

Microfisuramiento de las varillas de refuerzo empleadas en la construcción de viviendas informales: Caso de estudio Riobamba

Evelyn Melisa Cabrera Alvarez^{1*}, Teresa del Pilar Sáez Paguay¹, Luisa Paulina Viera Arroba¹

¹Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador.

*Autor para correspondencia/ corresponding author: emcabrera@uce.edu.ec

Microcracking of reinforcing bars used in informal housing construction: Riobamba case study

Resumen

Este trabajo investiga la relación entre el método de doblado de las varillas de refuerzo y la iniciación de microfisuras en aceros de refuerzo empleados en viviendas informales de la ciudad de Riobamba, Ecuador. Se compararon dos técnicas de doblado: el método tradicional y el realizado conforme a la Norma NTE INEN 2167. A partir de encuestas en campo se identificaron los diámetros de varilla y las prácticas de doblado más utilizadas. Se analizaron 20 muestras de varillas de 10 mm y 12 mm de diámetro, incluyendo tramos rectos y varillas dobladas a 180°, mediante ensayos metalográficos y microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados evidencian la ausencia de microfisuras en las muestras sin doblar y en aquellas dobladas con máquina semiautomática, bajo condiciones normativas, mientras que el doblado tradicional genera microfisuras localizadas en la zona interior del doblado, asociadas a concentraciones de esfuerzo en los resaltes longitudinales. El análisis de la longitud acumulada de microfisuras indica que el diámetro de la varilla tiene una influencia significativa en el nivel de microfisuración bajo las condiciones estudiadas. Los hallazgos resaltan la importancia del cumplimiento de los procedimientos normativos de doblado para preservar la ductilidad del acero de refuerzo y mejorar el desempeño de las estructuras de hormigón armado frente a cargas cíclicas en contextos de construcción informal.

Palabras clave: calidad, hormigón, metalografía, microfisuración, microscopía.

Abstract

This study investigates the relationship between the method used to bend reinforcing bars and the initiation of microcracks in reinforcing steel used in informal housing in the city of Riobamba, Ecuador. Two bending techniques were compared: the traditional method and the method carried out in accordance with Standard NTE INEN 2167. Field surveys were used to identify the most commonly used rebar diameters and bending practices. Twenty samples of 10 mm and 12 mm diameter rebars were analyzed, including straight sections and rebars bent at 180°, using metallographic tests and scanning electron microscopy (SEM). The results show the absence of microcracks in the unbent samples and in those bent with a semi-automatic machine under standard conditions, while traditional bending generates microcracks located in the inner area of the bend, associated with stress concentrations in the longitudinal ridges. Analysis



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
21/04/2025

Aceptado /
Accepted:
24/12/2025

Publicado en línea /
Published online:
28/04/2026



of the cumulative length of microcracks indicates that the diameter of the bar has a significant influence on the level of microcracking under the conditions studied. The findings highlight the importance of complying with standard bending procedures to preserve the ductility of reinforcing steel and improve the performance of reinforced concrete structures under cyclic loads in informal construction contexts.

Keywords: quality, concrete, metallography, microcracking, microscopy.

INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica, la informalidad en las construcciones es una práctica habitual en sectores medios y populares, siendo más evidente en las proximidades y periferias de los centros urbanos [1]. En Ecuador, es común observar viviendas que se ejecutan sin supervisión profesional, lo que resulta en un uso inadecuado de técnicas constructivas que aumentan la vulnerabilidad de las edificaciones frente a cargas sísmicas [2]. Entre 2012 y 2022, el país experimentó más de 70 000 sismos con magnitudes superiores a 2, y más de 8 474 viviendas resultaron afectadas por esta causa [3].

Diversos estudios de vulnerabilidad estructural han evidenciado la problemática relacionada con la calidad en el manejo y disposición de las varillas de refuerzo en edificaciones de hormigón armado. Por ejemplo, doblar varillas o estirarlas excesivamente pueden formar puntos débiles [4]. Esto ocurre cuando no se cumple con el diámetro interior mínimo de doblado establecido en el capítulo 25 del Código ACI 318-19, es decir, cuando el diámetro del mandril central alrededor del cual se apoya la varilla es inferior al mínimo exigido, situación que ocurre con el empleo de la estribadera tradicional y el tubo que sirve de palanca para doblar la varilla [5].

La varilla de construcción es una sólida barra redonda fabricada para utilizarse en estructuras de hormigón armado, con resaltes que generan una adherencia mecánica con el hormigón [6]. Sin embargo, estos resaltes salientes, transversales, con un ángulo de inclinación comprendido entre 45° y 90°, constituyen concentradores de esfuerzos o tensiones que podrían ser sitios potenciales de iniciación de fractura [7], por lo que deben considerarse ciertas condiciones durante el proceso de doblado.

El acero de refuerzo puede sufrir mecanismos de falla relacionados con la fatiga de bajo ciclo (LCF) durante los terremotos, cuando es sometido a grandes ciclos de deformación inelástica en tensión y compresión. Este estrés cíclico puede provocar la aparición de microfisuras en los elementos estructurales [8], y con el tiempo, conducir a la fractura de las varillas de refuerzo. Las microfisuras corresponden a la iniciación del daño en un elemento, no detectables a simple vista, y se presentan cuando se ha superado localmente la capacidad resistente del material [9].

Durante el doblado, la varilla se somete a compresión en su parte interior y a tracción en su parte exterior [10]. Este proceso se realiza en frío y no sólo afecta a la dureza del material, sino también al límite elástico, resistencia a la tracción y ductilidad [11, 12, 13, 14].



Para evitar deficiencias estructurales, todo proceso constructivo debe cumplir con las exigencias requeridas por la Norma Ecuatoriana de Construcción, en particular en lo referente al doblado de varillas. Según la Norma NTE INEN 2167, este procedimiento debe realizarse sobre el resalte longitudinal, garantizando un contacto permanente de la varilla alrededor de un mandril de apoyo. No obstante, se evidencia una divergencia entre las especificaciones técnicas y las condiciones reales del proceso de construcción [2]. Esta discrepancia es más evidente en las construcciones informales, donde la ausencia de planos y la falta de supervisión técnica de un profesional conducen al uso de métodos empíricos para el figurado (doblado) de las varillas. Esta práctica es especialmente común en zonas con escaso control por parte de las autoridades competentes, como en las periferias de las ciudades.

En el caso de Riobamba, las zonas de expansión urbana se encuentran delimitadas por los polígonos de interés social, en donde existe un crecimiento desorganizado y sin planificación, ocasionado por asentamientos humanos mayoritariamente irregulares, derivados del tráfico de tierras y la especulación [15].

En el presente estudio, se realizó un levantamiento de datos en los sectores periféricos de Riobamba, utilizando como referencia la proyección estimada de viviendas a construir al segundo trimestre del 2023 en la ciudad de Riobamba, la cual, según información del diario *Primicias*, fue de 315 viviendas [16]. La proliferación de construcciones informales en la ciudad de Riobamba constituye una realidad preocupante, ya que, según datos proporcionados por la Unidad de Avalúos y Catastros, más del 40 % de las construcciones reciben multas o sanciones por no contar con el respectivo permiso de construcción [17]. En este contexto, se tomó dicho porcentaje aplicado a las 315 viviendas, estimándose que aproximadamente 126 viviendas informales fueron construidas en Riobamba durante ese año. A partir de este resultado, y considerando un porcentaje representativo del 52.7 % de edificaciones que emplean hormigón en la región Sierra [18], se estimó una población mínima de 67 viviendas informales construidas con hormigón en los sectores periféricos de la ciudad.

Dado que esta población resultó manejable en términos de tamaño, se la utilizó como base para determinar el tamaño de la muestra. Durante el trabajo de campo, se realizaron encuestas *in situ* a encargados de 69 construcciones de viviendas informales que cumplieran con las condiciones requeridas para el estudio.

Además, para los ensayos metalográficos y de microscopía electrónica de barrido (SEM), el análisis se centró en las varillas de 10 mm y 12 mm, ya que estos diámetros fueron los más representativos según las encuestas realizadas.

En total, se realizaron 20 ensayos metalográficos, distribuidos equitativamente entre varillas de 10 mm y 12 mm, con 10 ensayos por cada diámetro. Estos incluyeron cuatro repeticiones por cada técnica de doblado (tradicional y a máquina), así como dos muestras patrón sin doblado, lo que asegura una representatividad adecuada en la variabilidad del proceso de doblado y la generación de microfisuras. La elección de este número de ensayos, muestreo no probabilístico, estuvo influenciada por las limitaciones económicas relacionadas con el costo de cada uno, obteniendo una adecuada cobertura sin exceder el presupuesto disponible.

El estudio determina la influencia del método de doblado de las varillas de refuerzo utilizadas en la construcción de viviendas informales en los sectores periféricos de Riobamba sobre la formación de microfisuras y, por ende, sobre la calidad del refuerzo estructural. Asimismo, evalúa el efecto del diámetro de las varillas en el nivel de microfisuración observado.

Finalmente, se reconoce como una brecha de investigación la limitada disponibilidad de equipos sofisticados de microscopía en Ecuador, así como la escasa bibliografía sobre estudios relacionados con la calidad de los materiales de construcción locales, lo que refuerza la pertinencia del presente estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

La delimitación georreferenciada de los polígonos de interés social de Riobamba fue proporcionada por el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, a través de la Dirección de Gestión de Ordenamiento Territorial. Esta información permitió identificar los sectores periféricos de la ciudad considerados en el estudio, los cuales se ilustran en la Figura 1.

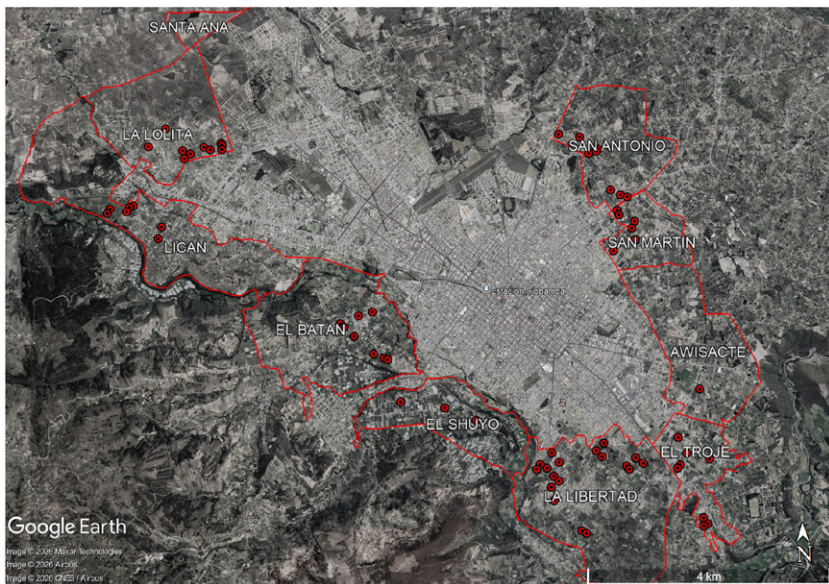


Figura 1. Polígonos de interés social de la ciudad de Riobamba, Chimborazo. Elaboración propia a partir de imágenes de Google Earth (2022). [19]

Debido a que no se dispone de un registro oficial preciso sobre la cantidad de viviendas informales construidas anualmente en esta zona, se utilizó como referencia el 40 % de construcciones que reciben multas o sanciones por no contar con permiso de



construcción en el año 2023 [17]. Con base en esta información, se definió una muestra de 69 encuestas en campo, distribuidas en los barrios que conforman los Polígonos de Interés Social de la ciudad.

Las encuestas fueron validadas mediante las técnicas de “prueba piloto” [20] y “validez de contenido” [21]. Para la “prueba piloto”, se aplicó la encuesta inicial en diez viviendas informales en proceso de construcción ubicadas en barrios periféricos del sur de Quito. La “validez de contenido”, por su parte, se llevó a cabo mediante la revisión de la encuesta por parte de nueve expertos, entre ingenieros civiles y arquitectos de la Universidad Nacional de Chimborazo, el Colegio de Ingenieros Civiles y el Municipio de Riobamba.

Las encuestas finales fueron aplicadas a los encargados de las obras, quienes no contaban con formación profesional en arquitectura o ingeniería civil. El objetivo principal de estas encuestas fue determinar el diámetro de las varillas de construcción y las técnicas de doblado más utilizadas en la práctica constructiva.

Con base en los resultados de las encuestas, se seleccionaron varillas de acero de 10 mm y 12 mm de diámetro para el análisis experimental. Las muestras fueron adquiridas en una distribuidora nacional, asegurando que cada diámetro de probeta proviniera de una única varilla continua. El acero adquirido corresponde a varillas de refuerzo con un límite de fluencia de $F_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ según la normativa nacional vigente.

Para el estudio metalográfico, se realizaron ensayos de acuerdo con la Norma ASTM E3, complementados con observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), conforme a la Norma E1508. Se ejecutaron diez ensayos para cada diámetro de varilla (10 mm y 12 mm), distribuidos en cuatro ensayos por cada técnica de doblado (doblado tradicional y doblado a máquina), además de dos ensayos correspondientes a muestras patrón sin doblado por cada diámetro. En total se realizaron 20 ensayos.

Las probetas fueron cortadas a una longitud de 50 cm, por conveniencia en el proceso de doblado. El análisis se centró exclusivamente en dobleces de 180° , dado que este ángulo corresponde al establecido en la Norma NTE INEN 2167 para las pruebas de doblado de varillas de refuerzo y representa la condición más crítica desde el punto de vista mecánico.

El doblado tradicional se realizó utilizando bancos de doblado de madera empotrados en el piso, equipados con estribaderas conformadas por barras de acero soldadas a una placa metálica, cuya separación determina las dimensiones del estribo, el recubrimiento y el diámetro de la varilla (ver Figuras 2 y 3).



Figura 2. Estribadera utilizada en el doblado tradicional de varillas de acero de 10 mm.



Figura 3. Estribadera utilizada en el doblado tradicional de varillas de acero de 12 mm.

El proceso de doblado tradicional consistió en el corte manual de las varillas mediante una sierra, seguido del doblado realizado por el operario, personal no calificado, utilizando la estribadera y un tubo metálico como palanca. La fuerza aplicada dependió exclusivamente del esfuerzo del operario, por lo que no fue posible controlar ni parametrizar su magnitud.

Todas las probetas sometidas al doblado por el método tradicional fueron realizadas por el mismo operario, sin brindarle instrucciones adicionales, con el fin de reproducir su práctica habitual en obra (Figura 4). En consecuencia, el doblado no se efectuó sobre el resalte longitudinal de la varilla, tal como lo establece la Norma NTE INEN 2167, situación que se ilustra en la Figura 5.



Figura 4. Práctica de doblado tradicional de varillas de acero.

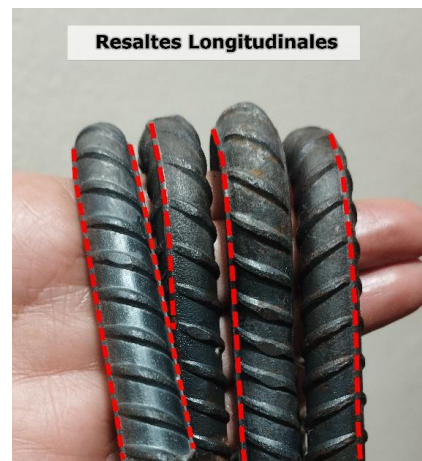


Figura 5. Resaltes longitudinales en varillas dobladas mediante el método tradicional.

Para realizar el doblado de varillas conforme a los parámetros establecidos por la Norma NTE INEN 2167 y el Código ACI 318-19, se empleó una dobladora semiautomática de acero de la marca OFMER (Figura 6). Se seleccionaron los mandriles adecuados para alcanzar los diámetros mínimos especificados en el Código ACI 318-19. En cumplimiento de la Norma NTE INEN 2167, las varillas se alinearon de forma que el doblado se realizara de manera libre, es decir, sobre el resalte longitudinal (Figura 7).

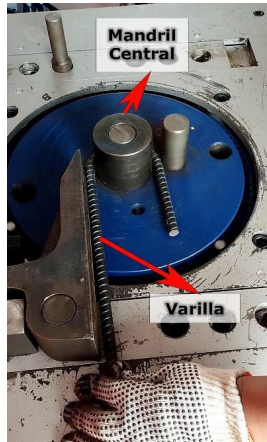


Figura 6. Dobladora semiautomática utilizada para el doblado de varillas conforme a la normativa vigente.



Figura 7. Varillas dobladas mediante dobladora semiautomática, mostrando la alineación del doblez sobre el resalte longitudinal.

Las probetas obtenidas fueron enviadas a un laboratorio certificado para su preparación, siguiendo las directrices de la Norma ASTM E3-11: "Práctica estándar para la preparación de muestras metalográficas".

En las Figuras 8 y 9 se observa el proceso de pulido y las muestras preparadas. Las muestras se prepararon sin ataque químico, ya que el estudio no incluye la determinación de la composición del material de las varillas.



Figura 8. Proceso de pulido de las muestras metalográficas.



Figura 9. Muestras metalográficas preparadas conforme a la Norma ASTM E3-11, sin ataque químico.

Los ensayos realizados a las muestras patrón, aquellas tomadas de los tramos rectos de las varillas, tuvieron como único propósito comparar sus resultados con los obtenidos de las muestras dobladas, tanto mediante el método tradicional como con la máquina eléctrica.

En los ensayos metalográficos las microfisuras se observaron con un aumento de 100x, ya que su tamaño es suficientemente grande como para no ser visibles con un aumento de 500x.



Las muestras preparadas para metalografía fueron empleadas también para las observaciones en microscopio de barrido electrónico (SEM). Se utilizó el microscopio JEOL JSM-IT100 (Figura 10).

Para la observación de las muestras en el microscopio electrónico de barrido, es necesario verificar que estas estén secas y sean conductoras. Aunque las muestras de varillas son conductoras, la resina sobre la que fueron preparadas no lo es. Por lo tanto, fue necesario recubrirlas con un material conductor, mediante un proceso conocido como *sputtering* o pulverización catódica, para formar una película delgada de oro, como se muestra en la Figura 11.



Figura 10. Muestra colocada en la cámara de vacío del microscopio electrónico de barrido (SEM).



Figura 11. Muestra metalográfica recubierta con oro para observación SEM, preparadas según la Norma ASTM E3-11.

No se observaron microfisuras en las muestras dobladas con la máquina eléctrica. Para evaluar si el diámetro de la varilla ejerce un efecto sobre el nivel de microfisuración en las varillas del método tradicional, se construyó una base de datos con las longitudes de las microfisuras obtenidas a través del ensayo metalográfico. Dado que el interés radica en evaluar el tamaño total de las microfisuras, se trabajó con la longitud acumulada, que corresponde a la suma de las longitudes individuales de las microfisuras por milímetro cuadrado de cada muestra, varillas de 10 mm y varillas de 12 mm.

Se comenzó por obtener los parámetros estadísticos descriptivos básicos, seguido del análisis mediante la interpretación de la gráfica de intervalos y de diferencia de medias. Para sustentar que existe una relación entre el nivel de microfisuración y el diámetro de la varilla, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, debido a que la cantidad de datos de cada muestra es pequeña para asumir una distribución normal.

RESULTADOS

En la Figura 1 se muestran los barrios periféricos de Riobamba, junto con el número de encuestas realizadas en cada uno de ellos.

Del total de encuestas aplicadas, se encontró que en 11 construcciones informales se afirmó tener un profesional a cargo, sin embargo, este no se encontraba en la obra en el



momento de la visita. En 58 construcciones, el mando recaía en un maestro mayor, y en un caso, en el propietario de la vivienda. De acuerdo con la información de los encuestados, 46 construcciones contaban con planos arquitectónicos, mientras que solo 19 tenían planos estructurales. Asimismo, 12 de los encuestados afirmaron conocer lo que indica la normativa vigente en Ecuador acerca del doblado de las varillas, mientras que 57 lo desconocían.

Se halló que, en 20 de las obras visitadas, se empleó máquina eléctrica para figurar varillas (Figura 6), mientras que en 49 se empleó el doblado tradicional, que consiste en el uso de bancos con clavos guía, trampas y tubos (Figuras 2, 3 y 4).

Para la conformación de columnas, vigas y losas, del sector de estudio, se utilizan principalmente varillas de 12 mm de diámetro, mientras que para los estribos se emplea principalmente la de 10 mm.

Las Figuras 12 y 13 corresponden a muestras de varillas dobladas mediante el método tradicional. Se observa una diferencia en la curvatura alcanzada respecto de la que debería obtenerse de acuerdo con los requisitos establecidos por la Norma NTE INEN 2167 y el Código ACI 318-19. Se ha encontrado un porcentaje de incumplimiento del diámetro mínimo del 46 % para las varillas de 10 mm y del 67 % en las varillas de 12 mm.

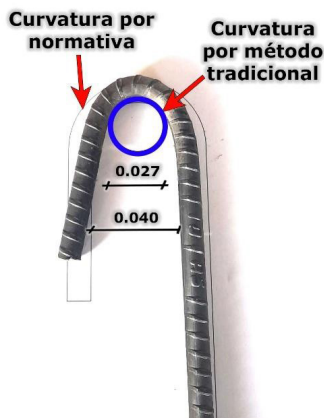


Figura 12. Comparación entre la curvatura obtenida mediante el método tradicional en y la curvatura mínima requerida por normativa en varillas de acero de 10 mm de diámetro.

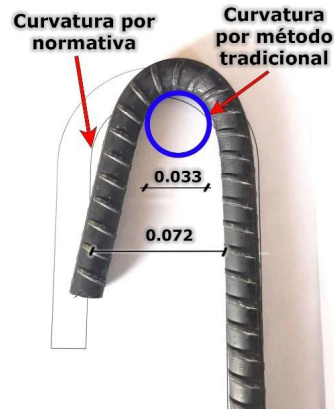


Figura 13. Comparación entre la curvatura obtenida mediante el método tradicional en y la curvatura mínima requerida por normativa en varillas de acero de 12 mm de diámetro.

Esta discrepancia se debe a que las barras que componen la estribera impiden que el doblez se desarrolle. En otras palabras, el diámetro del mandril central, alrededor del cual se realiza el doblado, es inferior al mínimo requerido, incumpliendo lo establecido en la Tabla 25.3.2 del código ACI 318-19, que especifica que el diámetro mínimo de doblado para varillas de la No. 10 a la No. 16 debe ser cuatro veces el diámetro de la varilla. Asimismo, no se cumple con lo señalado en la Tabla 25.3.1, que establece que, para varillas No. 10 a la No. 25, el diámetro mínimo de doblado debe ser seis veces el diámetro de la varilla, como requisito para el desarrollo de las barras corrugadas en tracción.

Por el contrario, las Figuras 14 y 15 corresponden a muestras de varillas dobladas mediante máquina semiautomática (Figura 6), en las que se evidencia el cumplimiento del diámetro de curvatura establecido por la Norma NTE INEN 2167 y el Código ACI 318-19. Este método garantiza una aplicación continua y uniforme de la fuerza durante el proceso de doblado, permitiendo un libre movimiento de la probeta en los puntos de contacto con el equipo, específicamente en el mandril central y los apoyos.

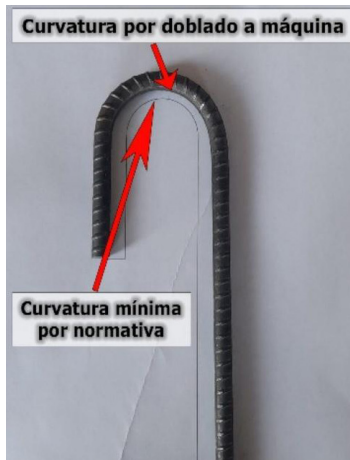


Figura 14. Varillas de 10 mm doblada mediante máquina semiautomática.



Figura 15. Varillas de 12 mm doblada mediante máquina semiautomática.

Metalografía de las muestras de tramos rectos y de las muestras dobladas mediante una máquina semiautomática

Las Figuras 16 y 17 muestran fotografías obtenidas mediante metalografía de las muestras patrón (tramos rectos sin doblar) de las varillas de 10 mm y 12 mm, respectivamente. Por otro lado, las Figuras 18 y 19 corresponden a fotografías de las muestras dobladas a máquina, también de 10 mm y 12 mm respectivamente. En las fotografías obtenidas de los ensayos metalográficos (Figuras 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23), la zona amarilla corresponde a la varilla, mientras que la parte más oscura representa la resina que rodea la muestra.



Figura 16. Micrografía metalográfica de muestra patrón (tramo recto), varilla de 10 mm.



Figura 17. Micrografía metalográfica de muestra patrón (tramo recto), varilla de 12 mm.



Figura 18. Micrografía metalográfica de varilla de 10 mm doblada a máquina.



Figura 19. Micrografía metalográfica de varilla de 12 mm doblada a máquina.

No se observaron microfisuras en ninguna de las muestras, ya sean tramos sin doblar o muestras dobladas con máquina, tanto para la varilla de 10 mm como para la de 12 mm, lo que demuestra que, al figurar la varilla con el empleo de mandriles adecuados en la máquina semiautomática, esta mantiene sus condiciones iniciales evitando sobreesfuerzos.

Metalografía en las muestras dobladas mediante el método tradicional

En todas las muestras analizadas, dobladas con el método tradicional, se observaron microfisuras exclusivamente en la parte interior del doblado, es decir, en la zona comprimida, como se ilustra en la Figura 20.

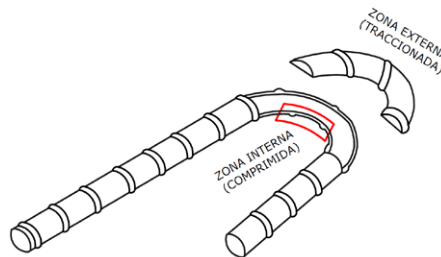


Figura 20. Microfisuras observadas en la zona interior del doblado en varillas dobladas mediante el método tradicional.

Dado que el interés radica en evaluar el tamaño total de las microfisuras, se midió cada una de ellas (representadas mediante las líneas blancas), asignándoles un número de identificación.

Posteriormente, se sumaron las longitudes individuales de las microfisuras para obtener la longitud acumulada en un milímetro cuadrado en cada muestra (Tabla 1). Cabe señalar que no se incluyen todas las imágenes obtenidas, sino solo una de cada caso. En este sentido, la Figura 21 corresponde a la muestra de 10 mm doblada con el método tradicional, mientras que la Figura 22 corresponde a la muestra de 12 mm doblada con el mismo método.

Las muestras dobladas con el método tradicional, tanto de 10 mm como de 12 mm, presentan un número y tamaño de microfisuras distintos, como se observa en la Tabla 1. Por

lo tanto, las Figuras 21 y 22 no reflejan el comportamiento de todas las muestras en cuanto al tamaño y número de microfisuras, sino que representan casos seleccionados para su análisis.

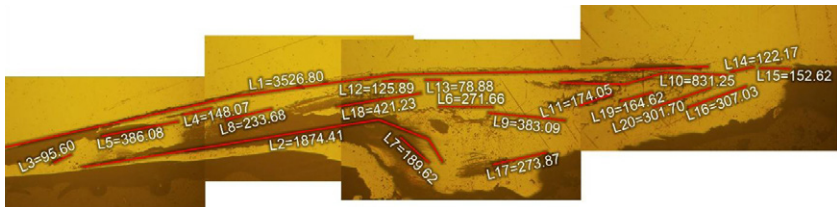


Figura 21. Microfisuras en varilla de 10 mm doblada mediante el método tradicional. Muestra T10A [μm].



Figura 22. Microfisuras en varilla de 12 mm doblada mediante el método tradicional. Muestra T12A [μm].

En la Figura 21 se observan áreas con espacios amplios, los cuales indican una deformación plástica del material, evidenciando el desplazamiento del mismo. A continuación, en la Figura 23 se muestra un ejemplo de este fenómeno.



Figura 23. Deformación plástica en la zona interior del doblez de una varilla doblada mediante el método tradicional.

De igual manera, las variaciones en la superficie del material que se observan en las Figuras 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, obtenidas de los ensayos metalográficos, que no presentan morfología puntiaguda, corresponden a rebabas producto del rolado de la varilla durante su fabricación.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la suma de las longitudes individuales de las microfisuras de cada muestra doblada mediante la técnica tradicional. En las varillas de



10 mm, la muestra T10A presenta la mayor longitud acumulada de microfisuras, seguida de las muestras T10C y T10B, mientras que la menor microfisuración corresponde a la muestra T10D. En el caso de las varillas de 12 mm, la mayor microfisuración se observa en la muestra T12A, seguida de las muestras T12C y T12B, siendo la muestra T12D la que presenta la menor longitud de microfisuras.

Este comportamiento se debe a que existen varios factores que influyen en el proceso de doblado, como la fuerza aplicada y la ubicación del resalte longitudinal, la cual no fue la misma en todas las muestras (Figura 4).

TABLA 1. Longitud acumulada de fisuras obtenida a partir del análisis metalográfico en muestras de varillas dobladas mediante el método tradicional.

Tramo	Técnica de doblado	Diámetro de la varilla ϕ (mm)	Muestra	Longitud total de microfisuras (μm)
Doblado	Tradicional	10	T10A	10062.32
			T10B	4700.93
			T10C	5358.49
			T10D	2172.40
		12	T12A	1645.39
			T12B	957.65
			T12C	1191.2
			T12D	494.89

Los parámetros estadísticos descriptivos básicos de los datos se presentan en la Tabla 2. A partir de estos resultados, se observa una variabilidad moderada en las longitudes totales de las microfisuras para los diámetros analizados, con un coeficiente de variación cercano al 50 %, lo que indica una dispersión considerable de los valores en comparación con el valor promedio. Esta variabilidad se refleja también en la Figura 24, donde las observaciones no siguen una tendencia uniforme.

Se evidencia que la variabilidad de los datos es mayor en las varillas de 10 mm de diámetro en comparación con las varillas de 12 mm. Este comportamiento sugiere que las mediciones de las microfisuras en las varillas de 10 mm son más dispersas o heterogéneas, lo que puede interpretarse como una mayor sensibilidad en esta muestra a los factores que afectan el proceso de doblado, como la fuerza aplicada y la ubicación del resalte longitudinal. En las varillas de 12 mm, los valores tienden a estar más cerca de la media.

Este análisis pone en evidencia que, aunque existe una tendencia general en las mediciones, la influencia de estos factores puede alterar considerablemente los resultados, lo que refuerza la importancia de controlar y minimizar las variables involucradas en el proceso de doblado para reducir la dispersión de los resultados y obtener un comportamiento más uniforme.



Se destaca que la media de las longitudes totales de microfisuras en las varillas de 10 mm dobladas mediante el método tradicional es aproximadamente cinco veces mayor que la correspondiente a las varillas de 12 mm dobladas con el mismo método, con lo que se puede afirmar que las microfisuras obtenidas en las varillas de 10 mm dobladas por el método tradicional son mayores que las obtenidas en las varillas de 12 mm. Sin embargo, para descartar que este resultado se deba al azar, se debe aplicar un método de significancia estadística.

Dado que el tamaño muestral para cada diámetro es reducido y no se puede asumir una distribución normal, se empleó la prueba no paramétrica de Mann-Whitney para determinar si este resultado es estadísticamente significativo. Con un nivel de confianza de 95 %, se obtuvo un valor $p = 0.03$, inferior al valor crítico de 0.05, lo que indica que existe evidencia estadística para afirmar que el diámetro de la varilla sí tiene un efecto en el nivel de microfisuración generado en las varillas dobladas con el método tradicional, evidenciándose que a menor diámetro corresponde un mayor nivel de microfisuras.

TABLA 2. Parámetros estadísticos descriptivos básicos de las longitudes totales de microfisuras en varillas dobladas mediante el método tradicional.

Variable	Diámetro de la varilla (mm)	N (# de muestras)	Media	Coefficiente de variación	Suma	Min.	Mediana	Máx.
Longitud total (μm)	10	4	5573.54	59.08	22294.14	2172.40	5029.71	10062.32
	12	4	1072.28	44.70	4289.13	494.89	1074.43	1645.39

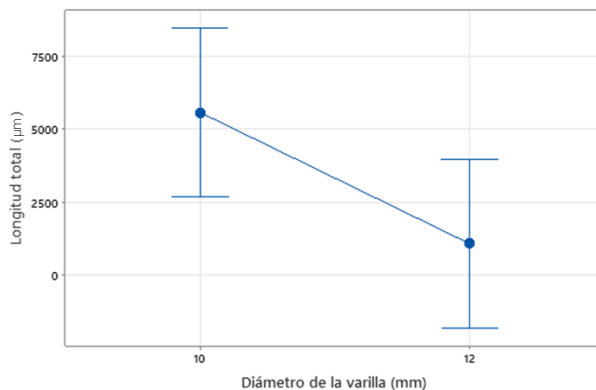
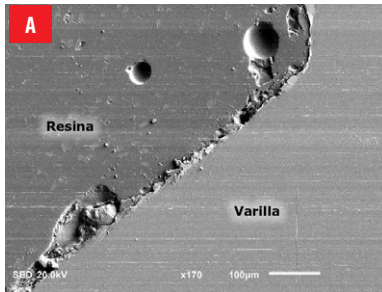


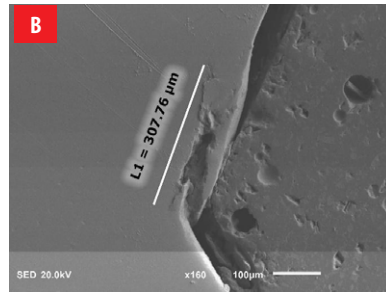
Figura 24. Gráficos de intervalos de las longitudes totales de microfisuras en varillas de 10 mm y 12 mm dobladas mediante el método tradicional.

Las observaciones a través del microscopio electrónico de barrido (SEM), confirmaron lo obtenido mediante ensayos metalográficos, pues, al realizar un recorrido por el borde externo e interno de las muestras, se observaron microfisuras en los resaltes de las varillas

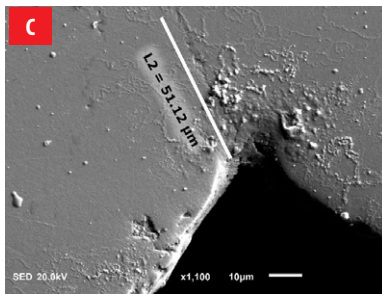
dobladas mediante el método tradicional, precisamente en la zona interior del doblé (Figura 25). En contraste, la superficie de las muestras que fueron dobladas utilizando la máquina eléctrica no presentó daño.



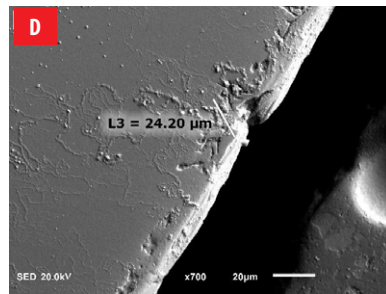
A. Superficie de una muestra de varilla doblada con máquina eléctrica, sin evidencia de daño superficial. Aumento: 170x.



B. Microfisura de 307.76 µm formada en la zona interna del doblé, correspondiente al concentrador de esfuerzo donde se inicia el corrugado. Aumento: 160x.



C. Iniciación de la microfisura en el concentrador de esfuerzos; se observa la dirección de propagación hacia el centro de la varilla. Aumento: 1100x.



D. Rebabas superficiales producto del rolado y la oxidación, que se desprenden durante el doblado, además de una microfisura de 24.20 µm. Aumento: 700x.

Figura 25. Micrografías obtenidas mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) que muestra la iniciación y propagación de microfisuras en muestras de varillas dobladas. Las imágenes fueron obtenidas con un voltaje de haz de 20.0 kV y una distancia de trabajo (WD) entre 17 y 18 mm. Los aumentos utilizados se indican en cada micrografía.

DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos metalográficos realizados a las muestras tomadas de los tramos rectos de las varillas (Figuras 16 y 17) coinciden con lo esperado, dado que estas zonas de la varilla no fueron sometidas a esfuerzo alguno. Esto se refleja en la ausencia de microfisuras, lo que confirma que la integridad del material no se vio comprometida en estas secciones.

En cuanto a los resultados de los ensayos metalográficos realizados en las muestras dobladas mediante la utilización de una máquina de doblado semiautomática, mostradas



en las Figuras 18 y 19, se observa que, al realizar el doblado siguiendo las recomendaciones de la Norma NTE INEN 2167 y el acápite 25.3 del Código ACI 318-19, no se evidencia microfisuración en la zona doblada. Esto sugiere que el proceso de doblado cumple con los requisitos establecidos para mantener la integridad del material, garantizando así la resistencia y durabilidad de las varillas en las zonas sometidas a esfuerzo.

Además, estos resultados demuestran que, cuando la velocidad de doblado es constante y se cumple con el diámetro mínimo de curvatura, no se generan sobreesfuerzos, lo que previene la aparición de microfisuras en el proceso de doblado.

En las muestras obtenidas de las varillas dobladas mediante el método tradicional, se observaron microfisuras únicamente en la parte interior del doblez (zona comprimida). En la parte externa del doblez, no se observaron microfisuras (Figura 20). Las microfisuras se originan en el resalte, donde las inclusiones actúan como puntos de activación para la microfisuración.

Durante el doblado tradicional, el resalte longitudinal quedó ubicado en una posición desfavorable respecto al eje neutro de la curvatura, esto provoca que, al momento de aplicar la curvatura, las deformaciones no se distribuyan uniformemente a lo largo de la sección de la varilla. En la zona del resalte, la curvatura impone deformaciones más elevadas, debido a que el resalte forma una protuberancia que actúa como un escalón geométrico, en el cual se concentran esfuerzos. Además, el resalte provoca un leve desplazamiento local del eje neutro y aumenta la rigidez de la zona, lo que eleva la magnitud de los esfuerzos internos. En conjunto, estas condiciones facilitan la iniciación de microfisuras que luego se propagan siguiendo las inclusiones presentes en el material [22].

Con el microscopio electrónico de barrido (SEM) se confirmó la tendencia observada en los resultados obtenidos mediante la metalografía. No obstante, no fue posible identificar exactamente las mismas microfisuras, debido a limitaciones inherentes al principio de funcionamiento de cada tipo de microscopio, al tratamiento adicional aplicado a las muestras para su análisis por SEM (*sputtering*) y al tiempo transcurrido entre la preparación de las muestras y su observación. Estos factores pueden favorecer el inicio de procesos de corrosión superficial, lo que dificulta la identificación y comparación directa de las microfisuras observadas.

Una vez determinado que el doblado de las varillas de refuerzo mediante el método tradicional produce un daño inicial en el material, manifestado en la generación de microfisuras, resulta fundamental analizar el impacto que estas pueden tener en el desempeño mecánico de las varillas. La presencia de microfisuras puede degradar sus propiedades mecánicas y aumentar la susceptibilidad a fracturas frágiles cuando las varillas son sometidas a cargas externas durante la vida útil de las estructuras [12, 13, 14, 23, 24].

En este contexto, resulta fundamental considerar el fenómeno de la fatiga, un proceso de deterioro que evoluciona con el tiempo y que ocurre en elementos sometidos a ciclos repetitivos de tensión, incluso por debajo del límite elástico. Bajo estas condiciones, una grieta comienza a formarse y a crecer progresivamente. Las grietas suelen originarse en defectos del material, ya sean internos o causados por factores externos. Estos defectos pueden ser resultado de cambios abruptos en la geometría, como en áreas



con concentración de tensiones, o en las zonas más vulnerables del material, que en este caso corresponden a las microfisuras originadas por el doblado. Cuando la grieta alcanza un tamaño crítico, se produce el fallo del componente estructural [23].

Durante un evento sísmico, este mecanismo de fatiga adquiere especial relevancia debido a que las sollicitaciones impuestas al acero de refuerzo corresponden a un régimen de fatiga de bajo número de ciclos, caracterizado por cargas cíclicas alternantes de tracción y compresión con amplitudes elevadas. En estas condiciones, las microfisuras preexistentes actúan como concentradores de tensiones, favoreciendo su apertura y cierre en cada ciclo sísmico.

Este proceso genera una acumulación progresiva de daño, ya que las deformaciones locales alrededor de las microfisuras pueden incrementarse, aún cuando las tensiones globales no alcancen el límite último del material. Con el aumento de la demanda inelástica, estas microfisuras pueden propagarse gradualmente, crecer y alcanzar tamaños críticos, reduciendo la ductilidad del acero de refuerzo y aumentando la probabilidad de fallas frágiles durante o después de un evento sísmico [12, 13, 14, 25].

Diversos estudios realizados en países con una alta prevalencia de prácticas de construcción informal han reportado comportamientos concordantes con los observados en el presente trabajo. Investigaciones desarrolladas en distintas regiones de América Latina, Asia y África señalan que el doblado manual o no normativo de varillas de refuerzo, sin un control adecuado del radio de curvatura ni de la velocidad de doblado, conduce a la aparición de microfisuras localizadas en la zona interior del doblez, asociadas a concentraciones de esfuerzo en los resaltes y a defectos microestructurales preexistentes [26, 27].

De igual manera, estos estudios indican que dichas microfisuras pueden constituir puntos de inicio para procesos de degradación acelerada del acero bajo cargas cíclicas de bajo número de ciclos, típicas de eventos sísmicos, favoreciendo la reducción de la ductilidad y el desarrollo de mecanismos de falla frágil en el refuerzo [28, 29, 30]. En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio son consistentes con la evidencia reportada a nivel internacional, reforzando la importancia de adoptar procedimientos de doblado controlados y acordes con la normativa técnica vigente, especialmente en contextos donde predominan prácticas constructivas informales. Asimismo, una mala calidad en el proceso de doblado puede sobrecargar el acero, lo que provoca que pierda sus propiedades y se vuelva más frágil. Esta condición, combinada con prácticas de construcción inadecuadas, puede dar lugar a la aparición de grietas transversales en la barra, afectando negativamente las características de resistencia del material [24].

El presente estudio no incluye ensayos estructurales ni simulaciones sísmicas en estructuras completas. Por esta razón, no se cuantificó el impacto del uso de varillas dobladas tradicionalmente en la resistencia sísmica de estructuras existentes. No obstante, los hallazgos confirman la relevancia de cumplir con las normas de doblado para reducir la vulnerabilidad de los elementos estructurales frente a cargas cíclicas o sísmicas

La relevancia de los resultados obtenidos en el presente estudio para el diseño sismorresistente radica en que el desempeño sísmico de las estructuras de hormigón



armado depende en gran medida de la ductilidad y de la capacidad de disipación de energía del acero de refuerzo, especialmente en las zonas críticas donde se espera la formación de rótulas plásticas, como ganchos, anclajes y regiones de confinamiento. En estas zonas, las varillas suelen ser dobladas y están sometidas a elevadas deformaciones cíclicas durante eventos sísmicos.

La presencia de microfisuras inducidas durante el proceso de doblado puede reducir la capacidad del acero para desarrollar deformaciones inelásticas estables, afectando negativamente los mecanismos de disipación de energía previstos en el diseño sismorresistente. En este sentido, los resultados microestructurales presentados evidencian que un proceso de doblado no controlado puede introducir daño inicial en el refuerzo, lo cual resulta relevante para el cumplimiento de los supuestos de ductilidad y comportamiento inelástico implícitos en los códigos de diseño sísmico.

CONCLUSIONES

Esta investigación demuestra que, al realizar el figurado de las varillas utilizando una técnica que garantiza un doblez libre con aplicación continua y uniforme de fuerza, en conformidad con la Norma NTE INEN 2167 y el apartado 25.3 del Código ACI 318-19, logrado mediante el uso de una máquina eléctrica semiautomática, no se generan microfisuras en las zonas de doblado. En cambio, al utilizar el método tradicional de estribera fijada sobre bancos de madera y tubos, si se observan microfisuras.

Los datos obtenidos de los ensayos realizados indican que el diámetro de la varilla influye en el nivel de microfisuración generado al doblar las varillas mediante el método tradicional, siendo mayor en las varillas de 10 mm en comparación con las de 12 mm. Sin embargo, a partir de la revisión documental, se encontró que la longitud de la grieta inicial aumentó con el aumento del diámetro de la barra, lo cual contrasta con los hallazgos de esta investigación [24].

Debido al alcance del trabajo realizado y al tamaño de las muestras analizadas, se debe aclarar que esta última afirmación es aplicable a este caso de estudio, con el fin de evitar una sobrestimación de la magnitud de los hallazgos y no generalizar los resultados.

Es importante destacar que las conclusiones de este estudio se aplican estrictamente a varillas de 10 mm y 12 mm sometidas a dobleces de 180°, que corresponden a las condiciones evaluadas experimentalmente. Por lo tanto, los resultados no deben extrapolarse de manera directa a varillas de otros diámetros, a otros ángulos de curvatura ni a configuraciones de figurado diferentes.

Desde el punto de vista práctico, estos hallazgos subrayan la necesidad de reforzar las actividades de inspección en obra, especialmente en estructuras donde se emplean varillas dobladas mediante métodos tradicionales que puedan inducir microfisuración. Asimismo, los resultados sugieren que, en intervenciones de mejoramiento o reforzamiento estructural, debe considerarse la posibilidad de que existan zonas debilitadas en los dobleces, lo que puede requerir medidas de compensación o sustitución. Finalmente, el estudio evidencia la importancia de capacitar a los trabajadores



informales y cuadrillas de obra en el uso de técnicas adecuadas de doblado y en el cumplimiento de los radios mínimos de curvatura, con el fin de reducir la aparición de microfisuras y mejorar el desempeño estructural de las edificaciones.

RECOMENDACIONES

Se recomienda extender el estudio a otras ciudades del país, con tamaño de muestras mayores, así como a obras de mayor escala, con el objetivo de obtener mayor diversidad de datos.

Asimismo es importante socializar los resultados obtenidos con los actores del sector constructivo, especialmente en el ámbito de la construcción informal, a fin de promover la adopción de técnicas de doblado que cumplan con la normativa vigente y contribuyan a mejorar la seguridad estructural.

Como recomendación para obras de construcción informal, se sugiere implementar controles no destructivos basados en verificaciones geométricas del proceso de doblado. En particular, se recomienda verificar el diámetro mínimo del mandril, la separación entre la estribadera y la palanca de doblado, y asegurar que la varilla se doble sobre su resalte longitudinal, conforme a la Norma NTE INEN 2167. Estas medidas contribuyen significativamente a reducir el riesgo de microfisuramiento sin necesidad de ensayos especializados.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Evelyn Cabrera: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, recursos, redacción, preparación del borrador original, visualización.

Teresa Sáez: conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, recursos, redacción, preparación del borrador original, visualización.

Luisa Viera: conceptualización, validación, redacción, revisión y edición, visualización, supervisión, administración del proyecto.

Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE TECNOLOGÍAS DE IA GENERATIVA Y ASISTIDA EN LA REDACCIÓN

Durante la preparación de este trabajo, no se utilizó ninguna tecnología de inteligencia artificial generativa ni herramientas de asistencia automatizadas en la redacción, análisis de datos o generación de figuras. El manuscrito fue elaborado, revisado y editado íntegramente por las autoras, quienes asumen plena responsabilidad por el contenido y la versión final del texto publicado.



DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación se encuentran disponibles en el repositorio institucional de la Universidad Central del Ecuador, en acceso abierto, y pueden ser consultados en el siguiente enlace permanente: <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/38860>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores reportan no tener conflictos de interés sobre esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Vergara, F., Fuster, X., Rojas, I., Hidalgo, R., Rincón, S., Álvarez, J., Voltaire, P., Meseguer, O. y Lizana, F. (2022). Vivienda informal y las organizaciones territoriales en América Latina. *Revista de geografía Norte Grande*, 81, 5–14. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022022000100005>
- [2] Torres-Medina, C. C. (2019). *Importancia de una adecuada supervisión técnica sobre el acero de refuerzo durante la ejecución de construcciones de edificaciones* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio de la Universidad Católica de Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/24349>
- [3] Menéndez, T. (22 de enero de 2026). *70 000 sismos han sacudido a Ecuador en los últimos 10 años*. Primicias. <https://web.archive.org/web/20260209164359/https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/sismos-ecuador-ultimos-anos-instituto-geofisico/>
- [4] Murty, C. V. R., Brzew, S., Faison, H., Comartin, C. D., & Irfanoglu, A. (2006). *En riesgo: El Desempeño Sísmico de los Edificios de Marcos de Concreto Reforzado Rellenos con Paredes de Mampostería* (Traducción al español de J. Gutiérrez & A. González, Publicación número WHE-2006-03). Earthquake Engineering Research Institute. <https://web.archive.org/web/20260209164742/https://www.yumpu.com/es/document/view/30338375/en-riesgo-world-housing-encyclopedia>
- [5] Medina Cruz, R., & Blanco Blasco, A. (2022). *Manual de construcción para maestros de obra*. Aceros Arequipa. <https://web.archive.org/web/20260209165131/https://www.acerosarequipa.com/manuales/manual-de-construccion-para-maestros-de-obra>
- [6] Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2017). *Varillas corrugadas y lisas de acero al carbono laminadas en caliente, soldables, microaleadas o termotratadas, para hormigón armado. Requisitos*. (NTE INEN 2167:2017, tercera revisión). INEN.
- [7] Arana, J., y González, J. (2002). *Mecánica de fractura*. Servicio editorial de la Universidad del País Vasco.
- [8] Loporca, G., Cuevas, A., Pampanin, S., & Kral, M. V. (2018). Monotonic and low-cycle fatigue properties of earthquake-damaged New Zealand steel reinforcing bars. The experience after the Christchurch 2010/2011 earthquakes. *Procedia Structural Integrity*, 11, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.026>
- [9] Narayanan, A., & Subramaniam, K. V. L. (2017). Damage assessment in concrete structures using piezoelectric based sensors. *Revista ALCONPAT*, 7(1). <https://doi.org/10.21041/ra.v7i1.173>
- [10] Molina León, E. R., & Rubio Tomalácelio, A. (2012). *Análisis de funcionamiento, operación y mantenimiento e implementación de una dobladora de tubo para el centro de producción y servicios de la universidad técnica de Cotopaxi*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1347>
- [11] Jiménez Arenas, J. M. (2016). *Efecto de la deformación en frío sobre la microestructura y propiedades de un acero*. [Tesis de pregrado, Universidad de Sevilla]. Repositorio de la Universidad de Sevilla. <https://idus.us.es/items/f1e49563-ff07-41eb-9943-8b0fb63c904b>
- [12] Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [13] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2001). *Metal Fatigue in Engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [14] Halford, G. R., Manson, S.S. (2006). *Fatigue and durability of structural materials*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.fds.9781627083447>
- [15] Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Riobamba. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Riobamba 2020-2023 (PDyOT). Tomo II*. GADM Riobamba. <https://es.scribd.com/document/556324305/PDOT-Tomo-II>
- [16] González, P. (2023, 5 de noviembre). *Construcción de viviendas cae en Quito y Guayaquil, pero sube en Samborondón*. Primicias. https://web.archive.org/web/20260209212736/https://www.primicias.ec/noticias/economia/construccion-viviendas-quito-guayaquil-samborondon/?utm_source
- [17] Ríos, D. (2023). *Las regulaciones urbanísticas del GAD Cantonal de Riobamba y las construcciones informales* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Chimborazo. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12049>



- [18] Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). *Estadísticas de edificaciones (ESED) 2023: Permisos de construcción*. https://web.archive.org/web/20260210125028/https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2023/anual/2.2023_ESED_Principales_resultados.pdf
- [19] Google Earth. (2022). [Ciudad de Riobamba] Recuperado febrero 12, 2026 de https://earth.google.com/web/@-1.66180546,-78.65523421,2783.27497671a,15350.0071028d,35y,3.91901695h,1.4754464t,0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASgOI_____ARAA?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=es-419&authuser=0
- [20] Villavicencio-Caparó, E., Ruiz-García, V., & Cabrera-Duffaut, A. (2016). Validación de cuestionarios. *Odontología Activa Revista Científica*, 1(3), 71-76. <https://oactiva.ucacue.edu.ec/index.php/oactiva/article/view/200/339>
- [21] Sánchez, A. B., Navarro, C. C., Garay, N. Z., & Mata, J. S. (2022). La validación por juicio de expertos como estrategia para medir la confiabilidad de un instrumento. *TECTZAPIC: Revista Académico-Científica*, 8(1), 9-18. <https://doi.org/10.51896/tectzapic/IQCL5337>
- [22] Allauca, F. (2011). *Influencia de la microestructura sobre las propiedades mecánicas en varillas de acero* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1401>
- [23] Peña, M. (2022). *Comportamiento frente a fatiga de barras de acero corrugado: Estudio experimental, estructural y numérico* [Tesis de maestría, Universidad de Cantabria]. Repositorio institucional de la Universidad de Cantabria. <https://hdl.handle.net/10902/26153>
- [24] Yan, S., Zheng, Y. L., Yan, Z. W., & Zhang, Z. C. (2025). Influence of bending angles on initial damage and mechanical properties of bent rebars. *Construction and Building Materials*, 499, 144124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144124>
- [25] Zhou, Y., Ou, Y. C., Lee, G. C., & O'Connor, J. S. (2010). Mechanical and low-cycle fatigue behavior of stainless reinforcing steel for earthquake engineering applications. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(3), 449-457. <https://doi.org/10.1007/s11803-010-0028-y>
- [26] Dieter, G. E., & Bacon, D. (1976). *Mechanical metallurgy*. McGraw-Hill.
- [27] Reed-Hill, R. E., & Abbaschian, R. (1992). *Physical Metallurgy Principles* (3rd ed.). PWS-KENT Publishing Company.
- [28] Hertzberg, R. W., Vinci, R. P., & Hertzberg, J. L. (2020). *Deformation and fracture mechanics of engineering materials* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- [29] Park, R., & Paulay, T. (1991). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons.
- [30] Bruneau, M., Uang, C. M., & Whittaker, A. S. (1998). *Ductile design of steel structures*. McGraw-Hill.