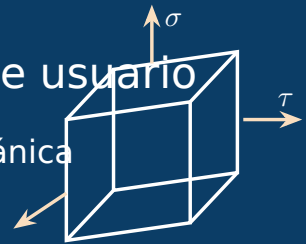


MechStress

Documentación técnica, científica y manual de usuario

HP Prime - análisis integrado de esfuerzos y resistencia mecánica



Versión documentada: MechStress v2.1.0 Release (baseline RC4).

Autor del proyecto y desarrollador principal: Carlos Valdés.

Plataforma: HP Prime (HP PPL, App base *None*, arquitectura modular multi-File).

Ámbito: tensor de esfuerzos 2D/3D, esfuerzos principales, círculo de Mohr, falla estática, fatiga, concentración de esfuerzos, mecánica de fractura, invariantes y resumen integrado.

Este documento describe el funcionamiento del programa, sus fundamentos físicos y matemáticos, sus decisiones algorítmicas, su uso práctico y sus limitaciones de ingeniería. No sustituye normas, códigos de diseño, certificados de material ni juicio profesional.

27 de septiembre de 2026

Índice

1. Créditos y autoría	3
2. Propósito y alcance	3
3. Arquitectura del programa	4
3.1. Persistencia y compatibilidad	4
4. Manual de usuario	5
4.1. Concepto de navegación	5
4.2. Entrada del tensor	5
4.3. Páginas NUM	6
4.4. Páginas PLOT	6
4.5. Menú principal	6
4.6. Materiales	6
4.7. Idioma	7
5. Fundamento mecánico: tensor de esfuerzos	7
5.1. Tensor de Cauchy	8
5.2. Esfuerzos principales	8
5.3. Transformación de esfuerzos 2D	8
6. Círculo de Mohr	9
7. Falla estática dúctil	9
7.1. Von Mises	9
7.2. Tresca	9
7.3. Interpretación	10
8. Falla estática frágil	10
8.1. Rankine	10
8.2. Coulomb-Mohr	10
8.3. Mohr modificado	10
9. Fatiga	10
9.1. Descomposición del ciclo	10
9.2. Límite de resistencia a fatiga y factores de Marin	11
9.2.1. Acabado superficial k_a	11
9.2.2. Tamaño k_b	11
9.2.3. Tipo de carga k_c	11

9.2.4. Temperatura k_d	11
9.2.5. Confiabilidad k_e	12
9.3. Concentración de esfuerzos	12
9.4. Goodman, Soderberg y Gerber	12
10 Mecánica de fractura	13
11 Invariantes, desviador y estado de tensión avanzado	13
11.1 Primer invariante y parte hidrostática	13
11.2 Segundo y tercer invariante desviadores	14
11.3 Triaxialidad	14
11.4 Ángulo y parámetro de Lode	14
12 Métodos numéricos y decisiones algorítmicas	15
12.1 Autovalores y autovectores	15
12.2 Tolerancias	15
12.3 Gerber sin iteración	15
12.4 Discretización gráfica	15
12.5 Clipping y autoescala	15
12.6 Formato y layout adaptativo	16
13 Ejemplos de comprobación	16
13.1 Ejemplo 2D	16
13.2 Ejemplo 3D	16
13.3 Ejemplo de fatiga	16
13.4 Ejemplo de fractura	17
14 Interpretación de resultados y buenas prácticas	17
15 Limitaciones científicas y de modelado	17
16 Optimización y consideraciones de implementación HP Prime	18
17 Validación durante el desarrollo	19
18 Guía rápida de trabajo	19
19 Glosario de símbolos	19
20 Referencias técnicas recomendadas	20
Nota final	20

1 Créditos y autoría

Autor del proyecto y desarrollador principal: Carlos Valdés.

El concepto de la aplicación, la definición de requisitos, la selección de funciones de ingeniería, la dirección del desarrollo, las pruebas sobre HP Prime y emulador, la validación funcional y las decisiones de producto fueron realizadas bajo la dirección de Carlos Valdés. MechStress surge de un proceso iterativo de diseño y depuración orientado a convertir la HP Prime en una herramienta portátil de mecánica aplicada de alcance considerablemente mayor que un calculador de esfuerzos principales.

La versión documentada corresponde a la rama que, tras las fases CEP 3D v1.x y MechStress v2.x, fue seleccionada como **release estable**: MechStress v2.1.0 basada en RC4. La denominación *RC4* se conserva únicamente como referencia histórica de desarrollo; a efectos de uso y distribución, este documento la trata como la versión Release.

2 Propósito y alcance

MechStress es una aplicación de mecánica aplicada para HP Prime diseñada para concentrar, en una sola herramienta portátil, varias operaciones que normalmente se encuentran separadas entre apuntes, hojas de cálculo y software de escritorio. Su núcleo parte del análisis tensorial de esfuerzos y extiende ese estado hacia criterios de resistencia, fatiga, fractura e invariantes.

La aplicación trabaja con estados tensionales en un punto. No modela la geometría completa de una pieza ni resuelve un problema de elementos finitos. El usuario introduce un tensor de esfuerzos ya conocido y MechStress determina magnitudes derivadas, orientaciones, factores de seguridad y representaciones gráficas asociadas.

Utilidades principales

- Estado plano de esfuerzos y tensor tridimensional general.
- Esfuerzos principales y direcciones principales.
- Círculo de Mohr 2D y representación 3D mediante los tres círculos principales.
- Tracción sobre un plano definido por su normal en 3D.
- Criterios dúctiles: Von Mises y Tresca.
- Criterios frágiles: Rankine, Coulomb–Mohr y Mohr modificado.
- Biblioteca de materiales y resistencias personalizadas.
- Fatiga con Goodman, Soderberg, Gerber, límite de fluencia, factores de Marin, K_t , sensibilidad de entalla q y K_f .
- Fractura elástica lineal en modo I mediante K_I , K_{IC} y tamaño crítico de grieta.
- Invariantes I_1 , J_2 , J_3 , componente hidrostática, tensor desviador, triaxialidad y Lode.
- Resumen integrado del estado mecánico.
- Cambio automático de idioma de la interfaz según la variable de sistema Language de la calculadora.

Alcance y limitación

MechStress es una herramienta de cálculo y análisis. No verifica por sí misma requisitos de ASME, API, AISC, Eurocódigos, ASTM u otros códigos; no incorpora factores legales o de servicio específicos de una norma; no reemplaza ensayos de material; y no debe usarse como única fuente para una decisión de seguridad crítica.

3 Arquitectura del programa

La aplicación utiliza una arquitectura modular nativa multi-File. El módulo principal se mantiene como primer File del contenedor de la App, porque contiene los entry points que la HP Prime utiliza para abrir las vistas. Los demás módulos separan cálculo, persistencia y presentación.

Módulo	Responsabilidad principal
MechStress	Entry points START/Symb/Num/Plot/PlotSetup/Info, lazo principal, navegación, caché de resultados y persistencia del estado.
COMMON	Unidades, colores, formato numérico, localización, medición real del ancho de texto y toolkit visual.
STRESS	Esfuerzos principales 2D/3D, vectores propios, transformación 2D y tracción sobre plano 3D.
MOHR	Ventanas gráficas, pan/zoom táctil, rejilla y círculo(s) de Mohr.
MATERIALS	Biblioteca de materiales, resistencias, selección y escalado de unidades.
FAILURE	Von Mises, Tresca, Rankine, Coulomb-Mohr, Mohr modificado y factores de seguridad.
ENVELOPE	Envoltentes gráficas de falla dúctil y frágil.
FATIGUE	Ciclo, límite de resistencia a fatiga, Marin, K_t/K_f , Goodman, Soderberg, Gerber y gráfica de fatiga.
FRACTURE	K_I , K_{IC} , geometría Y , tamaño crítico y gráfica $K_I(a)$.
INVARIANTS	I_1 , J_2 , J_3 , desviador, triaxialidad y Lode.
SUMMARY	Integración de las ramas de análisis en la página de resumen global.
UI	Formularios, páginas NUM, menú principal y pantalla de información.

La rama de producción elimina el módulo de autotest para reducir tamaño y tiempo de carga. Durante el desarrollo se utilizaron suites de regresión crecientes; la rama optimizada hereda el mismo núcleo matemático y elimina únicamente la infraestructura diagnóstica del runtime.

3.1 Persistencia y compatibilidad

Los estados se guardan mediante AVars. Para conservar compatibilidad con versiones anteriores, varias claves internas mantienen el prefijo histórico CEP3D aunque el nombre visible de la app sea MechStress:

Clave	Contenido
CEP3D	tensor, unidades, orientación/plano activo
CEP3DFAIL	S_y, S_{ut}, S_{uc}
CEP3DMAT	índice del material
CEP3DFAT	estado de fatiga y concentradores
CEP3DFRACT	estado de fractura

El cargador también reconoce estados históricos MOHR19 y MOHR13, lo que permite migrar datos de etapas tempranas del proyecto.

4 Manual de usuario

4.1 Concepto de navegación

La App usa las teclas principales de la HP Prime como vistas funcionales:

Tecla	Acción en MechStress
SYMB	Introducir o editar el tensor de esfuerzos 2D/3D y seleccionar unidades.
NUM	Recorrer las páginas de resultados numéricos.
PLOT	Recorrer las representaciones gráficas.
MENU	Abrir el menú principal integrado.
VIEW	En PLOT, cambiar de gráfica; con Shift+VIEW en Mohr, reajustar automáticamente la ventana.
INFO	Mostrar ayuda/información contextual de la aplicación.
ESC	Salir a Home desde el menú personalizado; en el lazo principal también finaliza hacia Home.
APPS	Desde el menú personalizado, abre la Biblioteca de Apps.

4.2 Entrada del tensor

En modo 2D la aplicación solicita

$$\sigma_x, \quad \sigma_y, \quad \tau_{xy}.$$

Internamente se interpreta como un estado plano de esfuerzos:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

En modo 3D se solicitan seis componentes independientes del tensor simétrico:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}.$$

Las unidades de esfuerzo disponibles son Pa, kPa, MPa, psi y ksi. Al cambiar de unidad, el programa reescala el tensor, las resistencias del material y los datos de fatiga para conservar el mismo estado físico.

4.3 Páginas NUM

La vista NUM tiene siete páginas. Las flechas izquierda/derecha permiten recorrerlas circularmente.

1. **Esfuerzos:** principales, orientación 2D o direcciones principales 3D, $\tau_{\max}$ y estado sobre un plano.
2. **Falla dúctil:** Von Mises, Tresca, uso y factor de seguridad.
3. **Falla frágil:** Rankine, Coulomb-Mohr y Mohr modificado cuando aplica.
4. **Fatiga:** ciclo, S_e , K_t , K_f y factores de seguridad.
5. **Fractura:** K_I , K_{IC} , Y , tamaño de grieta y a_{crit} .
6. **Invariantes:** I_1 , J_2 , J_3 , σ_m , presión, desviador, η y Lode.
7. **Resumen global:** principales, Von Mises, $\tau_{\max}$ y factores de seguridad de las ramas disponibles.

Por qué Invariantes no abre un formulario propio. La sección de invariantes analiza directamente el tensor actual. No necesita entradas adicionales: I_1 , J_2 , J_3 , triaxialidad y Lode quedan completamente definidos por el mismo tensor introducido en SYMB. Por eso la opción de menú conduce de forma directa a la página de resultados.

4.4 Páginas PLOT

La vista PLOT tiene cinco gráficos:

1. Círculo(s) de Mohr.
2. Envolvente dúctil Von Mises/Tresca.
3. Envolvente frágil Rankine/Coulomb-Mohr/Mohr modificado.
4. Diagrama de fatiga en el plano σ_m - σ_a .
5. Diagrama $K_I(a)$ frente a K_{IC} .

La gráfica de Mohr admite pan táctil, gesto de zoom con dos puntos, desplazamiento por teclas y zoom por teclado. Shift+VIEW reestablece el autoajuste. Las otras gráficas priorizan la comparación de estado contra envolvente y no reutilizan la navegación táctil de Mohr.

4.5 Menú principal

El menú reúne acceso a orientación/plano, material, resistencias, falla estática, invariantes, fatiga, fractura, resumen global, gráficas e información. Fatiga y fractura tienen sus propios submenús porque requieren parámetros adicionales al tensor.

4.6 Materiales

La biblioteca incorporada usa resistencias nominales de referencia en MPa:

Material	S_y	S_{ut}	S_{uc}
Personalizado	–	–	–
Acero ASTM A36	250	400	0
AISI 1018 CD	370	440	0
AISI 1045 CD	530	625	0
Acero inoxidable 304 recocido	215	505	0
Acero inoxidable 316 recocido	205	515	0
Al 6061-T6	276	310	0
Al 7075-T6	503	572	0
Ti-6Al-4V Gr 5	828	895	0
Fundición gris A48-30	0	214	752
Fundición gris A48-40	0	276	965

Consideración de ingeniería

Los valores de la biblioteca son datos nominales de referencia para cálculo. El diseño real debe emplear propiedades certificadas del material, condición metalúrgica, temperatura, orientación, espesor y lote aplicables al componente estudiado.

4.7 Idioma

La interfaz sigue directamente la variable de sistema Language de la HP Prime. El nombre de la App se mantiene estático como *MechStress*; la localización afecta menús, formularios, resultados, ayudas y mensajes.

Language	Idioma de interfaz
1	Inglés
2	Chino
3	Francés
4	Alemán
5	Español
6	Neerlandés
7	Portugués
8	Japonés

En la Release basada en RC4, las ocho tablas de traducción están **embebidas dentro del propio código PPL**, con 252 entradas por idioma. Al abrir la App, el cargador selecciona la tabla correspondiente a Language; si el usuario cambia el idioma del sistema y vuelve a entrar, la interfaz utiliza el nuevo idioma. Esta arquitectura fue elegida deliberadamente por robustez: no depende de ANote, AFiles, AFilesB ni archivos auxiliares externos para poder mostrar la interfaz.

Los nombres técnicos internacionales (por ejemplo, Von Mises, Tresca, Goodman, Gerber, K_t , K_f , K_{IC} , J_2 y J_3) se conservan cuando traducirlos podría reducir claridad o dificultar la correspondencia con bibliografía de ingeniería.

5 Fundamento mecánico: tensor de esfuerzos

5.1 Tensor de Cauchy

En un continuo clásico sin pares internos, el tensor de esfuerzos es simétrico. En tres dimensiones:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}.$$

Para un plano de normal unitaria $\mathbf{n}$, el vector de tracción es

$$\mathbf{t} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}.$$

La componente normal es

$$\sigma_n = \mathbf{t} \cdot \mathbf{n},$$

y la parte tangencial es

$$\boldsymbol{\tau}_n = \mathbf{t} - \sigma_n \mathbf{n}, \quad \tau_n = \|\boldsymbol{\tau}_n\|.$$

La aplicación normaliza automáticamente la normal introducida. El vector cero se rechaza porque no define un plano.

5.2 Esfuerzos principales

Los esfuerzos principales son los autovalores del tensor:

$$\det(\boldsymbol{\sigma} - \lambda \mathbf{I}) = 0.$$

Se ordenan como

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3.$$

Las direcciones principales corresponden a los autovectores asociados.

En 2D, si el cálculo matricial no está disponible o falla, existe un respaldo analítico:

$$\begin{aligned} \sigma_{prom} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, \\ R &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}, \\ \sigma_{1,2} &= \sigma_{prom} \pm R. \end{aligned}$$

El ángulo principal cumple

$$\tan(2\theta_p) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y},$$

con tratamiento por cuadrantes equivalente a una función atan2 .

5.3 Transformación de esfuerzos 2D

Para un giro θ :

$$\sigma_{x'} = \sigma_m + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta, \quad (1)$$

$$\sigma_{y'} = \sigma_m - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta, \quad (2)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta. \quad (3)$$

El programa trabaja internamente en radianes y convierte a grados o gradianes según la configuración de Home, evitando que el resultado dependa del modo angular activo durante la evaluación.

6 Círculo de Mohr

En estado plano, el círculo tiene centro

$$C = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$$

y radio

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}.$$

Las intersecciones con el eje normal son σ_1 y σ_2 . El cortante máximo en el plano es R .

Para un estado tridimensional, el programa usa los tres círculos formados por los pares de esfuerzos principales:

$$R_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad R_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \quad R_{13} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

El cortante máximo absoluto es

$$\tau_{max} = R_{13} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

La ventana gráfica se calcula de forma automática a partir de los resultados. El usuario puede desplazar y ampliar el círculo sin alterar los datos mecánicos.

7 Falla estática dúctil

7.1 Von Mises

La tensión equivalente de Von Mises, expresada mediante esfuerzos principales, es

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}.$$

Para material con límite de fluencia S_y :

$$FS_{VM} = \frac{S_y}{\sigma_{VM}}.$$

En el plano de esfuerzos principales, la envolvente de Von Mises se representa como la curva elíptica correspondiente al nivel de fluencia.

7.2 Tresca

La medida equivalente utilizada es la máxima diferencia entre esfuerzos principales:

$$\sigma_T = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|).$$

El factor de seguridad es

$$FS_T = \frac{S_y}{\sigma_T}.$$

Esto equivale a imponer que el cortante máximo no exceda $S_y/2$.

7.3 Interpretación

La pantalla compara ambos criterios y reporta el menor factor de seguridad como referencia conservadora entre los dos. Un valor inferior a uno indica que el punto está fuera de la envolvente idealizada de fluencia.

8 Falla estática frágil

Sea σ_1 el principal máximo y σ_3 el mínimo. La aplicación usa S_{ut} como resistencia última a tracción y S_{uc} como resistencia última a compresión.

8.1 Rankine

El uso normalizado se obtiene a partir de la mayor demanda de tracción o compresión:

$$U_R = \max\left(\frac{\max(\sigma_1, 0)}{S_{ut}}, \frac{\max(-\sigma_3, 0)}{S_{uc}}\right), \quad FS_R = \frac{1}{U_R}.$$

8.2 Coulomb-Mohr

Para estados mixtos $\sigma_1 > 0 > \sigma_3$:

$$U_{CM} = \frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}}.$$

En tracción pura o compresión pura se reduce al cociente uniaxial correspondiente. El factor de seguridad es $1/U_{CM}$.

8.3 Mohr modificado

La implementación usa la forma por regiones:

$$U_{MM} = \begin{cases} \sigma_1/S_{ut}, & \sigma_3 \geq 0, \\ -\sigma_3/S_{uc}, & \sigma_1 \leq 0, \\ \sigma_1/S_{ut}, & \sigma_1 > 0 > \sigma_3 \text{ y } |\sigma_3/\sigma_1| \leq 1, \\ \frac{(S_{uc} - S_{ut})\sigma_1}{S_{uc}S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{uc}}, & \text{caso mixto restante.} \end{cases}$$

En 3D el criterio de Mohr modificado solo se habilita cuando el estado se reconoce como esencialmente plano, es decir, cuando uno de los esfuerzos principales es cercano a cero dentro de una tolerancia numérica. Rankine y Coulomb-Mohr sí se calculan con el par extremo σ_1, σ_3 del estado general.

9 Fatiga

9.1 Descomposición del ciclo

A partir de σ_{max} y σ_{min} :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{|\sigma_{max} - \sigma_{min}|}{2}.$$

La rama de fatiga adopta una decisión conservadora para la compresión media: no se acredita beneficio por $\sigma_m < 0$. Por ello

$$\sigma_m^+ = \max(\sigma_m, 0).$$

9.2 Límite de resistencia a fatiga y factores de Marin

En modo automático, para materiales compatibles, el límite de laboratorio inicial se toma como

$$S'_e = \min(0.5S_{ut}, 700 \text{ MPa}).$$

El límite corregido es

$$S_e = S'_e k_a k_b k_c k_d k_e k_{misc}.$$

9.2.1 Acabado superficial k_a

Con S_{ut} en MPa:

$$k_a = a S_{ut}^b.$$

Acabado	a	b
Rectificado	1.58	-0.085
Maquinado / estirado en frío	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272	-0.995

9.2.2 Tamaño k_b

Para carga axial se adopta $k_b = 1$. En los demás casos, con diámetro equivalente d en mm:

$$k_b = \begin{cases} 1, & d \leq 2.79, \\ (d/7.62)^{-0.107}, & 2.79 < d \leq 51, \\ 1.51d^{-0.157}, & d > 51. \end{cases}$$

9.2.3 Tipo de carga k_c

$$k_c = 1.00 \text{ (flexión)}, \quad k_c = 0.85 \text{ (axial)}, \quad k_c = 0.59 \text{ (torsión)}.$$

9.2.4 Temperatura k_d

La temperatura se convierte a Fahrenheit y se limita al intervalo usado por la correlación. La implementación evalúa

$$k_d = 0.975 + 0.432 \times 10^{-3} T_F - 0.115 \times 10^{-5} T_F^2 + 0.104 \times 10^{-8} T_F^3 - 0.595 \times 10^{-12} T_F^4.$$

9.2.5 Confiabilidad k_e

La aplicación incorpora los factores

$$1.000, 0.897, 0.868, 0.814, 0.753, 0.702$$

para 50, 90, 95, 99, 99.9 y 99.99 % de confiabilidad, respectivamente.

9.3 Concentración de esfuerzos

El factor teórico K_t puede introducirse manualmente o estimarse con dos geometrías idealizadas:

$$K_t = 3$$

para un agujero circular en una placa ancha ideal, y

$$K_t = 1 + 2\frac{a}{b}$$

para una entalla elíptica idealizada tipo Inglis.

La sensibilidad de entalla q se limita a $0 \leq q \leq 1$, y el factor efectivo de fatiga es

$$K_f = 1 + q(K_t - 1).$$

En los criterios de fatiga se usa

$$\sigma_a^* = K_f \sigma_a, \quad \sigma_m^* = K_t \max(\sigma_m, 0).$$

9.4 Goodman, Soderberg y Gerber

Goodman:

$$FS_G = \frac{1}{\sigma_a^*/S_e + \sigma_m^*/S_{ut}}.$$

Soderberg:

$$FS_S = \frac{1}{\sigma_a^*/S_e + \sigma_m^*/S_y}.$$

Gerber se resuelve escalando simultáneamente el estado por n :

$$n \frac{\sigma_a^*}{S_e} + \left(n \frac{\sigma_m^*}{S_{ut}} \right)^2 = 1.$$

Definiendo

$$A = \frac{\sigma_a^*}{S_e}, \quad B = \left(\frac{\sigma_m^*}{S_{ut}} \right)^2,$$

la raíz positiva es

$$FS_{Gerber} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B}}{2B},$$

con el límite $1/A$ cuando $B \rightarrow 0$.

La comprobación de fluencia del ciclo usa el pico local

$$\sigma_{pico} = \max(|K_t \sigma_{max}|, |K_t \sigma_{min}|), \quad FS_y = \frac{S_y}{\sigma_{pico}}.$$

Alcance y limitación

El modelo implementado es un análisis de vida alta/infinita mediante diagramas de tensión media. No calcula una curva S-N completa, daño acumulado de Miner, crecimiento de grieta por Paris ni fatiga multiaxial avanzada.

10 Mecánica de fractura

La sección de fractura usa mecánica de fractura elástica lineal (LEFM) en modo I. El factor de intensidad es

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a},$$

donde a es una longitud característica de grieta, Y es el factor geométrico y σ es la tensión de apertura.

La comparación con la tenacidad K_{IC} produce

$$FS_K = \frac{K_{IC}}{K_I}.$$

La grieta crítica idealizada se obtiene de

$$a_{crit} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma} \right)^2.$$

Las fuentes de tensión disponibles son: valor manual, esfuerzo principal máximo del tensor actual o σ_{max} del ciclo de fatiga. Si la tensión de apertura es compresiva o nula, el programa toma $K_I = 0$, porque no existe apertura de modo I en el modelo idealizado.

Los modelos de Y incorporados son:

$Y = 1$ grieta central ideal en placa infinita,

$Y \approx 1.12$ grieta de borde ideal,

y valor manual para cualquier geometría cuya solución sea conocida por el usuario.

Internamente, a se almacena en metros y K en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. La interfaz presenta mm y $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ para unidades SI, o pulgadas y $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ para sistemas psi/ksi.

Consideración de ingeniería

K_{IC} debe provenir de datos apropiados para material, orientación, espesor, temperatura y ambiente. No se deduce de S_y ni de S_{ut} . El factor geométrico Y debe corresponder a la geometría real y al rango de validez de la solución utilizada.

11 Invariantes, desviador y estado de tensión avanzado

11.1 Primer invariante y parte hidrostática

$$I_1 = \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z.$$

La tensión media es

$$\sigma_m = \frac{I_1}{3},$$

y la presión se presenta con la convención

$$p = -\sigma_m.$$

El tensor se descompone en

$$\boldsymbol{\sigma} = \sigma_m \mathbf{I} + \mathbf{s},$$

donde $\mathbf{s}$ es el tensor desviador.

11.2 Segundo y tercer invariante desviadores

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}$$

y, en componentes,

$$J_2 = \frac{s_{xx}^2 + s_{yy}^2 + s_{zz}^2}{2} + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2.$$

El tercer invariante es

$$J_3 = \det(\mathbf{s}),$$

que la implementación desarrolla explícitamente como

$$J_3 = s_{xx}s_{yy}s_{zz} + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz} - s_{xx}\tau_{yz}^2 - s_{yy}\tau_{xz}^2 - s_{zz}\tau_{xy}^2.$$

Von Mises queda relacionado con J_2 mediante

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3J_2}.$$

11.3 Triaxialidad

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{VM}}.$$

Cuando σ_{VM} es prácticamente cero, la triaxialidad no se reporta como una razón física bien definida.

11.4 Ángulo y parámetro de Lode

La aplicación calcula

$$\theta_L = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right),$$

limitando numéricamente el argumento del arco coseno al intervalo $[-1, 1]$ para evitar errores de redondeo.

El parámetro normalizado mostrado es

$$\bar{L} = 1 - \frac{6\theta_L}{\pi}.$$

Con esta convención, valores cercanos a +1, 0 y -1 representan estados asociados respectivamente a extensión axisimétrica, cortante puro y compresión axisimétrica dentro de la parametrización desviadora adoptada.

12 Métodos numéricos y decisiones algorítmicas

Aunque la mayor parte de MechStress se basa en fórmulas cerradas, existen varias decisiones numéricas relevantes.

12.1 Autovalores y autovectores

Los esfuerzos principales se obtienen con la rutina nativa EIGENVAL sobre matrices simétricas de 2x2 y 3x3. En 2D existe un respaldo analítico que evita perder funcionalidad si el cálculo matricial falla.

Para cada autovalor 3D, la dirección principal se aproxima construyendo las tres filas de

$$\sigma - \lambda \mathbf{I}$$

y calculando sus productos cruzados por pares. El producto cruzado de mayor norma es el candidato al vector del núcleo. Después se normaliza y se fija un signo determinista para evitar que la misma dirección aparezca visualmente invertida entre cálculos equivalentes.

12.2 Tolerancias

Se emplean tolerancias relativas del orden de 10^{-10} a 10^{-12} para distinguir vectores degenerados, esfuerzos prácticamente iguales y denominadores cercanos a cero. Estas tolerancias no representan incertidumbre física; son protecciones contra ruido de punto flotante.

12.3 Gerber sin iteración

El factor de seguridad de Gerber no se busca mediante Newton ni bisección. Se resuelve analíticamente como una ecuación cuadrática en el factor de escala n , reduciendo coste y eliminando problemas de convergencia.

12.4 Discretización gráfica

Las curvas visuales se dibujan mediante segmentos finitos:

- envolvente de Von Mises: 72 segmentos;
- curva de Gerber: 40 segmentos;
- curva $K_I(a)$: 48 segmentos.

Estas discretizaciones afectan solo la representación gráfica; los factores de seguridad numéricos se calculan con las ecuaciones directas.

12.5 Clipping y autoescala

Las envolventes y puntos se transforman de coordenadas físicas a píxeles mediante una ventana calculada a partir de resistencias o resultados. Los puntos fuera del rango se recortan para que la pantalla siga siendo legible. En Mohr, la ventana puede modificarse mediante pan/zoom sin recalculer el estado mecánico.

12.6 Formato y layout adaptativo

La interfaz no estima el ancho del texto únicamente por número de caracteres. La función de layout mide el ancho real en píxeles usando el valor de retorno de TEXTOUT_P sobre un GROB auxiliar. Si una fila no cabe, el sistema puede abreviar etiquetas conocidas o reducir la fuente del valor. Para números extremadamente grandes o pequeños, el formato cambia a notación científica.

Esta decisión es importante en HP Prime porque el espacio horizontal es fijo y las traducciones multilingües pueden variar mucho de longitud.

13 Ejemplos de comprobación

13.1 Ejemplo 2D

Para

$$\sigma_x = 100 \text{ MPa}, \quad \sigma_y = 40 \text{ MPa}, \quad \tau_{xy} = 30 \text{ MPa},$$

se obtiene

$$\begin{aligned} \sigma_m &= 70 \text{ MPa}, & R &= 42.426 \text{ MPa}, \\ \sigma_1 &\approx 112.426 \text{ MPa}, & \sigma_2 &\approx 27.574 \text{ MPa}, \end{aligned}$$

y

$$\theta_p \approx 22.5^\circ.$$

El máximo cortante en el plano es aproximadamente 42.426 MPa.

13.2 Ejemplo 3D

Considérese, en MPa,

$$\sigma = \begin{bmatrix} 50 & 20 & 30 \\ 20 & 80 & 40 \\ 30 & 40 & 30 \end{bmatrix}.$$

Los principales son aproximadamente

$$\sigma_1 = 117.867, \quad \sigma_2 = 41.311, \quad \sigma_3 = 0.821 \text{ MPa}.$$

Entonces

$$\sigma_{VM} \approx 102.956 \text{ MPa}, \quad \tau_{max} \approx 58.523 \text{ MPa}.$$

Los invariantes asociados son

$$I_1 = 160 \text{ MPa}, \quad J_2 \approx 3533.33 \text{ MPa}^2, \quad J_3 \approx 40740.74 \text{ MPa}^3,$$

con

$$\eta \approx 0.5180, \quad \theta_L \approx 19.91^\circ, \quad \bar{L} \approx 0.3363.$$

13.3 Ejemplo de fatiga

Supóngase

$$\sigma_{max} = 180 \text{ MPa}, \quad \sigma_{min} = 20 \text{ MPa}, \quad S_e = 200 \text{ MPa}, \quad S_{ut} = 400 \text{ MPa}, \quad S_y = 250 \text{ MPa},$$

con $K_t = 1.5$ y $q = 0.8$. Entonces

$$\sigma_m = 100 \text{ MPa}, \quad \sigma_a = 80 \text{ MPa}, \quad K_f = 1.4.$$

La aplicación usa

$$\sigma_a^* = 112 \text{ MPa}, \quad \sigma_m^* = 150 \text{ MPa}.$$

Los factores resultan aproximadamente

$$FS_G = 1.070, \quad FS_S = 0.862, \quad FS_{Gerber} = 1.337,$$

y el chequeo de fluencia del ciclo produce $FS_y \approx 0.926$.

13.4 Ejemplo de fractura

Para

$$\sigma = 120 \text{ MPa}, \quad a = 2 \text{ mm}, \quad Y = 1.12, \quad K_{IC} = 50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}},$$

se obtiene

$$K_I \approx 10.65 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}, \quad FS_K \approx 4.69,$$

y

$$a_{crit} \approx 44.1 \text{ mm}.$$

14 Interpretación de resultados y buenas prácticas

1. **Verifique primero el tensor.** Un error de signo o de unidad se propaga a todas las ramas posteriores.
2. **Use el material correcto.** Los criterios dependen de S_y , S_{ut} y S_{uc} ; si faltan propiedades, algunas ramas quedan deliberadamente no disponibles.
3. **No mezcle criterios sin contexto.** Von Mises/Tresca son apropiados para materiales dúctiles isotrópicos bajo supuestos clásicos; Rankine/Coulomb-Mohr/Mohr modificado se orientan a comportamiento frágil idealizado.
4. **En fatiga, revise la procedencia de S_e .** El modo Marin es una estimación ingenieril; un dato experimental específico puede ser preferible.
5. **En fractura, cuide Y y K_{IC} .** Son los parámetros más sensibles a geometría, espécimen y condiciones reales.
6. **Use la página Resumen como índice, no como sustituto del detalle.** Cuando un factor es crítico, revise la página correspondiente y los supuestos de ese criterio.

15 Limitaciones científicas y de modelado

Alcance y limitación

- Elasticidad lineal en el análisis tensorial; no se modela plasticidad incremental ni endurecimiento.
- Material idealmente homogéneo e isotrópico para los criterios clásicos implementados.
- No se calculan tensiones a partir de cargas, geometría de vigas, placas, ejes o

sólidos; el tensor es entrada del usuario.

- No hay análisis transitorio, térmico-acoplado, creep, viscoelasticidad ni dinámica.
- Fatiga: no incluye espectros variables, Miner, rainflow, curvas S-N completas ni fatiga multiaxial avanzada.
- Fractura: LEFM modo I; no incluye K_{II} , K_{III} , J -integral, CTOD ni crecimiento de grieta.
- Los materiales incorporados no sustituyen certificados ni bases normativas.
- Las envolventes gráficas son ayudas de interpretación; el valor numérico de cada criterio es la referencia de cálculo de la App.

16 Optimización y consideraciones de implementación HP Prime

La rama de producción fue optimizada con el objetivo de reducir almacenamiento y coste de ejecución sin cambiar las ecuaciones. Entre las medidas aplicadas se encuentran:

- eliminación del módulo de pruebas del runtime y rutas diagnósticas no destinadas al usuario final;
- eliminación de funciones muertas, comentarios de desarrollo y escrituras persistentes redundantes;
- inicialización única del GROB auxiliar usado para medir texto, evitando redimensionarlo repetidamente durante el render;
- medición real del ancho de texto para distribuir etiquetas y valores sin depender de estimaciones por número de caracteres;
- caché de datos de material, fatiga y fractura durante la navegación, reduciendo lecturas repetidas de AVars;
- conservación de la sintaxis PPL interna para evitar errores introducidos por minimización textual excesiva;
- eliminación del autotest y de utilidades diagnósticas en la build distribuable, manteniendo una rama de desarrollo como referencia;
- localización autocontenida: las tablas de los ocho idiomas se encuentran embebidas en PPL y se seleccionan mediante Language, priorizando fiabilidad sobre una reducción extrema de tamaño.

La optimización se realizó en varias pasadas. La v2.0.0 de integración tenía un hpappprgm de aproximadamente 191128 bytes; una rama recortada anterior a la localización completa llegó a alrededor de 147802 bytes. La localización robusta de ocho idiomas de la Release RC4 aumenta de nuevo el tamaño del core, porque incorpora ocho catálogos completos dentro del programa. Este crecimiento es intencional: después de probar esquemas externos más ligeros, la solución embebida resultó la más estable en la HP Prime real.

En consecuencia, la Release no persigue el mínimo número de kilobytes posible, sino un equilibrio entre **tamaño, velocidad, mantenibilidad y robustez**. El tamaño mostrado

por la calculadora puede diferir del tamaño del hpappprgm por el contenedor, icono, nota y metadatos de la App.

17 Validación durante el desarrollo

El proyecto se validó de forma incremental. Se construyeron suites automáticas conforme crecían las capacidades: 38 pruebas en la etapa de fatiga/concentradores, 45 al incorporar fractura y 53 al incorporar invariantes; estas tres etapas fueron verificadas en ejecución con 38/38, 45/45 y 53/53 respectivamente. Durante la integración v2.0 la suite se amplió hasta 60 comprobaciones orientadas también a integración. La rama final de producción eliminó la suite del runtime para reducir peso.

La eliminación de los tests de la App distribuable no implica que las ecuaciones hayan sido reemplazadas; el objetivo fue separar una *golden build* de desarrollo de una build final más ligera. Para cambios futuros, la práctica recomendada es reactivar una rama de validación antes de modificar el motor matemático.

Consideración de ingeniería

Después de cualquier actualización de firmware de HP Prime, cambio profundo de arquitectura o modificación de criterios, debe repetirse una batería de regresión numérica antes de distribuir una nueva versión.

18 Guía rápida de trabajo

1. Abra MechStress desde la Biblioteca de Apps.
2. Pulse **SYMB** y seleccione 2D/3D, unidades y componentes del tensor.
3. Pulse **NUM** para revisar esfuerzos principales.
4. Desde **MENU**, seleccione material y complete resistencias si es necesario.
5. Revise falla dúctil/frágil según el material.
6. Si el problema es cíclico, configure Fatiga: ciclo, S_e /Marin y concentradores.
7. Si existe una grieta conocida, configure Fractura: fuente de tensión, a , K_{IC} y Y .
8. Consulte Invariantes para caracterizar el estado hidrostático/desviador.
9. Use Resumen global para identificar qué rama merece una inspección más detallada.
10. Use **PLOT** para revisar Mohr y las envolventes gráficas.
11. Desde el menú personalizado, **ESC** vuelve directamente a Home.

19 Glosario de símbolos

Símbolo	Significado
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Esfuerzos normales cartesianos.
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	Esfuerzos cortantes.
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales ordenados de mayor a menor.

Símbolo	Significado
σ_{VM}	Tensión equivalente de Von Mises.
τ_{max}	Cortante máximo absoluto.
S_y	Límite de fluencia.
S_{ut}	Resistencia última a tracción.
S_{uc}	Resistencia última a compresión.
S_e	Límite de resistencia a fatiga corregido.
K_t	Factor teórico de concentración de esfuerzos.
q	Sensibilidad de entalla.
K_f	Factor efectivo de concentración en fatiga.
K_I	Factor de intensidad de esfuerzos modo I.
K_{IC}	Tenacidad a la fractura modo I en deformación plana, cuando el dato suministrado corresponde a esa condición.
Y	Factor geométrico de fractura.
a	Longitud característica de grieta.
I_1	Primer invariante del tensor de esfuerzos.
J_2, J_3	Segundo y tercer invariantes del tensor desviador.
η	Triaxialidad de esfuerzos.
θ_L	Ángulo de Lode.
$\bar{L}$	Parámetro de Lode normalizado usado por la App.

20 Referencias técnicas recomendadas

Las ecuaciones implementadas corresponden a formulaciones clásicas de mecánica de materiales, diseño mecánico, fatiga y fractura. Para ampliar teoría y revisar rangos de aplicación se recomiendan:

Referencias

- [1] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.
- [2] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf y D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill.
- [3] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*. Pearson.
- [4] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. CRC Press.
- [5] S. P. Timoshenko y J. N. Goodier, *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill.

Nota final

MechStress fue concebida como una herramienta de ingeniería portátil: no intenta reemplazar un solver de elementos finitos ni una norma de diseño, sino reunir en la calculadora una cadena coherente de análisis desde el tensor de esfuerzos hasta varios mecanismos de falla. Su valor práctico depende tanto de la calidad de los datos introducidos como de la correcta selección del modelo físico.

MechStress v2.1.0 Release

Proyecto concebido, dirigido y validado por **Carlos Valdés**.

Fin del documento - MechStress