

Modelo para la estimación de parámetros de fatiga y su validación comparativa frente a modelos clásicos, con aplicación al acero AISI 410

A Model for Estimating Fatigue Parameters and Its Comparative Validation Against Classical Models, with Application to AISI 410 Steel

Augusto F. Torres Catonga^{a,b}, Hugo A. Rojas Hernández^c, Socorro Valdez Rodríguez^d

Abstract:

In this work, a model is proposed for the estimation of the Coffin–Manson–Basquin strain–life model parameters (σ_f , b , ϵ_f , and c) from monotonic properties, based on the direct relationship between fatigue durability and the endurance limit. The proposed model was comparatively evaluated against nine classical models reported in the literature, using AISI 4340, A538B, SAE 4142, and SAE 9262 steels as experimental references, and quantifying its accuracy through the percentage relative error. The results showed that the proposed model yielded the lowest average error (6.54% and 5.41%) and the lowest standard deviation (0.0763 y 0.0621) for AISI 4340 and A538B steels, materials with moderate-strength properties similar to AISI 410. For higher-strength steels, the Roessle–Fatemi model showed better performance, evidencing a specific applicability range. The proposed model's superior performance is attributed to its formulation based on physically representative points of the S–N curve, reducing error propagation typical of models relying on indirect empirical correlations. An additional advantage of the proposed model is that it requires only the ultimate strength and the reduction of area as input properties, together with the characteristic points of the S–N curve, which extends its applicability to materials with limited technical information and allows identifying a specific range of applicability based on the ductility and strength of the analyzed steel. Finally, the model was applied to AISI 410 martensitic stainless steel to estimate its fatigue parameters and construct an approximation of the S–N curve in the absence of specific experimental data, yielding consistent results and demonstrating its potential as a preliminary tool for finite element simulations.

Keywords:

Fatigue, S–N curve, monotonic properties, fatigue parameters, AISI 410 stainless steel, Coffin–Manson–Basquin

Resumen:

En este trabajo se propone un modelo para la estimación de los parámetros del modelo deformación-vida de Coffin–Manson–Basquin (σ_f , b , ϵ_f y c) a partir de propiedades monotónicas, basado en la relación directa entre la durabilidad y el límite de fatiga. El modelo propuesto se evaluó comparativamente frente a nueve modelos clásicos reportados en la literatura, utilizando como referencia experimental los aceros AISI 4340, A538B, SAE 4142 y SAE 9262, y cuantificando su precisión mediante el error relativo porcentual. Los resultados evidenciaron que el modelo propuesto presentó el menor error promedio (6.54%, 4.94%, 16.97% y 4.11%) y la menor desviación estándar (0.0763, 0.0925, 0.2728 y 0.0744) para los aceros AISI 4340, A538B, SAE 4142 y SAE 9262, materiales que presentan la mayor y menor ductilidad del conjunto de validación (reducción de área de 57 %, 56 %, 20% y 32%). Para los aceros de mayor o menor ductilidad, el modelo propuesto presentó mejor desempeño, evidenciando un rango específico de aplicabilidad. El mejor desempeño del modelo propuesto se atribuye a su formulación basada en puntos físicamente representativos de la curva S–N, lo que reduce la propagación de errores característica de los modelos sustentados en correlaciones empíricas indirectas. Una ventaja adicional del modelo propuesto es que requiere únicamente el esfuerzo último y la reducción de área como propiedades de entrada, junto con los puntos característicos de la curva S – N, lo que amplía su aplicabilidad a materiales con información técnica limitada y permite identificar un rango específico de aplicabilidad en función de la ductilidad y resistencia mecánica del acero analizado. Finalmente, el modelo fue aplicado al acero inoxidable martensítico AISI 410 para estimar sus parámetros de fatiga y construir una

^a Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Ciencias Físicas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0009-0005-8384-2979>, Email: torres_catonga@icf.unam.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Morelos | Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0009-0005-8384-2979>, Email: torres_catonga@icf.unam.mx

^c Autor de Correspondencia, Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Ciencias Físicas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0002-5616-8975>, Email: hugo.rojas@icf.unam.mx

^d Universidad Nacional Autónoma de México | Instituto de Ciencias Físicas | Cuernavaca-Morelos | México, <https://orcid.org/0000-0002-3696-3373>, Email: svaldez@icf.unam.mx

aproximación de la curva S–N en ausencia de datos experimentales específicos, obteniendo resultados coherentes con el comportamiento esperado y demostrando su potencial como herramienta preliminar para simulaciones por elementos finitos.

Palabras Clave:

Fatiga, curva S–N, propiedades monotónicas, parámetros de fatiga, acero inoxidable AISI 410, Coffin–Manson–Basquin

INTRODUCCIÓN

La fatiga mecánica es el proceso de daño progresivo que conduce a la fractura de materiales sometidos a cargas cíclicas repetidas. La comprensión de este fenómeno es fundamental para predecir y prevenir fallas estructurales, garantizando la seguridad, confiabilidad y eficiencia de componentes estructurales y mecánicos. La falla por fatiga ocurre incluso cuando los esfuerzos aplicados se encuentran por debajo del límite elástico del material, generando daño acumulativo que conduce a la iniciación, propagación y fractura final [1], [2], [3], [4].

A pesar de los avances en el estudio de la fatiga, la caracterización experimental del comportamiento cíclico, especialmente bajo condiciones multiaxiales [5], continúa siendo un proceso de elevado costo y duración, limitado frecuentemente por la disponibilidad de equipo especializado para la obtención de datos experimentales confiables [6], [7]. Esta limitación es particularmente relevante en materiales de uso industrial donde los datos de fatiga son escasos o inexistentes, lo que ha motivado el desarrollo de métodos de estimación basados en propiedades mecánicas más accesibles [8].

La literatura reciente confirma que, si bien existen numerosos modelos empíricos y semiempíricos para estimar propiedades cíclicas a partir de propiedades monotónicas, su desempeño resulta altamente sensible al tipo de acero analizado, sin que exista un modelo universal superior [9], [10]. Con el fin de reducir la dependencia de ensayos experimentales, se han desarrollado diversos modelos empíricos y semiempíricos, entre los que se encuentran los propuestos por Morrow [11], Manson y Murray [12], Raske y Morrow [13], Socie et al. [14], Muralidharan - Manson [15], Park y Song [16], Ong [17] y Roessle y Fatemi [18], que constituyen fuentes originales de cada modelo evaluado, además se citan con fines de trazabilidad metodológica, así como el modelo de Meggiolaro y Castro, ampliamente utilizados en la literatura para aproximar los parámetros en fatiga de los modelos esfuerzo-vida y deformación-vida [19].

De manera complementaria, estudios recientes han explorado enfoques basados en redes neuronales artificiales para la estimación de propiedades cíclicas a partir de monotónicas [20], [21], lo que evidencia la vigencia actual de esta línea de investigación.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es proponer y evaluar comparativamente un modelo para la estimación de los parámetros del modelo deformación – vida de Coffin – Manson – Basquin (σ_f , b , ϵ_f y c) a partir de propiedades monotónicas, fundamentado en la relación directa entre la durabilidad y el límite de fatiga como puntos característicos de la curva S – N, con el fin de disponer de una herramienta confiable para materiales con información experimental de fatiga limitada, como el acero inoxidable martensítico AISI 410.

No obstante, la capacidad predictiva de estos modelos presenta una variabilidad significativa, ya que sus formulaciones dependen de hipótesis simplificadas y ajustes empíricos obtenidos a partir de bases de datos experimentales limitadas en términos de composición y condiciones de ensayo.

Como consecuencia, su precisión puede verse afectada por factores como la microestructura, la dureza, el acabado superficial y las condiciones de carga, lo que restringe su aplicabilidad y ocasiona discrepancias considerables respecto a datos experimentales [16], [18]. Bajo este contexto, persiste la necesidad de establecer metodologías sistemáticas que permitan evaluar la confiabilidad de estos modelos y seleccionar aquellos que proporcionen estimaciones más precisas, particularmente en materiales con información experimental limitada.

Este problema es especialmente relevante para el acero inoxidable martensítico AISI 410, ampliamente utilizado en aplicaciones industriales —específicamente en álabes de turbinas de vapor— debido a su resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, pero cuya caracterización a fatiga es aún insuficiente [8], [22], [23], [24] [25], como lo confirman estudios recientes que muestran que ningún método convencional de estimación ofrece una precisión uniforme superior para todos los tipos de acero [9].

Disponer de un modelo matemático confiable resulta, por tanto, fundamental no solo para reducir costos y tiempos asociados a la caracterización experimental, sino para sustentar decisiones de diseño en componentes críticos, donde dicha información experimental es escasa.

En respuesta a esta necesidad, el presente trabajo propone un modelo para la estimación de parámetros de

fatiga a partir de propiedades monotónicas, basado en la relación directa entre la durabilidad y el límite de fatiga como puntos característicos de la curva S–N. La propuesta se fundamenta en un enfoque preliminar desarrollado en un trabajo de tesis previo de los autores [23], el cual se formaliza y valida en el presente estudio mediante una evaluación comparativa frente a nueve modelos clásicos reportados en la literatura, empleando los aceros AISI 4340, A538B, SAE 4142 y SAE 9262 como referencia experimental.

El modelo se aplica posteriormente al acero AISI 410, proporcionando una herramienta práctica para la predicción del comportamiento a fatiga en ausencia de datos experimentales y facilitando su implementación en simulaciones numéricas y diseño de componentes de ingeniería [26] [27].

METODOLOGÍA

El presente trabajo propone una metodología de evaluación comparativa para la estimación de parámetros de fatiga a partir de propiedades monotónicas del material, cuyo objetivo principal es validar la capacidad predictiva del modelo propuesto en este trabajo frente a otros modelos empíricos clásicos reportados en la literatura.

Este enfoque comparativo responde a la recomendación de estudios recientes, los cuales evidencian que la exactitud de los modelos de estimación de parámetros de fatiga depende fuertemente del material analizado y que ningún modelo resulta universalmente preciso, por lo que su validación sistemática frente a un conjunto amplio de modelos clásicos constituye una práctica metodológica necesaria [9], [10].

La metodología se estructura en dos etapas: en la primera se evalúan distintos modelos utilizando aceros con propiedades cíclicas experimentales conocidas; en la segunda, el modelo con mejor desempeño se emplea para estimar las propiedades en fatiga del acero AISI 410.

Modelo teórico

La estimación de las propiedades cíclicas se fundamenta en el modelo deformación-vida de Coffin–Manson–Basquin, ecuación (1), el cual establece que la deformación total cíclica es la suma de sus componentes elástica y plástica, bajo condiciones de carga uniaxial y temperatura ambiente.

$$\frac{\varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (1)$$

La región de altos ciclos se describe mediante la relación de Basquin, ecuación (2), mientras que la región de bajos

ciclos se representa a través de la ecuación de Coffin–Manson, ecuación (3).

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

La combinación de ambas expresiones permite obtener los parámetros fundamentales de fatiga: σ'_f , b , ϵ'_f y c .

Selección de modelos de estimación

Para la evaluación comparativa se seleccionaron nueve modelos ampliamente utilizados en la literatura para la estimación de propiedades cíclicas a partir de propiedades monotónicas, incluyendo los enfoques de Morrow [11], Manson y Murray [12], Raske y Morrow [13], Socie et al. [14], Muralidharan – Manson [15], Park y Song [16], Ong [17], Roessle y Fatemi [18], el Método de las medianas [19] y el modelo propuesto [23] en este trabajo, tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelos empíricos utilizados para la estimación de parámetros en fatiga.

Ref.	Modelo	σ'_f	ϵ'_f	b	c
[11]	Método de Morrow	σ_f	ϵ_f	$\frac{-n'}{1 + 5 * n'}$	$\frac{-1}{1 + 5 * n'}$
[12]	Pendiente universal de Manson y Murray	$1.9 * S_u$	$0.76 \left[\epsilon'_f = \ln \left(\frac{1}{1 - RA} \right) \right]^{0.6}$	-0.12	-0.6
[13]	Método de Raske – Morrow	$\sigma'_f = \sigma_f$	$0.002 \left(\frac{\sigma'_f}{S'_Y} \right)^{1/n'}$	Valor max - 0.12 Valor min - 0.05	$-0.5 \leq c \leq -0.7$
[14]	Método de Socie et al (Mitchell)	$S_u + 345 MPa$	$\epsilon'_f = \epsilon_f$ $\epsilon_f \cong 1 \quad \epsilon'_f = \ln \left(\frac{1}{1 - RA} \right)$	$-\frac{1}{6} \log \left(\frac{2 * \sigma'_f}{S_u} \right)$	$\epsilon_f \cong 1 \quad -0.6 ("ductile")$ $\epsilon_f \cong 0.5 \quad -0.5 ("strong")$
[15]	Muralidharan - Manson	$0.623E \left(\frac{S_u}{E} \right)^{0.832}$	$0.0196 \left(\ln \left(\frac{1}{1 - RA} \right) \right)^{0.155} \left(\frac{S_u}{E} \right)^{-0.53}$	-0.09	-0.56
[16]	Park y Song	$1.5 * \frac{S_u}{E}$	$0.59\varphi; \text{if } \frac{S_u}{E} \leq 0.003, \varphi=1; \text{O if } \frac{S_u}{E} > 0.003, \varphi = \left(1.375 - 125 \frac{S_u}{E} \right)$	-0.087	-0.58
[17]	Cuatro puntos modificados por Ong	σ_f	$\epsilon'_f = \ln \left(\frac{1}{1 - RA} \right)$	$\frac{1}{6} \log \left(\frac{\left(\frac{S_u}{E} \right)^{0.81}}{6.25 \frac{\sigma_f}{E}} \right)$	$\frac{1}{4} \log \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2 * \epsilon'_f} \right)$
[18]	Método de Roessle – Fatemi	$(4.25 * HB + 225) MPa$	$\frac{[0.32 * HB^2 - 487 * HB + 191000]}{E}$	-0.09	-0.56
[19]	Meggiolaro y Castro	$1.5 * S_u$	0.45	-0.09	-0.59
[23]	Modelo Propuesto	$S_u + 345 MPa$	$\epsilon'_f = \ln \left(\frac{1}{1 - RA} \right)$	a) $b = -\frac{1}{3} \log_{10} \left(\frac{S_f}{S_e} \right)$ b) $b = -\frac{1}{3} \log_{10} \left(\frac{f S_u}{S_e} \right)$ c) $b = -\frac{\log_{10} \left(\frac{\sigma'_f}{S_e} \right)}{\log_{10} (2N_e)}$ d) $b = \frac{-n'}{1 + 5n'}$	$c = \frac{-1}{1 + 5n'}$

Fuente: elaboración propia con base en las referencias citadas.

Para el caso de Raske y Morrow [13], se observa que el exponente b puede tomar valores entre -0.05 y -0.12; este trabajo utiliza un valor central de -0.0851, no de forma empírica sino sustentada por la ecuación 6, criterio consistente que no reporta la literatura [19], pero si la literatura clásica [13].

Datos de entrada

Las propiedades monotónicas empleadas como variables de entrada incluyen el esfuerzo último (σ_u), el esfuerzo de fluencia (σ_y), el módulo de elasticidad (E), la reducción de área (RA) y la dureza (HB). Los valores correspondientes a los aceros de referencia AISI 4340, A538B, SAE 4142 y SAE 9262 se presentan en la Tabla 2, obtenidos de Ong [17] y Manson y Halford [28]. Las propiedades cíclicas experimentales utilizadas para la validación son presentadas en la Tabla 3, obtenidas de las mismas referencias.

Tabla 2. Propiedades monotónicas de los aceros de referencia.

Material	Ref.	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	E (GPa)	RA (%)	HB
AISI 4340	[17]	1240	1172	195	57	350
A538B	[17]	1860	ND	185	56	460
SAE 4142	[28]	2035	ND	200	20	475
SAE 9262	[28]	1565	ND	200	32	410

Fuente: Ong (1993), Manson (2006).

Tabla 3. Propiedades cíclicas de los aceros de referencia.

Material	Ref.	σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f	c
AISI 4340	[17]	1655	-0.076	0.73	-0.62
A538B	[17]	2135	-0.071	0.80	-0.71
SAE 4142	[28]	2070	-0.082	0.20	-0.77
SAE 9262	[28]	1855	-0.057	0.38	-0.65

Fuente: Ong (1993), Manson (2006).

Procedimiento de cálculo

El procedimiento general aplicado a cada material consistió en: sustituir las propiedades monotónicas en las ecuaciones de cada modelo de la Tabla 1; calcular los parámetros de fatiga σ'_f , b , ϵ'_f y c ; determinar los parámetros auxiliares de durabilidad S_f y límite de fatiga S_e , mediante las ecuaciones (4) y (5); y comparar los resultados con los valores experimentales de la Tabla 3. De manera particular, el modelo propuesto incorpora una formulación basada en dos puntos característicos de la curva S-N de Wöhler: la durabilidad (S_f) a $N_f=10^3$ ciclos y el límite de fatiga (S_e) a $N_e=10^6$ ciclos. Para los aceros de referencia, estos parámetros se calcularon con las

ecuaciones (4) y (5) a partir de sus propiedades cíclicas experimentales (Tabla 3).

$$S_f = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (4)$$

$$S_e = \sigma'_f (2N_e)^b \quad (5)$$

Estos valores no corresponden a las convenciones establecidas en la literatura. Sin embargo, son una alternativa mostrada en esta metodología. En cuanto al exponente de resistencia a la fatiga, dicho valor se determina con la ecuación (6).

$$b = -\frac{\log_{10}\left(\frac{\sigma'_f}{S_e}\right)}{\log_{10}(2N_e)} \quad (6)$$

Cabe destacar, que el mismo resultado se obtiene con las ecuaciones del modelo propuesto para los incisos a, b y d usando las ecuaciones (4) y (5). Por otro lado, el coeficiente de resistencia a la fatiga, el coeficiente de ductilidad a la fatiga y el exponente de ductilidad se obtienen respectivamente mediante las ecuaciones (7), (8) y (9):

$$\sigma'_f = S_u + 345 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\epsilon'_f = \ln\left(\frac{1}{1-RA}\right) \quad (8)$$

$$c = \frac{-1}{1+5 \cdot n'} \quad (9)$$

Para el cálculo del exponente c de la ecuación (9), se requiere previamente el exponente de endurecimiento cíclico n' , despejado de la ecuación (10):

$$b = \frac{-n'}{1+5n'} \quad (10)$$

Donde b se determinó previamente con la ecuación (6). Adicionalmente, las ecuaciones (11) y (12) permiten calcular el coeficiente y el exponente de resistencia cíclica.

$$k' = \frac{\sigma'_f}{(\epsilon'_f)^{b/c}} \quad (11)$$

$$n' = \frac{b}{c} \quad (12)$$

Tabla 4. Parámetros cíclicos derivados y puntos característicos de la curva S – N de los aceros de referencia.

Material	k (MPa)	n	S_f (MPa)	S_e (MPa)
AISI 4340	1720.1	0.123	928.79	549.44
A538B	2183.2	0.100	1244.6	762.12
SAE 4142	2457.0	0.106	1109.9	629.92
SAE 9262	2019.3	0.088	1202.8	811.31

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4 proporciona las magnitudes de S_f y S_e , dichos parámetros permiten calcular de forma más precisa el exponente de resistencia a la fatiga haciendo uso de la ecuación b de la referencia [23] de la Tabla 1.

Este procedimiento permite determinar de forma completa los cuatro parámetros del modelo Coffin–Manson–Basquin, exclusivamente con propiedades monotónicas. Adicionalmente, se pueden obtener dos propiedades cíclicas en función de los 4 parámetros del modelo Coffin – Manso – Basquin, tal como se aprecia en la Tabla 4.

Las ecuaciones (4) a (12) para el cálculo de los parámetros de fatiga de los diez modelos junto con la evaluación del error (ecuaciones 13 a 15) se realizaron con Microsoft Excel, versión 2408. La construcción de la curva S – N estimada para el acero AISI 410 Figura (1) se generó utilizando MATLAB R2024b.

Criterio de evaluación y validación

El análisis de los resultados se realizó mediante una técnica de evaluación comparativa basada en estadística descriptiva de los errores de estimación. En primer lugar, se calculó el error relativo porcentual (ecuación 13) entre cada valor estimado y su referencia experimental para los cuatro parámetros en fatiga (σ_f , b , ϵ_f y c) y los cuatro aceros de validación.

$$Error(\%) = \left| \frac{X_{exp} - X_{pred}}{X_{exp}} \right| * 100 \quad (13)$$

Posteriormente, se obtuvieron el error promedio (ecuación 14) y la desviación estándar (ecuación 15) de dichos errores para cada modelo, lo que permitió construir una jerarquización (ranking) de los diez modelos evaluados según su exactitud (menor error promedio) y su estabilidad (menor desviación estándar) frente a los distintos materiales.

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i| \quad (14)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} \quad (15)$$

Esta metodología de análisis comparativo es coherente con estudios recientes que emplean criterios estadísticos similares para clasificar el desempeño de métodos de estimación de propiedades cíclicas [10].

RESULTADOS

Comparación de parámetros en fatiga

A fin de analizar la capacidad predictiva de los modelos descritos en la Tabla 1, se estimaron los parámetros de fatiga σ_f , b , ϵ_f y c para los aceros AISI 4340, A538B, SAE 4142 y SAE 9262 empleando las ecuaciones presentadas en la metodología. Las Tablas 5, 6, 7 y 8 presentan los valores estimados, expresados en unidades consistentes con la Tabla 3 para facilitar la comparación directa con los valores experimentales.

Los modelos cuyos valores aparecen como “----” corresponden a aquellos que requieren propiedades monotónicas no disponibles en el conjunto de datos empleado, principalmente el esfuerzo de fluencia σ_y o el esfuerzo real de fractura σ_f . Asimismo, los valores del modelo de Park y Song [16] en la Tabla 5 se expresan en magnitudes reducidas porque su formulación define el coeficiente σ_f como una fracción del módulo de elasticidad (S_u/E), por lo que estos valores deben interpretarse en términos de deformación elástica relativa, no de esfuerzo absoluto.

Tabla 5. Estimación del coeficiente de resistencia a la fatiga σ_f (MPa).

No.	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Valor experimental	1655	2135	2070	1855
2	Morrow [11]	----	----	----	----
3	Manson y Murray [12]	2356	3534	3866.5	2973.5
4	Raske – Morrow [13]	----	----	----	----
5	Socie et al [14]	1585	2205	2380	1910
6	Muralidharan – Manson [15]	1806.3	2509.62	2740.23	2202.4
7	Park y Song [16] *	9.53846E-03	1.50811E-02	1.52625E-02	1.17375E-02
8	Ong [17]	----	----	----	----
9	Roessle y Fatemi [18]	1712.5	2180	2243.75	1967.5
10	Meggiolaro y Castro [19]	1860	2790	3052.5	2347.5
11	Modelo Propuesto [23]	1585	2205	2380	1910

* Los valores del modelo de Park y Song [16] se expresan como fracción adimensional ($1.5 \cdot S_u/E$).

---- Dato no disponible por falta de propiedades monotónicas requeridas por el modelo. Ver explicación en el texto.

Tabla 6. Estimación del exponente de resistencia a la fatiga b

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Valor experimental	-0.0760	-0.0710	-0.0820	-0.0570
2	Morrow [11]	-0.0760	-0.0667	-0.0695	-0.0610
3	Manson y Murray [12]	-0.1200	-0.1200	-0.1200	-0.1200
4	Raske – Morrow [13]	-0.0850	-0.0850	-0.0850	-0.0850
5	Socie et al [14]	-0.0679	-0.0625	-0.0615	-0.0646
6	Muralidharan – Manson [15]	-0.0900	-0.0900	-0.0900	-0.0900
7	Park y Song [16]	-0.0870	-0.0870	-0.0870	-0.0870
8	Ong [17]	----	----	----	----
9	Roessle y Fatemi [18]	-0.0900	-0.0900	-0.0900	-0.0900
10	Meggiolaro y Castro [19]	-0.0900	-0.0900	-0.0900	-0.0900
11	Modelo Propuesto [23]	-0.0730	-0.0732	-0.0916	-0.0590

---- Dato no disponible por falta de propiedades monotónicas requeridas por el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Estimación del coeficiente de ductilidad a la fatiga ϵ_f

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Valor experimental	0.7300	0.8000	0.2000	0.3800
2	Morrow [11]	----	----	----	----
3	Manson y Murray [12]	0.6865	0.6752	0.3090	0.4291
4	Raske – Morrow [13]	----	----	----	----
5	Socie et al [14]	----	----	----	----
6	Muralidharan – Manson [15]	0.2786	0.2176	0.1767	0.2211
7	Park y Song [16]	0.3423	0.0698	0.0608	0.2342
8	Ong [17]	0.8440	0.8210	0.2231	0.3857
9	Roessle y Fatemi [18]	0.9795	1.0324	0.9550	0.9550
10	Meggiolaro y Castro [19]	0.4500	0.4500	0.4500	0.4500
11	Modelo Propuesto [23]	0.8440	0.8210	0.2231	0.3857

---- Dato no disponible por falta de propiedades monotónicas requeridas por el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Estimación del exponente de ductilidad a la fatiga c

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Valor experimental	-0.6200	-0.7100	-0.7700	-0.6500
2	Morrow [11]	-0.6200	-0.6667	-0.6525	-0.6952
3	Manson y Murray [12]	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000
4	Raske – Morrow [13]	-0.6000	-0.6000	-0.6000	-0.6000
5	Socie et al [14]	-0.5000	-0.5000	-0.5000	-0.5000
6	Muralidharan – Manson [15]	-0.5600	-0.5600	-0.5600	-0.5600
7	Park y Song [16]	-0.5800	-0.5800	-0.5800	-0.5800
8	Ong [17]	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	Roessle y Fatemi [18]	-0.5600	-0.5600	-0.5600	-0.5600
10	Meggiolaro y Castro [19]	-0.5900	-0.5900	-0.5900	-0.5900
11	Modelo Propuesto [23]	-0.6349	-0.6339	-0.5419	-0.7049

---- Dato no disponible por falta de propiedades monotónicas requeridas por el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores resaltados en negrita corresponden a los modelos que presentan menor desviación respecto a los valores experimentales para cada acero. En la Tabla 5, los modelos de Socie et al. [14], Roessle y Fatemi [18] y el modelo propuesto [23] presentan las mejores aproximaciones al coeficiente de resistencia a la fatiga σ_f . Para el exponente de resistencia a la fatiga b (Tabla 6), los modelos de Morrow [11] y el modelo propuesto [23] muestran las menores discrepancias. Para el coeficiente de ductilidad a la fatiga e_f' (Tabla 7), destacan los modelos de Manson y Murray [12], Ong [17] y el modelo propuesto [23]. Finalmente, el exponente de ductilidad a la fatiga c

(Tabla 8), destaca a los modelos de Morrow [11] y el modelo propuesto [23] por sus mejores ajustes.

Evaluación del error relativo

Con el objetivo de cuantificar la precisión de cada modelo, se calculó el error relativo porcentual entre los valores estimados y experimentales para cada parámetro de fatiga mediante la ecuación (13). Los modelos que no permitieron una estimación válida por falta de datos monotónicos se registraron con un error del 100% para mantener la uniformidad del análisis comparativo. Los resultados se presentan en las Tablas 9 a 12.

Tabla 9. Error relativo porcentual del coeficiente de resistencia a la fatiga σ_f'

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Morrow [11]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
2	Manson y Murray [12]	42.36%	65.53%	86.79%	60.30%
3	Raske – Morrow [13]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
4	Socie et al [14]	4.23%	3.28%	14.98%	2.96%
5	Muralidharan – Manson [15]	9.18%	17.55%	32.38%	18.73%
6	Park y Song [16]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
7	Ong [17]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
8	Roessle y Fatemi [18]	3.47%	2.11%	8.39%	6.06%
9	Meggiolaro y Castro [19]	12.39%	30.68%	47.46%	26.55%
10	Modelo Propuesto [23]	4.23%	3.28%	14.98%	2.96%

100% = modelo no aplicable por falta de propiedades monotónicas requeridas o valores físicamente incoherentes.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Error relativo porcentual del exponente de resistencia a la fatiga b

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Morrow [11]	0.00%	6.10%	15.25%	6.95%
2	Manson y Murray [12]	57.89%	69.01%	46.34%	110.53%
3	Raske – Morrow [13]	11.84%	19.72%	3.66%	49.12%
4	Socie et al [14]	10.61%	11.99%	24.99%	13.32%
5	Muralidharan – Manson [15]	18.42%	26.76%	9.76%	57.89%
6	Park y Song [16]	14.47%	22.54%	6.10%	52.63%
7	Ong [17]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
8	Roessle y Fatemi [18]	18.42%	26.76%	9.76%	57.89%
9	Meggiolaro y Castro [19]	18.42%	26.76%	9.76%	57.89%
10	Modelo Propuesto [23]	3.92%	3.13%	11.73%	3.53%

100% = modelo no applicable por falta de propiedades monotónicas requeridas o valores físicamente incoherentes.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Error relativo porcentual del coeficiente de ductilidad a la fatiga ϵ_f

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Morrow [11]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
2	Manson y Murray [12]	5.97%	15.60%	54.50%	12.92%
3	Raske – Morrow [13]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
4	Socie et al [14]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
5	Muralidharan – Manson [15]	61.83%	72.80%	11.64%	41.82%
6	Park y Song [16]	53.11%	91.28%	69.58%	38.38%
7	Ong [17]	15.61%	2.62%	11.57%	1.49%
8	Roessle y Fatemi [18]	34.18%	29.05%	377.50%	151.32%
9	Meggiolaro y Castro [19]	38.36%	43.75%	125.00%	18.42%
10	Modelo Propuesto [23]	15.61%	2.62%	11.57%	1.49%

100% = modelo no applicable por falta de propiedades monotónicas requeridas o valores físicamente incoherentes.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Error relativo porcentual del exponente de ductilidad a la fatiga c

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Morrow [11]	0.00%	6.10%	15.25%	6.95%
2	Manson y Murray [12]	3.23%	15.49%	22.08%	7.69%
3	Raske – Morrow [13]	3.23%	15.49%	22.08%	7.69%
4	Socie et al [14]	19.35%	29.58%	35.06%	23.08%
5	Muralidharan – Manson [15]	9.68%	21.13%	27.27%	13.85%
6	Park y Song [16]	6.45%	18.31%	24.68%	10.77%
7	Ong [17]	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
8	Roessle y Fatemi [18]	9.68%	21.13%	27.27%	13.85%
9	Meggiolaro y Castro [19]	4.84%	16.90%	23.38%	9.23%
10	Modelo Propuesto [23]	2.40%	10.72%	29.62%	8.45%

100% = modelo no aplicable por falta de propiedades monotónicas requeridas o valores físicamente incoherentes.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los modelos tradicionales presentan una dispersión considerable en la estimación de los parámetros de fatiga, con errores que oscilan entre 0% (mejor ajuste) y 100% (falta de información) dependiendo del parámetro y material analizado.

Los menores errores relativos para el coeficiente de resistencia σ_f se observan en la Tabla 9 para los modelos de Socie et al. [14], Roessle y Fatemi [18] y el modelo propuesto [23] para los 4 aceros. La Tabla 10, destaca con un mejor ajuste a Morrow [11] y el modelo propuesto [23], para el exponente b para todos los aceros. Por otro lado, la Tabla 11 propone como mejores modelos a Manson y Murray [12], Ong [17] y el modelo propuesto [23] para los

aceros AISI 4340 y A538B del coeficiente ϵ_f . Finalmente, la Tabla 12 detalla a los modelos de Morrow [11] y el modelo propuesto [23] con el mejor ajuste para el exponente c.

Desempeño del modelo propuesto

El análisis comparativo de los cuatro parámetros de fatiga mediante la desviación estándar (Tabla 13) y el error promedio (Tabla 14) permite identificar el rango de aplicabilidad de cada modelo según las propiedades mecánicas del material evaluado.

Tabla 13. Desviación estándar de los cuatro parámetros de fatiga

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Morrow [11]	0.5774	0.5806	0.5972	0.5815
2	Manson y Murray [12]	0.2916	0.4182	0.4751	0.5288
3	Raske – Morrow [13]	0.5562	0.5900	0.6518	0.5151
4	Socie et al [14]	0.5354	0.5793	0.5932	0.5501
5	Muralidharan – Manson [15]	0.3079	0.4047	0.2939	0.3214
6	Park y Song [16]	0.4698	0.5760	0.5887	0.4602
7	Ong [17]	1.1091	1.1162	1.1109	1.1169
8	Roessle y Fatemi [18]	0.1974	0.2658	1.9169	0.7422
9	Meggiolaro y Castro [19]	0.1804	0.2809	0.6521	0.2813
10	Modelo Propuesto [23]	0.0763	0.0925	0.2728	0.0744

Valores resaltados en negrita indican el menor valor de desviación estándar por el material. El modelo propuesto presenta el mejor desempeño para todos los aceros.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Error promedio de los cuatro parámetros de fatiga

No	Referencia	AISI 4340	A538B	SAE 4142	SAE 9262
1	Morrow [11]	50.00%	53.05%	57.63%	53.48%
2	Manson y Murray [12]	27.36%	41.41%	52.43%	47.86%
3	Raske – Morrow [13]	53.77%	58.80%	56.43%	64.20%
4	Socie et al [14]	33.55%	36.21%	43.76%	34.84%
5	Muralidharan – Manson [15]	24.78%	34.56%	20.26%	33.07%
6	Park y Song [16]	43.51%	58.03%	50.09%	50.45%
7	Ong [17]	78.90%	75.66%	77.89%	75.37%
8	Roessle y Fatemi [18]	16.44%	19.76%	105.73%	57.28%
9	Meggiolaro y Castro [19]	18.50%	29.52%	51.40%	28.02%
10	Modelo Propuesto [23]	6.54%	4.94%	16.97%	4.11%

Valores resaltados en negrita indican el menor error promedio. El modelo propuesto presenta el mejor desempeño para todos los aceros.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo propuesto presentó el menor error promedio y la menor desviación estándar para los aceros AISI 4340 ($E = 6.54\%$, $s = 0.0763$), A538B ($E = 4.94\%$, $s = 0.0925$), SAE 4142 ($E = 16.97\%$, $s = 0.2728$) y SAE 9262 ($E = 4.11\%$, $s = 0.0744$) caracterizados por propiedades de resistencia mecánica moderada.

Este comportamiento sugiere que el modelo propuesto presenta su mayor capacidad predictiva en aceros con propiedades mecánicas similares a las del acero inoxidable martensítico AISI 410 ($S_u \approx 480$ MPa), condición que justifica su aplicación específica en la estimación de los parámetros de fatiga de este material. La identificación de este rango de aplicabilidad constituye una contribución relevante para la selección informada de modelos de estimación según el tipo de acero analizado.

Aplicación al acero AISI 410

Una vez identificado el rango de aplicabilidad del modelo, este se aplicó al acero AISI 410 utilizando como datos de entrada sus propiedades estáticas, presentadas en la Tabla 15. Los parámetros del modelo Coffin–Manson–Basquin se estimaron a partir de los puntos característicos de la curva S–N de Wöhler, definidos por la durabilidad $S_f = 0.9 \cdot S_u$ y el límite de fatiga $S_e = 0.5 \cdot S_u$. La ecuación 16 permite calcular los factores f (0.9 y 0.5) en función de N_f y N_e .

$$f_{f,e} = \frac{\sigma'_f}{S_u} (2N_{f,e})^b \quad (16)$$

Tabla 15. Propiedades estáticas del acero AISI 410

Propiedad estática	Símbolo	AISI 410
Esfuerzo de fluencia (MPa)	S_y	275
Esfuerzo último (MPa)	S_u	480
Módulo de Elasticidad (GPa)	E	200
Reducción de área (%)	RA	45
Dureza	HB	223
Densidad (kg/m ³)	ρ	7800 - 7850

Fuente: Zhang et al. (2019) y Adinoyi et al. (2019).

Los parámetros cíclicos estimados para el acero AISI 410 se detallan en la Tabla 16. Donde la durabilidad ($S_f = 432$ MPa) y el límite de fatiga ($S_e = 240$ MPa) se calcularon en función de un factor f , dichos puntos ayudan a calcular los puntos inicial y final de la curva S–N de Wöhler.

Tabla 16. Propiedades cíclicas del acero AISI 410

Propiedad cíclica	Símbolo	AISI 410
Coefficiente de resistencia a la fatiga	σ'_f	825 MPa
Exponente de resistencia a la fatiga	b	-0.0851
Coefficiente de ductilidad a la fatiga	ϵ'_f	0.5978
Exponente de ductilidad a la fatiga	c	-0.5745
Coefficiente de resistencia cíclica	k'	889.7 MPa
Exponente de deformación cíclica	n'	0.1481
*Durabilidad a la fatiga	S_f	432 MPa
Factor de durabilidad a la fatiga	f_f	0.9
*Límite de fatiga	S_e	240 MPa
Factor de límite de fatiga	f_e	0.5

* S_f y S_e corresponden a los puntos inicial y final de la curva S - N de Wöhler, calculados con las ecuaciones (4) y (5).

Fuente: Elaboración propia.

Los valores estimados muestran una tendencia coherente con el comportamiento esperado para aceros inoxidables martensíticos, caracterizados por una transición definida entre las regiones de bajo y alto número de ciclos. La curva S–N resultante (Figura 1) permite visualizar el

comportamiento a fatiga estimado del material, constituyendo una aproximación útil para su implementación en simulaciones numéricas y herramientas de elementos finitos.

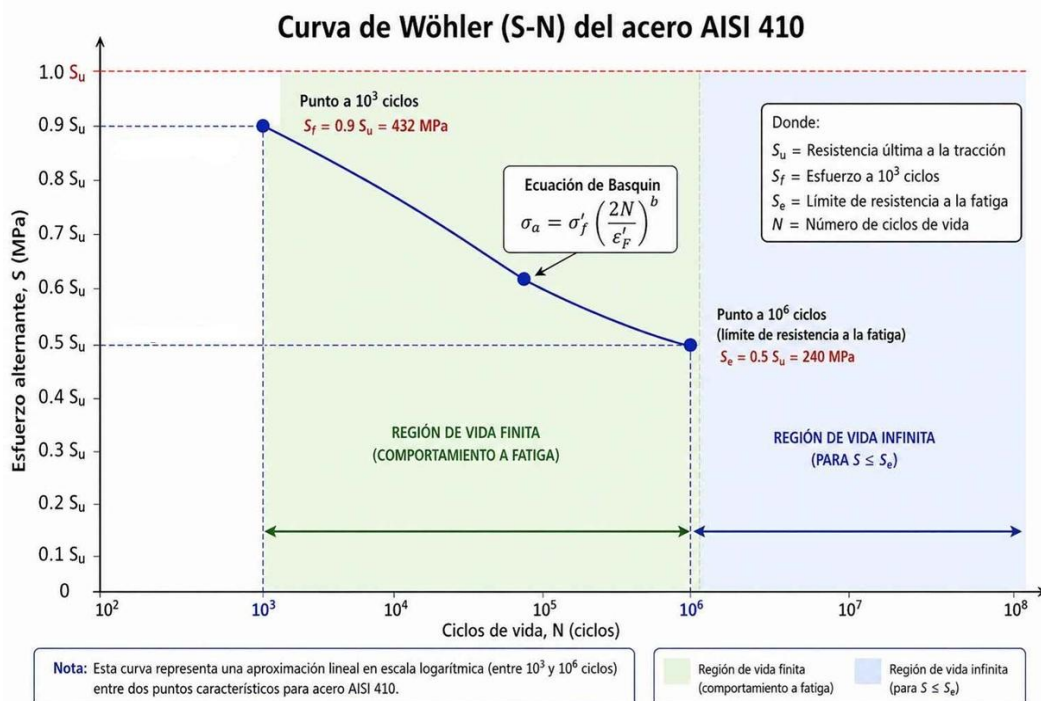


Figura 1. Curva S – N estimada del acero AISI 410 mediante el modelo propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Como se planteó desde la introducción y se confirma con los datos obtenidos (Tablas 9 - 12), ningún modelo evaluado ofreció consistentemente los menores errores, lo que justificó explorar un enfoque adicional en lugar de adoptar directamente uno de los modelos clásicos.

Los resultados obtenidos evidencian diferencias importantes en la capacidad predictiva de los modelos analizados para estimar los parámetros del modelo deformación-vida de Coffin–Manson–Basquin. Las mayores discrepancias se concentraron en los exponentes b y c , con errores que oscilaron entre 0% y 100% según el modelo y material analizado. Este comportamiento confirma la elevada sensibilidad de dichos parámetros a las formulaciones empíricas empleadas para vincular las propiedades monotónicas con las propiedades cíclicas del material.

La variabilidad observada en los modelos tradicionales puede atribuirse a que sus formulaciones fueron desarrolladas a partir de bases de datos experimentales específicas, limitando su capacidad de generalización

cuando se aplican a materiales con propiedades mecánicas diferentes a las del conjunto original de calibración. Adicionalmente, varios de estos enfoques establecen relaciones indirectas entre propiedades monotónicas y parámetros cíclicos, favoreciendo la propagación de errores durante el proceso de estimación. Este efecto resulta particularmente crítico en la predicción de los exponentes de fatiga, ya que pequeñas variaciones en estos parámetros modifican significativamente la pendiente de la curva deformación-vida y, en consecuencia, la predicción de vida útil del material.

El análisis comparativo mediante el error promedio y la desviación estándar, calculados mediante las ecuaciones (14) y (15) respectivamente, permitió identificar el rango específico de aplicabilidad de cada modelo según las propiedades mecánicas del material evaluado. El modelo propuesto presentó los siguientes errores promedio (6.54%, 4.94%, 16.97% y 4.11%) y las siguientes desviaciones estándar (0.0763, 0.0925, 0.2728 y 0.0744) para los aceros AISI 4340, A538B, SAE 4142 y SAE 9262, materiales caracterizados por propiedades de resistencia moderada (S_u entre 1240 y 1860 MPa).

Esta diferenciación sugiere que la elección del modelo debe realizarse en función de las propiedades mecánicas del material objetivo, en lugar de adoptar un enfoque universal. El mejor desempeño del modelo propuesto en los aceros de mayor ductilidad es consistente con la hipótesis de partida, anclar los parámetros del modelo a valores derivados directamente de la curva S – N limita la propagación de incertidumbre que sí afecta a los modelos apoyados en correlaciones indirectas, siempre que las propiedades monotónicas del material se encuentren dentro del rango para el cual las relaciones definidas en las ecuaciones (4) y (5) mantienen validez. Esta condición se satisface en los aceros de mayor ductilidad del conjunto de validación y también en el acero AISI 410, cuya reducción de área (45 %) se sitúa dentro de ese intervalo. La aplicación del modelo al acero AISI 410 permitió estimar los parámetros de fatiga necesarios para la construcción de la curva S–N en ausencia de información experimental específica (Figura 1). Los resultados obtenidos muestran una tendencia coherente con el comportamiento esperado para aceros inoxidables martensíticos, caracterizados por una transición definida entre las regiones de bajo y alto número de ciclos.

Los parámetros estimados ($\sigma_f' = 825$ MPa, $b = -0.0851$, $\epsilon_f' = 0.5978$, $c = -0.5745$, $k = 889.7$ MPa y $n' = 0.1481$) presentan diferencias respecto a los reportados por [24], atribuibles a que dichas condiciones de carga son multiaxiales (tensión – torsión). Esta diferencia es esperada dadas las distintas condiciones de carga y no invalida el uso del modelo como herramienta preliminar viable para la caracterización a fatiga de materiales con disponibilidad limitada de información experimental.

Desde el punto de vista ingenieril, la metodología propuesta representa una alternativa práctica para la estimación de propiedades de fatiga a partir de propiedades monotónicas, reduciendo la dependencia de probetas experimentales. Asimismo, los parámetros obtenidos pueden implementarse directamente en modelos numéricos de fatiga utilizados en herramientas de elementos finitos [27], facilitando la evaluación de vida útil en componentes sometidos a cargas cíclicas, como los álabes de turbinas de vapor donde el acero AISI 410 es ampliamente utilizado [3].

No obstante, el presente estudio presenta limitaciones que deben considerarse en su aplicación. En primer lugar, el rango de aplicabilidad del modelo propuesto queda restringido a aceros de resistencia moderada, lo que exige una selección informada del modelo según las propiedades del material objetivo.

Asimismo, el factor de durabilidad (0.9) y el del límite de fatiga (0.5) empleados para estimar S_f y S_e en el acero AISI 410 (Tabla 16) se adoptaron como una aproximación práctica ante la ausencia de propiedades cíclicas experimentales para este material, sin haberse derivado directamente del conjunto de calibración empleado en este trabajo (cuyas razones S_f/S_u y S_e/S_u observadas se ubican, respectivamente, entre 0.545 – 0.769 y 0.310 – 0.518), su validación mediante ensayos experimentales específicos constituye una línea de trabajo futura.

En segundo lugar, no se consideran explícitamente factores como microestructura, tratamientos térmicos, efectos ambientales o condiciones de carga multiaxial, los cuales pueden influir significativamente en el comportamiento a fatiga de los materiales [2], [6]. Futuras investigaciones podrían enfocarse en incorporar estos efectos dentro del modelo y ampliar la validación experimental utilizando materiales con diferentes composiciones, condiciones de operación y tratamientos térmicos.

CONCLUSIONES

Se propuso un modelo para estimar los parámetros del modelo deformación-vida de Coffin-Manson-Basquin (σ_f' , b , ϵ_f' y c) a partir de las propiedades monotónicas. Su base es la durabilidad y el límite de fatiga definidos en las ecuaciones (4) y (5). Se comprobó con nueve modelos clásicos usando como referencia experimental los aceros AISI 4340, A538B, SAE 4142 y SAE 9262, y en los cuatro casos se obtuvo el menor error promedio (6.54%, 4.94% 16.97% y 4.11%) y la menor desviación estándar (0.0763, 0.0925, 0.2728 y 0.0744).

Más allá de su menor error promedio, el trabajo aporta tres elementos que lo distinguen de los modelos reportados en la literatura:

- i. Una formulación que relaciona los parámetros de fatiga directamente con dos puntos físicamente representativos de la curva S-N, la durabilidad y el límite de fatiga. Así se evitan las correlaciones empíricas indirectas en las que se apoyan los modelos clásicos y se limita la propagación de errores, a lo que se atribuye la menor dispersión observada.
- ii. La identificación de un rango de aplicabilidad según la ductilidad y resistencia mecánica del material. Estudios comparativos recientes [9], [10] coinciden en que ningún método convencional resulta preciso para todos los aceros. Saber en qué condiciones funciona mejor cada modelo permite elegirlo con criterio, sin recurrir a una fórmula universal.

iii. Un menor requerimiento de datos de entrada. Bastan el esfuerzo último (S_u), la reducción de área (RA) y los ciclos característicos de la curva S-N. No hacen falta el esfuerzo de fluencia (S_y) ni el esfuerzo real de fractura (σ_f), que rara vez aparecen en las fichas técnicas de materiales industriales. Su ausencia impidió aplicar aquí los modelos de Morrow, Raske-Morrow, Park y Song y Ong (tablas 5 y 7). La capacidad de operar con información mínima es, además, uno de los aspectos que la literatura reciente valora en los métodos de estimación de propiedades da fatiga [29].

Con el modelo validado en los aceros de referencia, el siguiente paso fue aplicarlo al acero inoxidable martensítico AISI 410, del cual no se dispone de información experimental específica, El modelo permitió estimar $\sigma_f = 825$ MPa, $b = -0.0851$, $\varepsilon_f = 0.5978$ y $c = -0.5745$ (tabla 16) y construir su curva S-N. Estos valores difieren de los reportados por Adinoyi et al. [24]. La diferencia se atribuye a que esos ensayos se hicieron bajo carga multiaxial (tensión-torsión), mientras que el modelo supone carga uniaxial.

En la práctica de ingeniería, los parámetros obtenidos pueden incorporarse directamente en simulaciones por elementos finitos [27]. Esto reduce la dependencia de ensayos costosos y facilita evaluar la vida a fatiga de componentes sometidos a cargas cíclicas, como los álabes de turbinas de vapor, donde el AISI 410 es de uso común [3], [30].

Queda pendiente incorporar el efecto de microestructura, los tratamientos térmicos, el medio ambiente y la carga multiaxial, y ampliar la validación experimental, para extender la capacidad predictiva y el rango de aplicación del modelo.

NOMENCLATURA

En la Tabla 17 se resume la nomenclatura empleada en el presente trabajo.

Tabla 17. Nomenclatura.

Símbolo	Descripción
Propiedades monotónicas	
E	Módulo de elasticidad
σ_u	Esfuerzo último de tensión
σ_y	Esfuerzo de fluencia
σ_f	Esfuerzo de fractura real
RA	Reducción de área
HB	Dureza en Brinell
ε_f	Ductilidad a la fractura real
Parámetros cíclicos de fatiga	
σ'_f	Coefficiente de resistencia a la fatiga
b	Exponente de resistencia a la fatiga
ε'_f	Coefficiente de ductilidad a la fatiga
c	Exponente de ductilidad a la fatiga
k'	Coefficiente de resistencia cíclica
n'	Exponente de endurecimiento cíclico
Variables de deformación	
ε_t	Deformación total
ε_e	Deformación elástica
ε_p	Deformación plástica
Puntos característicos de la curva S - N	
S_f	Durabilidad a la fatiga (10^3 ciclos)
S_e	Límite de Fatiga (10^6 ciclos)
f_f	Factor de durabilidad ($S_f = f_f * S_u$)
f_e	Factor de límite de fatiga ($S_e = f_e * S_u$)
N_f	Número de ciclos a la durabilidad 10^3
N_e	Número de ciclos en el límite de fatiga 10^6

Fuente: Elaboración propia.

Referencias

- [1] K. Grönlund, A. Ahola, K. Lipiäinen, T. Pesonen, T. Björk, and M. Moshtaghi, "Fatigue performance of welded joints made of high-strength steel under variable amplitude loading conditions and varying mean stress," *Welding in the World*, vol. 69, no. 8, pp. 2253–2268, Aug. 2025, <https://doi.org/10.1007/s40194-025-01989-5>.
- [2] A. Campagnolo, L. Vecchiato, and G. Meneghetti, "Multiaxial variable amplitude fatigue strength assessment of steel welded joints using the peak stress method," *Int. J. Fatigue*, vol. 163, p. 107089, Oct. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107089>.
- [3] J. A. Rodríguez Ramírez, C. M. Clemente Mirafuentes, M. A. Zalapa Garibay, J. C. García Castrejón, and L. G. Guillén Anaya, "Corrosion Fatigue Analysis in Power Steam Turbine Blade," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 3, p. 544, Mar. 2023, <https://doi.org/10.3390/met13030544>.
- [4] A. Tridello, C. Boursier Niutta, M. Rossetto, F. Berto, and D. S. Paolino, "Fatigue Design Curves for Industrial Applications: A Review," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 48, no. 3, pp. 1001–1021, Mar. 2025, <https://doi.org/10.1111/ffe.14545>.
- [5] P. R. da Costa, H. Soares, L. Reis, and M. Freitas, "Ultrasonic fatigue testing under multiaxial loading on a railway steel," *Int. J. Fatigue*, vol. 136, p. 105581, Jul. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105581>.
- [6] J. Albinmousa, M. J. Adinoyi, and N. Merah, "Multiaxial low-cycle-fatigue of stainless steel 410 alloy under proportional and non-proportional loading," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 192, p. 104393, Aug. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104393>.
- [7] P. Costa *et al.*, "Review of Multiaxial Testing for Very High Cycle Fatigue: From 'Conventional' to Ultrasonic Machines," *Machines*, vol. 8, no. 2, p. 25, May 2020, <https://doi.org/10.3390/machines8020025>.
- [8] R. Motte and W. De Waele, "An Overview of Estimations for the High-Cycle Fatigue Strength of Conventionally Manufactured Steels Based on Other Mechanical Properties," *Metals (Basel)*, vol. 14, no. 1, p. 85, Jan. 2024, <https://doi.org/10.3390/met14010085>.
- [9] R. Basan and T. Marohnić, "A comprehensive evaluation of conventional methods for estimation of fatigue parameters of steels from their monotonic properties," *Int. J. Fatigue*, vol. 183, p. 108244, Jun. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108244>.
- [10] S. Raczek, A. Niesłony, K. Kluger, and T. Łukasik, "Comparison of Fatigue Property Estimation Methods with Physical Test Data," *Metals (Basel)*, vol. 15, no. 7, p. 780, Jul. 2025, <https://doi.org/10.3390/met15070780>.
- [11] B. Jodean Morrow, "Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals," 1965. Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: <https://dl.astm.org/stps/book/1905/chapter-abstract/700505/Cyclic-Plastic-Strain-Energy-and-Fatigue-of-Metals>
- [12] S. S. Manson and W. M. Murray, "Fatigue: A complex subject - some simple approximations." Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19650010514>
- [13] D. T. Raske y J. Morrow., "Mechanics of Materials in Low Cycle Fatigue Testing," American Society for Testing and Materials, 1969. Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: <https://dl.astm.org/stps/book/818/chapter/131108/Mechanics-of-Materials-in-Low-Cycle-Fatigue>
- [14] D. F. Socie, M. R. Mitchell, and E. M. Caulfield, "Fundamentals of modern fatigue analysis," 1977, Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: https://fc.mechse.illinois.edu/files/reports/FCP_Report026.pdf
- [15] S. S. Manson, "A Modified Universal Slopes Equation for Estimation of Fatigue Characteristics of Metals," 1988. Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: <https://asmedigitalcollection.asme.org/materialstechnology/article/110/1/55/385195/A-Modified-Universal-Slopes-Equation-for>
- [16] J.-H. Park and J.-H. Song, "Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties," 1995. Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/014211239599737U>
- [17] J. H. Ong, "An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data Strain-life properties," 1993. Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/014211239390179T>
- [18] M. Roessle, "Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations," *Int. J. Fatigue*, vol. 22, no. 6, pp. 495–511, Jul. 2000, [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00026-8).
- [19] M. A. Meggiolaro and J. T. P. Castro, "Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions," *Int. J. Fatigue*, vol. 26, no. 5, pp. 463–476, May 2004, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.10.003>.
- [20] T. Marohnić, R. Basan, and E. Marković, "Estimation of Cyclic Stress–Strain Curves of Steels Based on Monotonic Properties Using Artificial Neural Networks," *Materials*, vol. 16, no. 14, p. 5010, Jul. 2023, <https://doi.org/10.3390/ma16145010>.
- [21] M. S. Quraishy and T. K. Kundu, "A Comprehensive Study on Fatigue Strength Prediction of a Broad Range of Steels Using Machine Learning," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 34, no. 24, pp. 30146–30160, Dec. 2025, <https://doi.org/10.1007/s11665-025-12006-7>.
- [22] C. O. F. T. Ruchert and M. Carvalho, "Failure analysis of a martensitic stainless steel steam turbine blade," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, no. 7, p. 406, Jul. 2024, <https://doi.org/10.1007/s40430-024-04952-5>.
- [23] T. Catonga A. Fabián, "Estimación de vida útil de un grupo de álabes de una turbina de vapor por el método de algoritmos genéticos," Tesis, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 2019. Accessed: Jun. 02, 2026. [Online]. Available: <http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/2765>
- [24] M. J. Adinoyi, N. Merah, and J. Albinmousa, "Strain-controlled fatigue and fracture of AISI 410 stainless steel," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 106, p. 104166, Dec. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104166>.
- [25] P. Rani and A. K. Agrawal, "Failure Analysis of Steam Turbine Blades: A Comprehensive Review," *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, vol. 13, no. 8, p. 638, Dec. 2025, <https://doi.org/10.1007/s42417-025-02196-8>.
- [26] H. Zhang, Z. Wei, F. Xie, and B. Sun, "Assessment of the Properties of AISI 410 Martensitic Stainless Steel by an Eddy Current Method," *Materials*, vol. 12, no. 8, p. 1290, Apr. 2019, <https://doi.org/10.3390/ma12081290>.
- [27] A. M. Alshoaibi and Y. A. Fageehi, "Advances in Finite Element Modeling of Fatigue Crack Propagation," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 20, p. 9297, Oct. 2024, <https://doi.org/10.3390/app14209297>.
- [28] S. S. Manson and G. R. Halford, *Fatigue and durability of structural materials*. ASM International, 2006. Accessed: Sep. 12, 2026. [Online]. Available: <https://dl.asminternational.org/technical-books/monograph/163/Fatigue-and-Durability-of-Structural-Materials>

- [29] D. V. Srinivasan, M. Moradi, P. Komninos, D. Zarouchas, and A. P. Vassilopoulos, "A generalized machine learning framework to estimate fatigue life across materials with minimal data," *Mater. Des.*, vol. 246, p. 113355, Oct. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113355>.
- [30] Y. Chen, X. Yang, Y. Ai, P. Guan, and W. Zhang, "Fatigue Life Analysis Based on Transition State Parameters of Turbine Blades," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 24, no. 4, pp. 1889–1905, Aug. 2024, <https://doi.org/10.1007/s11668-024-01967-x>.