

# Metodología Probabilística Weibull de Diseño de Vigas de Acero Estructural, Sujeta a Fatiga: Memoria de Investigación.

Alejandro Molina<sup>1</sup>, Manuel R. Piña-Monarez<sup>2</sup>, Lázaro Rico-Pérez<sup>2</sup>, Servio Tulio de la Cruz-Cháidez<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: José Alejandro Molina Ordóñez, #ORCID 0000-0002-1945-7727, email [al187118@alumnos.uacj.mx](mailto:al187118@alumnos.uacj.mx).

## Resumen:

Las metodologías actuales de determinación de vida de los componentes estructurales que se encuentran operando bajo el ambiente específico al que fueron diseñados, presentan debilidades teóricas para predecir parámetros de confiabilidad y/o probabilidad de falla al que están expuestos durante su vida útil. Es por ello, que en esta investigación se presenta una metodología basada en las variables más influyentes en la determinación del comportamiento mecánico de un componente: esfuerzos generados debido a su aplicación; resistencia del material para soportar estos esfuerzos; y las deformaciones que se generan en el área de máxima concentración de esfuerzos. Además, se hace un análisis de dependencia del tiempo para estas variables, logrando capturar un valor característico en función del tiempo que es utilizado para introducirlo en metodologías probabilísticas. El resultado esperado de esta investigación, es obtener un modelo de relación de vida-esfuerzo basado en un análisis dependiente del tiempo para las variables principales. Al final de la investigación, se espera desarrollar tres casos de aplicación teórico-práctico, que incluye un caso teórico para desarrollar el modelo y el estudio de 2 productos estresados obtenidos de la industria local.

**Keywords:** Static and Fatigue analysis, normal stresses, mechanical design, time-dependence stress, Weibull distribution.

## Introducción.

La vida de un elemento estructural depende del estrés que se genera debido a las cargas aplicadas, así como la resistencia que tiene el material de soportar estos esfuerzos. De igual manera, con el paso del tiempo la resistencia del material cederá y tendrá disminución de esta capacidad para resistir los esfuerzos. De modo que, con el paso del tiempo, los esfuerzos a los que se somete elemento rebasan las condiciones de resistencia y se presenta la falla en el elemento estructural. A

causa de esto, la intensidad con la que actúan los esfuerzos sobre la resistencia crece con el paso del tiempo.

En el campo de mecánica de materiales y diseño de elementos estructurales, el análisis por fatiga está principalmente basado en esfuerzos, deformaciones, fracturas o fallas [1, 2]. Entonces, el mecanismo de falla de fatiga es considerada como un modo de falla aleatorio y su análisis podemos generarlo a través de una función de distribución de esfuerzos y una función de distribución de resistencia.

Así, en este documento se expone una síntesis del proyecto de investigación de la siguiente forma: 2. Justificación de la investigación; 3. Objetivos e Hipótesis; 4. Metodología actual; 5. Resultados; y 6. Conclusiones. A continuación, se presenta la justificación de la investigación.

## 2. Justificación.

Distintos mecanismos de fallas se presentan a lo largo de armaduras y vigas gracias a su efecto de anisotropía [3, 4]. En la predicción de estas fallas, es necesario el estudio esfuerzo-resistencia de un elemento estructural. Dado que, con el paso del tiempo la solicitud de esfuerzos aumenta en un elemento y la intensidad con la que actúan estos esfuerzos sobre la resistencia es mayor, en la determinación de la probabilidad de falla de un elemento estructural, es necesario un análisis dependiente del tiempo esfuerzo-resistencia  $f(s, S)$ .

Las metodologías actuales de diseño de elementos estructurales sujetos a fatiga no son eficientes en la determinación de la vida de un elemento. A pesar de que un análisis *stress-strain/true-stress-true strain* define un valor característico del esfuerzo en función de la deformación  $f(s, \varepsilon)$ , no es posible determinar un parámetro de vida del elemento estructural con estas metodologías. En ese mismo orden, las teorías de fallas basadas en la determinación de los esfuerzos que actúan en un elemento estructural se limitan a condicionar el rango de esfuerzos basado en parámetros de un análisis de resistencia  $(S_{ut}, S_e)$  [1, 2, 5], siendo ineficientes en la predicción de una probabilidad de falla. Por otro lado, el análisis de las curvas *sN stress amplitude* y *εN strain* definen un valor de vida en ciclos  $N_f$  de un elemento sujeto a fatiga, en el que se han encontrado debilidades de la metodología que al día de hoy no están resueltas [5, 6, 7]. En este mismo sentido, Jinqun Xu [8] hace un importante estudio de los ciclos de histéresis determinando un comportamiento no lineal de este ciclaje, en donde proyecta una predicción de este comportamiento basado en modelos osciladores armónicos. No obstante, es sabido que estos modelos pueden estar definidos por la forma  $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \cos(\omega t)$ . En particular, los modelos reológicos basados en viscoelasticidad incluyen la forma  $c\dot{x}$  de la pasada ecuación, en el

que  $\dot{x}$  es considerado como el cambio de la deformación con respecto del tiempo. Por otro lado, otro aspecto importante de los modelos reológicos, es que existe el hecho de que las propiedades mecánicas de los materiales varían con el tiempo y la estructura molecular captura esta variación o disminución de la capacidad cuando son estresados. Sin embargo, aunque esta herramienta metodológica es utilizada en esta investigación para capturar la dependencia del tiempo en los esfuerzos y las deformaciones, no es posible definir la vida de un componente estructural.

Con respecto a la determinación de los esfuerzos en dependencia del tiempo, diversos autores han desarrollado teoría del comportamiento *stress-strain*, definiendo modelos reológicos de idealización del comportamiento gradual de la deformación en función de los esfuerzos aplicados de la forma  $\sigma(t) = E\varepsilon(t)$ . Junhong Zhang [9], propone un método probabilístico basado en el comportamiento cíclico *stress-strain*, comúnmente nombrado como histéresis, utilizando teorías de fallas de deformación. Desafortunadamente, los límites establecidos por las teorías de fallas solo representan el límite al que un esfuerzo de aplicación debe de trabajar, no el esfuerzo que esta actuando en un instante  $\sigma(t)$ . Además, estos modelos no son capaces de definir probabilidad de falla de un elemento estructural que se encuentra en operación bajo su ambiente específico determinado en el diseño.

En el enfoque de metodologías probabilísticas, Manuel R. Piña-Monarez [10] hace una importante contribución a la predicción de probabilidades de falla de un componente estructural que se encuentra estresado. Es importante destacar que, en este estudio, se definen los parámetros de distribución Weibull  $W(\beta, \eta)$  para una matriz de esfuerzos y define un esfuerzo equivalente  $\sigma_v$  en su método propuesto. De igual manera, Jesús M. Barraza-Contreras [11] define un numero de ciclos esperado  $N_f$  representados como esfuerzos equivalentes para un caso de aplicación en su método propuesto. Incluso W. Weibull [12] y F. Duffy [13], coinciden en que es complicado capturar la influencia que tienen los fenómenos de fatiga, la nucleación, la grieta y micro defectos del material sobre un elemento diferencial de volumen de un producto estresado. Por lo que la ingeniería y diseño de productos se limita a la teoría de comportamientos y mecanismos de deformación. Esto nos lleva a la declaración del problema de investigación, el cual se presenta a continuación.

## **2.1. Declaración del Problema**

*“Las metodologías estáticas actuales de análisis de esfuerzos y resistencia de materiales, no son eficientes en la determinación de la vida de un componente estructural cuando su vida depende de la variación aleatoria de los esfuerzos generados por el fenómeno de fatiga. Debido a esto, la*

*determinación de vida y parámetros de confiabilidad pueden resultar erróneos en la predicción de la vida cuando se diseña un elemento estructural”.*

Por lo expuesto antes, en esta memoria se presenta una síntesis de los avances del proyecto de investigación basado en un caso de aplicación de determinación de la vida de un elemento estructural. A continuación, se presentan los objetivos de la investigación así como las hipótesis a demostrar.

### **3. Objetivos e Hipótesis.**

En esta sección se presentan los objetivos de esta investigación, seguido de las hipótesis a demostrar.

#### **3.1. Objetivo General**

Determinación de una metodología probabilística basada en la distribución Weibull para modelar la vida de una viga estructural, sujeta a fatiga.

##### **3.1.1. Objetivos Específicos**

- Determinar una función de distribución  $s(t)$  para modelar los esfuerzos generados a través del tiempo, a partir de las cargas que se aplican en un elemento estructural.
- Determinar una función de distribución  $S(t)$  para modelar la resistencia a través del tiempo.
- Determinar de un modelo del comportamiento de la deformación  $[\varepsilon(t), s(t), S(t)]$  en el elemento estructural a partir de su aplicación.

#### **3.2. Hipótesis General**

Comprobar que la metodología probabilística basada en la distribución Weibull para modelar la vida de una viga estructural, sujeta a fatiga, tiene mayor poder predictivo que las metodologías actuales.

##### **3.2.1. Hipótesis Específicas**

- Comprobar que la elaboración de una función de distribución  $s(t)$  para modelar los esfuerzos a través del tiempo, tiene mayor poder explicativo que las funciones de determinación de esfuerzos actuales.
- Comprobar que la elaboración de una función de distribución  $S(t)$  para modelar la resistencia a través del tiempo, tiene mayor poder explicativo que las funciones de determinación de resistencia actuales.
- Comprobar que la determinación de un modelo del comportamiento de la deformación de un elemento diferencial  $f(s, S, \varepsilon)$  a partir de su aplicación, tiene mayor poder explicativo que los modelos de actuales.

Como consecuencia del planteamiento del problema, los objetivos y las hipótesis establecidas para esta investigación, se realizó el desarrollo de la siguiente metodología actual.

#### 4. Metodología actual.

En esta sección se exponen las herramientas metodológicas más representativas utilizadas para este proyecto de investigación, seguido por la breve descripción de cada una de ellas con el fin de resaltar la aportación de los resultados que se obtendrán de esta investigación. Así, en la siguiente imagen se muestra un mapa conceptual de estas herramientas.



**Figura 1.** Esquema de herramientas metodológicas.

Así, en la imagen expuesta se expone que, en la determinación de la vida de un componente estructural es necesario de la utilización de las metodologías actuales basadas en 2 enfoques propuestos: diseño y selección de un componente estructural y análisis del material.

En lo que corresponde al diseño y selección de un componente estructural se muestran las metodologías de análisis estático de elementos estructurales, metodologías de determinación de esfuerzos y teorías de fallas de materiales, que tienen como objetivo seleccionar y validar un elemento estructural. Es importante mencionar que, con el uso de estas metodologías es posible analizar la vida de un elemento estructural con las metodologías mencionadas y haciendo un análisis de teoría de fallas. Sin embargo, los parámetros de determinación de vida de componentes estructurales están basados, en su mayoría, en factores de seguridad.

Por su parte, en lo que se refiere al análisis del material de un componente estructural seleccionado, las herramientas metodológicas más representativas son: el comportamiento de las deformaciones, teoría de fatiga de materiales y modelos de viscoelasticidad. Respecto a las metodologías de comportamiento de deformación tienen como objetivo establecer las características del material en función del esfuerzo aplicado. En relación con la teoría de fatiga de materiales tiene como objetivo definir un tiempo de vida de los elementos estructurales que se someten a esfuerzo, basado en las

características límite del material. Finalmente, los modelos reológicos, también conocidos como modelos basados en viscoelasticidad, tienen como objetivo definir el comportamiento de las deformaciones en función del tiempo. No obstante, aunque se define el comportamiento de las deformaciones en función del tiempo, no es posible determinar un parámetro de vida de un elemento estructural.

En consecuencia, con este diseño metodológico, es posible la construcción de una metodología probabilística propuesta que tiene como objetivo definir un modelo que relacione la vida de un elemento estructural con sus características principales de desgaste, esfuerzo, deformación y resistencia en función del tiempo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos hasta este momento.

## 5. Resultados.

Como resultados de esta investigación, se tiene hasta hoy la publicación de los siguientes artículos:  
Artículo publicado en: **2do Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología CICITEC 2019.**

# 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

**Recibido:** 02 de Mayo del 2019 **Aceptado:** 13 Octubre del 2019 **Publicado:** 02 de Noviembre del 2019  
**ISSN:** 2594-1925

Artículo 2:

## 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, México;

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

Appl. Sci. **2020**, *10*, 5725; doi:10.3390/app10165725

## **6. Conclusiones.**

A continuación, se exponen las conclusiones de esta memoria de investigación:

- Existe la necesidad de determinar la vida de un componente estructural.
- La vida de un componente estructural, depende de los esfuerzos que se generan debido a las cargas que se aplican.
- La influencia de los esfuerzos aumenta a través del tiempo.
- Las metodologías actuales de determinación de elementos tienen oportunidad de aportación científica/teórica.
- No existe una función que relacione la vida del componente estructural en función de sus esfuerzos aplicados y su comportamiento a través del tiempo, así como el comportamiento de la resistencia del material en función del tiempo.
- La aplicación de metodologías probabilísticas, nos ayuda a definir un rango de probabilidades de la variable y el espacio en que lo estamos analizando.

## Bibliografía.

- [1] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's mechanical engineering design*, vol. 8. McGraw-Hill New York, 2008.
- [2] Y.-L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, and M. Barkey, *Fatigue testing and analysis: theory and practice*, vol. 13. Butterworth-Heinemann, 2005.
- [3] J. M. Gere and S. Timoshenko, "Mechanics of Materials, ; Brooks," *Cole, Pacific Grove, CA*, pp. 815–839, 2001.
- [4] V. V Vasiliev and E. V Morozov, *Advanced mechanics of composite materials and structural elements*. Newnes, 2013.
- [5] D. Kececioglu, *Robust engineering design-by-reliability with emphasis on mechanical components & structural reliability*, vol. 1. DEStech Publications, Inc, 2003.
- [6] N. E. Dowling, *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Pearson, 2012.
- [7] A. C. Ugural and S. K. Fenster, *Advanced mechanics of materials and applied elasticity*. Pearson Education, 2011.
- [8] J. Xu, M. Huo, and R. Xia, "Effect of cyclic plastic strain and flow stress on low cycle fatigue life of 316L (N) stainless steel," *Mech. Mater.*, vol. 114, pp. 134–141, 2017.
- [9] J. Zhang, W. Li, H. Dai, N. Liu, and J. Lin, "Study on the Elastic–Plastic Correlation of Low-Cycle Fatigue for Variable Asymmetric Loadings," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 11, p. 2451, 2020.
- [10] M. R. Piña-Monarez, "Weibull stress distribution for static mechanical stress and its stress/strength analysis," *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 34, no. 2, pp. 229–244, Dec. 2017.
- [11] J. M. Barraza-Contreras, M. R. Piña-Monarez, and A. Molina, "Fatigue-Life Prediction of Mechanical Element by Using the Weibull Distribution," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 18, p. 6384, 2020.
- [12] W. Weibull, "A statistical theory of strength of materials," *IVB-Handl.*, 1939.
- [13] S. F. Duffy and J. P. Gyekenyesi, "Time dependent reliability model incorporating continuum damage mechanics for high-temperature ceramics," 1989.