples...
microeventos interactivos. El colapso de una estructura ortotrópica suele estar precedido por
microfisuras interlaminarias (fisuración de la matriz), delaminación entre la fibra y la resina
(desprendimiento), delaminación entre capas adyacentes y, en última instancia, estructuralmente, la
ruptura cataclísmica de fibras tensoriales. Para modelar computacionalmente esta progresión de
Los daños requieren teorías de vanguardia.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

Para identificar matemáticamente en qué rango de voltaje ocurrirá el primer microdefecto,
Los programas FEA implementan formulaciones interactivas complejas, con especial énfasis en
Criterios clásicos de Tsai-Wu y Hashin. El criterio polinómico de Tsai-Wu, por ejemplo,
Proporciona una envolvente de fallo elipsoidal continua, que indica si la pieza fallará bajo determinadas condiciones.
combinaciones complejas de cargas axiales y cortantes. Sin embargo, este polinomio
Depende fundamentalmente de la entrada precisa de los límites de resistencia a la tracción y a la compresión, que
Deben ser obtenidos mediante una caracterización experimental previa.
(pruebas con cupones estandarizados).
El criterio fenomenológico de Hashin (o los métodos de Puck) va más allá de simplemente predecir el
momento del colapso y trata de distinguir cuál de los modos mecánicos de ruina está en marcha (falla).
Ruptura de la matriz transversal o de la fibra primaria). La veracidad de las predicciones de Hashin en
Las mallas nodales tridimensionales se ven tremendamente influenciadas por la sensibilidad de la malla y...
Consideraciones para la degradación progresiva de la rigidez adoptadas por el diseñador. En caso de que estos
Los algoritmos de análisis de daños progresivos (PDA) funcionan
sin calibración basada en informes de emisión acústica de laboratorio, sus pronósticos de
Las tasas de supervivencia serán ficticias.

El desafío académico y tecnológico en los oleoductos radica en gran medida en la fatiga.
presión oligocíclica inducida por fluctuaciones de la presión de la bomba interna o por movimientos
marítimo (vórtices). La respuesta a la fatiga en el laminado reduce, día a día, los márgenes teóricos del criterio
estático. Es en este punto crítico que la fusión entre el historial de recuento de ciclos del
Rutinas de fatiga física y numérica en banco de trabajo (basadas en la regla de daño acumulativo de Miner)
Garantiza que el sistema de infraestructuras se mantendrá intacto durante tres o cuatro décadas.
Requerido en los contratos de exploración en aguas ultraprofundas.

5. PROTOCOLOS INTERNACIONALES DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (ASME y DNV)

El último eslabón que legitima el uso irrestricto de simulaciones numéricas asociadas a las pruebas.
Lo empírico es el marco normativo general impuesto por las autoridades profesionales y la supervisión.
A nivel internacional, en el sector de tuberías industriales y recipientes a presión, la norma ASME Boiler and
Código de recipientes a presión (en particular la Sección X, centrada en la presión de plásticos reforzados con fibra)
Vessels establece normas estrictas para la aceptación de componentes sometidos a presión.
El código ASME requiere explícitamente informes hidrostáticos exhaustivos para respaldar cualquier

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

Flexibilidad en los espesores mínimos generados en los informes generados por computadora.
En el contexto de la exploración marítima en alta mar , la calificación independiente y
La gestión de riesgos estructurales, Det Norske Veritas (DNV), define el panorama a través de la
Norma DNV-ST-C501 (Materiales compuestos). Esta norma específica va más allá del mero diseño.
Diseño prescriptivo basado en el rendimiento .
estipula coeficientes de seguridad parciales directamente vinculados a la varianza estadística de
datos obtenidos de ensayos destructivos. Cuanto mayor sea la reproducibilidad de los ensayos de
Cuanto mejor sea el balance y mejor se ajuste a la curva de análisis de elementos finitos (FEA), menores serán los factores de penalización.
Debido a la incertidumbre que esto implica, permite realizar proyectos considerablemente más sencillos.
La correlación continua con estas normas evita errores de interpretación en el dimensionamiento.
Cuando el ingeniero estructural desarrolla la matriz del modelo numérico, teniendo en cuenta la
límites de aprobación exactos requeridos por los estándares ASCE, API o DNV, según el informe emitido
Este proceso se transforma en un documento legal indiscutible de validación de campo.
La ciencia actuarial protege a los propietarios de activos contra pérdidas prematuras no cubiertas por el seguro.
entidades corporativas, protegiendo a los consorcios de inversores de pérdidas multimillonarias resultantes de
Derrame nocivo de productos químicos en el medio ambiente.
De esta manera, el cumplimiento basado en simulación, combinado con evidencia empírica estandarizada,
Permite una aceleración sustancial del tiempo de comercialización de las innovaciones. Jarrones
revestido con las últimas tecnologías y blindaje naval híbrido ligero recibe
La aprobación de entidades estatales en ciclos de verificación técnica más cortos. La garantía de
La integridad no se basa en una dependencia excesiva de las interfaces tridimensionales.
Estéticamente impecable, pero con una trazabilidad científica demostrada por la coincidencia precisa.
entre el mundo de los datos matemáticos y la resistencia mecánica irreductible del material en el suelo.
de pruebas.

CONCLUSIÓN

La consolidación teórica y práctica del dimensionamiento en infraestructuras extremas reafirma que
El avance irreversible de la ingeniería se basa en el equilibrio constante entre el postulado
Análisis matemático y refutación empírica. La adopción generalizada del análisis de elementos finitos.
reveló el comportamiento íntimo y tensional de estructuras complejas, eliminando
definitivamente el dimensionamiento masivo basado en prueba y error empírico que prevaleció en
construcción macroestructural del siglo pasado, reemplazándola con asignación inteligente y

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google
RCMOS - Revista Científica Multidisciplinaria El Conocimiento.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

estructura topológica del material.

Se hace evidente en la literatura que el funcionamiento avanzado de los paquetes de ingeniería ayudados por Los ordenadores requieren un profesional que domine la mecánica a nivel micromolecular. transposición correcta de la resistencia de una carcasa cilíndrica de acero aramida, carbono o naval. Escribir líneas de código numérico requiere un dominio completo de las ecuaciones diferenciales y de la mecánica del daño continuo. Descuidar esta base implica el riesgo de obtener resultados de tensiones gráficamente impecables en el software, pero estructuralmente infundadas, artificiales y mortales en la realidad física.

Las pruebas en un banco de pruebas instrumentado seguirán siendo, sin duda, la validación definitiva para Innovaciones en infraestructura crítica civil, energética y de defensa nacional. Mediante demostración científicamente, en laboratorios con atmósferas y cargas estrictamente controladas, que Las predicciones numéricas ortotrópicas son correctas hasta los límites del colapso global del cuerpo.

La evidencia sugiere que la investigación justifica la disminución del uso de superaleaciones de metales pesados en la construcción naval. y fomenta la transición hacia el hidrógeno y los compuestos ultraligeros.

Las trayectorias futuras en este campo metodológico indican la creciente incorporación de Aprendizaje automático en el postprocesamiento y la evaluación numérica. No destructivo. Los algoritmos emergentes deberán absorber miles de horas de pruebas acústicas. para recalibrar de forma autónoma los coeficientes de las ecuaciones estáticas, permitiendo mallas Tecnologías regenerativas que anticipan anomalías basándose en estadísticas predictivas de alto volumen. Revolucionando los conceptos de monitorización de la fatiga (SHM - Salud Estructural) Escucha).

En resumen, un compromiso inquebrantable con el rigor de la predicción estructural define la fiabilidad. La tecnología en las eras venideras. La constante convergencia metodológica entre el poder exponencial. de los clústeres de procesamiento matemático y las lecturas eléctricas precisas de las celdas de carga Esto demuestra que el control riguroso de la integridad tensorial de la materia seguirá siendo la piedra angular. inalienable para permitir la expansión de grandes infraestructuras con la máxima seguridad. humano y ambiental.

REFERENCIAS

KLAUS-JÜRGEN, Bathe. Procedimientos de elementos finitos. 2.ª ed. Watertown: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.

TSAI, Diseño y ensayo de materiales compuestos SW. Lausana: Tech Science Press, 2008.

HASHIN, Z. Criterios de falla para compuestos de fibra unidireccionales. Journal of Applied

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.

Machine Translated by Google

Año VII, vol. 1 2026 | Envío: 08/02/2026 | Aceptado: 11/02/2026 | Publicación: 14/02/2026

Mecánica, vol. 47, núm. 2, págs. 329-334, 1980.

ASME BPVC. Código de calderas y recipientes a presión, Sección X: Recipientes a presión de plástico reforzado con fibra. Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos, Nueva York, NY, 2023.

DNV-ST-C501. Componentes compuestos. Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd, Bærum, Noruega, 2013.

Este artículo se publica en acceso abierto bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite el uso, la distribución y la reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se cite correctamente la obra original.