

Título del Proyecto de Investigación  
al que corresponde el Reporte Técnico:

**Metodología Probabilística Weibull de la Deformación de Vigas de  
Acero Estructural Simplemente Apoyadas, Sujetas a Fatiga**

Tipo de financiamiento

Sin financiamiento

Fecha de Inicio: 10/01/2019  
Fecha de Término: 15/12/2021

Tipo de Reporte

Parcial

Final

Autor (es) del reporte técnico:

Dr. Manuel Román Piña Monarrez  
Dr. Servio Tulio De La Cruz Chaidez

# Metodología Probabilística Weibull de la Deformación de Vigas de Acero Estructural Simplemente Apoyadas, Sujetas a Fatiga

## Resumen:

En la determinación y modelación de la vida de componentes estructurales, existe la necesidad de formular un modelo de estimación de vida que esté en función de los parámetros dinámicos que afectan la vida del elemento estructural. Siendo estos parámetros capaces de representar el esfuerzo aplicado y de medir el efecto que su aplicación cíclica tiene en la disminución de la resistencia del material. Así, las variables de entrada para formular el modelo son los esfuerzos aplicados y las características de resistencia inicial del material, y la variable de salida la cual representa la disminución de la resistencia inicial es la deformación. Así, basado en las relaciones entre estas variables, el modelo esfuerzo-resistencia-deformación desarrollado nos permite determinar la vida del elemento en cualquier instante del tiempo deseado. La determinación de la vida del elemento es posible a través del uso de la distribución Weibull de dos parámetros. La eficacia del modelo desarrollado fue evaluada de forma simulada a través de la aplicación de la metodología propuesta en un caso de aplicación en el análisis de una fibra óptica. Finalmente, es importante mencionar que debido a que los modelos desarrollados son dinámicos, su uso en diferentes campos de aplicación y áreas del conocimiento en un futuro próximo permitirá el desarrollo de modelos más robustos de medición de daño acumulado, fatiga mecánica, pronóstico de vida de elementos estructurales y determinación dinámica de su confiabilidad.

**Palabras Clave:** Elemento estructural, Fatiga, Estrés-deformación, Weibull análisis, Resistencia de materiales.

## Summary:

In determining and modeling the life of structural components there is a need to formulate a life estimation model that is function of the dynamic parameters that affect the life of the structural element. These parameters being capable of representing the applied stress and of measuring the effect that its cyclical application has on the reduction of the strength of the material. Thus, the input variables to formulate the model are the applied stresses and the initial strength of the material, and the output variable which represents the decrease in the initial material's strength is the deformation. Therefore, based on the relationships among these variables, the stress-strength-strain model developed allows us to determine the life of the element at any desired instant in time. The determination of the element's life is possible by using the two parameter Weibull distribution. The effectiveness of the developed model was evaluated in a simulated way through the application of the proposed methodology in a case of application in the analysis of an optical fiber. Finally, it is important to mention that because the models developed are dynamic, their use in different fields of application and areas of knowledge soon will allow the development of more robust models for the measurement of accumulated damage, mechanical fatigue, and prediction of the life of structural elements, as well as the dynamic determination of its reliability.

**Key Words:** Structural element, Fatigue, Stress-deformation, Weibull analysis, Strength of materials.

## **Usuarios potenciales (del proyecto de investigación)**

Ingenieros civiles, ingenieros mecánicos y diseñadores de estructuras. Docentes y estudiantes de las áreas de ingeniería, y en general el personal relacionado con los análisis estructurales y de confiabilidad.

## **1. Introducción**

El campo de determinación de vida y fallas de elementos estructurales es necesario la determinación de las variables que determinan las fallas, y de la variable que representa el deterioro de la funcionalidad del elemento. Así, en esta investigación las variables de entrada al análisis son directamente los esfuerzos que se le aplican al elemento y la propia resistencia inicial del material utilizado. De igual forma como variable representante del deterioro de la funcionalidad del elemento se utilizó la deformación resultante de la aplicación cíclica de los esfuerzos.

La determinación de los esfuerzos se realizó en base al campo de la mecánica de materiales [1–3]. Esto considerando a los esfuerzos a partir de límites de resistencia que establecen diversas teorías de fallas, como lo son las teorías de fallas de Soderberg, Goodman, ASME y Gerber [4, 5]. De igual forma, el análisis de la deformación se realizó tomando en cuenta la relación funcional de como los esfuerzos generados y la disminución de la resistencia, son afectados por la deformación. Este análisis inició desde 1665 cuando el Cient. Robert Hooke estableció la relación que existe entre estas variables, conocida hasta hoy día como la teoría de la elasticidad [6, 7]. Basado en estas relaciones esfuerzo deformación, en esta investigación se determina un esfuerzo equivalente a los esfuerzos inicialmente aplicados y a los esfuerzos generados en el instante de tiempo analizado. Luego este esfuerzo equivalente es usado para determinar la matriz de esfuerzo correspondiente, los parámetros de la distribución Weibull que representa a esos esfuerzos y la determinación de la vida del elemento. La eficacia del modelo esfuerzo-resistencia-deformación generado se validó de forma simulada y aplicada en el análisis de vida de una fibra óptica en una planta industrial de la región.

## **2. Planteamiento del Problema**

El problema en la determinación de la vida de una estructura de acero consiste en que las cargas a las que la estructura está sujeta son variables. De esa forma los esfuerzos que estas cargas variables generan son aleatorios por lo que deben de ser analizados de forma probabilística. Aunado a la naturaleza probabilística de los esfuerzos, es importante mencionar que debido a que éstos se generan internamente en la estructura, su análisis es complejo. En ese mismo sentido, debido a que los esfuerzos internos generados generan deflexión en la estructura, entonces el modo de falla es por fatiga. Así, basado en la teoría de fatiga, actualmente el análisis de estructuras se realiza basado en el diseño estático y dinámico de esfuerzos. Desafortunadamente en este análisis, la aleatorización presente en los esfuerzos no es modelada con una distribución de probabilidad, en su lugar factores de corrección de esfuerzos y un factor de seguridad es utilizado junto con una teoría de falla no probabilística para determinar si el elemento estructural es seguro o no.

Las teorías de fallas más comunes son la de Goodman y la Elíptica. Desafortunadamente debido a que estas teorías no toman en cuenta el comportamiento aleatorio al que los elementos estructurales están sujetos, entonces a través de su aplicación

no es posible determinar la vida del elemento. Así, el objetivo de este proyecto consiste en desarrollar una metodología probabilística para determinar la vida de un componente estructural sujeto a fatiga. La complejidad de la investigación consiste en que 1) debido a que todo elemento estructural está sujeto a cargas variables las cuales están modeladas por una distribución de probabilidad específica, entonces del ambiente específico al que el elemento estructural estará sujeto, es necesario determinar su distribución de probabilidad, aquí llamada distribución del estrés, 2) debido a que la resistencia del elemento para soportar el estrés aplicado es también aleatoria, entonces es necesario también determinar en base a las propiedades del material la distribución de probabilidad que modela la resistencia y 3) determinar la forma de combinar la distribución del estrés y la distribución de la resistencia para determinar la vida del elemento estructural.

De manera adicional, es importante notar que dado a que la vida del elemento está determinada por la relación estrés/número de ciclos, entonces bajo este enfoque probabilístico, la aplicación directa de la relación esfuerzo número de ciclos que la curva esfuerzo número de ciclos (S-N) del material proporciona, no es suficiente debido a que la curva S-N está determinada solo para el valor promedio (percentil 50). Así, en esta investigación es necesario desarrollar también una metodología basada en la resistencia del material para determinar el percentil deseado de la curva S-N. La base de la investigación se realiza sobre las metodologías de mecánica de materiales y esfuerzos para determinar la distribución del estrés y la distribución de la resistencia, y sobre la distribución Weibull para determinar la vida del elemento diseñado.

## 2.1 Marco Teórico

Esta sección está estructurada para presentar los conceptos y teorías relevantes que se utilizaron en el desarrollo y análisis del presente proyecto.

### Teoría de Deformaciones

El estudio del comportamiento de los materiales es un tema de investigación que se sigue desarrollando a diario en diferentes campos de la ciencia [8–14]. Tal es el caso de las metodologías *stress-strain*, metodologías de fractura de materiales, metodologías viscoelasticidad y metodologías de ciclaje de materiales: histéresis. Estas teorías acertadamente describen el comportamiento del material bajo ciertas condiciones. Pero existe un espacio de oportunidades de investigación en el estado del arte entre los modelos que determinan estas metodologías y la generación directa que sufre un elemento cuando se encuentra en operación.

Para describir este problema, tomemos la referencia de utilizar un esfuerzo que le equivale al momento en que el material llegue a los límites alcanzados descritos por modelos de límites de elasticidad en pruebas experimentales “*stress-strain*”. Este esfuerzo equivalente  $\sigma_{eq}$  también conocido como “*von Misses stress*” [1, 3, 9, 15], representa el límite de la superficie de ocurrencias que se espera que no alcance el esfuerzo generado, para que se cumplan las condiciones estático-elásticas. Entonces, de esta deducción podemos obtener que, un esfuerzo equivalente no es representado por el historial de ocurrencias de un comportamiento *stress-strain* de una prueba experimental. Esto nos lleva a analizar que, diferentes metodologías de esfuerzos cinemáticos y esfuerzos desviatorios nos ayudan a interpretar estos modelos de comportamiento de materiales. De aquí parte la

idea de J.L. Chaboche [16] quien acertadamente utilizó la interpretación del esfuerzo que le equivale al momento en que lo está analizando basado en la teoría desarrollada en su artículo “*On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations*”. Desafortunadamente parte del hecho de que el esfuerzo equivalente es de manera determinista representado por el esfuerzo “*von Misses stress*”. Debido a estas deducciones, las deformaciones obtenidas en un elemento diferencial de volumen contienen toda la información que cualquier estudio pudiera necesitar.

### **Teoría True Stress-True Strain**

La resistencia que un diferencial de volumen  $dv$  estresado de un elemento estructural soporta, está dada por 2 variables, la deformación axial y la deformación longitudinal. Por tanto, en el fenómeno de deformación de un material, si cambia la longitud, cambian los esfuerzos. Así, el valor que representa la deformación de la longitud está dado por *true stress*. Además, durante el fenómeno de deformación de un material, la suma de todas las elongaciones está dada por:

$$\varepsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dl}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

En donde  $\varepsilon_t$  representa *true strain*. Aquí, el *true stress* está dado por:

$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon_t) \quad (2)$$

En donde  $\sigma$  representa el esfuerzo en el fenómeno de *stress-strain*. También, *true stress*  $\sigma_t$  y *true strain*  $\varepsilon_t$  contienen el efecto que tienen la deformación axial y la deformación longitudinal sobre la deformación. Entonces, hasta este punto hemos analizado la teoría del comportamiento de materiales cuando se somete a una carga. Ahora, en el siguiente apartado analizaremos de manera físico-matemático como los esfuerzos pueden ser representados a través del comportamiento mecánico de los esfuerzos en relación con la deformación.

### **Teoría Elemental de Vigas en Flexión Basado en Deformación**

La necesidad de utilizar funciones para la determinación de la vida de un elemento estructural nos lleva a hacer un análisis de las deformaciones que sufre un elemento diferencial de volumen  $dv$ , con el objetivo de incluirlas a nuestro modelo de predicción final. En el proceso de deformación de un elemento diferencial de volumen, ocurre un proceso de elongaciones (*u-plano x*, *v-plano y*, *w-plano z*) en el plano *x-y-z* y ángulos de deformación  $\gamma_{ij}$  como se muestra en la siguiente figura [1, 2, 15]. Partiendo del hecho de deformaciones axialmente normales de un elemento estresado, se sabe que este sufre una elongación  $\Delta_x$  debido a una fuerza aplicada sobre un área determinada. De aquí que, un elemento axialmente cargado, sufre una elongación  $\Delta_x$ . Por lo que, el elemento diferencial de longitud de este elemento sufre un desplazamiento  $u + \Delta_u$ . Así, la elongación total puede ser considerada como:

$$\varepsilon_x = \lim_{\Delta_x \rightarrow 0} \frac{\Delta_u}{\Delta_x} = \frac{d_u}{d_x} \quad (3)$$

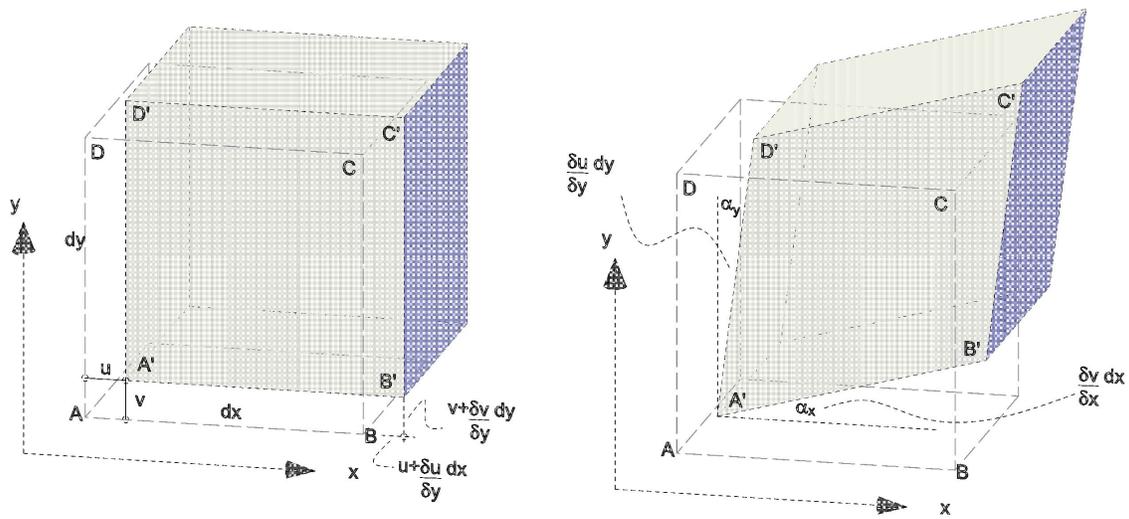


Figura 1 Plano  $xy$  de deformaciones de un diferencial de volumen  $dv$ .

### Modelos Reológicos

Un modelo reológico es una función que incluye el comportamiento de mecánica de materiales, comportamiento de resistencia y viscosidad de los materiales. Este modelo es utilizado para definir el comportamiento de la resistencia basado en deformación. Primero, entremos en el concepto general de cantidad de movimiento de una partícula, la cual es el producto de la masa del cuerpo y su velocidad en un instante determinado, esto obedece a la ley de conservación, en donde la cantidad de movimiento de todo el sistema cerrado no puede ser cambiado y permanece constante en el tiempo [8, 9, 17]. De esta manera:

$$F = mv \tag{4}$$

En donde  $F$  es la fuerza en un sistema,  $m$  es la masa de un cuerpo y  $v$  es la velocidad en un instante determinado. Por otro lado, fuerza  $F$  es una magnitud vectorial que mide la razón de cambio del momento lineal entre 2 partículas o sistemas de partículas [18]. En relación con el momento, podemos encontrar la segunda ley de Sir Isaac Newton:

$$F = ma \tag{5}$$

En donde  $a$  es aceleración. Así, en un sistema de fuerzas, el trabajo realizado es un efecto de la energía. Dicho en otras palabras, la energía es la capacidad de realizar un trabajo [14], [18, 19]. Entonces, la energía cinética se determina a partir de la sumatoria de todos los diferenciales de trabajo realizados en un sistema de fuerzas de un punto  $A$  a un punto  $B$ , esto puede ser determinado de la siguiente manera:

$$W = \int_A^B F dr \tag{6}$$

En donde  $r$  representa la distancia en este sistema de fuerzas. La solución a esta ecuación es:

$$U_k = \frac{1}{2}mv^2 \tag{7}$$

En donde  $U_k$  representa la energía cinemática. De igual manera, se le denomina energía potencial al resultado del trabajo de la igualdad entre un sistema de fuerzas que solo

depende de coordenadas. A manera de ejemplificar la energía en un sistema de fuerzas, los resortes pueden ser observados como un sistema elástico capaz de almacenar energía y desprenderse de ella sin sufrir deformación permanente cuando cesan las fuerzas o la tensión a las que están sometidos. La ecuación de energía almacenada en un sistema de fuerzas se muestra a continuación:

$$F = -kx \quad (8)$$

En donde  $k$  es una constante de deformación de longitud o volumétrica y  $x$  representa la distancia desplazada [14, 18, 19]. Es así que un modelo reológico de análisis de este fenómeno, también conocido como oscilador armónico simple (MAS), puede ser representado como se muestra en la siguiente figura.

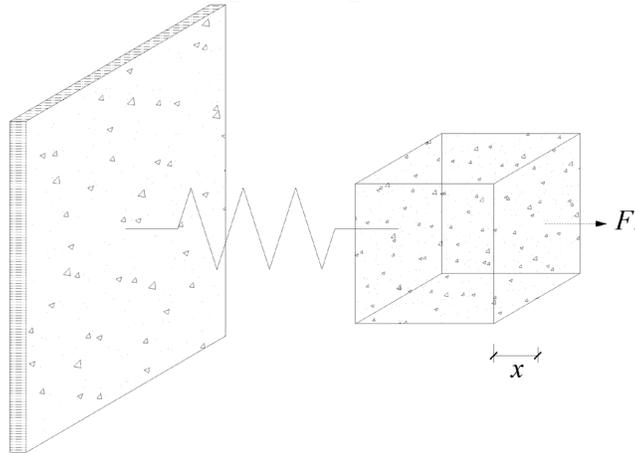


Figura 2 Caso de ampliación seleccionado para desarrollo de metodología propuesta.

Substituyendo las ecuaciones (5) y (8), obtenemos la ecuación diferencial MAS de este sistema, la cual se muestra la cual se muestra continuación:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (9)$$

En donde  $\ddot{x}$  representa la aceleración del sistema. La solución de la ecuación diferencial propuesta es mediante una transformación integral a ecuación algebraica, para posteriormente aplicar su inversa (transformada de Laplace). Además, debido a que se está buscando una función  $f(t)$  periódica con periodo  $p$ , esta existe cuando el número positivo de  $p$  cumple con  $f(t+p)$  para cada valor positivo de  $t$  [19]. Así, el planteamiento de la transformada de Laplace para la función (9) queda de la siguiente manera:

$$m\mathcal{L}[\ddot{x}] + m\mathcal{L}[x] = 0; \quad (10)$$

La solución  $x(s)$  es:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi); \quad (11)$$

En donde  $\omega$  es la frecuencia natural de este sistema armónico,  $\varphi$  es el ángulo de fase,  $t$  tiempo y  $A$  es la amplitud. De este planteamiento se tienen las herramientas metodológicas para construir un modelo de relación *stress-strain* a través del tiempo, el cual será descrito más adelante. Antes, permítanos presentar las características de energía que se presentan durante el fenómeno de deformación de un material.

### Desarrollo de la Teoría Euler-Bernoulli

El elemento de longitud  $L$ , se encuentra bajo una carga uniformemente distribuida  $W$ , en donde en su apoyo  $A$  está rígido y su extremo  $B$  se encuentra de manera libre. Aquí, analizamos un plano  $C-C'$  a una distancia  $x$  como función del tiempo  $t$  en este eje de coordenadas  $xy$ . El análisis de frecuencia a través del tiempo, como función podemos analizarla como  $\omega_m(x, t)$ . Ahora, analicemos un diferencial de este elemento sometido a cargas de la siguiente manera.

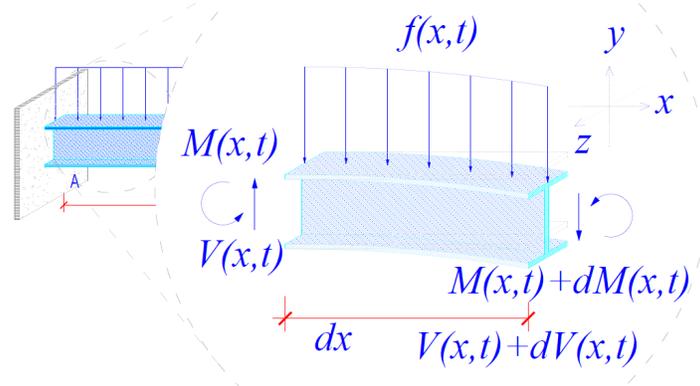


Figura 3 Relación cargas-tiempo  $f(x, t)$ .

Aquí, a partir de la segunda ley de Sir Isaac Newton  $\sum f = ma$  y cumpliendo con las metodologías estático elásticas en relación con el equilibrio en un sistema de fuerzas, el análisis se puede representar de la siguiente manera [8, 9, 20, 21]:

$$[\rho A(x) dx] \left[ \frac{\partial^2 \omega_m(x, t)}{\partial t^2} \right] = V - (V + dV) + f(x, t) dx \quad (12)$$

En donde la masa es  $\rho$  veces la sección transversal  $A$  de la longitud  $L$  que, a su vez, es  $dx$  veces la aceleración instantánea que representa la ecuación diferencial  $\frac{\partial \omega_m(x, t)}{\partial t^2}$ .

Tomando la ecuación diferencial parcial de la teoría de deformación  $dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx$  tenemos:

$$[\rho A(x) dx] \left[ \frac{\partial^2 \omega_m(x, t)}{\partial t^2} \right] = \left[ \frac{\partial V}{\partial x} dx \right] + f(x, t) dx \quad (13)$$

Analicemos el equilibrio de momentos de la siguiente manera:

$$[M + dM - M - (V + dV) dx] + \left[ f(x, t) dx \frac{dx}{2} \right] = 0 \quad (14)$$

Tomando la ecuación diferencial parcial de la teoría de deformación  $dM = \frac{\partial M}{\partial x} dx$ , tenemos:

$$\frac{\partial M}{\partial x} dx - V dx - \frac{\partial V}{\partial x} dx + f(x, t) \frac{dx}{2} = 0 \quad (15)$$

De esta ecuación se tiene que:

$$V = \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} dx \quad (16)$$

Substituyendo  $V$  en la ecuación (96) se tiene que:

$$[\rho A(x)] \left[ \frac{\partial^2 \omega_m(x, t)}{\partial t^2} \right] = \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} dx + f(x, t) dx \quad (17)$$

Debido a que  $M(x, t) = EI(x) \frac{\partial^2 \omega_m(x, t)}{\partial t^2}$ , entonces:

$$[\rho A(x)] \left[ \frac{\partial^2 \omega_m(x, t)}{\partial t^2} \right] = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \frac{\partial^2 \omega_m(x, t)}{\partial t^2} \right] + f(x, t) dx \quad (18)$$

De esta manera, se demuestra la ecuación diferencial que describe los desplazamientos transversales de un elemento estructural. De esta descripción se puede ver que  $\rho$  veces el área  $A$  es la masa por unidad de longitud, y que esta pequeña cantidad de masa en un diferencial  $dx$  veces, es la masa con que la fuerza produce la aceleración en un elemento estructural. En el siguiente apartado, con el objetivo de establecer el estrés en función del tiempo, determinaremos la fórmula de frecuencia natural para un caso de aplicación dado. En el siguiente apartado definiremos los parámetros que definen el comportamiento del material y la relación *stress-strain* a través del tiempo.

### Comportamiento *Stress-Strain* Basado en Modelos Reológicos

De un análisis *stress-strain* se obtienen funciones que son utilizadas para modelar, diseñar y predecir el comportamiento de un material. Un modelo reológico determina la función el comportamiento de las deformaciones a través del tiempo. Estos modelos han sido definidos como se muestra en la Figura 4 [8, 9].

El comportamiento de las deformaciones se define como: simple deformación monotónica Figura 4(a), elástico perfectamente plástico Figura 4(b) y endurecimiento elastoplástico lineal (sin daño acumulado “creep”) Figura 4(c). Además, en la figura se muestra una respuesta esperada para estos modelos reológicos. La deformación monotónica, se considera deformación uniaxial. Además, un ciclo de carga comprende  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ , en donde  $\varepsilon_e$  puede ser considerado como  $\varepsilon_1$  que contienen la carga monotónica axial:

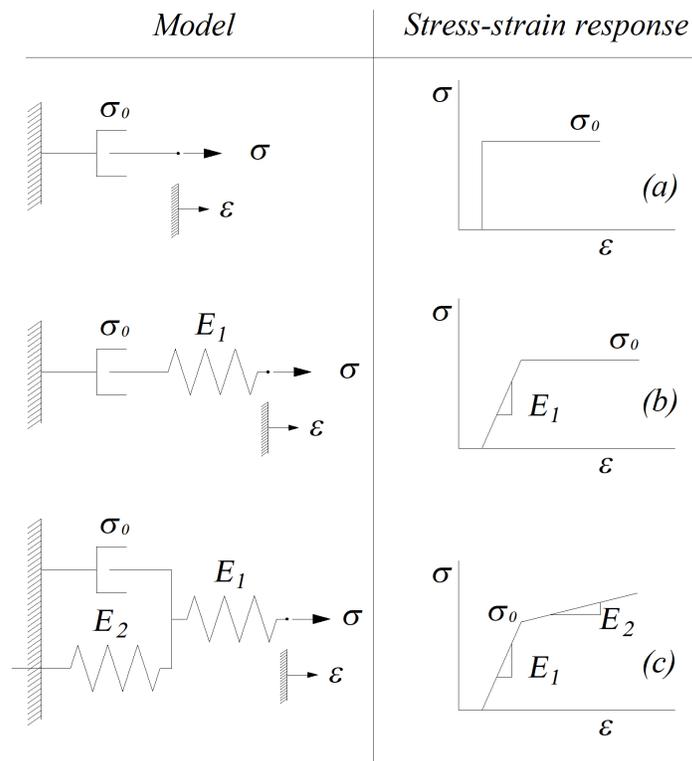


Figura 4 Análisis del comportamiento de las deformaciones, basado en modelos reológicos.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1} \quad (19)$$

El esfuerzo aplicado para una deformación  $\varepsilon_p = \varepsilon_2$ , depende de su previo comportamiento elástico, para una respuesta de un módulo estresado  $E_2$ , esto es:

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} \quad (20)$$

Así, para  $\sigma \geq \sigma_0$ :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma - \sigma_0}{E_2} \quad (21)$$

En el elástico perfectamente plástico, el esfuerzo rebasa el límite elástico, entrando en una zona perfectamente plástica (para materiales que tengan esta característica), esto puede ser analizado como el modelo reológico (a) mostrado en la Figura 4. Así, el endurecimiento elastoplástico (Figura 4 b), modela el comportamiento de las deformaciones en sus diferentes etapas de carga y descarga cuando un elemento se encuentra en operación. Este modelo requiere de una constante adicional que puede ser analizada como un factor de modificación de la intensidad del módulo de elasticidad  $\vartheta$ .

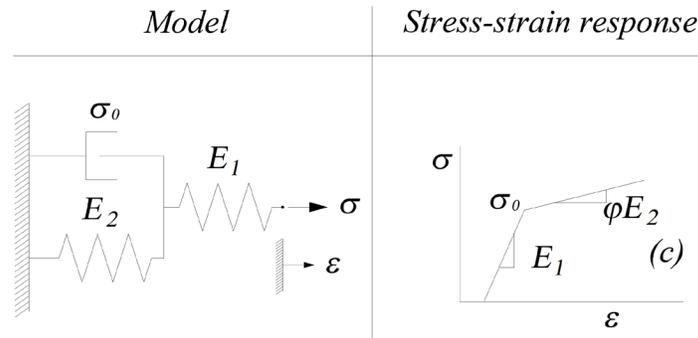


Figura 5 Relación *stress-strain*/ modelos reológicos.

En la Figura 5 b, la pendiente  $\varphi E$ , puede ser analizada como:

$$\varphi E = \frac{\sigma - \sigma_0}{\varepsilon - \varepsilon_0} \quad (22)$$

De aquí se tiene que:

$$(\varepsilon - \varepsilon_0)\varphi E = \sigma - \sigma_0 \quad (23)$$

Entonces:

$$\sigma = (1 - \varphi)\sigma_0 + \varphi E \varepsilon \quad (24)$$

Además, si  $\varepsilon_p$  es un incremento  $\Delta\varepsilon_p = (\varepsilon - \varepsilon_0)$ , entonces substituyendo en la ecuación (20):

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma - \sigma_0}{\varphi E} \quad (25)$$

Debido a que  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ , entonces:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{(\sigma - \sigma_0)}{\varphi E} \quad (26)$$

La respuesta del modelo reológico planteado es la suma de todas las deformaciones elásticas relacionadas a  $E_1$  y cualquier comportamiento plástico en la sección de “damping ( $E_2, \sigma_0$ )” del modelo reológico de la Figura 4 b, en donde no ocurren deformaciones plásticas hasta que el esfuerzo  $\sigma_0$  es rebasado cumpliendo con ( $\sigma \geq \sigma_0$ ). En el estado plástico y elastoplástico, el esfuerzo es proporcional a la deformación elevada a una potencia. Al ser una relación de potencia, un gráfico logarítmico de la relación stress-strain determina los parámetros del comportamiento del material. En la siguiente imagen, se hace una relación Log stress-Log strain con el objetivo de poner en evidencia este factor de potencia en el modelo reológico.

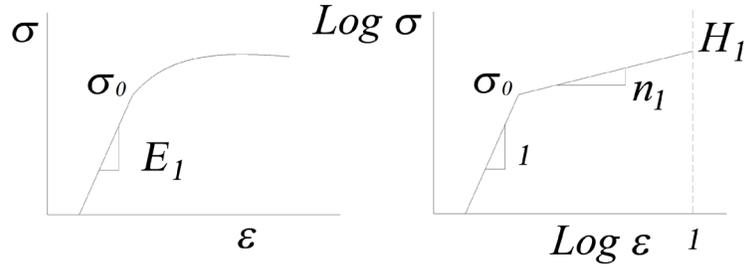


Figura 6 Relación *stress-strain* en estados plásticos.

En el gráfico Log-Log Figura 6b, en el comportamiento plástico encontramos la pendiente  $n_1$ . Nótese que en la región plástica se observa un comportamiento  $\text{Log } E = 1$ . Así, el valor de la pendiente  $n_1$  y el valor adicional  $H_1$  representan una regresión lineal del comportamiento logarítmico de la gráfica stress-strain, que evidencia error según el tipo de análisis estadístico que se realice. De aquí se tiene que:

$$\sigma = H_1 \varepsilon^{n_1} \quad (27)$$

También:

$$\varepsilon = \left( \frac{\sigma}{H_1} \right)^{1/n_1} \quad (28)$$

En donde  $n$  es conocido como el exponente de endurecimiento de deformación. Además, cabe notar que estas aseveraciones provienen de un error de datos estadísticos analizados a partir de los datos de experimentación de una prueba stress-strain. Por otro lado, debido a que el estado elástico no es independiente de estas deducciones del estado plástico, en el punto  $(\varepsilon_0, \sigma_0)$ :

$$\varepsilon = E \left( \frac{H_1}{E} \right)^{1/(1-n_1)} \quad (29)$$

Entonces, para  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ , en donde  $\varepsilon_p = \left( \frac{\sigma}{H} \right)^{1/n_1}$  se tiene la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{H} \right)^{1/n_1} \quad (30)$$

Tomando en cuenta estas deducciones para ciclo inverso de descarga del material, la deformación en función del esfuerzo que se puede representar como:

$$\varepsilon = f(\sigma) \quad (31)$$

Entonces, la respuesta del ciclo inverso queda definida por la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = f \left( \frac{\Delta \sigma}{2} \right) \quad (32)$$

Además, después del ciclo original *stress-strain* ( $\sigma, \varepsilon$ ), los ciclos de carga y descarga (histéresis) están dados por:

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} - 2f \left( \frac{\sigma_{max} - \sigma}{2} \right) \quad (33)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{min} + 2f \left( \frac{\sigma - \sigma_{min}}{2} \right) \quad (34)$$

En este apartado definimos los parámetros del comportamiento de las deformaciones debido a un esfuerzo que se genera. A continuación, expondremos el capítulo de metodología, en donde presentaremos la metodología actual y la metodología desarrollada.

### **Método LRFD.**

Este método LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) está basado en la metodología de McCormac [22] que justifica los conceptos de estado límite que se usan para describir una condición en la que una estructura deja de cumplir su función específica. En los marcos de las observaciones anteriores, el estado límite de resistencia se basa en la seguridad o capacidad de carga de las estructuras e incluyen las resistencias plásticas, de pandeo, de fractura, de fatiga, de volteo, etcétera. El estado límite de servicio se refiere al comportamiento de las estructuras bajo cargas normales de servicio y tienen que ver con aspectos asociados con el uso y ocupación, como deflexiones excesivas, deslizamientos, vibraciones y agrietamientos [23].

Los factores de carga basados de la especificación LRFD determinan factores y combinación de cargas seleccionadas para usarse con las cargas mínimas recomendadas con el propósito de incrementar las cargas para tomar en cuenta las incertidumbres.

### **3. Objetivos General**

Predecir la vida de una viga estructural simplemente apoyada sujeta a fatiga utilizando la distribución Weibull.

#### **Objetivos específicos**

1. Determinar los esfuerzos normales  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ , así como el esfuerzo cortante  $\tau$ -sección de la región de máximo esfuerzo.
2. Determinar los parámetros de la familia Weibull basado en los esfuerzos principales.
3. Determinar el daño acumulado a través de los ciclos de vida del elemento estructural.

### **4. Metodología**

Fase 1. Se realiza el análisis estático y se aplica el método LRFD para seleccionar el elemento estructural.

Fase 2. Se realiza el análisis dinámico y se determina la matriz de esfuerzos equivalentes en el instante de tiempo analizado el cual aquí se realizó en  $10^6$  ciclos.

Fase 3. Se determinan los parámetros de la distribución Weibull que representan a la matriz de esfuerzos equivalentes de la fase 2.

Fase 4. Se determina la vida esperada del elemento para el instante de tiempo analizado y sus indicadores de confiabilidad.

## **5. Resultados**

Participación en congreso internacional por parte del alumno.

Publicación de tres artículos en journal indexado al JCR.

Aplicación de la metodología desarrollada en proceso productivo de planta industrial de la región.

Documento de tesis de doctorado del alumno participante.

## **6. Productos generados**

Participación en congreso internacional y publicación de artículo en extenso.

Tres artículos en journal indexado al JCR

Aplicación industrial en industria de la región.

## **7. Conclusiones**

1. La metodología desarrollada permite determinar los esfuerzos de aplicación que se generan en un componente estructural y/o mecánico, así como determinar su vida esperada.

2. Los esfuerzos internos generados en el elemento estructural son incorporados al análisis para determinar la matriz de esfuerzos equivalentes al instante de tiempo analizado.

3. El enfoque probabilístico de la metodología permite determinar los parámetros Weibull en cualquier aplicación que se desee.

4. Dado que la metodología desarrollada nos permite cuantificar el efecto que la aplicación repetitiva del esfuerzo tiene sobre la resistencia del material, esta servirá para el desarrollo de modelos más complejos enfocados en el análisis de fatiga y de determinación de vida remanente de los elementos estructurales.

## **8. Contribución e impacto del proyecto**

Metodología capaz de cuantificar el efecto que la aplicación repetitiva del esfuerzo tiene sobre la resistencia del material.

## **9. Impacto económico, social y/o ambiental en la región**

La metodología desarrollada permite la validación del diseño de elementos estructurales y mecánicos a través de un índice de confiabilidad reduciendo con ello el tiempo de liberación y reclamos por garantías, lo cual se traduce en ahorro económico para los usuarios.

## 10. Referencias (bibliografía)

- [1] A. C. Ugural and S. K. Fenster, *Advanced mechanics of materials and applied elasticity*. Pearson Education, 2011.
- [2] V. D. Da Silva, *Mechanics and strength of materials*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [3] V. V Vasiliev and E. V Morozov, *Advanced mechanics of composite materials and structural elements*. Newnes, 2013.
- [4] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*, vol. 8. McGraw-Hill New York, 2008.
- [5] Y.-L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, and M. Barkey, *Fatigue testing and analysis: theory and practice*, vol. 13. Butterworth-Heinemann, 2005.
- [6] J. M. Gere and S. Timoshenko, "Mechanics of Materials, ; Brooks," *Cole, Pacific Grove, CA*, pp. 815–839, 2001.
- [7] S. Timoshenko, *Elementary theory and problems*. Van Nostrand, 1940.
- [8] H. F. Brinson and L. C. Brinson, "Polymer engineering science and viscoelasticity," *An Introd.*, 2008.
- [9] N. E. Dowling, *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Pearson, 2012.
- [10] L. A. Mihai and A. Goriely, "How to characterize a nonlinear elastic material? A review on nonlinear constitutive parameters in isotropic finite elasticity," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 473, no. 2207, p. 20170607, 2017.
- [11] M. Clifford, *An introduction to mechanical engineering . Part 2*, 1st ed. London: Hodder Education, 2010.
- [12] M. Géradin and D. J. Rixen, *Mechanical vibrations: theory and application to structural dynamics*. John Wiley & Sons, 2014.
- [13] H. T. Banks and H. T. Tran, *Mathematical and experimental modeling of physical and biological processes*. CRC Press, 2009.
- [14] M. Clifford, K. Simmons, and P. Shipway, *An introduction to mechanical engineering: Part 1*. CRC Press, 2009.
- [15] A. C. Ugural, *Mechanical Design: An Integrated Approach*. McGraw-Hill/Higher Education, 2004.
- [16] J. L. Chaboche and G. Rousselier, "On the plastic and viscoplastic constitutive equations—Part I: Rules developed with internal variable concept," 1983.
- [17] C. Lalanne, *Mechanical Vibration and Shock Analysis, Specification Development*. John Wiley & Sons, 2013.
- [18] S. Patnaik and D. Hopkins, *Strength of materials: a new unified theory for the 21st century*. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [19] Y. A. Çengel, W. J. Palm, and S. M. S. Ortega, *Ecuaciones diferenciales para ingeniería y ciencias*. McGraw-Hill, 2014.
- [20] R. G. Budynas, W. C. Young, and A. Sadegh, "Roark's formulas for stress and strain," *McGrwhill Publ.*, 2002.
- [21] A. Ghali, A. M. Neville, and T. G. Brown, *Structural analysis: a unified classical and matrix approach*. Crc Press, 2017.
- [22] J. McCormac, *Diseño de estructuras de acero*. Alfaomega Grupo Editor, 2016.
- [23] Y.-L. Lee, M. E. Barkey, and H.-T. Kang, *Metal fatigue analysis handbook: practical problem-solving techniques for computer-aided engineering*. Elsevier, 2011.

## 11. Anexos

### A) Congreso Internacional

 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología  
Unidad Valle de Las Palmas

 CONGRESO INTERNACIONAL  
DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

2° Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología  
Otorga la presente

# CONSTANCIA

A

**José Alejandro Molina Ordoñez, Manuel R. Piña-Monarez, Servio Tulio de la Cruz Cháidez**

Por su participación en el Eje Temático Diseño Mecánico y Manufactura con el trabajo titulado  
Análisis Metodológico del Esfuerzo Normal  $\sigma$  y Basado en Deflexión Elástica

Tijuana, Baja California, México, del 25 al 27 de Septiembre del 2019.

 M. Antonio Gómez Roa  
Director de la FCITEC

 Dr. Luis Jesús Villarreal Gómez  
Presidente del Comité Organizador

 Dr. Alberto Hernández Maldonado  
Presidente del Comité Científico

 Dra. María De Los Angeles Zárate López  
Coordinadora de Posgrado e Investigación



## Análisis Metodológico del Esfuerzo Normal $\sigma_y$ Basado en Deflexión Elástica

Molina Alejandro<sup>1</sup>, Piña-Monarez Manuel R.<sup>2</sup>, de la Cruz-Cháidez Servio Tulio<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de doctorado del Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, del Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Cd. Juárez, Chihuahua, México.

<sup>2</sup>Investigador del Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, del Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Cd. Juárez, Chihuahua, México.

<sup>3</sup>Investigador del Departamento de Ingeniería Civil, del Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Cd. Juárez, Chihuahua, México.

**Autor de correspondencia:** Alejandro Molina, Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, del Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Cd. Juárez, Chihuahua, México. ORCID 0000-0002-1945-7727. E-mail: [al187118@alumnos.uacj.mx](mailto:al187118@alumnos.uacj.mx)

**Recibido:** 02 de Mayo del 2019 **Aceptado:** 13 Octubre del 2019 **Publicado:** 02 de Noviembre del 2019

**Resumen.** - *El problema en la determinación de los esfuerzos normales ( $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ) en una sección transversal utilizando como base la deflexión elástica, se basa en el hecho de que las metodologías existentes aún presentan carencias en su análisis. El artículo presenta un análisis de los esfuerzos normales ( $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ ) desarrollados a partir de las cargas aplicadas sobre el elemento estructural y el desarrollo de un caso de aplicación. Asimismo, debido a que la deflexión de un elemento depende de las cargas aplicadas, entonces el análisis de los esfuerzos está basado en la deflexión elástica del componente estructural. Además, la selección del elemento estructural se basa en la normatividad de diseño de vigas para componentes estructurales. Por otro lado, el análisis del material para hacer un diseño de un componente estructural también se presenta en este artículo. Igualmente, el material presentará desgaste debido a las cargas aplicadas, entonces se realiza un análisis de fatiga basado en los esfuerzos normales.*

## B) Artículos indexados al JCR



Article

# Weibull S-N Fatigue Strength Curve Analysis for A572 Gr. 50 Steel, Based on the True Stress—True Strain Approach

Alejandro Molina \*, Manuel R. Piña-Monarez and Jesús M. Barraza-Contreras 

Industrial and Manufacturing Department of the Engineering and Technological Institute, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Cd. Juárez, Chihuahua 32310, Mexico; Manuel.pina@uacj.mx (M.R.P.-M.); al187061@alumnos.uacj.mx (J.M.B.-C.)

\* Correspondence: al187118@alumnos.uacj.mx

Received: 5 June 2020; Accepted: 24 July 2020; Published: 18 August 2020



**Abstract:** In this paper a Weibull methodology to determine the probabilistic percentiles for the S-N curve of the A572 Gr. 50 steel is formulated. The given Weibull/S-N formulation is based on the true stress and true strain values, which are both determined from the stress-strain analysis. For the analysis, the Weibull  $\beta$  and  $\eta$  parameters are both determined directly from the maximum and minimum addressed stresses values. The S-N curve parameters are determined for  $10^3$  and  $10^6$  cycles. In the application, published experimental data for the CSA G40.21 Gr. 350W steel is used to derive the true stress and true strain parameters of the A572 Gr. 50 steel. Additionally, the application of the S-N curve, its probabilistic percentiles and the Weibull parameters that represent these percentiles are all determined step by step. Since the proposed method is flexible, then it can be applied to determine the probabilistic percentiles of any other material.

**Keywords:** reliability; stress-strain analysis; strength analysis; fatigue life reliability analysis; Weibull distribution

## 1. Introduction

For the A572 Gr. 50 steel material, a probabilistic S-N curve does not exist. The main goal of the S-N curves analysis is related to the strength material behavior and its correlation with the defined stress ratio [1–4]. Structural elements are subjected to a range of stress values, so to determine the probabilistic S-N curve, any material steel is necessary [1–3,5,6]. Despite this, currently, in structural design, two different approaches have been used, and they are: (1) the application of a failure theory to determine if the designed element is safe or not; and (2) the fatigue approach [1,7]. Unfortunately, these approaches are not very efficient for predicting the reliability of a structural element. This mainly because, while the failure theory does not consider the time in the analysis, as it is the case of the Goodman, Elliptical and Soderberg failure theories given by Budynas and Nisbett [8], in the fatigue strength analysis, the S-N curve only represents the strength average [9,10]. Therefore, neither the failure theory nor the fatigue analysis is efficient to perform a probabilistic analysis [2,11,12]. Thus, in this paper based on the A572 Gr. 50 steel true stress-true strain analysis, the method to determine the probabilistic percentiles of the S-N curve is formulated, based on the two parameter Weibull distribution. Therefore, the efficiency of the proposed method to determine the probabilistic percentiles is based on the fact that the Weibull shape  $\beta$  and scale  $\eta$  parameters are both directly determined from the maximum and minimum material strength ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) values, which are given from the true stress-true strain analysis [13]. Moreover, the analysis is based on the true stress-true strain approach, because the failure of a structure does not depend only on the applied axial stress, but it also depends

Article

# Probabilistic Linear Time-Dependent Stress Beam Analysis and Its Stress-Strength Reliability

Alejandro Molina \* , Manuel R. Piña-Monarez , Jesús M. Barraza-Contreras  and Servio T. de la Cruz-Cháidez

Industria and Manufacturing Department of the Engineering and Technological Institute, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua 32310, Mexico; manuel.pina@uacj.mx (MRP-M); al187061@alumnos.uacj.mx (J.M.B.-C.); schaidez@uacj.mx (S.T.d.L.C.-C.)

\* Correspondence: al187118@alumnos.uacj.mx

**Featured Application:** Since to apply the proposed reliability method, the only inputs are the applied stress matrix or applied principal stresses values, and the material characteristics, then it could be applied and any mechanical and structural stress analysis were the reliability of the designed element is of interest. In particular because the proposed method help us to incorporate the effect the applied stress has over time (fatigue) by using the material rheological model, it can be used to formulate new theory to proposed a more complex fatigue-reliability methodology.

**Abstract:** Based on the principal stress values generated by the bending beam, the material's strength required at  $10^6$  cycles is determined depending on time. To determine the stress/strength reliability ( $R(t)$ ), the stress distribution is determined directly from the range of the principal stresses values, and the strength distribution is determined based on the reduced tensile strength ( $S_r$ ) and fatigue strength ( $S_e$ ) range. Therefore, based on the time-dependent stress and the material's strength, a step-by-step method to determine the reliability  $R(t)$  of the structural element at  $10^6$  cycles is provided. The  $R(t)$  index is used to select the best among the feasible beam alternatives of the static/elastic and plastic methodologies. The method's efficiency is based on the time-dependent stress analysis performed by using the elastic modulus, and corresponding strain as time dependence variables. Because the time-dependent stress is related to the changes of the bending deflection through time, it is determined based on the addressed equivalent stress at  $10^6$  cycles.

**Keywords:** reliability analysis; stress-strength analysis; time-dependent stress; reliability index determination



Citation: Molina, A.; Piña-Monarez, M.R.; Barraza-Contreras, J.M.; de la Cruz-Cháidez, S.T. Probabilistic Linear Time-Dependent Stress Beam Analysis and Its Stress-Strength Reliability. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 3459. <https://doi.org/10.3390/app11083459>

Academic Editor: Filippo Berto

Received: 27 March 2021

Accepted: 9 April 2021

Published: 12 April 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Although the mechanical properties of materials such as stress, strain, and strength vary with time [1,2], the structural elements lifetime (cycles) subjected to fatigue is determined by applying static/elastic methodologies that are based on the applied stress range and the material's strength. However, as W. Weibull [3] and F. Duffy [4] have emphasized, the difficulties of these approaches consist in incorporating the fatigue phenomenon, the nucleation growth, and the microstructural damage in an accurate strength theory. Consequently, engineering and product design theories are limited because by applying the static/elastic theories, we cannot determine the stress based on the time nor the material's strength or the element's reliability.

In practice, the design phase of a structural element is performed based on the LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) method, which is directly related to the AISI (*American Institute of Steel Construction*) norm [5,6]. Unfortunately, although both methodologies are based on the bending (internal moments) beams, because the generated internal stresses are not considered in their analysis, then by applying these methodologies, we cannot determine the reliability of the structural element. Despite this, Jawaheri and Nanni [7] introduced the reliability analysis based on an experimental strength extrapolation of two

Article

# Fatigue-Life Prediction of Mechanical Element by Using the Weibull Distribution

Jesús M. Barraza-Contreras , Manuel R. Piña-Monarez and Alejandro Molina

Industrial and Manufacturing Engineering at the Technological Institute, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chih 32310, Mexico; Manuel.pina@uacj.mx (MRP-M.); all87118@alumros.uacj.mx (A.M.)

\* Correspondence: all87061@alumnos.uacj.mx

Received: 16 August 2020; Accepted: 9 September 2020; Published: 13 September 2020



**Abstract:** Applying Goodman, Gerber, Soderberg and Elliptical failure theories does not make it possible to determine the span of failure times (cycles to failure- $N_i$ ) of a mechanical element, and so in this paper a fatigue-life/Weibull method to predict the span of the  $N_i$  values is formulated. The input's method are: (1) the equivalent stress ( $\sigma_{eq}$ ) value given by the used failure theory; (2) the expected  $N_{eq}$  value determined by the Basquin equation; and (3) the Weibull shape  $\beta$  and scale  $\eta$  parameters that are fitted directly from the applied principal stress  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  values. The efficiency of the proposed method is based on the following facts: (1) the  $\beta$  and  $\eta$  parameters completely reproduce the applied  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  values. (2) The method allows us to determine the reliability index  $R(t)$ , that corresponds to any applied  $\sigma_{eq}$  value or observed  $N_i$  value. (3) The method can be applied to any mechanical element's analysis where the corresponding  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$ ,  $\sigma_{eq}$  and  $N_{eq}$  values are known. In the performed application, the  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  values were determined by finite element analysis (FEA) and from the static stress analysis. Results of both approaches are compared. The steps to determine the expected  $N_i$  values by using the Weibull distribution are given.

**Keywords:** static and fatigue reliability; mechanical design; Weibull distribution; finite element analysis; principal stresses

## 1. Introduction

Fatigue is a random phenomenon [1,2] that causes a mechanical component to fail [3] at a stress level lower than the material strength limit ( $S_r$ ) [4]. Although fatigue is random and the mechanical component is subject to variable amplitude and cyclic load [ $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ], based on single equivalent stress  $\sigma_{eq}$  value, its failure analysis can be performed by applying a failure theory such as the Goodman, Gerber, Soderberg, and ASME (American Society of Mechanical Engineers) elliptical theories [5] (pp. 185,186,188) [6] (pp. 313–316). Depending on the specific research, different statistical models based on (stress, strain, crack growth, etc.) have been proposed to determine the cycles to failure [7–9]. Therefore, because rather than using the random behavior the analysis uses only a stress value, its application does not enable either the reliability of the component or its expected cycles to failure ( $N_i$ ) values to be found. However, because the expected  $N_i$  values can be determined from the related stress-cycles S-N curve of the used material [10], and since the ultimate strength ( $S_{ult}$ ) and  $S_r$  values represent the strength of the material used, then based on the theory given in [11], and on the  $S_{ult}$  and  $S_r$  values, the Weibull shape  $\beta$  and scale  $\eta$  parameters can be determined. Therefore, the novelty of the proposed method lies in that it uses the Weibull parameters to determine both the component's reliability and the expected  $N_i$  values. Because the reliability of the component depends on both the applied stress and the inherent strength [12,13] in the product to overcome it, then the proposed method to determine the random behavior of  $N$  can be based on the Weibull distribution used to model the stress, and on the Weibull distribution used to model the  $N_i$  values.

## C) Aplicación Industrial

Cd. Juárez, Chihuahua. 29 de marzo del 2021.

**COMMSCOPE**  
**Departamento de prueba**  
Ing. Jorge Lozano  
Ing. Sergio Jurado

Presente,

Por medio de la presente se hace constar que el C. José Alejandro Molina Ordóñez, realizó y finalizó el proyecto de investigación "Statistical Analysis of Geometry response over its process factors Cut/ Previous Polish/ Polishing paper", tomando de referencia la existencia de una necesidad en una línea de producción de la planta Antonio J. Bermúdez. El proyecto se resume en introducción al proceso de producción, análisis del comportamiento de las estaciones de trabajo, análisis de la prueba de calidad como respuesta, planteamiento del caso, análisis estadístico y comprobación de datos. Dicho proyecto tuvo un costo aproximado de \$1,500 dls y se realizó en el periodo 4 de febrero del 2021 – 29 de marzo del 2021.

Los beneficios obtenidos de esta investigación fueron:

- Determinación de la influencia que tienen los factores de proceso sobre la prueba de calidad en la estación de geometría.
- Descripción estadística del proceso.
- Implementación de una corrida robusta para disminuir la probabilidad de fallas en la estación de geometría.

En el enfoque de requisitos el examen de grado del alumno, este proyecto se define como determinación del ambiente específico de un análisis de caso de aplicación (caso 1) de la tesis titulada: "Metodología Probabilística Weibull de Diseño de Vigas de Acero Estructural, Sujeta a Fatiga".

En este proyecto participo: por parte de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez el Dr. Manuel Román Piña Monarrez, quien fungió como asesor académico; por parte de la empresa Commscope el Ing. Jorge Lozano (gerente de departamento) y el Ing. Sergio Jurado (Ingeniero de equipos de prueba), quienes fungieron como tutores de planta.

Se extiende la presente para los fines que el interesado convenga en Ciudad Juárez, Chihuahua.

Atentamente

Ing. Jorge Lozano

Atentamente

Ing. Sergio Jurado

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y MANUFACTURA

DOCTORADO EN TECNOLOGÍA.



COMMSCOPE®

“Avance 11 de febrero 2021: Estancia de investigación”

Alejandro Molina

Director: Dr. Manuel Román Piña Monarrez

Asesor: Dr. Servio Tulio de la Cruz Chaidez

Departamento de Prueba COMMSCOPE:

Ing. Jorge Lozano

Ing. Sergio Jurado

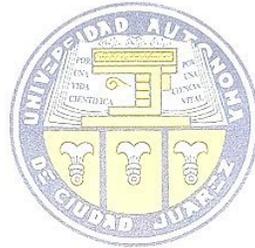
CD.JUÁREZ, CHIHUAHUA.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y MANUFACTURA

DOCTORADO EN TECNOLOGÍA.



COMMSCOPE®

Ciudad Juárez: Antonio j Bermúdez

**"Análisis estadístico línea 37: Reporte Semana 2"**

M.I. Alejandro Molina

Director: Dr. Manuel Román Piña Monarrez

Asesor: Dr. Servio Tulio de la Cruz Chaidez

Departamento de Prueba COMMSCOPE:

Ing. Jorge Lozano

Ing. Sergio Jurado

CD.JUÁREZ, CHIHUAHUA.

## 12. Taxonomía de los Roles de Colaborador (con las actividades logradas)

Roles	Definición de los roles	Nombre de él(la) investigador(a)	Figura	Grado de contribución	Actividades logradas durante el proyecto	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto
Director del proyecto	Dirigir y coordinar las actividades del proyecto	Manuel Román Piña Monarrez	Director del proyecto	Principal	Desarrollo validación e implementación del modelo	20hrs
Colaborador	Asesor	Servio Tulio De La Cruz Chaidez	Asesor	Asesoría técnica en estructuras	Apoyo en la formulación y validación de los modelos	10hrs

### 12.1 Estudiantes participantes en el proyecto

Nombre de estudiante(s)	Matrícula	Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto	Actividades logradas en la ejecución del proyecto
M.C José Alejandro Molina Ordoñez	187118	30	Investigación bibliográfica y de campo Implementación real en planta Desarrollo de artículos de investigación

### Aclaratoria sobre cambios en las fases metodológicas

1. En la fase 2 del proyecto la matriz de esfuerzos es determinada a través del uso de un esfuerzo equivalente que no es parte de la metodología del alumno y que es resultado de los avances del proyecto publicados en "Weibull analysis for normal /accelerated and fatigue random vibration test publicado en mayo del 2019" y de los resultados preliminares de mi otro alumno Jesús publicado en el tercer artículo del anexo B que en este reporte se anexa "Fatigue life prediction of mechanical element by using the Weibull distribution".
2. Los parámetros mencionados en la fase 3 son determinados a través de adecuar la metodología dada en mi artículo "Weibull stress distribution for static mechanical stress and its stress/strength analysis" al caso dinámico requerido por el proyecto, actividad que es independiente de la tesis doctoral del alumno.
3. La fase 4 está fuera del alcance de la tesis del alumno y es resultado de las actividades propias del conocimiento desarrollado en estos dos años del proyecto.

En general por ser un proyecto de generación de conocimiento de ciencia básica, además de lo arriba mencionado es muy difícil separar que partes son de la tesis doctoral de Alejandro y que partes son propias del proyecto, ya que como el conocimiento se iba generando este se iba usando en el proyecto sin importar quien lo generó.

## **Aclaratoria sobre las fechas y la participación del profesor Lázaro Rico**

1. Todo el periodo de los dos años es del proyecto ya que su solución final hace uso de los hallazgos publicados en mi artículo el 2019, "Fatigue life prediction of mechanical element by using the Weibull distribution". de los hallazgos publicados en el 2020 por mis alumnos y de los análisis del proceso y análisis estadísticos hechos durante la implementación de la metodología desarrollada en la planta COMMSCOPE en el 2021.

2. En particular el periodo de febrero y marzo donde se hizo una implementación en la planta Commscope es solo del proyecto ya que la aplicación realizada fue solicitada por la planta como fase inicial para después permitir al alumno experimentar con un producto de acero que si estuviera relacionado con el tema de tesis de Alejandro. El anexo C del reporte contiene las evidencias de dicha aplicación firmadas por el responsable de la planta.

Es importante mencionar que en el reporte anexo ya no aparece el Dr. Lazaro Rico Pérez, esto debido a que el Dr. se incorporó solo la última semana de la implementación mencionada (es decir solo participó en una actividad) y a que como se menciona, El Dr. Lazaro inicialmente no era parte del equipo de trabajo, y a que el Dr. no aparece como autor en los productos generados, no pudiendo así evidenciar la participación del Dr. Rico en el proyecto.