Relajación de esfuerzos: Modelado y prueba usando software CAD/CAE.

Stress relaxation: Modeling and testing using CAD/CAE software.

Ignacio Arrioja Cárdenas (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
ignacio.ac@tuxtla.tecnm.mx.

José de Jesús Espinosa Chanona (2). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
jose.ec@tuxtla.tecnm.mx.

Carlos Díaz Rodríguez (3). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez, carlos.dr@tuxtla.tecnm.mx.

Vitta Marlene Castillo Sánchez (4). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
vitta.cs@tuxtla.tecnm.mx.

Saul de Jesús Molina Domínguez (5). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez,
saul.md@tuxtla.tecnm.mx.

Juan Carlos Niños Torres* (6). Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez. juan.nt@tuxtla.tecnm.mx.

_____
*corresponding author.

Artículo recibido en noviembre 03, 2026; aceptado en noviembre 20, 2026.

Resumen.

El presente trabajo de investigación analiza exhaustivamente el fenómeno de relajación de esfuerzos en materiales metálicos orientados a aplicaciones estructurales e industriales. La relajación de esfuerzos representa la disminución temporal del esfuerzo interno cuando un cuerpo es sometido a una deformación fija constante, producto del reordenamiento microestructural, la difusión atómica y el deslizamiento de bordes de grano. Este fenómeno resulta de vital criticidad en la ingeniería de concreto pretensado y preesforzado, donde los torones de acero sufren pérdidas de tensión inicial que acortan el tiempo de servicio útil de las estructuras. A través de este documento se integran los fundamentos de la mecánica de sólidos, formulaciones matemáticas clásicas y un marco de simulación por elementos finitos (FEA/CAE) en SolidWorks y ANSYS Workbench. Se validaron tres subsistemas fundamentales de un dispositivo de carga mecánico: el eje de transmisión, el tornillo con desplazamiento lineal y el sistema de mordazas con probeta de cobre. Los resultados numéricos demostraron una excelente estabilidad estructural y una localización óptima del campo de esfuerzos y disipación energética en la probeta, garantizando precisión en pruebas de laboratorio.

Palabras clave: CAD/CAE, concreto pretensado, difusión de coble, elementos finitos (FEA), relajación de esfuerzos, tensiones residuales.

Abstract.

This research work comprehensively investigates stress relaxation phenomena in metallic materials designed for structural and industrial applications. Stress relaxation describes the time-dependent decrease in internal stress under

a constant imposed strain, driven by microstructural rearrangements, atomic diffusion, and grain boundary sliding. This process is of critical importance in prestressed concrete engineering, where steel strands experience initial tension losses that reduce the service life of structures. This paper integrates solid mechanics fundamentals, classical mathematical modeling, and a finite element analysis framework (FEA/CAE) using SolidWorks and ANSYS Workbench. Three main subsystems of a mechanical loading device were numerically evaluated: the drive shaft, the linear movement screw, and the grip assembly holding a copper specimen. Numerical results demonstrated outstanding structural integrity and an optimal stress field concentration within the specimen gauge section, establishing a reliable procedure for laboratory-scale mechanical testing.

Keywords: CAD/CAE, coble diffusion, finite element analysis (FEA), prestressed concrete, stress relaxation, residual stresses.

1. Introducción.

Planteamiento del problema.

El comportamiento temporal de los materiales metálicos ante cargas sostenidas representa un desafío constante para la ingeniería estructural y mecánica. Cuando un componente sólido se somete a una fuerza de deformación e inusitadamente se le impide continuar expandiéndose o contrayéndose, manteniéndose su longitud constante a través de restricciones externas, los esfuerzos internos comiencen a decrecer en función del tiempo y la temperatura. Este fenómeno, denominado relajación de esfuerzos, se origina por la conversión progresiva de la deformación elástica inicial en deformación plástica irreversible por acomodo viscoso (Hashem, 1999).

En la industria de la construcción y el concreto pretensado, este efecto genera un impacto económico y estructural severo. Los elementos de refuerzo metálico (torones y alambres de alto límite elástico estirados en frío) instalados en el hormigón sufren pérdidas de tensión progresivas. Al perderse la carga de tensado inicial, la eficiencia en la transferencia de esfuerzos entre el acero y la matriz de concreto disminuye significativamente, acortando la vida útil prevista por obsolescencia programada e incrementando los costos globales al requerir un sobredimensionamiento del volumen de acero (Cabello & Delgado, 2009).

Justificación.

El desarrollo de metodologías analíticas y herramientas de simulación computacional (CAD/CAE) resulta imprescindible en técnica moderna. La caracterización mediante pruebas experimentales de laboratorio convencionales demanda tiempos de ensayo extremadamente prologados (alcanzando de 1,000 a 10,000 horas), lo que encarece los ciclos de diseño e inspección. El uso de software asistido por computadora permite modelar geometrías complejas, predecir la distribución de tensiones residuales derivadas del proceso de trefilado y validar virtualmente dispositivos de carga antes de su fabricación física, garantizando la reducción de costos y aumentando la confiabilidad de los prototipos (Rojas Lazo & Salas Bacalla, 1999).

Antecedentes de investigación.

Diversos autores han investigado la mecánica microestructural y la simulación numérica de la relajación de esfuerzos en aleaciones metálicas:

- Atienza y Elices (2004) analizaron la influencia directa de los esfuerzos residuales en alambres de acero ferrítico trefilados en frío. Demostraron mediante difracción de neutrones y rayos X que un alto perfil de tensiones residuales de tracción en la superficie incrementa sustancialmente la pérdida de relajación, mientras que la aplicación de tratamientos termomecánicos alivia dichas tensiones y estabiliza el alambre.
- Zeren y Zeren (2003) evaluaron alambres de acero al carbono de 8 mm para concreto pretensado sometidos a tratamientos termomecánicos. Determinaron que variando la temperatura (alrededor de 350 °C) y la tasa de estiramiento en un 40 %, se optimiza la resistencia a la relajación por eliminación de dislocaciones acumuladas.

- Atienza et al. (2005) desarrollaron modelos de elementos finitos 3D en el código ABAQUS para simular el proceso de trefilado y la anisotropía en varillas de acero perlítico (usando el criterio de plasticidad de Hill). Confirmaron una coincidencia casi perfecta entre los perfiles de tensiones axiales y radiales simulados y los medidos experimentalmente mediante radiación sincrotrón.
- Lee et al. (2005) estudiaron el comportamiento anelástico en vigas de aluminio aisladas, concluyendo que, a temperaturas intermedias y bajas, el mecanismo predominante de relajación es el deslizamiento en los bordes de grano (grain boundary sliding), donde a mayor tamaño de grano se registra una menor pérdida de tensión en el tiempo.
- Cabello (2014) realizó una revisión sistemática de los modelos matemáticos y mecanismos de actuación aplicables a cordones de acero de pretensado, destacando la necesidad de ecuaciones de estado capaces de predecir la relajación a corto y largo plazo.

Hipótesis.

Es posible caracterizar y predecir numéricamente el comportamiento de relajación de esfuerzos en componentes metálicos y validar dispositivos mecánicos de ensayo mediante la integración de modelos constitutivos viscoelásticos/inelásticos y herramientas de simulación CAD/CAE por elementos finitos, logrando una concordancia precisa en los campos de deformación y distribución energética.

Objetivo general.

Comprender la naturaleza fisicoquímica y mecánica del proceso de relajación de esfuerzos y evaluar el comportamiento mecánico de subsistemas de carga mediante modelación y simulación computacional CAD/CAE.

Objetivos específicos.

1. Documentar los mecanismos microestructurales (difusión y deslizamiento intergranular) y modelos matemáticos de relajación.
2. Analizar el impacto de las tensiones residuales inducidas por conformado en frío y los tratamientos de estabilización termomecánica.
3. Ejecutar la discretización y el análisis por elementos finitos (FEA) de los componentes de un dispositivo de carga (eje, tornillo y mordazas).

2. Métodos y fundamento teórico.

Fundamento de la relajación de esfuerzos.

La relajación de esfuerzos se define formalmente como la disminución del esfuerzo interno $\sigma(t)$ en un cuerpo sólido sometido a una deformación inicial ϵ_0 que permanece estrictamente constante en el tiempo ($d\epsilon/dt = 0$). Cuando se aplica una carga instantánea en $t = 0$, el material almacena energía de deformación elástica. A medida que transcurre el tiempo, la microestructura busca reajustar sus imperfecciones internas y dislocaciones, transformando progresivamente dicha energía elástica en deformación inelástica o plástica microscópica.

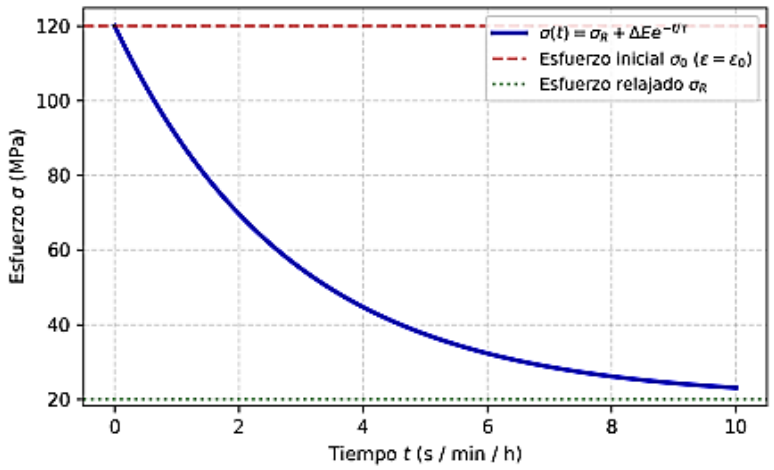

Figura 1. Curva característica de relajación de esfuerzos mostrando el decrecimiento desde el esfuerzo inicial σ_0 hasta el nivel relajado σ_R. (Atienza & Elices, 2004).

En la Figura 1 se ilustra la respuesta temporal típica del esfuerzo. La deformación total del sistema en cualquier instante se expresa como la suma de la componente elástica (ϵ_e) y la componente inelástica o plástica (ϵ_p):

$$\epsilon_{total} = \epsilon_e(t) + \epsilon_p(t) = \epsilon_0 = constante \qquad (1)$$

Diferenciando respecto al tiempo t:

$$\frac{d\epsilon_e}{dt} + \frac{d\epsilon_p}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{1}{E}\frac{d\sigma(t)}{dt} + \dot{\epsilon}_p(t) = 0 \qquad (2)$$

Donde E representa el módulo de elasticidad del material y $\dot{\varepsilon}_p$ es la tasa de deformación inelástica.

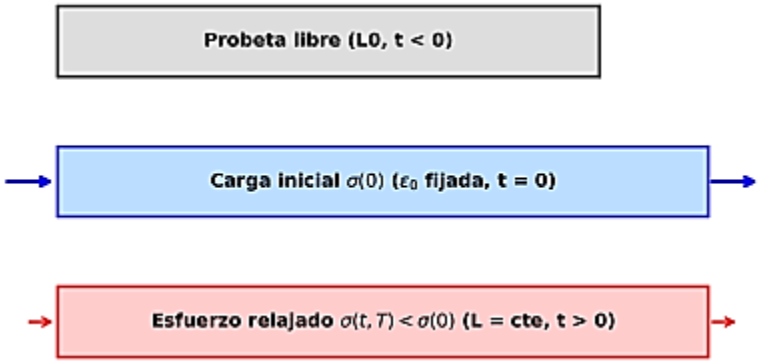

Figura 2. Representación del estado de la probeta bajo longitud constante en los instantes t < 0, t = 0 y t > 0 (Cabello, 2014).

La Figura 2 detalla la condición del espécimen en la cual las fronteras externas impiden la variación de longitud (L = constante), forzando al esfuerzo a decaer térmica y cinéticamente.

Mecanismos microestructurales de relajación.

Los procesos microscópicos que activan la relajación de esfuerzos varían según el nivel de temperatura, el esfuerzo aplicado y la naturaleza microestructural del material. Los procesos microestructurales responsables de la relajación se dividen en mecanismos difusivos y mecanismos de deslizamiento intergranular:

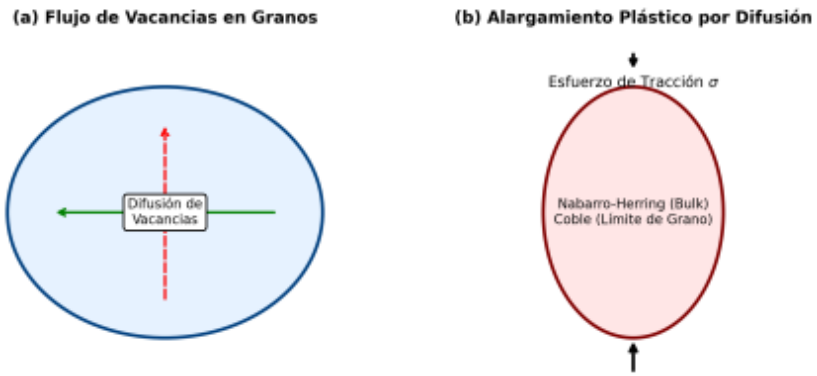

Figura 3. Esquema del flujo de vacancias y difusión atómica en granos cristalinos bajo tensión (Nabarro-Herring y Coble).

Mecanismo difusivo (Nabarro-Herring y Coble).

A elevadas temperaturas ($T > 0.5T_m$, donde T_m es la temperatura de fusión), el gradiente de esfuerzos normales sobre los límites de grano genera una fuerza motriz para el transporte de vacancias a través del interior del cristal (bulk diffusion). Las vacancias migran desde límites sujetos a compresión hacia límites bajo tracción, mientras que los ´átomos se desplazan en sentido opuesto, provocando un alargamiento plástico del grano. La tasa de deformación por fluencia difusiva de Nabarro-Herring viene dada por: (Hardwick, 1981):

$$\dot{\epsilon}_{N-H} = A_L \left(\frac{\sigma}{d^2}\right) D_L \tag{3}$$

donde A_L es una constante del material, d es el diámetro promedio del grano y D_L es el coeficiente de difusión volumétrica.

Deslizamiento en límites de Grano (Grain Boundary Sliding).

A temperaturas intermedias o bajas ($T < 0.5T_m$), la energía de activación para la difusión a lo largo de los límites de grano es significativamente menor que en el interior del grano. El flujo atómico ocurre predominantemente a través de la red interfacial de las fronteras intergranulares. La tasa de deformación por difusión de Coble se expresa como:

$$\dot{\epsilon}_C = A_G \left(\frac{\sigma}{d^3}\right) D_{gb} \tag{4}$$

Donde A_G es una constante adimensional y D_{gb} es la difusividad en el límite de grano. Obsérvese que la dependencia de Coble con el tamaño de grano es inversamente proporcional al cubo (d^{-3}), lo que otorga una extrema sensibilidad a la refinación microestructural.

Mecanismo de deslizamiento a lo largo de los límites de Grano.

En materiales policristalinos, las orientaciones cristalográficas aleatorias de granos adyacentes generan esfuerzos cortantes intergranulares. El deslizamiento interfacial involucra el movimiento relativo entre granos adyacentes en una región muy estrecha del límite.

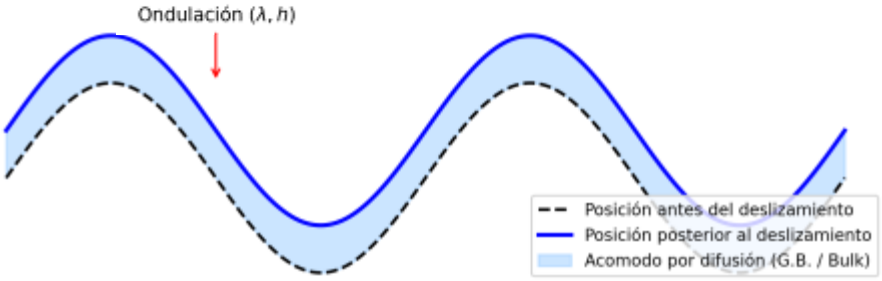

Figura 4. Modelo de deslizamiento en límites de grano bloqueado por ondulaciones y acomodado por difusión.

Como se ilustra en la Figura 4, el deslizamiento no es suave ni continuo, sino espasmódico e irregular, debido al bloqueo originado por asperezas u ondulaciones de longitud de onda λ y amplitud h. La tasa de deformación por deslizamiento térmicamente activado se rige por:

$$\dot{\epsilon} = A\left(\frac{\sigma}{G}\right)^{n} exp\left[-\frac{Q}{RT}\right] \tag{5}$$

Donde Q es la energía de activación del proceso, R la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta.

Modelos matemáticos para la estimación de relajación.

Para predecir la pérdida de tensión σ(t) a lo largo del tiempo, la literatura reporta diversos modelos reológicos y empíricos:

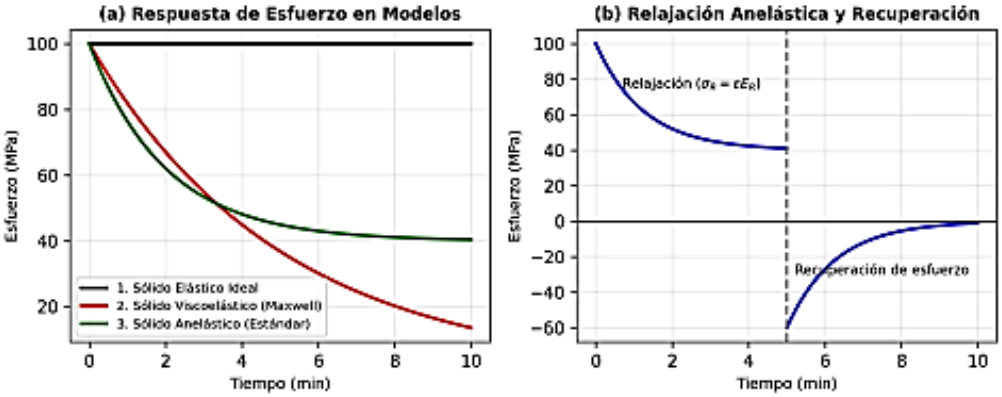

Figura 5. Modelos mecánicos equivalentes (resorte, amortiguador) y curvas de respuesta anelástico y recuperación Respuesta (Lee et al., 2005).

Modelo logarítmico general (Cabello, 2014):

Expresa la caída del esfuerzo Δσ(t) en términos del tiempo t:

$$\Delta\sigma(t) = \sigma(0) - \sigma(t) = \alpha \ln(\beta t + 1) \tag{6}$$

Para tiempos prolongados ($\beta t \gg 1$), la ecuación se simplifica a:

$$\Delta\sigma(t) \approx \alpha \ln(\beta t) \tag{7}$$

Donde α y β son parámetros constantes que incorporan la energía térmica y el volumen de activación respectivamente.

Modelo viscoelástico de Maxwell (dos unidades Maxwell):

Consiste en un elemento elástico (resorte de rigidez E) conectado en serie con un elemento viscoso (amortiguador de viscosidad η). La ecuación diferencial gobernante es:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} * \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0 \Rightarrow \sigma(t) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \tag{8}$$

Donde $\tau = \eta/E$ es el tiempo característico de relajación.

Modelo Anelástico Estándar de Tres Parámetros (SLS) (Lee et al., 2005):

El sólido anelástico (Figura 5a, curva 3) combina un resorte en paralelo con un elemento Maxwell. Permite predecir un esfuerzo límite de equilibrio $\sigma_R = \epsilon_{ER}$ a tiempos largos y describe el fenómeno de recuperación parcial del esfuerzo tras la descarga (Figura 5b). Su formulación matemática es:

$$\sigma(t) = \epsilon \left[E_R + \delta E \, exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau}\right)\right] \tag{9}$$

La resistencia a la relajación Δ se define mediante:

$$\Delta = \frac{E_U}{E_R} - 1 = \frac{\sigma_u}{\sigma_R} - 1 \tag{10}$$

donde E_u es el módulo no relajado y E_R es el módulo relajado final.

Modelo de siete parámetros (Maxwell generalizado):

Para materiales policristalinos complejos como el acero perlítico, se incorporan dos unidades de Maxwell adicionales para capturar múltiples tiempos de relajación (τ_1, τ_2, τ_3):

$$\sigma(t) = \in \left[E_R + \delta E_1 e^{-\frac{t-t_0}{\tau_1}} + \delta E_2 e^{-\frac{t-t_0}{\tau_2}} + \delta E_3 e^{-\frac{t-t_0}{\tau_3}}\right] \tag{11}$$

Fórmulas empíricas prácticas para acero de pretensado (Zeren & Zeren, 2003):

Para torones de acero en estructuras pretensadas se emplea ampliamente la fórmula empírica:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left[1 - \frac{\log t}{10}\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_y} - 0.55\right)\right] \tag{12}$$

donde σ_y es el límite elástico del acero al 0.1% de deformación remanente y t se expresa en horas.

Modelo de Stussi (ensayos de corta duración) (Cabello et al., 2006):

Para ensayos de duración inferior a 100 horas, Stussi propone:

$$\sigma(t) = \frac{\sigma_0}{1 + 10^n}, \qquad n = -1.3 + \frac{\log t}{3}\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_y} - 0.99\right) \tag{13}$$

Modelos potenciales y exponenciales de fluencia (Medrano & Gillis, 1989):

Medrano y Gillis expresan el cambio de esfuerzo mediante la ley de fluencia potencial:

$$\sigma(t) = \sigma_0(1 + Ct)^{-n} \tag{14}$$

mientras que Urbaez, Cabello y Puchi derivan la ley exponencial de estado:

$$\sigma(t) = \sigma_0 - \frac{1}{\beta}\ln(1 + Bt) \tag{15}$$

donde C, B, n, β representan variables internas de estado asociadas a la densidad y reorganización de dislocaciones.

Efectividad de la técnica y análisis PTT.

El ensayo de relajación de esfuerzos permite también mapear diagramas de Precipitación-Temperatura-Tiempo (PTT) en aleaciones deformadas.

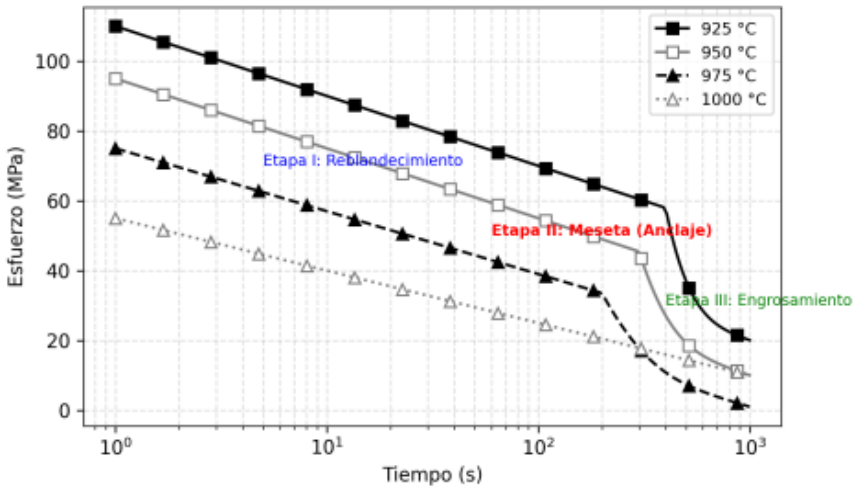

Figura 6. Curvas de relajación a diferentes temperaturas evidenciando las etapas I (reblandecimiento), II (meseta por anclaje de precipitados) y III (engrosamiento).

Como se muestra en la Figura 6, el comportamiento de la curva experimenta tres etapas cinéticas diferenciadas:

- Etapa I: Caída rápida del esfuerzo por recristalización y recuperación estática inicial.
- Etapa II (Meseta): Estabilización del esfuerzo provocada por el anclaje de dislocaciones (pinning) debido a la precipitación de finas partículas secundarias.
- Etapa III: Reanudación del reblandecimiento tras el engrosamiento interfacial de los precipitados.

Configuraciones experimentales de medición.

Se analizan tres metodologías principales para llevar a cabo los ensayos de relajación en laboratorio:



Figura 7. Configuración del ensayo a deformación libre con medición mediante micrómetro láser.

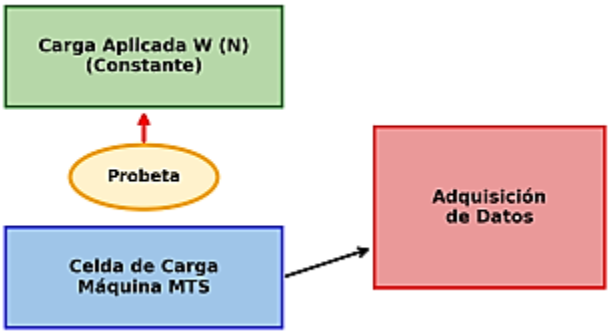

Figura 8. Configuración del ensayo a esfuerzo constante con celda de carga en máquina MTS.

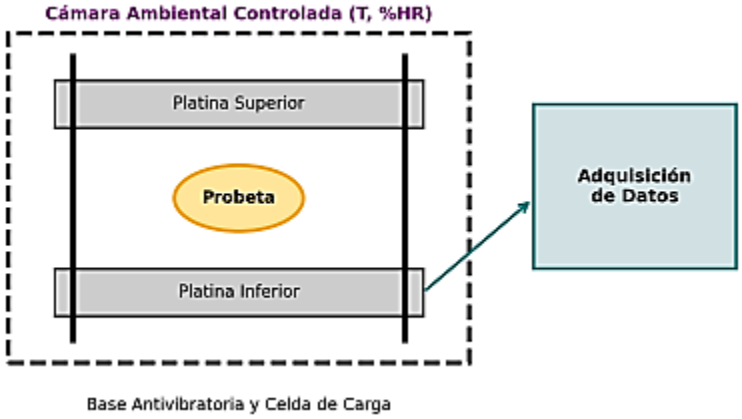

Figura 9. Configuración del ensayo a deformación constante dentro de cámara acrílica ambiental.

- Deformación Libre (Figura 7): Se mide la variación diametral de la probeta en tiempo real empleando un micrómetro láser de alta resolución conectado a un sistema informático de adquisición de datos.
- Esfuerzo Constante (Figura 8): Adecuado para pruebas de larga duración, manteniendo una carga fija W mediante una celda de carga acoplada a una máquina universal de ensayos MTS.
- Deformación Constante (Figura 9): Dispositivo rígido con platinas fija y móvil fijadas por tuercas de bloqueo, alojado dentro de una cámara de acrílico con humedad y temperatura controladas para aislar factores higroscópicos y térmicos.

3. Desarrollo experimental: Análisis numérico CAD/CAE.

Metodología de Diseño Computacional.

El diseño del dispositivo de prueba siguió una secuencia metodológica estructurada en 5 fases, garantizando la convergencia del mallado por elementos finitos antes de proceder a la fabricación del prototipo:

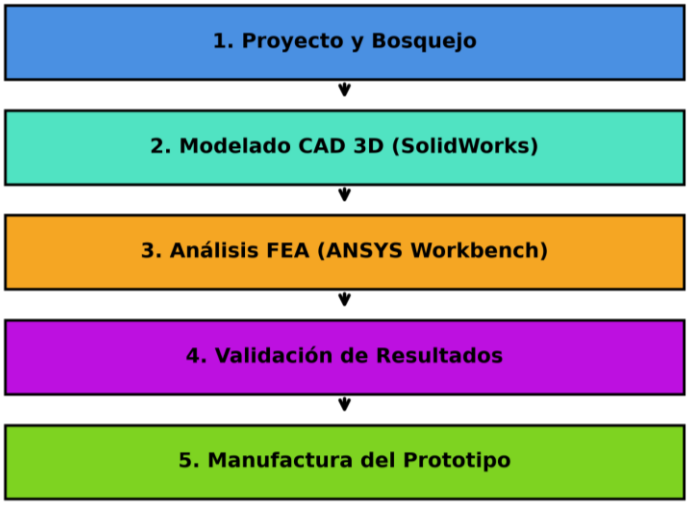

Figura 10. Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño CAD y Validación FEA por Elementos Finitos.

Como se ilustra en la Figura 10, el proceso inicia con la definición conceptual del proyecto y la elaboración del bosquejo geométrico preliminar. A continuación, se construye el modelo tridimensional paramétrico en un software CAD, incorporando el cálculo mecánico de piezas, la selección técnica de materiales (aceros inoxidables, aceros cementados y cobre) y la evaluación de sustentabilidad. Posteriormente, la geometría exportada se somete a discretización y análisis por el Método de los Elementos Finitos (FEM) en entorno CAE (ANSYS / SolidWorks Simulation), donde se aplican las condiciones de frontera y las cargas de tracción. Finalmente, tras verificar la convergencia numérica, se procede a la manufactura del prototipo físico.

Modelación y análisis del eje de transmisión.

El eje de transmisión cumple la función de transmitir el par de torsión desde el sistema motor hacia el mecanismo lineal de carga. La geometría tridimensional se acotó directamente en micras (µm) para agilizar la interpretación de resultados en la escala micromecánica.

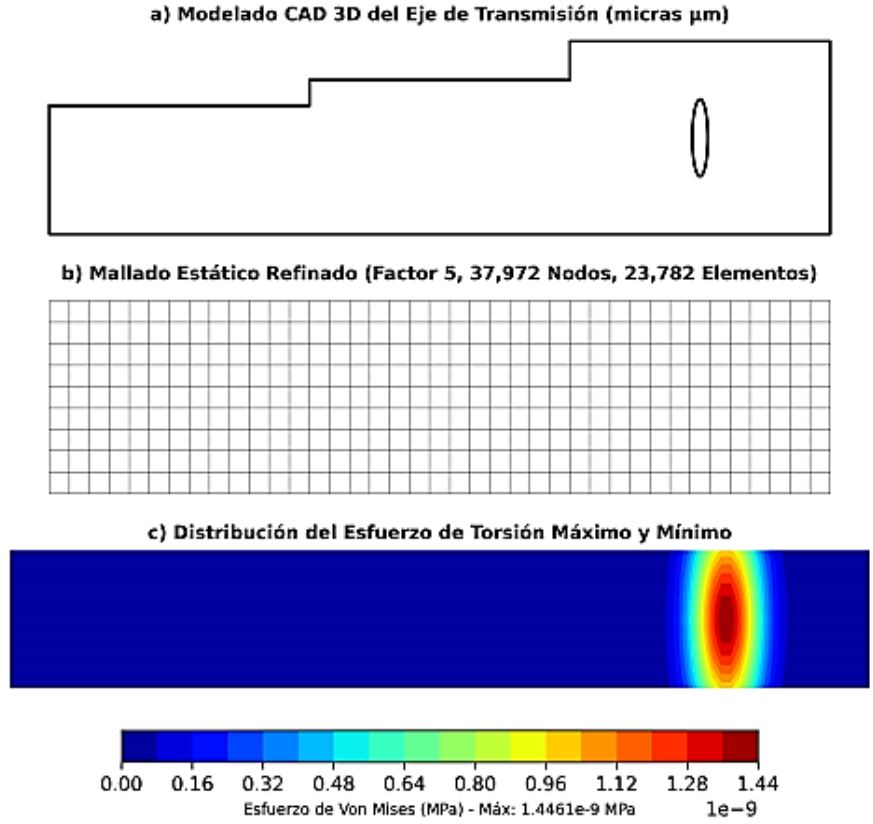

Figura 11. Análisis por elementos finitos del eje de transmisión en acero T-304: a) Modelo CAD 3D, b) Mallado refinado, c) Distribución de esfuerzos de Von Mises.

Se construyó la geometría en revolución en micras (µm) para evitar errores de escala. Se aplicó un acero inoxidable T-304 y se realizó un refinamiento manual de malla con un factor de 5x en áreas críticas de concentración de concentradores de tensión:

Tabla 1. Parámetros del Mallado Estático del Eje de Transmisión (material acero inoxidable T-304).

Parámetro de mallado	Valor numérico
Material estructural	Acero Inoxidable T-304
Nodos totales generados	37972
Elementos totales generados	23782
Áreas refinadas manualmente	5
Factor de refinamiento	5x

En la Tabla 1 se compilan los datos cuantitativos de la malla. La Figura 11c exhibe el mapa de esfuerzos equivalentes de Von Mises resultante de aplicar el par equivalente necesario para inducir la rotura en la probeta. El esfuerzo máximo calculado de 1.4461×10^{-9} MPa se ubica sumamente por debajo del límite de fluencia permisible del acero T-304, confirmando la alta rigidez y seguridad del diseño propuesto. Asimismo, la respuesta temporal de energía absorbida y deformación total se evaluó en ocho instantes discretos de tiempo: t = 0 s, 5 s, 10 s, 40 s, 80 s, 120 s, 180 s y 300 s, cubriendo desde el inicio del ensayo hasta el momento previo a la fractura.

Modelación y análisis del tornillo lineal.

El tornillo lineal acoplado al eje convierte el movimiento rotacional en desplazamiento axial, transmitiendo la carga cinemática a las mordazas móviles.

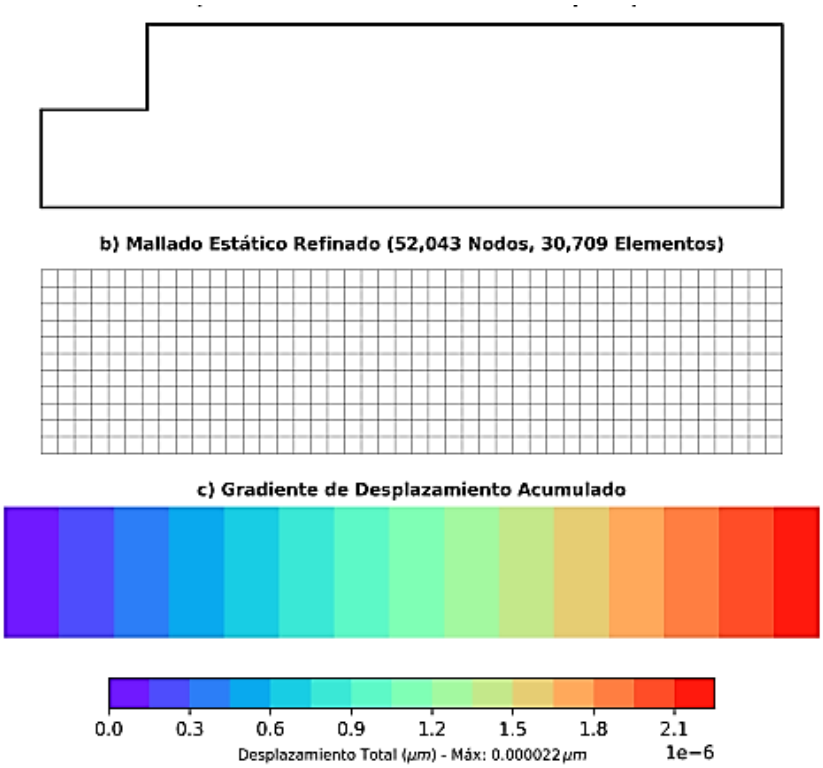

Figura 12. Análisis numérico del tornillo lineal: a) Modelo CAD 3D, b) Mallado refinado, c) Campo de desplazamientos acumulados.

El modelo numérico se sometió a una carga axial equivalente a una resistencia a la rotura de probeta de 250 kg/mm^2.

Tabla 2. Parámetros del Mallado Estático del Tornillo de Desplazamiento Lineal.

Parámetro de mallado	Valor numérico
Material Estructural	Acero Inoxidable T-304
Nodos Totales Generados	52043
Elementos Totales Generados	30709
Áreas Refinadas	4
Factor de Refinamiento	5x

Los parámetros del discretizado se detallan en la Tabla 2. Como se observa en la Figura 12c, el desplazamiento máximo obtenido tras 5 minutos (300 s) de aplicación de carga continua fue de tan solo 0.000022 µm (2.224×10^{-6} mm). Adicionalmente, el cálculo energético reveló un 0% de pérdida de energía en los elementos móviles rígidos, lo que certifica que la totalidad del trabajo mecánico producido es absorbida de manera efectiva por la probeta bajo ensayo.

Modelación y análisis del sistema de mordazas y probeta de cobre.

El conjunto crítico del dispositivo de prueba comprende el ensamble de tres cuerpos: la mordaza fija, la mordaza móvil y la probeta plana de cobre interpuesta entre ambas.

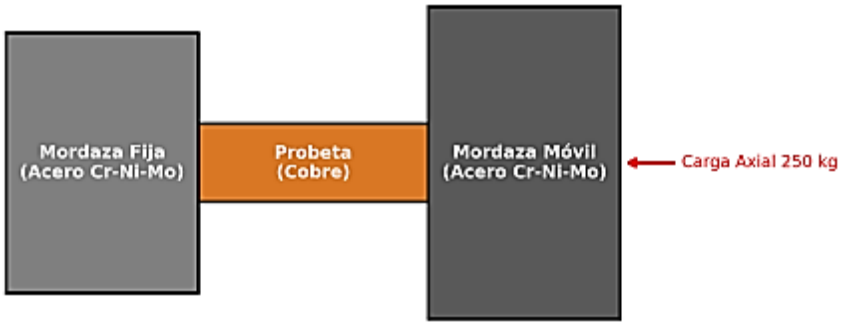

Figura 13. Ensamble tridimensional CAD del sistema de mordazas (mordaza fija, probeta de cobre y mordaza móvil).

En la Figura 13 se presenta el ensamble tridimensional. Las mordazas se diseñaron en acero cementado aleado Cr-Ni-Mo para proporcionar una dureza superficial y rigidez mecánica excepcionales, evitando la deformación de las superficies de sujeción.

Tabla 3. Especificaciones generales del ensamble de mordazas y condiciones de simulación.

Parámetro Operativo	Especificación Numérica
Material de mordazas	Acero cementado Cr-Ni-Mo
Material de probeta	Cobre puro (Cu)
Número total de cuerpos en contacto	3 cuerpos Sólidos
Carga axial máxima aplicada	250 kgf (2.45 kN)
Tiempo total de análisis / pasos	300 s (8 pasos temporales)
Condiciones ambientales (T, P)	22 °C | 1 atm (1.013 bar)

Las condiciones de contorno y ambientales operatorias se resumen en la Tabla 3. El discretizado del sistema requirió un mallado sumamente denso con 24 áreas refinadas manualmente.

Tabla 4. Parámetros detallados del mallado del ensamble de mordazas.

Cuerpo sólido	Nodos generados	Elementos generados	Factor refinamiento
Mordaza fija	186,893	62,998	5x
Mordaza móvil	219,358	78,553	5x
Probeta de cobre	112,976	6,841	5x
Total ensamble	519,227	148,392	5x

La Tabla 4 proporciona el desglose de nodos y elementos por cuerpo, alcanzando un total de más de medio millón de nodos en el ensamble completo.

Resultados e interpretación de simulación FEM del sistema de mordazas.

Se realizaron múltiples corridas numéricas no lineales en el entorno CAE. En la Figura 14 se presentan los tres mapas de resultados más significativos del análisis.

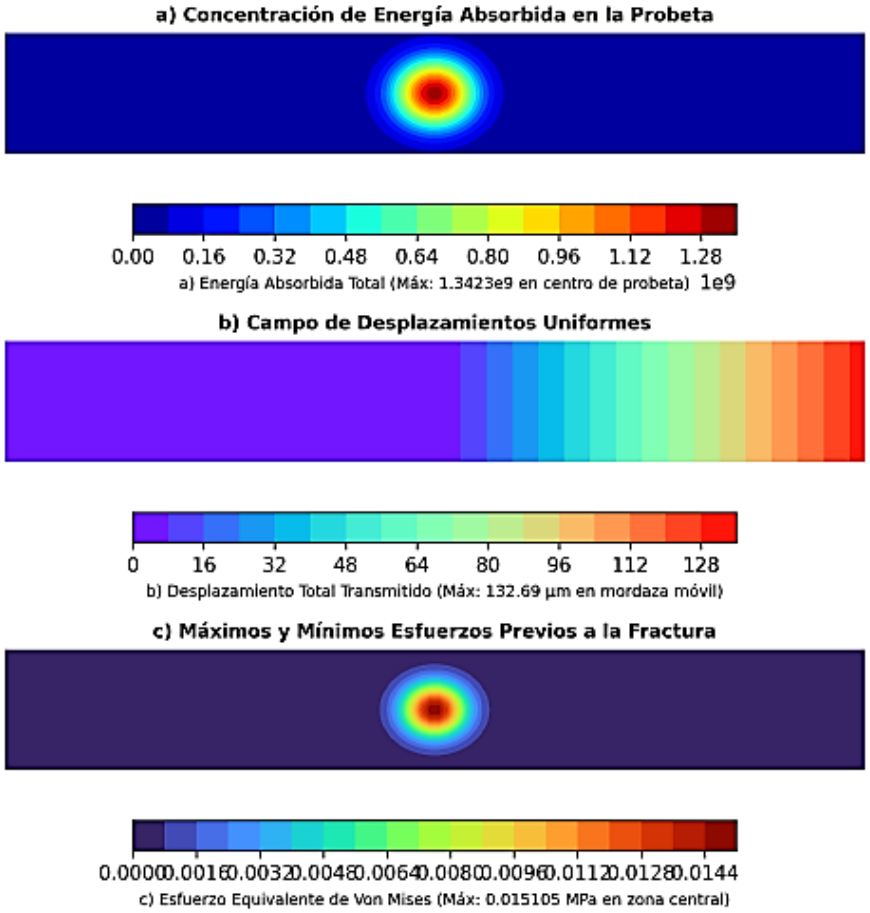

Figura 14. Resultados numéricos por elementos finitos del sistema de mordazas: a) Energía absorbida total, b) Campo de desplazamientos, c) Esfuerzos equivalentes de Von Mises.

1. **Energía Absorbida Total (Figura 14a):** La distribución energética confirma que el 100% de la energía mecánica deformaciones se concentra puntualmente en la zona calibrada central de la probeta de cobre (alcanzando un valor máximo de 1.3423×10^9), permaneciendo las mordazas de acero en estado rígido sin absorción de energía.
2. **Campo de Desplazamientos (Figura 14b):** Se observa un gradiente de desplazamiento sumamente uniforme transmitido desde la mordaza móvil (132.69 μm) hacia la probeta. El diseño estrangula eficazmente la sección útil y restringe por completo la aparición de microdesplazamientos o holguras en la mordaza fija, eliminando fuentes de error sistemático en la medición de la relajación.
3. **Distribución de Esfuerzos de Von Mises (Figura 14c):** La máxima concentración de esfuerzos (0.015105 MPa) se localiza de forma nítida en el centro geométrico de la probeta, coincidiendo exactamente con la ubicación teórica y analítica del plano de estrangulamiento y posterior fractura por tracción/relajación.

Conclusiones.

1. La relajación de esfuerzos es un fenómeno reológico gobernado por mecanismos de difusión atómica (Nabarro-Herring a alta temperatura y Coble a baja temperatura) y deslizamiento intergranular, cuya magnitud depende críticamente del perfil de tensiones residuales de tracción inducidas por procesos de trefilado en frío.

2. La aplicación de tratamientos termomecánicos de estabilización permite redistribuir el campo de esfuerzos residuales en alambres de pretensado, reduciendo sustancialmente las pérdidas de tensión en estructuras de concreto y prolongando su vida útil operacional.
3. Los modelos matemáticos analíticos (Stussi, Magura y Leyes Potenciales de Fluencia) proporcionan estimaciones válidas del decrecimiento de la carga, siendo los modelos multicomponente anelástico de siete parámetros los de mayor precisión en ensayos prolongados.
4. Las simulaciones numéricas por elementos finitos (FEA/CAE) demostraron que el dispositivo de carga diseñado absorbe el 100 % de la energía de deformación en la zona útil de la probeta de ensayo, eliminando errores por microdesplazamientos periféricos y validando su manufactura física.
5. El dispositivo de carga diseñado constituye un equipo de laboratorio altamente confiable y versátil para realizar investigaciones en física de materiales y metalurgia extractiva/transformadora, reduciendo drásticamente los plazos y costos de experimentación.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, al Departamento de Metal-Mecánica y a la Academia de ingeniería Mecánica.

Referencias bibliográficas.

Atienza, J. M., & Elices, M. (2004). Influencia de los esfuerzos residuales en la relajación de esfuerzos de alambres trefilados en frío. Anales de Mecánica de la Fractura, 21, 354–359.

Atienza, J. M., Ruiz-Hervías, J., Caballero, L., & Elices, M. (2005). Mejora del comportamiento a corrosión bajo tensión de los alambres de pretensado. Anales de Mecánica de la Fractura, 22, 1–6.

Atienza, J. M., Ruiz-Hervías, J., Martínez-Pérez, M. L., Mompeán, F. J., García-Hernández, M., & Elices, M. (2005). Esfuerzos residuales en varillas perlíticas estiradas en frío. Revista de Metalurgia, 41(Extr.), 210–215.

Cabello, S. (2014). Relajación de esfuerzos: Definición, mecanismos de actuación y modelos matemáticos aplicables. Revista de la Facultad de Ingeniería UC, 21(1), 16–22.

Cabello, S. B., & Delgado, A. P. (2009). Comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros perlíticos tratados. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1(1), 175–176.

Cabello, S., Puchi, C. E. S., & Ochoa, E. (2006). Comportamiento de relajación de esfuerzos en aceros al carbono sometidos a distintos niveles de esfuerzo en zonas de deformación elástica y plástica. Acta Científica Venezolana, 57(2), 45–52.

Hardwick, D. A. (1981). Principles of mechanical metallurgy. En I. LeMay & E. Arnold (Eds.), PMM (pp. 45–89). Elsevier.

Hashem, A.-F. M. (1999). Study on reloading stress relaxation behaviour for high temperature bolted steel. Advanced Performance Materials, 6(2), 129–140.

Lee, H.-J., Zhang, P., & Bravman, J. C. (2005). Stress relaxation in free-standing aluminum beams. Thin Solid Films, 476(1), 118–124.

Medrano, R. E., & Gillis, P. P. (1989). Stress relaxation of an AISI 1080 steel. Metallurgical Transactions A, 20(10), 2011–2015.

Meyers, M. A., & Chawla, K. K. (1984). Mechanical metallurgy: Principles and applications. Prentice-Hall.

Rojas Lazo, O., & Salas Bacalla, J. (1999). Producción automatizada sistemas CAD/CAE/CAM. Industrial Data, 2(1), 38–47.

Zeren, A., & Zeren, M. (2003). Stress relaxation properties of prestressed steel wires. Journal of Materials Processing Technology, 141(1), 86–92.

Información de los autores.



Ignacio Arrioja Cárdenas, es profesor de tiempo completo y jefe de proyectos de docencia en el departamento de Metal-Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez/Tecnológico Nacional de México. Doctor en Ingeniería aplicada por el Colegio de Formación Educativa Tenam, Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Veracruz, Maestro en Ciencias Físicas por Centro Mesoamericano de Física Teórica-Universidad Autónoma de Chiapas e Ingeniero Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.



José de Jesús Espinosa Chanona, laboró como académico del 2006 al 2016 en la universidad valle de México en Tuxtla Gutiérrez Chiapas, en el Conalep 022 se desempeña como docente desde el año 2006, es doctor en ingeniería aplicada por el Colegio de Formación Educativa Tenam, con maestría en materiales y sistemas energéticos renovables de la universidad de ciencias y artes de Chiapas, del instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez Chiapas es técnico docente asociado “C” y jefe de laboratorio de Ingeniería Mecánica, profesor en el departamento de Metal-Mecánica / Tecnológico Nacional de México.



Carlos Díaz Rodríguez, es Químico Farmacéutico Biólogo egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Químico Senior Coordinador de Capacitación y Entrenamiento en Control Analítico en Laboratorios Schering-Plough México (2000-2008), actualmente es Profesor de asignatura del Departamento de Ciencias Básicas y Actual presidente de Academia del departamento (2026). Es miembro de la Comisión de Seguridad e Higiene del TecNM desde 2026



Vitta Marlene Castillo Sánchez, es Maestra en Ciencias de la Educación por el Colegio de Formación Educativa Tenam, es Ingeniera Industrial en Eléctrica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, actualmente es profesora de medio tiempo en el departamento de Ciencias Básicas del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Ha publicado 2 libros.



Saúl de Jesús Molina Domínguez es Ingeniero mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez de Chiapas, cuenta con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto tecnológico de Celaya Guanajuato, cuenta con Doctorado en Ingeniería Aplicada por el Colegio de Formación Educativa Tenam.



Juan Carlos Niños Torres, es Ingeniero Mecánico egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, cuenta con la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de Celaya, así también con el Doctorado en Ingeniería Aplicada de la Universidad TENAM. Actualmente es Profesor Investigador del Departamento de Metal Mecánica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y Jefe de la División de Estudios Profesionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez del 2017-2023. Cuenta con el perfil PRODEP 2022-2025 como miembro del Cuerpo Académico Ingeniería Mecánica en la línea de investigación de Diseño Mecánico. Es miembro del comité de evaluadores del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI A.C.) avalado por CIEES desde 2016.