

# 8

## *Estudio Del Comportamiento De La Varilla ASTM A615 Como Perno De Anclaje En La Construcción De Estructuras*

*Study Of The Performance Of ASTM A615  
Rod As An Anchor Bolt In The Construction  
Of Structures*

### **Autores**

**Luis Jaime Fernández Sánchez**

Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, Ambato - Ecuador  
[ljfernandez@pucesa.edu.ec](mailto:ljfernandez@pucesa.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0001-2059-9730>

**Diego Enrique Fernández Sánchez**

Ingeniería Hidráulica, Investigador Independiente, Ambato - Ecuador  
[diferandez9809@gmail.com](mailto:diferandez9809@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0000-0272-8917>,

**Luis Manuel Fernández Delgado**

Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica Indoamerica, Ambato - Ecuador  
[luisfernandez@indoamerica.edu.ec](mailto:luisfernandez@indoamerica.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-6354-4046>

**Roberto Sebastián Quintana Vásconez**

Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ambato, Ambato - Ecuador  
[rsquintanav@pucesa.edu.ec](mailto:rsquintanav@pucesa.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0006-6285-3254>

**Francisco Agustín Peña Jordán**

Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador  
[fa.pena@uta.edu.ec](mailto:fa.pena@uta.edu.ec)  
<http://orcid.org/0000-0002-0140-3827>

# 8

## *Estudio Del Comportamiento De La Varilla ASTM A615 Como Perno De Anclaje En La Construcción De Estructuras*

### *Resumen*

Este estudio analizó el comportamiento mecánico de la varilla de acero ASTM A615 empleada como perno de anclaje en estructuras metálicas, considerando los requisitos de diseño estructural, los materiales disponibles y los esfuerzos actuantes en este tipo de elementos. Se destacó la necesidad de armonizar normativas internacionales, como la NEC SE EC y la AISC 360-16, con las condiciones reales del mercado ecuatoriano, en particular con los productos suministrados por la industria siderúrgica local. Mediante un enfoque experimental, se evaluó la respuesta estructural de los pernos de anclaje fabricados con acero ASTM A615, analizando su comportamiento frente a esfuerzos de tracción y su compatibilidad con los criterios establecidos en distintas normativas de diseño, tales como la, NEC SE EC, AISC 360-16 y ASTM F1554. Los resultados obtenidos evidenciaron que este acero presenta una elevada resistencia a la tracción y al corte, superando los valores característicos de aceros comúnmente utilizados para pernos de anclaje, como el ASTM A36 y el ASTM F1554 Grado 55 y Grado 105. Por lo tanto, se determina que el acero ASTM A615 es apto para ser empleado como perno de anclaje en situaciones estructurales con predominio de cargas controladas y estáticas; no obstante, su utilización no es aconsejable en contextos que requieran una alta ductilidad o la disipación de energía, ya que tiene poco potencial de deformación. Aunque tiene propiedades de resistencia favorables, la normativa actual no apoya explícitamente su aplicación; por eso es necesario un análisis técnico exhaustivo y emplear criterios de diseño conservadores.

**Palabras Clave:** *Acero ASTM A615, estructuras metálicas, normativa estructural, pernos de anclaje.*

### *Abstract*

This study analyzed the mechanical behavior of ASTM A615 steel reinforcing bars used as anchor bolts in steel structures, taking into account structural design requirements, the available materials, and the stresses acting on this type of element. It emphasized the need to harmonize international standards, such as NEC SE EC and AISC 360-16, with the actual conditions of the Ecuadorian market, particularly with the products supplied by the local steel industry. Through an experimental approach, the structural response of anchor bolts manufactured from ASTM A615 steel was evaluated, analyzing their behavior under tensile forces and their compatibility with the criteria established in different design standards, such as NEC SE EC, AISC 360-16, and ASTM F1554. The results showed that this steel exhibits high tensile and shear strength, exceeding the characteristic values of steels commonly used for anchor bolts, such as ASTM A36 and ASTM F1554 Grade 55 and Grade 105. Therefore, ASTM A615 steel is considered suitable for use as an anchor bolt in structural situations dominated by controlled and static loads; however, its use is not recommended in contexts that require high ductility or energy dissipation, since it has limited deformation capacity. Although it has favorable strength properties, current standards do not explicitly support its application; therefore, a thorough technical analysis and the use of conservative design criteria are required.

**Keywords:** *ASTM A615 steel, steel structures, structural standards, anchor bolts.*

**Nota Editorial: Recibido: 23 de febrero 2026 Aceptado: 22 de abril 2026**

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción se encuentra en constante evolución, impulsada por la necesidad de reducir los tiempos de ejecución de los proyectos, mejorar la calidad de las estructuras y garantizar su seguridad [1]. En este contexto, la Ingeniería Civil ha experimentado avances significativos, especialmente en el análisis del comportamiento de materiales fundamentales como el concreto y el acero. Investigaciones previas han demostrado que el acero de refuerzo presenta un comportamiento constitutivo predecible y factores de sobrerresistencia relevantes para el diseño estructural [1]. En particular, en el caso de las barras ASTM A615, se ha reportado un desempeño satisfactorio frente a fatiga de bajo número de ciclos, así como una adecuada respuesta de adherencia en el concreto, influida por variables como la geometría de las corrugas, la resistencia del concreto y la longitud de anclaje [2], [3], [4].

Asimismo, otros estudios han señalado que la capacidad de anclaje y el desempeño de las conexiones dependen de variables como el confinamiento, el espaciamiento entre elementos de anclaje, la configuración del refuerzo y las condiciones de instalación, pudiendo presentarse modos de falla como arrancamiento, fisuración del concreto o deslizamiento [3], [5], [6]. En este marco, los pernos de anclaje desempeñan una función esencial en la construcción, ya que permiten fijar de manera efectiva las estructuras al concreto y contribuyen directamente a la estabilidad y seguridad del sistema estructural [7], [8], [9]. Sin embargo, a pesar de estos avances, el estudio específico del comportamiento de los pernos de anclaje utilizados en estructuras metálicas, particularmente aquellos fabricados a partir de varilla ASTM A615, ha recibido una atención limitada en la literatura, especialmente en lo relativo a su influencia sobre la capacidad de anclaje y el desempeño global de la conexión estructural.

En el contexto ecuatoriano, la varilla ASTM A615 se emplea con frecuencia como perno de anclaje en estructuras metálicas; no obstante, su utilización suele realizarse de manera empírica, sin una comprensión suficientemente detallada de sus propiedades mecánicas ni de las implicaciones asociadas a sus procesos de fabricación [10], [11]. Este desconocimiento sobre su comportamiento y desempeño puede derivar en problemas significativos durante la vida útil de la estructura, generando costos adicionales de mantenimiento, reduciendo su durabilidad y planteando preocupaciones en términos de seguridad estructural [12], [13]. En este sentido, estudios recientes destacan que, si bien los aceros de alta resistencia resultan atractivos por sus propiedades mecánicas, también deben satisfacer exigencias adicionales relacionadas con la resistencia al desgaste y la fatiga, factores esenciales en el diseño de conexiones sometidas a cargas dinámicas [14], [15], [16], [17], [18].

Esta investigación, por lo tanto, utiliza la normativa ecuatoriana NEC SE EC (Estructuras Metálicas) como marco de referencia legal. Esta norma es un reflejo del esfuerzo del país por conciliar las normas internacionales, como la AISC 360-16, con los materiales proporcionados por la industria siderúrgica local. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo abordar el uso de los pernos de anclaje de varilla ASTM A615. Se llevarán a cabo ensayos mecánicos y modelación mediante software para evaluar el comportamiento de pernos de anclaje de varilla ASTM A615. Los resultados de esta investigación se utilizarán para proponer recomendaciones sobre su posible uso, lo que contribuirá a mejorar la calidad y la seguridad de las estructuras construidas.

En la literatura internacional, diversos estudios han analizado el comportamiento de los pernos de anclaje en estructuras metálicas y han evidenciado que su desempeño depende de factores como la resistencia del acero, la ductilidad, la adherencia con el concreto y la respuesta ante cargas cíclicas. Se ha reportado que los modos de falla más comunes incluyen el arrancamiento del concreto, la fisuración circundante y el deslizamiento del perno, especialmente cuando no se garantiza una adecuada longitud de anclaje o confinamiento. De igual forma, investigaciones previas han señalado que los aceros convencionalmente empleados en pernos de anclaje, como ASTM A36 o ASTM A307, presentan un comportamiento más predecible debido a sus propiedades de ductilidad y al mayor control de sus procesos de fabricación. En contraste, el acero ASTM A615, ampliamente disponible y utilizado en el medio por su alta resistencia y bajo costo, no ha sido diseñado específicamente para este tipo de aplicaciones, lo que genera incertidumbre respecto a su comportamiento frente a sollicitaciones de fatiga, cargas dinámicas y condiciones reales de servicio.

Esta situación evidencia la necesidad de realizar estudios comparativos que permitan evaluar las diferencias de desempeño entre el acero ASTM A615 y otros aceros tradicionalmente utilizados en pernos de anclaje, con el fin de determinar su viabilidad estructural y establecer criterios técnicos que respalden su uso en condiciones seguras. En este contexto, se incorpora el análisis del acero ASTM A36 como material de referencia, debido a su uso ampliamente documentado en elementos estructurales y en aplicaciones relacionadas con conexiones metálicas, incluidos pernos y elementos de anclaje. Este acero presenta un comportamiento mecánico más uniforme y predecible, con propiedades de ductilidad y resistencia bien establecidas en la normativa internacional. Del mismo modo, se considera el acero ASTM F1554 Grado 55, ampliamente utilizado en la fabricación de pernos de anclaje estructurales y normado específicamente para este tipo de aplicaciones, cuyas propiedades mecánicas controladas lo convierten en un referente adecuado para evaluar materiales alternativos.

Con base en lo anterior, la presente investigación adopta la normativa ecuatoriana NEC SE EC (Estructuras Metálicas) como marco de referencia legal, en correspondencia con el esfuerzo del país por armonizar normas internacionales, como la AISC 360-16, con los materiales suministrados por la industria siderúrgica local. El estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico de pernos de anclaje fabricados con varilla ASTM A615 mediante ensayos experimentales y modelación numérica, así como comparar su desempeño con materiales de referencia como el ASTM A36 y el ASTM F1554 Grado 55. Los resultados permitirán establecer recomendaciones técnicas sobre su posible uso, contribuyendo a mejorar la calidad, seguridad y confiabilidad de las estructuras construidas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. MÉTODOS.

La investigación se realizó en tres laboratorios del país: el ensayo de tracción en LenMav, ubicado en la ciudad de Riobamba; los ensayos de corte en la Escuela Politécnica Nacional, en Quito; y los ensayos metalográficos en el Centro de Desarrollo Metalmecánico de Tungurahua, en la ciudad de Ambato. A continuación, se describen los ensayos efectuados.

### 2.2. ENSAYOS DE TRACCIÓN.

Se realizaron diez ensayos de tracción en la máquina universal WAW600B Jinan Liangong, certificada por el INEN con el código LNM-F-2016500064D, con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico del acero ASTM A615 bajo cargas axiales de tracción.

### 2.3. ENSAYOS DE CORTE.

Se realizaron diez ensayos de corte simple sobre probetas de varilla corrugada roscada de acero ASTM A615, utilizando la máquina Tinius Olsen serie 100T, calibrada por Metro Cía. Ltda. en el año 2022. Debido a la limitada disponibilidad de material, se definió un total de veinte ensayos experimentales (diez de tracción y diez de corte), cumpliendo con la norma ASTM E8 y optimizando el material disponible.

### 2.4. ENSAYOS METALGRÁFICOS.

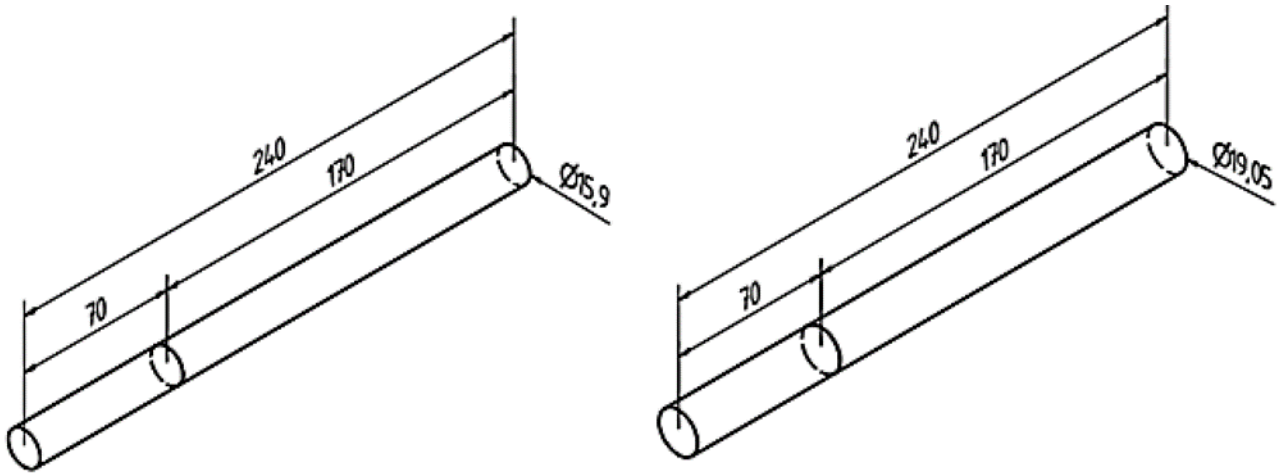
Los ensayos metalográficos se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales del Centro de Fomento Metalmecánico Carroceros de Tungurahua, utilizando un microscopio electrónico OLYmpUS modelo BX41M-LED, con el fin de analizar la microestructura del acero ASTM A615.

### 2.5. SIMULACIÓN.

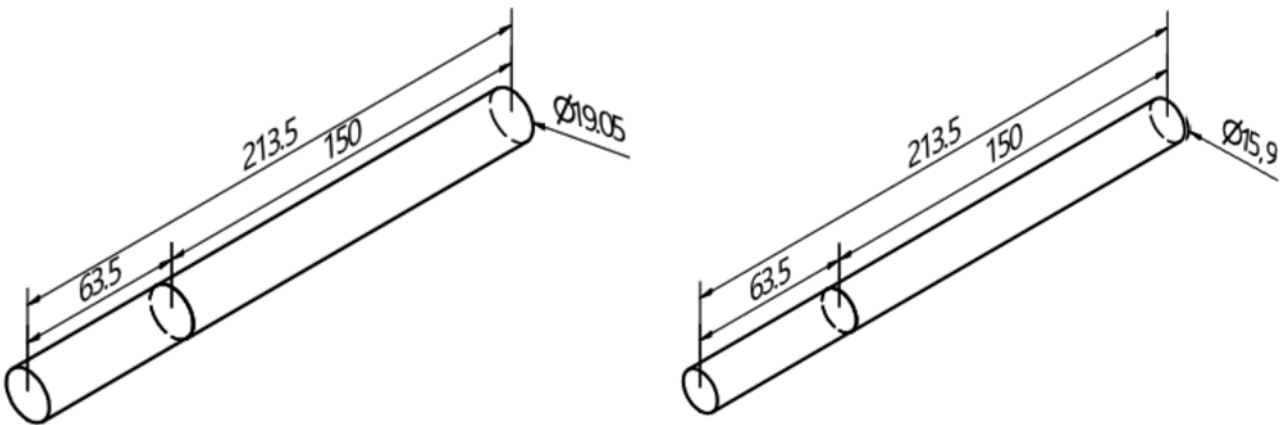
La simulación numérica se realizó en el software ANSYS 2019 R3, empleando el método de elementos finitos. El modelo consistió en un perno de acero ASTM A615 embebido en un bloque de concreto de 55 MPa, con una malla de refuerzo interna. Se aplicó un mallado hexagonal al perno y tetragonal al bloque. Las condiciones de borde incluyeron un soporte fijo en la base del concreto y cargas de tracción incrementales en el perno. El criterio de falla se estableció según el factor de seguridad de Von Mises ( $<1,0$ ). El modelo fue validado frente a los resultados de [19] obteniendo un porcentaje de error máximo de 4,05%, lo que confirma la precisión de la simulación.

### 2.6. MATERIALES.

Para la elaboración de las probetas destinadas a los ensayos de tracción, corte y análisis metalográfico se utilizó acero ASTM A615, conforme a las especificaciones técnicas del fabricante. Se emplearon varillas corrugadas NOVACERO de diámetros nominales 15,90 mm y 19,05 mm. Para cada diámetro se prepararon cinco probetas para ensayo de tracción y cinco probetas para ensayo de corte, de acuerdo con las dimensiones establecidas en las Figuras 1 y 2.



**Fig. 1-** Dimensiones de probeta de ensayos a tracción.



**Fig. 2-** Dimensiones de probeta de ensayos a corte.



**Fig. 3-** Roscado en varilla corrugada de acero ASTM A615 de 15,90 mm.



**Fig. 4-** Roscado en varilla corrugada de acero ASTM A615 de 19,05 mm.

## 2.7. BLOQUE DE CONCRETO.

Se consideró un concreto de base o cimiento teniendo en cuenta una resistencia al aplastamiento de 55 MPa. Para que los resultados puedan ser comparados con el estudio realizado en (Hangzhou, Beijing, 2019) artículo científico donde se estudió el mismo fenómeno en diferente acero.

- No se toma en cuenta ninguna consideración ambiental
- Se considera que el concreto trabaja con un índice de humedad bajo.
- No se considera el deterioro u oxidación perteneciente a la placa base
- Se desprecia cualquier tipo de imperfección en el colado.

## 2.8. PERNO DE ANCLAJE.

El perno de anclaje fue considerado como una varilla de acero ASTM A615 utilizada como elemento estructural, con propiedades mecánicas proporcionadas por la industria siderúrgica ecuatoriana. Para este estudio se empleó material suministrado por la empresa NOVACERO. Las propiedades mecánicas del acero utilizado se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1-** Propiedades mecánicas del acero ASTM A615

| Propiedades Mecánicas       |         |
|-----------------------------|---------|
| Límite de fluencia $F_y$    | 420 MPa |
| Resistencia a la tracción R | 620 MPa |
| Porcentaje de elongación    | 9% min  |

## 3. RESULTADOS

Los ensayos de tracción realizados en las probetas de 15,90 mm se llevaron a cabo en un total de cinco ensayos. Los resultados obtenidos evidencian roturas de carácter horizontal y frágil en cuatro de las cinco probetas analizadas. En la Tabla 2 se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de tracción realizados en varillas de 15,90 mm de acero ASTM A615.

**Tabla 2-** Resultados de ensayo de tracción en varilla de 15,90 mm de acero ASTM A615

| Número de muestra                      | 01  | 02                    | 03                    | 04                    | 05                    |
|--|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Característica                         | Barra roscada                                     | Barra roscada         | Barra roscada         | Barra roscada         | Barra roscada         |
| Diámetro (mm)                          | 12,95   | 13,41                 | 13,50                 | 13,07                 | 13,72                 |
| Longitud inicial (mm)                  | 240   | 240                   | 240                   | 240                   | 240                   |
| Sección transversal (mm <sup>2</sup> ) | 131,71  | 141,24                | 143,14                | 134,17                | 147,84                |
| Módulo de elasticidad (GPa)            | 2,709x10 <sup>2</sup>                             | 2,484x10 <sup>2</sup> | 2,582x10 <sup>2</sup> | 1,949x10 <sup>2</sup> | 2,045x10 <sup>2</sup> |
| Carga de fluencia (kN)                 | 71,34   | 69,72                 | 77,00                 | 69,46                 | 71,42                 |
| Esfuerzo de fluencia (MPa)             | 541,63  | 493,64                | 537,94                | 517,72                | 483,08                |
| Carga máxima (kN)                      | 88,66   | 93,06                 | 90,54                 | 89,94                 | 94,20                 |
| Esfuerzo máximo (MPa)                  | 673,13  | 658,89                | 632,53                | 670,36                | 637,16                |
| Porcentaje de elongación (%)           | 2   | 4,5                   | 3                     | 3                     | 4                     |
| Tipo de fractura                       | H   | H                     | PTC                   | H                     | H                     |
| Observaciones                          | H: Horizontal<br>PTC: Parcialmente de taza y cono |                       |                       |                       |                       |

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos de tracción realizados en cinco probetas de 19,05 mm de diámetro. En este caso, las probetas presentan fracturas diagonales y parciales de tipo taza y cono en cuatro de las cinco probetas ensayadas.

**Tabla 3-** Resultados de ensayo de tracción en varilla de 19,05 mm de acero ASTM A615

| Número de muestra                      | 06   | 07                    | 08                    | 09                    | 10                    |
|--|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Característica                         | Barra roscada  | Barra roscada         | Barra roscada         | Barra roscada         | Barra roscada         |
| Diámetro (mm)                          | 15,68  | 15,44                 | 15,60                 | 15,47                 | 16,58                 |
| Longitud inicial (mm)                  | 240  | 240                   | 240                   | 240                   | 240                   |
| Sección transversal (mm <sup>2</sup> ) | 193,10   | 187,23                | 191,13                | 187,96                | 215,90                |
| Módulo de elasticidad (GPa)            | 2,684x10 <sup>2</sup>  | 2,486x10 <sup>2</sup> | 1,965x10 <sup>2</sup> | 1,876x10 <sup>2</sup> | 1,872x10 <sup>2</sup> |
| Carga de fluencia (kN)                 | 89,70  | 143,92                | 129,16                | 90,42                 | 99,32                 |
| Esfuerzo de fluencia (MPa)             | 464,53   | 768,66                | 675,75                | 481,05                | 460,02                |
| Carga máxima (kN)                      | 129,70   | 152,92                | 130,54                | 134,76                | 148,30                |
| Esfuerzo máximo (MPa)                  | 671,67   | 816,73                | 682,97                | 716,95                | 686,88                |
| Porcentaje de elongación (%)           | 2  | 3,5                   | 4                     | 2,5                   | 2                     |
| Tipo de fractura                       | D  | PTC                   | H                     | D                     | D                     |
| Observaciones                          | H: Horizontal<br>PTC: Parcialmente de taza y cono<br>D: Diagonal |                       |                       |                       |                       |

Las variaciones observadas en los diámetros de las probetas se deben a tolerancias propias del proceso de fabricación del acero y a las irregularidades geométricas generadas por las corrugas y el proceso de roscado, lo que produce diferencias en la sección transversal efectiva de cada muestra. En cuanto al módulo de elasticidad, aunque es una propiedad inherente del material, su determinación experimental puede presentar dispersión debido a factores como la precisión de los instrumentos de medición, la alineación de la probeta en la máquina de ensayo y la definición del tramo elástico inicial en la curva esfuerzo-deformación. Adicionalmente, al tratarse de acero ASTM A615, el cual no está diseñado específicamente como acero estructural de alta precisión, pueden existir ligeras variaciones en su microestructura y composición, lo que contribuye a la dispersión de los valores obtenidos. Por lo tanto, las diferencias registradas se consideran normales dentro de ensayos experimentales y no afectan la validez general de los resultados.

En el análisis superficial del roscado de la varilla ASTM A615 se identificaron irregularidades geométricas asociadas al proceso de corrugado, las cuales generan discontinuidades en el diámetro efectivo de la varilla. Estas imperfecciones se muestran en la Figura 5, y pueden dificultar la planificación del mecanizado y el cumplimiento de los parámetros geométricos de la rosca.



**Fig. 5-** Imperfecciones en el roscado causadas por la irregularidad geométrica de la varilla ASTM A615.

Se llevó a cabo un análisis estadístico utilizando el método de chi cuadrado con el fin de comparar los resultados que se lograron experimentalmente. Esta evaluación se llevó a cabo para analizar la variación de las propiedades mecánicas adquiridas, cotejando los valores experimentales con los que se han fijado como referencia en las normativas AISC 360-16 y ASTM F1554.

El método consistió en determinar el valor promedio (M) de cada propiedad mecánica (resistencia máxima, módulo de elasticidad, porcentaje de alargamiento y esfuerzo de fluencia) a través del procesamiento de cinco probetas por cada diámetro (19,05 mm y 15,90 mm). Después, se estableció la desviación de los datos para examinar su dispersión y consistencia. Esto garantizó que la exactitud de los resultados permaneciera dentro de los límites aceptables para la investigación científica, lo cual fue comprobado a través del cálculo del error relativo.

Esta perspectiva permitió confirmar la fiabilidad de las pruebas y sentar una base comparativa fuerte para establecer la idoneidad del acero ASTM A615 en comparación con los materiales estructurales tradicionales. En la Tabla 4 se muestran los cálculos de propiedades mecánicas del acero ASTM A615.

**Tabla 4-** Cálculo de propiedades mecánicas del acero ASTM A615

|                     |                            |   |
|---------------------|----------------------------|---|
| Varilla de 15,90 mm | Módulo de elasticidad      | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 2,709 \times 10^2 + 2,484 \times 10^2 + 2,582 \times 10^2 + 1,949 \times 10^2 + 2,045 \times 10^2$ $M = 2,3538 \times 10^2 \text{ GPa}$ |
|                     | Esfuerzo a fluencia        | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 541,63 + 493,64 + 537,94 + 517,72 + 483,08$ $M = 514,80 \text{ MPa} = 5249,52 \text{ kg/cm}^2$  |
|                     | Esfuerzo máximo a tracción | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 673,13 + 658,89 + 632,53 + 670,36 + 637,16$ $M = 654,41 \text{ MPa} = 6673,16 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$                            |
|                     | Porcentaje de elongación   | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 2 + 4,5 + 3 + 3 + 4$ $M = 3,3\%$  |
| Varilla de 19,05 mm | Módulo de elasticidad      | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 2,684 \times 10^2 + 2,486 \times 10^2 + 1,965 \times 10^2 + 1,876 \times 10^2 + 1,872 \times 10^2$ $M = 2,1748 \times 10^2 \text{ GPa}$ |
|                     | Esfuerzo a fluencia        | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 464,53 + 768,66 + 675,75 + 481,05 + 460,02$   |
|                     |                            | $M = 570,00 \text{ MPa} = 5812,40 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  |
|                     | Esfuerzo máximo a tracción | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 671,67 + 816,73 + 682,97 + 716,95 + 686,88$ $M = 715,04 \text{ MPa} = 7291,38 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$                            |
|                     | Porcentaje de elongación   | $M = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^n 2 + 3,5 + 4 + 2,5 + 2$ $M = 2,8\%$  |

Se definió un marco comparativo con el acero ASTM A36 para determinar la factibilidad técnica del acero ASTM A615 en comparación con los estándares de seguridad estructural. La comparación es esencial porque la AISC 360-16 sugiere el empleo de pernos ASTM A307 (hechos con acero A36) para componentes que están sujetos a compresión. La Tabla 5 proporciona un desglose de los valores de referencia para el acero ASTM A36. Al comparar estos datos con los resultados de los experimentos realizados para la varilla A615 (Grado 60), se detectaron las siguientes razones de proporcionalidad:

- Resistencia: El límite de fluencia es 2,06 veces mayor en la varilla de 15,90 mm y 2,28 veces mayor en la de 19,05 mm respecto al A36. Asimismo, la resistencia a la tracción es entre 1,19 y 1,3 veces superior.
- Rigidez: El módulo de elasticidad presentó una diferencia drástica, siendo 1,18 veces mayor en la varilla de 15,90 mm y 1,09 veces mayor en la de 19,05 mm.
- Ductilidad: En sentido inverso, el acero ASTM A36 posee un porcentaje de elongación 6,97 veces mayor (para 15,90 mm) y 8,21 veces mayor (para 19,05 mm) que el material ensayado.

Este análisis cuantitativo muestra que, aunque el acero ASTM A615 tiene una capacidad de resistencia significativamente mayor, su ductilidad es limitada (alrededor del 3% de elongación en comparación con el 23% del A36), lo cual es un obstáculo importante. Para prevenir fallas frágiles o arranques prematuros antes de que la estructura llegue a las condiciones esperadas de servicio, es fundamental contar con la capacidad de deformación plástica en el diseño de anclajes sometidos a cargas cíclicas, dinámicas o variables.

**Tabla 5- Propiedades mecánicas del acero ASTM A36**

| <b>Propiedades Mecánicas</b> |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Técnica                      | Extrusión en caliente |
| Límite de fluencia $F_y$     | 250 MPa               |
| Resistencia a la tracción R  | 400 – 550 MPa         |
| Porcentaje de elongación     | 23% min               |
| Módulo de elongación         | 200 GPa               |

La Tabla 6 muestra diferencias significativas entre las propiedades del acero ASTM F1554 Gr 55 (según la norma AISC 360-16) y los valores obtenidos en los ensayos. El límite de fluencia es 1,33 veces mayor en la probeta de 15,90 y 1,47 veces mayor en la de 19,05. En cuanto a la resistencia a la tracción, la muestra de 15,90 presenta un aumento de 1,27 veces, y la de 19,05, 1,38 veces. Sin embargo, el porcentaje de elongación es notablemente menor: 6,37 veces menor en la sonda de 15,90 y 7,5 veces menor en la de 19,05.

**Tabla 6- Propiedades mecánicas del acero ASTM F1554 Gr 55**

| <b>Propiedades Mecánicas</b> |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Técnica                      | Extrusión en caliente |
| Límite de fluencia $F_y$     | 388 MPa               |
| Resistencia a la tracción R  | 517 MPa               |
| Porcentaje de elongación     | 21% min               |

La Tabla 7 muestra que las propiedades del acero ASTM F1154 Gr 105 presentan variaciones en comparación con los ensayos de las sondas, el límite de fluencia es 0,8 veces menor en la probeta de 15,90 y 0,88 veces menor en la de 19,05, en cuanto a la resistencia a la tracción, la probeta de 15,90 es 0,76 veces menor y la de 19,05, 0,83 veces menor. Sin embargo, el porcentaje de elongación es significativamente mayor, siendo 4,54 veces más en la de 15,90 y 5,36 veces más en la de 19,05.

**Tabla 7- Propiedades mecánicas del acero ASTM F1554 Gr 105**

| <b>Propiedades Mecánicas</b> |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| Técnica                      | Extrusión en caliente |
| Límite de fluencia $F_y$     | 659,48 MPa            |
| Resistencia a la tracción R  | 878,84 MPa            |
| Porcentaje de elongación     | 15% min               |

### 3.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE

Tras la falla, se calculó el área resistente promediando cuatro lecturas de diámetro en la zona afectada, con el fin de obtener resultados con bajo margen de error. Los resultados correspondientes a los ensayos de corte en probetas de 15,90 mm se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 8-** Resultados de ensayo de corte en varilla de 15,90 mm

| Número de muestra                      | 01            | 02            | 03            | 04            | 05            |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Característica                         | Barra roscada | Barra roscada | Barra roscada | Barra roscada | Barra roscada |
| Diámetro menor(mm)                     | 13,40         | 13,10         | 13,20         | 13,60         | 13,40         |
| Diámetro comercial (mm)                | 16            | 16            | 16            | 16            | 16            |
| Sección transversal (mm <sup>2</sup> ) | 141,00        | 134,80        | 145,30        | 135,80        | 140,00        |
| Carga máxima (kN)                      | 73,57         | 76,56         | 76,86         | 67,28         | 64,14         |
| Resistencia al corte (MPa)             | 521,70        | 568,00        | 529,10        | 495,40        | 458,20        |

Los resultados del ensayo de corte en las probetas de 15,90 mm muestran una resistencia promedio al corte de 514,48 MPa, una carga máxima promedio de 71,68 kN y una sección transversal promedio de 139,38 mm<sup>2</sup>.

Para establecer su clasificación, este valor se comparó con los criterios definidos en la Tabla J3.2 de la norma AISC 360-16, en la cual se especifican los valores de esfuerzo cortante nominal para diferentes grupos de pernos estructurales. A partir de los resultados experimentales, el esfuerzo cortante equivalente obtenido se aproxima al valor de 469 MPa (68 ksi), correspondiente al Grupo B, considerando el caso en que la rosca no está excluida del plano de corte. En función de esta comparación, se puede inferir que la varilla ensayada presenta un comportamiento mecánico similar al de los pernos del Grupo B bajo condiciones en las que la zona roscada participa en la resistencia al corte.

En la Tabla 9 se presentan los resultados de los ensayos de corte realizados en probetas de 19,05 mm de diámetro, con el fin de comparar su comportamiento mecánico frente a las probetas de menor diámetro.

**Tabla 9-** Resultados de ensayo de corte en varilla de 19,05 mm

| Número de muestra                      | 06            | 07            | 08            | 09            | 10            |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Característica                         | Barra roscada | Barra roscada | Barra roscada | Barra roscada | Barra roscada |
| Diámetro menor(mm)                     | 16,70         | 15,60         | 15,90         | 16,60         | 16,00         |
| Diámetro comercial (mm)                | 20            | 20            | 20            | 20            | 20            |
| Sección transversal (mm <sup>2</sup> ) | 218,40        | 191,10        | 197,90        | 215,10        | 200,40        |
| Carga máxima (kN)                      | 112,96        | 111,07        | 121,33        | 112,58        | 111,48        |
| Resistencia al corte (MPa)             | 517,20        | 581,10        | 613,00        | 523,30        | 556,20        |

Los resultados obtenidos en los ensayos de corte en probetas de 19,05 mm evidencian una resistencia promedio al corte de 558,16 MPa, una carga máxima promedio de 113,88 kN y una sección transversal promedio de 204,58 mm<sup>2</sup>.

Para establecer su clasificación, este valor se comparó con los criterios definidos en la Tabla J3.2 de la norma AISC 360-16, en la cual se especifican los valores de esfuerzo cortante nominal para diferentes grupos de pernos estructurales. A partir de los resultados experimentales, el esfuerzo cortante equivalente obtenido se aproxima al valor de 469 MPa (68 ksi), correspondiente al Grupo B, considerando el caso en que la rosca no está excluida del plano de corte. En función de esta comparación, se puede inferir que la varilla ensayada presenta un comportamiento mecánico similar al de los pernos del Grupo B bajo condiciones en las que la zona roscada participa en la resistencia al corte.

En la Tabla 10 se presentan los valores de resistencia a corte tipo X y tipo N para distintos aceros utilizados como varillas de anclaje, con el fin de establecer una comparación con los resultados experimentales obtenidos. Estos valores han sido tomados y adaptados de la guía Steel Design Guide 1: Base Plate and Anchor Rod Design, publicada por el American Institute of Steel Construction (AISC), específicamente de la Tabla 2.2 correspondiente a materiales para pernos de anclaje.

Los ensayos tipo X y N evalúan la resistencia del acero a la compresión transversal y al cizallamiento, respectivamente. El tipo X es clave para pilares y columnas, mientras que el tipo N es relevante para vigas y uniones atornilladas.

**Tabla 10-** Resistencia a corte tipo X y N para aceros usados como varillas de anclaje

| Acero        | Resistencia de corte tipo X (MPa) | Resistencia de corte tipo N (MPa) |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| F1554 Gr 36  | 199,94                            | 159,95                            |
| F1554 Gr 55  | 258,55                            | 206,84                            |
| F1554 Gr 105 | 430,92                            | 344,73                            |

Los resultados obtenidos en las probetas de 15,90 mm y 19,05 mm evidencian una alta capacidad resistente en ambos casos. No obstante, se observan diferencias en el comportamiento mecánico entre ambos diámetros, siendo las probetas de 19,05 mm las que presentan mayores valores de resistencia al corte y a la tracción, lo cual se asocia directamente con el incremento del área transversal efectiva. Sin embargo, esta mayor resistencia no implica necesariamente un mejor desempeño global, ya que también se identifican variaciones en la ductilidad del material, reflejadas en los porcentajes de elongación registrados.

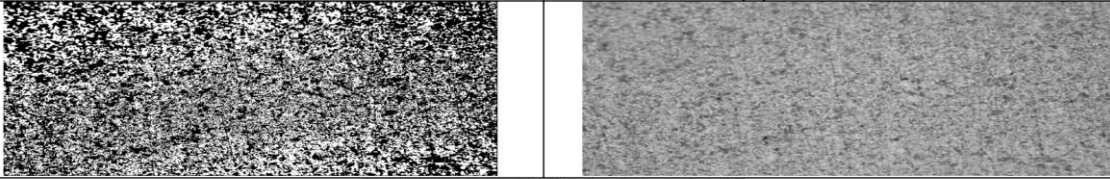
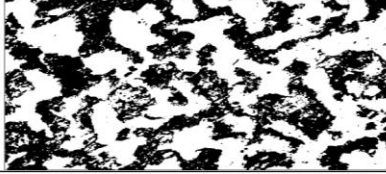
Adicionalmente, al comparar los resultados experimentales con los valores normativos y de referencia para aceros empleados en pernos de anclaje, se evidencia que las varillas de acero ASTM A615 pueden desarrollar capacidades resistentes comparables a las de aceros estructurales convencionales. No obstante, la dispersión de los resultados y los modos de falla observados sugieren un comportamiento menos predecible, lo que resalta la importancia de una evaluación experimental rigurosa antes de su aplicación en elementos estructurales críticos.

### 3.2. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

El objetivo de este análisis es evaluar los efectos del proceso de roscado sobre la macroestructura y microestructura del acero ASTM A615, identificando posibles alteraciones en la morfología del material, concentraciones de esfuerzos, discontinuidades o zonas de debilitamiento que puedan influir en su comportamiento mecánico.

Luego de lijar y secar las probetas, se aplicó un ataque químico con Nital al 4% durante 50 segundos para observar la microestructura del acero. Posteriormente, se tomaron microfotografías con un microscopio electrónico a aumentos de 100x, 200x, 500x y 1000x. Los resultados del ensayo metalográfico correspondiente a la probeta de 15,90 mm se presentan en la Tabla 11.

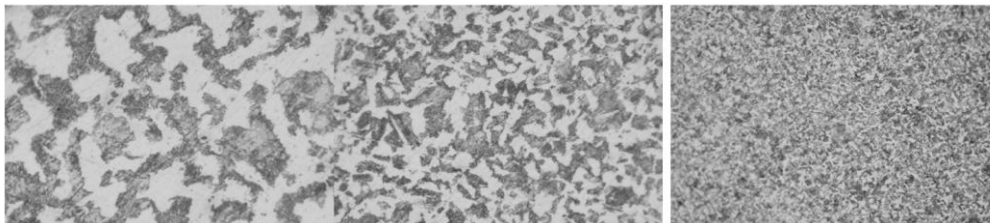
**Tabla 11-** Reporte de ensayo metalográfico de probeta de 15,90 mm

| Ensayo Metalográfico   |   |
|--|---|
| Ensayo N.º: 01   | Tipo de estudio: De laboratorio                                   |
| Lugar de estudio y análisis: Laboratorio de Materiales - CFPMCPT   |   |
| Solicitado por: UTA  | Fecha de solicitud: 12/12/2023                                    |
| Identificación de componente de estudio: Probeta Nº01  |   |
| Realizado por: Ing. Fernando Tibán   | Supervisado por: Ing. Luis Mayorga                                |
| Parámetros de ensayo   |   |
| Lugar: Laboratorio de materiales - CFPMCPT   | Pulido: Mecánico  |
| Temperatura durante pulido: 22°C   | Ataque químico de superficie: Nital 4%                            |
| Material estudiado: Acero ASTM A615  | Tiempo: 50 segundos   |
| Tamaño de grano<br>Probeta de 15,90  |   |
| Método: ASTM E112 comparación  | Componentes: Perlita y ferrita<br>Ferrita 46,59% y perlita 53,40% |
|    |   |
|    |   |
| <p>Al ser un acero hipoeutectoide presenta ferrita proeutectoide el carbono no se ha alojado al borde del grano por lo que prima el porcentaje de fases el cual mediante el software ImageJ se determinó en 46,59% ferrita proeutectoide y 53,40% perlita.</p> |   |

A partir del análisis microestructural, se identificó que el acero ASTM A615 corresponde a un acero hipoeutectoide, caracterizado por la presencia de ferrita proeutectoide distribuida en los contornos de grano y perlita en la matriz. La microestructura observada presenta una distribución relativamente homogénea de fases, sin evidencia de discontinuidades significativas o defectos microestructurales que comprometan la integridad del material, como se observa en la Figura 6.

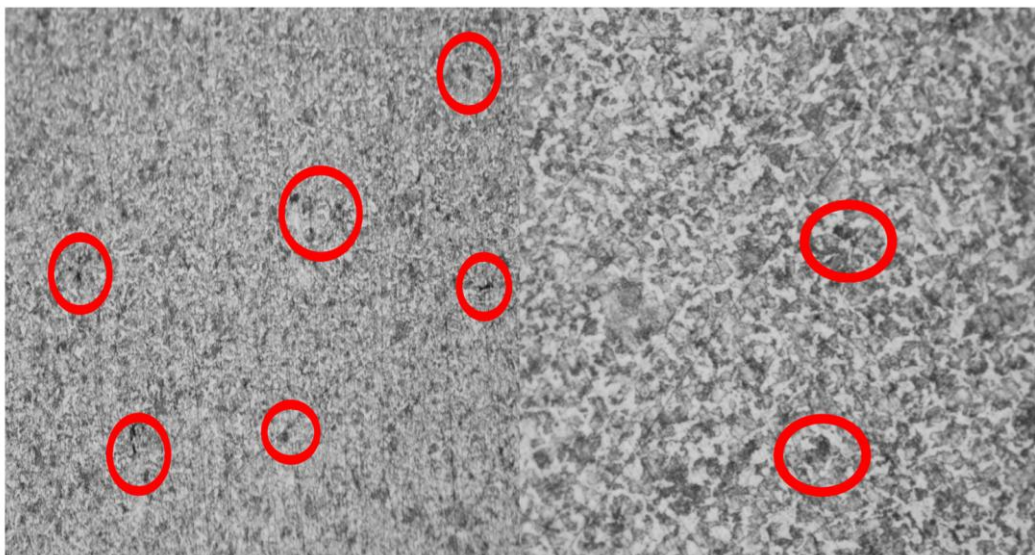
Asimismo, se observa que la morfología de la perlita y la disposición de la ferrita sugieren un proceso de enfriamiento controlado durante la fabricación del acero. Sin embargo, en las zonas cercanas al roscado se pueden generar concentraciones de esfuerzos y ligeras alteraciones locales en la microestructura, lo cual podría influir en el comportamiento mecánico bajo cargas, especialmente en condiciones de fatiga o corte.

En este sentido, aunque la microestructura es consistente con la de un acero de refuerzo convencional, la presencia de estas características microestructurales refuerza la necesidad de evaluar experimentalmente su desempeño cuando se emplea en aplicaciones no convencionales, como pernos de anclaje.



**Fig. 6-** Microfotografías de la probeta de 15,90 mm de acero ASTM A615: (a) aumento de 1000x, (b) aumento de 500x y (c) aumento de 200x.

En las micrografías obtenidas se observan incrustaciones de grafito en la matriz del acero, atribuibles al proceso de fundición previo del material. Estas incrustaciones se evidencian a diferentes aumentos, como se muestra en la Figura 7. Como se menciona en [20].



**Fig. 7-** Incrustaciones de grafito observadas en la probeta de 15,90 mm de acero ASTM A615: (a) aumento de 100x y (b) aumento de 200x.

Al incrementar el nivel de aumento se evidencia con mayor claridad la distribución y morfología de las incrustaciones de grafito presentes en la microestructura del acero, como se observa en la Figura 8.



**Fig. 8-** Incrustaciones de grafito en la probeta de 15,90 mm de acero ASTM A615: (a) aumento de 500x y (b) aumento de 1000x.

El acero ASTM A615 analizado presenta una microestructura ferrita-perlita cercana al equilibrio, con predominio de perlita sobre ferrita. Este tipo de distribución de fases se asocia, en la literatura, con un incremento de la resistencia mecánica y de la capacidad de endurecimiento del material, debido al aporte de la perlita y a su efecto sobre la respuesta deformacional del acero [21], [22]. No obstante, dado que un contenido elevado de perlita puede afectar la ductilidad, la aptitud del material para aplicaciones estructurales y para procesos de mecanizado debe interpretarse de manera conjunta con su respuesta experimental [22], [23]. En este sentido, la microestructura observada permite inferir que el acero presenta propiedades mecánicas adecuadas para su uso estructural y una capacidad de deformación compatible con operaciones de mecanizado, siempre que estas se realicen bajo condiciones controladas y por personal calificado, a fin de evitar la generación de discontinuidades o defectos que comprometan su desempeño

### 3.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La validación de la interfaz concreto–perno de anclaje se realizó mediante un modelo numérico basado en el método de elementos finitos, desarrollado en el software ANSYS. Se aplicó una carga progresiva en el extremo libre del perno, considerando el bloque de concreto como empotrado en su base, con el fin de simular condiciones reales de servicio.

Se observó que, con una carga mínima de 0,26 MPa, tanto el perno como el concreto presentan deformaciones en tracción, evidenciando un alto coeficiente de seguridad según el criterio de Von Mises para condiciones de servicio menores. En la Figura 9 se muestra la relación entre el esfuerzo aplicado y el factor de seguridad para la interfaz correspondiente al perno de 19,05 mm. [24], [25]

El esfuerzo máximo al cual el enlace falla es de 25,14 MPa, valor que corresponde a la falla del concreto en la interfaz perno–concreto. Este comportamiento se identificó a partir del análisis de los factores de seguridad calculados para cada uno de los elementos del sistema.

Se observó que el perno de anclaje mantiene factores de seguridad superiores a la unidad durante todo el proceso de carga, mientras que el concreto presenta una reducción progresiva de su capacidad resistente. En particular, cuando la fuerza aplicada alcanza los 3500 N, el factor de seguridad del concreto disminuye a 0,96, indicando el inicio de la falla.

En consecuencia, se concluye que el modo de falla del sistema está gobernado por el concreto y no por el acero, generándose la ruptura en un volumen de concreto con un diámetro aproximado de 0,2 m [26].

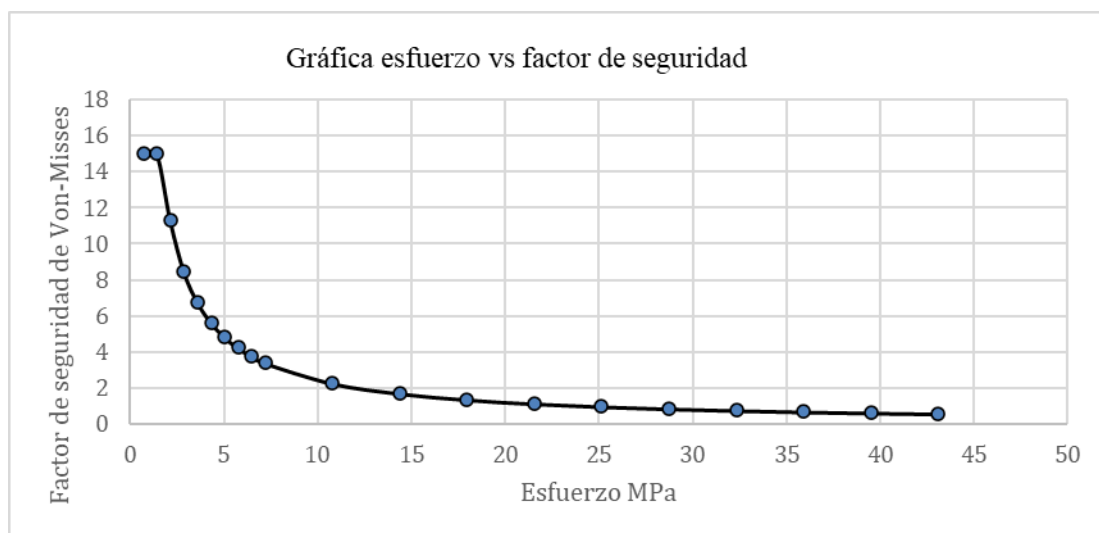


Fig. 9- Relación esfuerzo–factor de seguridad en la interfaz concreto–perno de anclaje de 19,05 mm.

En la Figura 9 se observa cómo el factor de seguridad disminuye progresivamente conforme aumentan los esfuerzos aplicados en el perno de 19,05 mm. Se identifica que, al aplicar una carga de 100 N, el factor de seguridad comienza a descender desde valores cercanos a 15 hasta aproximarse a 3,4 cuando el esfuerzo alcanza 21,54 MPa, valor próximo al esfuerzo máximo considerado para la falla del sistema. Con el fin de cuantificar la diferencia entre los resultados de la simulación y los valores teóricos, se calculó el porcentaje de error relativo utilizando la siguiente expresión:

$$\%error = \frac{|E - T|}{|T|} * 100 \quad (1)$$

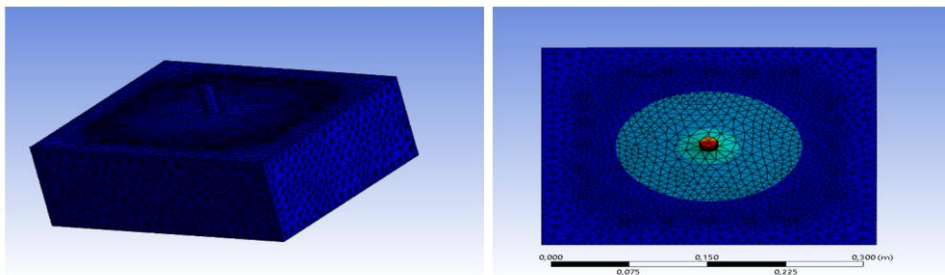
$$\%error = \frac{|21,54 - 21|}{|21|} * 100 = 2,57\% \quad (2)$$

donde **E** corresponde al valor obtenido mediante simulación y **T** al valor teórico de referencia [19].

El porcentaje de error aceptable en proyectos de investigación donde se busca generar conocimiento para futuras investigaciones suele situarse entre 2,5% y 8% según, Pichardo Corpus [27], para que este sea aceptado dentro de una investigación científica lo cual valida la simulación y los resultados en la misma.

Para el caso analizado, el porcentaje de error obtenido fue de 2,57 %, valor que se encuentra dentro del rango aceptable para trabajos de investigación científica.

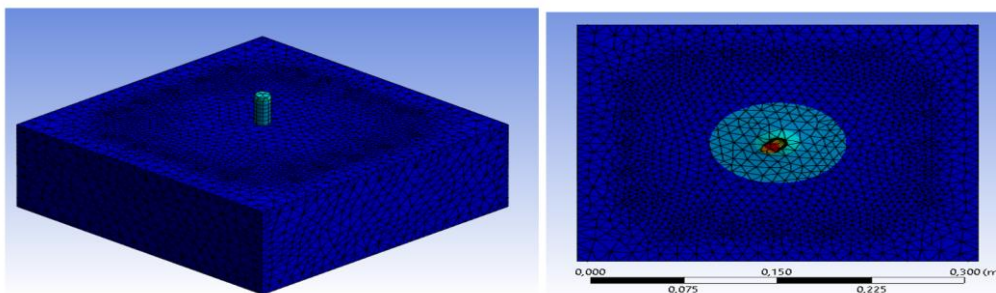
En la Figura 10 se muestran los estados inicial y final de la simulación numérica de esfuerzos en el perno de anclaje de 19,05 mm, evidenciando la concentración de esfuerzos en la zona de contacto perno–concreto.



**Fig. 10-** Estados inicial y final de la simulación de esfuerzos en el perno de anclaje de 19,05 mm.

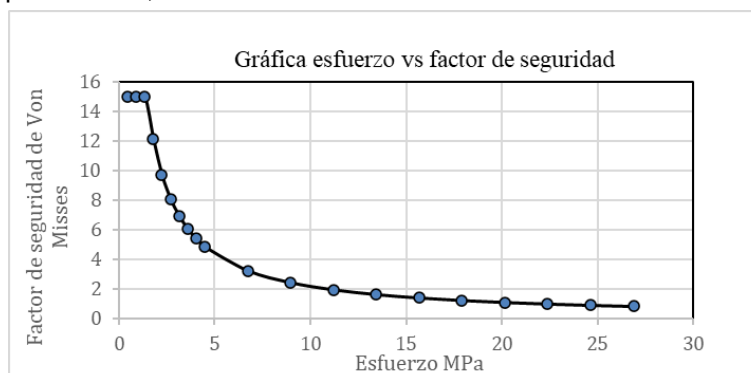
Para el perno de 15,90 mm se siguió el mismo procedimiento de simulación, considerando un esfuerzo mínimo inicial de 1,34 MPa, previo a que el coeficiente de seguridad alcanzara valores iguales o superiores a 15. La simulación termina cuando la carga aplicada reduce el coeficiente de seguridad a menos de uno, lo que indica falla del concreto o acero, generando un cono de concreto de aproximadamente 0,20 metros de diámetro.

La Figura 11 presenta los estados inicial y final de la simulación de esfuerzos para el perno de anclaje de 15,90 mm, observándose un comportamiento similar al registrado para el perno de mayor diámetro.



**Fig. 11-** Estados inicial y final de la simulación de esfuerzos en el perno de anclaje de 15,90 mm.

En la Figura 12 se muestra la relación entre el esfuerzo aplicado y el factor de seguridad para la interfaz concreto–perno correspondiente al perno de 15,90 mm.



**Fig. 12-** Relación esfuerzo–factor de seguridad en la interfaz concreto–perno de anclaje de 15,90 mm.

La Figura 12 permite observar el comportamiento del interfaz perno–concreto desde la aplicación de una carga de 100 N hasta alcanzar un esfuerzo aproximado de 20,16 MPa, punto en el cual se produce la falla del concreto.

Al comparar este valor con el esfuerzo teórico de referencia, se obtuvo un porcentaje de error de 4,05 %, calculado mediante la expresión previamente definida para el error relativo, el cual se encuentra dentro del rango aceptable para estudios de investigación.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el porcentaje de error obtenido se encuentra dentro del rango aceptable reportado en la literatura para estudios de validación numérica, lo cual valida la precisión del modelo y la adecuada correlación entre los resultados experimentales y numéricos.

En la Figura 13 se presenta el diagrama esfuerzo–deformación obtenido a partir de la simulación de tracción de la junta concreto–perno de 15,90 mm.

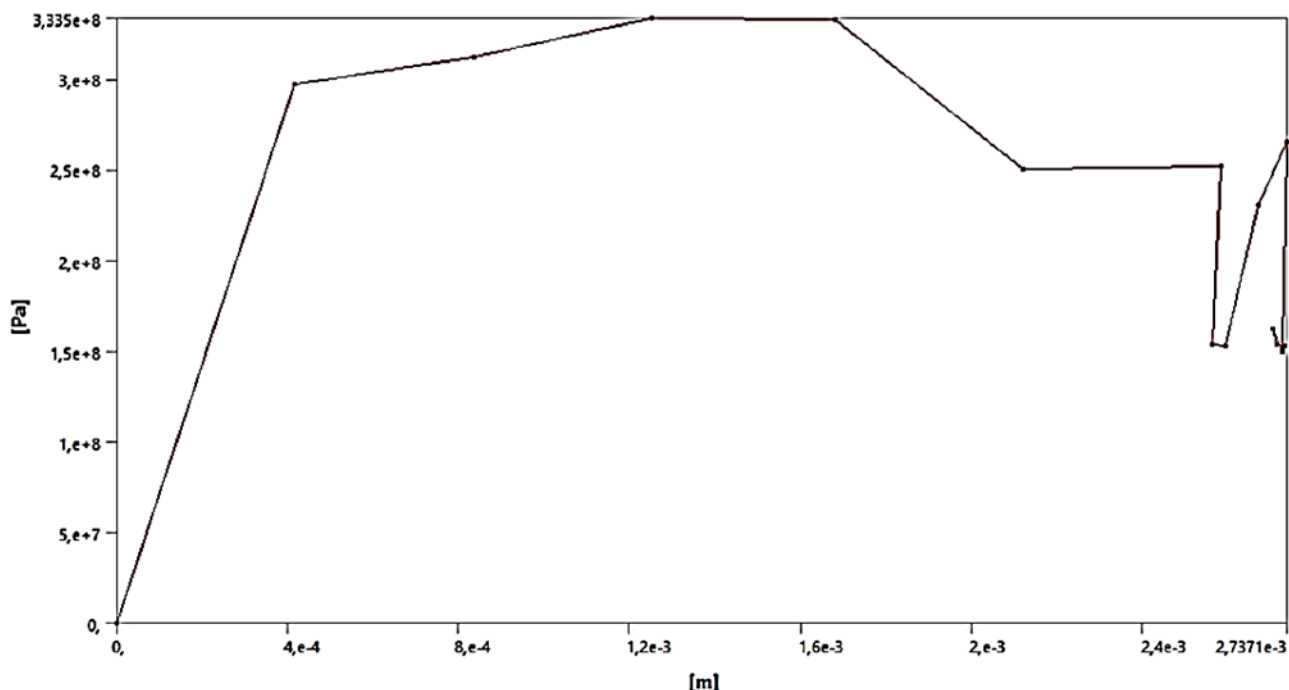


Fig. 13- Diagrama esfuerzo–deformación de tracción de la junta concreto–perno de 15,90 mm de anclaje.

La Figura 13 muestra una deformación máxima aproximada de 0,4 mm antes de la falla, validando el análisis de la interfaz al coincidir con las zonas esfuerzo–deformación características del acero.

Finalmente, en la Figura 14 y Figura 15 se presenta la relación entre la fuerza aplicada y el coeficiente de seguridad para el perno de anclaje de 19,05 mm y 15,90 mm, respectivamente.

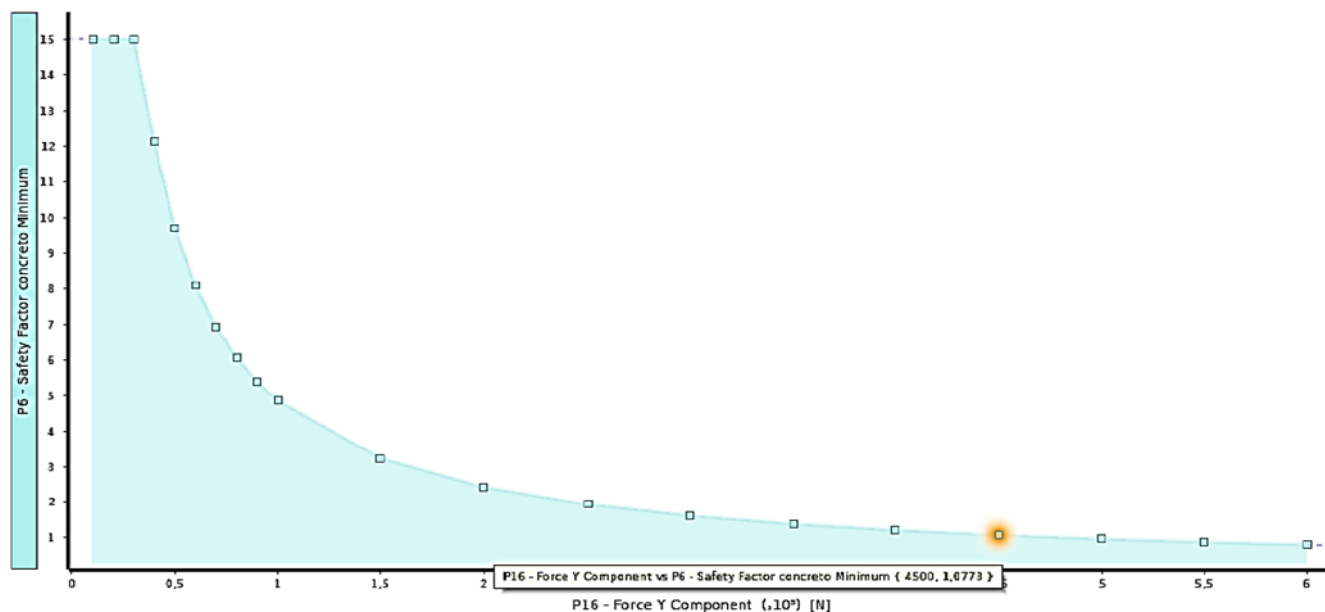


Fig. 14- Relación fuerza–coeficiente de seguridad para el perno de anclaje de 19,05 mm

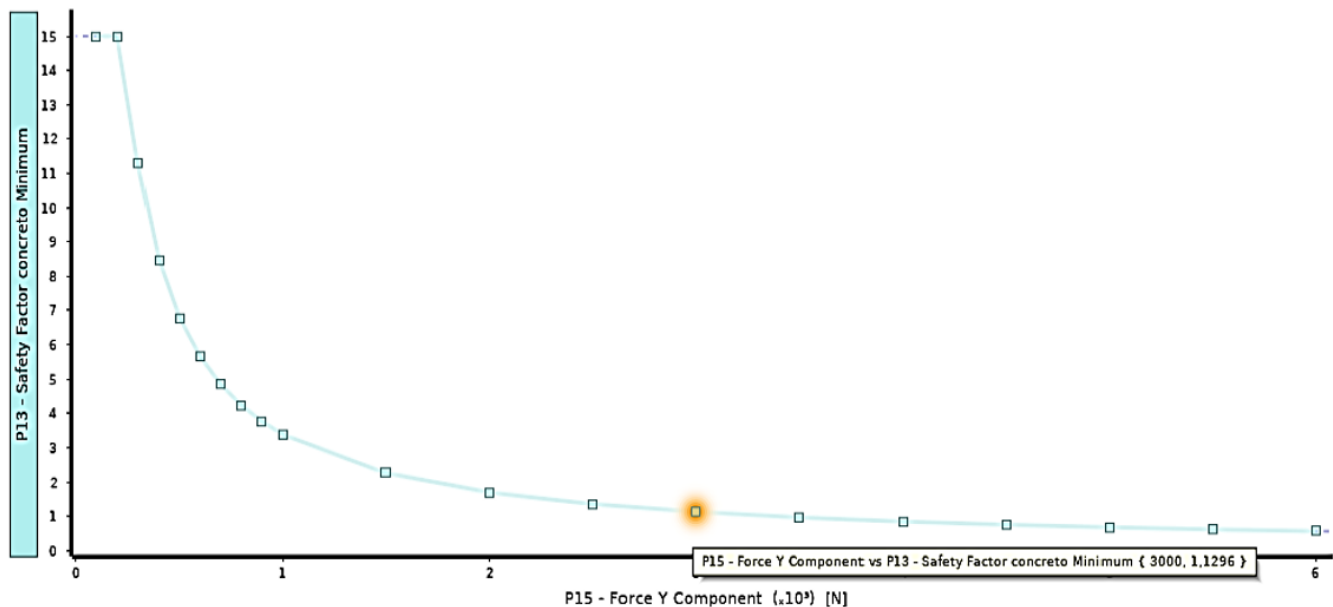


FIG. 15- RELACIÓN FUERZA–COEFICIENTE DE SEGURIDAD PARA EL PERNO DE ANCLAJE DE 15,90 MM

#### 4. DISCUSIÓN

El presente estudio sobre el acero ASTM A615 revela un perfil de resistencia a tracción destacado. Este comportamiento se aprecia en los valores medios obtenidos en la Tabla 4, donde el esfuerzo de fluencia promedio alcanzó los 514,80 MPa (15,90 mm) y 570,00 MPa (19,05 mm), superando significativamente al acero ASTM A36 detallado en la Tabla 5. Específicamente, los resultados evidencian que el límite de fluencia del material ensayado es 2,06 a 2,28 veces superior al del acero de referencia.

Sin embargo, esta superioridad mecánica se ve contrastada por el bajo nivel de elongación, el cual constituye una limitación crítica. Según los resultados de la Tabla 4, el acero ASTM A615 registró una elongación promedio de apenas 3,3% (15,90 mm) y 2,8% (19,05 mm), valores drásticamente inferiores al 23% mínimo que exige la normativa para el acero A36. Esta deficiencia en la ductilidad se refleja también en la Tabla 2 y Tabla 3, donde se reportan roturas de carácter horizontal y frágil en la mayoría de las probetas.

Estos hallazgos se complementan con los resultados del análisis metalográfico, en el cual se identificó que el acero ASTM A615 presenta una microestructura típica de acero hipoeutectoide, compuesta principalmente por perlita y ferrita proeutectoide. La distribución de fases observada, con aproximadamente 53,40% de perlita y 46,59% de ferrita, evidencia una estructura relativamente homogénea, sin presencia de discontinuidades microestructurales significativas que comprometan la integridad del material. No obstante, la morfología de las fases y su distribución en los contornos de grano sugieren un comportamiento mecánico con limitada capacidad de deformación plástica, lo cual resulta coherente con los bajos valores de elongación obtenidos experimentalmente.

Adicionalmente, las micrografías permitieron identificar la presencia de incrustaciones de grafito dispersas en la matriz del acero, atribuibles al proceso de fabricación previo del material. Estas inclusiones, aunque no predominantes, constituyen heterogeneidades locales que pueden actuar como concentradores de esfuerzos, favoreciendo la iniciación de grietas bajo solicitaciones de tracción o cargas cíclicas. Este aspecto resulta relevante, ya que contribuye a explicar el comportamiento frágil observado en las probetas, particularmente en condiciones donde la ductilidad es un factor determinante.

Estos hallazgos coinciden con los estudios, y sustentan la conclusión de que el material posee una ductilidad insuficiente para anclajes expuestos a cargas dinámicas, lo que podría derivar en fallas por arrancamiento antes de alcanzar las condiciones de servicio, tal como se observó en la simulación numérica (Figura 9 y 12).

Además, esta investigación subraya un problema en el proceso de roscado de las varillas ASTM A615, especialmente en aquellas corrugadas. Esta problemática se aprecia visualmente en la Figura 5, donde se identificaron irregularidades geométricas y discontinuidades en el diámetro efectivo de la varilla que dificultan el cumplimiento de los parámetros normalizados de la rosca, esto es un punto crítico, ya que una rosca defectuosa puede reducir significativamente la capacidad de anclaje de una varilla, poniendo en riesgo la seguridad estructural.

Este problema de fabricación ha sido abordado por [28], [29], [30], [31], quienes subrayan que los defectos de roscado son uno de los factores que contribuyen a la falla prematura en pernos de anclaje sometidos a esfuerzos de cizalla y tracción combinados, especialmente en proyectos de infraestructura con altas demandas de carga y factores ambientales variables.

La comparación con la normativa ecuatoriana NEC SE EC [32], [33] y la americana AISC 360-16 [34] evidencia una falta de coherencia en la elección de materiales y en la metodología de pruebas aplicada a la evaluación de anclajes estructurales. La adaptación local de materiales como el ASTM A615 responde a su disponibilidad en el mercado ecuatoriano, pero la normativa no especifica los requisitos para garantizar su desempeño bajo diversas condiciones de carga, investigaciones como las de [35], [36] que destacan la importancia de una estandarización en los ensayos y especificaciones técnicas en regiones que se enfrentan a distintos desafíos en términos de adaptación de materiales, por tanto en su estudio, recomiendan un enfoque más integrado que considere las propiedades de resistencia y ductilidad, especialmente en áreas sísmicas o de alta actividad industrial.

En lo que respecta a pruebas mecánicas, los ensayos de corte y tracción llevados a cabo en este estudio señalan que el acero ASTM A615 [37] tiene una gran capacidad de resistencia, ya que soporta cargas altas. No obstante, la escasa ductilidad que se evidencia a partir del porcentaje de elongación registrado (alrededor del 3%) podría causar fallos prematuros en situaciones de carga dinámica o variable [8], [38], [39], [40], [41].

Estos hallazgos son coherentes con lo que se ha reportado en la bibliografía, que indica que los aceros de alta resistencia, a pesar de tener beneficios en términos de resistencia, tienden a mostrar una ductilidad inferior frente a requerimientos complejos. En este marco, varios estudios sugieren que se utilicen tratamientos térmicos como una opción para optimizar la ductilidad del material sin poner en peligro de manera significativa su resistencia mecánica.

Asimismo, investigaciones recientes en anclajes estructurales sugieren que la implementación de tratamientos térmicos específicos puede incrementar la capacidad de deformación del acero, mejorando su desempeño frente a cargas dinámicas y de impacto, lo cual resulta fundamental para garantizar la integridad estructural en aplicaciones críticas [42], [43], [44], [45], [46], [47].

Por último, se concluye que la investigación sobre el acero ASTM A615 como perno de anclaje evidencia que, a pesar de su alta resistencia a la tracción, su baja elongación representa una limitación importante en aplicaciones estructurales que requieren alta ductilidad.

Estos resultados se complementan con estudios recientes que recomiendan la mejora de las propiedades de ductilidad mediante procesos de post-tratamiento, así como la necesidad de contar con una normativa más específica que considere las propiedades locales de los materiales y las exigencias estructurales del entorno

## 5. CONCLUSIONES

El acero ASTM A615 tiene un alto nivel de resistencia a la tracción, pero su escaso porcentaje de elongación (cerca del 3%), que es significativamente menor al valor sugerido por las normativas estructurales, muestra que tiene una ductilidad baja. Esta condición supone un riesgo de fallo anticipado cuando el material se somete a cargas no homogéneas, requerimientos dinámicos o efectos de flexión en sistemas de anclaje.

Se establece, con base en los resultados que se han conseguido experimental y numéricamente, que el acero ASTM A615 tiene la capacidad de ser empleado como perno de anclaje en situaciones donde lo que predomine sean las cargas estáticas, controladas y de baja variabilidad. Sin embargo, no se aconseja su empleo en estructuras que estén expuestas a cargas cíclicas y dinámicas o que necesiten una alta capacidad de deformación y disipación de energía.

Además, se detectaron restricciones en el procedimiento de roscado de varillas corrugadas, vinculadas a la fluctuación en el diámetro. Esto impacta la exactitud del acoplamiento y la repartición de fuerzas en la interfaz entre el concreto y el perno. Este aspecto debe tenerse en cuenta al fabricar y controlar la calidad de los componentes de anclaje.

Por último, se aconseja que el empleo del acero ASTM A615 como perno de anclaje sea analizado con criterios de diseño prudentes y junto a investigaciones adicionales que examinen su rendimiento bajo cargas combinadas. Además, se recomienda la creación de directrices normativas particulares que incluyan el empleo de materiales no convencionales en sistemas de anclaje estructural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. T. J. Mander and A. B. Matamoros, "Constitutive modeling and overstrength factors for reinforcing steel," *ACI Struct. J.*, vol. 116, no. 3, pp. 219–232, 2019, doi: <https://doi.org/10.14359/51713320>
2. R. Hawileh, A. Rahman, and H. Tabatabai, "Evaluation of the Low-Cycle Fatigue Life in ASTM A706 and A615 Grade 60 Steel Reinforcing Bars," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 65–76, Jan. 2010, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:1\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:1(65))
3. X. Rong, X. Sun, X. Li, and Y. Li, "Experimental study on anchoring performance of high-strength steel bar with welded anchor plate and anchor bar," *Yingyong Lixue Xuebao/Chinese Journal of Applied Mechanics*, vol. 41, no. 5, pp. 1091–1100, 2024, doi: <https://doi.org/10.11776/j.issn.1000-4939.2024.05.013>
4. C. D. Moen and S. R. Sharp, "Bond properties between concrete and corrosion-resistant reinforcing steels," *ACI Struct. J.*, vol. 113, no. 2, pp. 383–392, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.14359/51688628>
5. W. Fuchs and J. Hofmann, "Post-installed reinforcing bars – Requirements for their reliable use," *Developments in the Built Environment*, vol. 5, Mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100040>
6. G. Zhang, D.-K. Thai, Y. Dai, Y. Zeng, B. Shi, and H. Li, "Investigation into the Bearing Capacity and Mechanics Behavior of the Diaphragm Connection Form of a Utility Tunnel," 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings>
7. Y. M. Ruda Arias and D. F. Paez Moreno, "Anclajes posinstalados en concretos de alta resistencia," *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, pp. 137–156, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.18359/RCIN.2208>
8. K. Salman, R. Sarange, A. Iqbal, and G. Faraone, "ENHANCING THE SEISMIC PERFORMANCE OF HOLD-DOWN TIMBER TO CONCRETE CONNECTIONS VIA DUCTILE ANCHORS," in *Proceedings from the 14th World Conference on Timber Engineering: Advancing Timber for the Future Built Environment, WCTE 2025, World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, 2025, pp. 3242–3247. doi: <https://doi.org/10.52202/080513-0395>
9. W. Tizani, M. Cabrera, M. Mahmood, J. Ninic, and F. Wang, "The behaviour of anchored extended blind bolts in concrete-filled tubes," *Steel Construction*, vol. 15, pp. 51–58, May 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/stco.202100037>
10. C. J. Barros Ochoa, "Análisis de la Tensión de Adherencia del Hormigón con el Acero de refuerzo en diferentes estados de oxidación y diferentes tratamientos de pasivación y protección," *Universidad de Cuenca*, Cuenca, 2021. Accessed: Nov. 07, 2023. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37321>
11. L. Toranzo and D. Fadruga, "Selección de materiales en el proceso de diseño.," 2020, Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/784/7843892009/>
12. M. Samy, "Strengthening of reinforced concrete shear walls using steel," 2021, doi: <https://doi.org/10.4455/182>
13. C. A. Gansino Llanos and K. A. Tapia Mantilla, "Análisis de la resistencia mecánica en pernos de anclaje hasta 1/2 pulgada de diámetro, utilizados en Estructuras Metálicas.," *Universidad Politécnica Salesiana sede Quito*, Quito, 2021. Accessed: Feb. 22, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19938>
14. J. Winkler, C. T. Georgakis, and G. Fischer, "Fretting fatigue behavior of high-strength steel monostrands under bending load," *Int. J. Fatigue*, vol. 70, pp. 13–23, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.08.009>
15. V. Milovanović, D. Arsić, M. Milutinović, M. Živković, and M. Topalović, "A Comparison Study of Fatigue Behavior of S355J2+N, S690QL and X37CrMoV5-1 Steel," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 7, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/met12071199>
16. M. Denisa, J. Michal, V. Tibor, F. D. Lýdia, and N. František, "Examination of fatigue life of HSLA Domex 700 MC welded joints," in *Transportation Research Procedia*, Elsevier B.V., 2021, pp. 533–537. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.018>
17. Z. Cheng et al., "Effect of microstructural features on the fatigue behavior of ultra-high strength press hardened steels," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 32, pp. 1192–1205, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.07.138>
18. K. Karthikeyan, M. Helen Santhi, and C. R. Chidambaram, "Behaviour of horizontal connections in precast walls under lateral loading," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 436–440, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.35940/ijrte.C4217.098319>

19. C. Fang, K. Lundgren, M. Plos, and K. Gylltoft, "Bond behaviour of corroded reinforcing steel bars in concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 1931–1938, Oct. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.008>
20. D. E. Castillo Gutiérrez, I. Inírida, A. Moncaleano, and R. Rodríguez Baracaldo, "Caracterización microestructural y mecánica de aceros de fase dual (ferrita-martensita), obtenidos mediante procesos térmicos y termomecánicos Microstructural and mechanical characterization of dual phase steels (ferrite-martensite), obtained by thermomechanical processes," 2018. doi: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000300430>
21. D. Simek et al., "Prediction of the strength of the ferritic-pearlitic steels by means of X-ray diffraction," in *Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011*, 2011, pp. 880–885. [Online]. Available: <https://scopus.puce.elogim.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84898063713&partnerID=40&md5=7ab28d3e7ae5a8f5e5ee913a4f1834fc>
22. L. I. Gladshtein, N. P. Larionova, and B. F. Belyaev, "Effect of ferrite-pearlite microstructure on structural steel properties," *Metallurgist*, vol. 56, no. 7–8, pp. 579–590, 2012, doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9619-3>
23. S. Isavand and A. Assempour, "Effects of Microstructural Morphology on Formability, Strain Localization, and Damage of Ferrite-Pearlite Steels: Experimental and Micromechanical Approaches," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 52, no. 2, pp. 711–725, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-020-06115-2>
24. E. L. Kreiger, M. A. Kreiger, and M. P. Case, "Development of the construction processes for reinforced additively constructed concrete," *Addit. Manuf.*, vol. 28, pp. 39–49, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.015>
25. E. I. Villagrán Arroyo, C. Vera Mendoza, and A. E. Posada Sánchez, "Modelo esfuerzo - deformación para elementos de concretos reforzado que cumple con las hipótesis de las NTC RCDF 2004.," *Concreto y cemento: Investigación y desarrollo*, ISSN 2395-809X, ISSN-e 2007-3011, Vol. 5, No. 1, 2013, págs. 32-39, vol. 5, no. 1, pp. 32–39, 2013, Accessed: Mar. 13, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4934740&info=resumen&idioma=ENG>
26. K. Ninčević and R. Wan-Wendner, "On the dependence of concrete edge breakout on concrete age and coarse aggregate type," *Structural Concrete*, vol. 22, no. 5, pp. 2952–2966, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/suco.202000653>
27. J. A. Pichardo-Corpus, G. Contreras-Nuño, and J. A. de la Peña, "Proportion and distribution of errata in scientific publications," *Investigacion Bibliotecologica*, vol. 33, no. 80, pp. 97–116, 2019, doi: <https://doi.org/10.22201/iibi.24488321xe.2019.80.58000>
28. G. hua Xie, Y. sheng Tang, C. M. Wang, S. quan Li, and R. gui Liu, "Experimental study on fatigue performance of adhesively bonded anchorage system for CFRP tendons," *Compos. B Eng.*, vol. 150, pp. 47–59, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.047>
29. Z. He et al., "Study on stress corrosion behavior and failure mechanism of galvanized bolts in complex coal mine environments," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 34, pp. 1759–1776, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.173>
30. S. Liu, W. Zhang, and D. He, "Damage failure mode and parameter optimization of the connecting section of extendable grouting bolts," *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, vol. 44, no. 2, pp. 1–9, 2025, doi: <https://doi.org/10.16186/j.cnki.1673-9787.2023110042>
31. H. Wang, P. Liu, G. Gao, J. Hou, Z. Hao, and Z. Lu, "Experimental and numerical simulation study on the shear mechanical properties of prestressed anchor cables," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 185, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.110428>
32. J. A. Quinde, J. Jiménez-Pacheco, and E. Ortega-Guamán, "Review of design standards for confined masonry in Latin America: proposals for the Ecuadorian Construction Standard," *Revista Politecnica*, vol. 51, no. 1, pp. 77–92, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.33333/rp.vol51n1.07>

33. J. Pilatasig, R. Aguiar, B. Cagua, O. Andachi, and P. Cerón, "Analysis of the reinforcement of a steel structure with concentric diagonals. manta uvc case," *Revista Ingenieria de Construccion*, vol. 36, no. 3, pp. 294–310, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.7764/RIC.00004.21>
34. Y. Li, C. C. Lee, and Y. Cai, "Recent Research Advances in High-Performance Steel Tubular Members: Material Properties, Stub Columns, and Beams," *Buildings*, vol. 13, no. 11, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings13112713>
35. P. Spyridis and N. Mellios, "Tensile Performance of Headed Anchors in Steel Fiber Reinforced and Conventional Concrete in Uncracked and Cracked State," *Materials*, vol. 15, no. 5, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15051886>
36. L. J. Fernández Sánchez, R. S. Quintana Vásconez, D. E. Fernández Sánchez, and L. M. Fernández Delgado, "Vulnerabilidad sísmica y normativa constructiva en la Sierra de Ecuador: Una revisión sistemática de la literatura," *Revista Ingenio global*, vol. 5, no. 1, pp. 170–187, Apr. 2026, doi: <https://doi.org/10.62943/rig.v5n1.2026.499>
37. R. -Soto, "Electrochemical behavior of dissimilar welded joints between ASTM A615 and AISI 304 with and without buttering using Inconel 182," 2019, doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.315>
38. W. Sun, S. Liu, and C. Zhang, "An effective improvement for enhancing the strength and feasibility of FRP spike anchors," *Compos. Struct.*, vol. 247, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112449>
39. X. Wang, H. Li, and X. Song, "Experimental investigation of ultra-low cycle fatigue behaviors of laminated rubber bearings in spatial grid structures," *Structures*, vol. 45, pp. 1394–1411, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.076>
40. P. Wang et al., "Accumulated damage failure mechanism of anchoring structures under cyclic impact disturbance," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 12, pp. 1693–1709, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2024.11.006>
41. Y. Dong, T. Zhou, Z. Chen, J. Xu, and J. Su, "Seismic performance of L-shaped exposed column base connections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 235, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109832>
42. D. Wang, M. He, Z. Tao, A. Guo, and X. Wang, "Deformation-softening behaviors of high-strength and high-toughness steels used for rock bolts," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 14, no. 6, pp. 1872–1884, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.026>
43. E. Harati, E. Harati, and U. Onochie, "Effect of post-weld heat treatment on mechanical and microstructural properties of high strength steel weld metal," *Welding International*, vol. 38, no. 6, pp. 422–429, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/09507116.2024.2348008>
44. C. Zhang, X. Luo, J. Liu, X. Zhou, and Y. Tu, "Flash Tempering of High-Strength, Low-Alloy Martensitic Steel via Electrical Pulsing Treatment," *Materials*, vol. 18, no. 1, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18010182>
45. B. He et al., "Influence of post-process heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser-directed energy deposition repaired Q690D high-strength steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 39, pp. 7700–7716, Nov. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.11.073>
46. H. Geng, X. Sun, X. Guo, Y. Zhao, X. Yin, and Z. Du, "Achieving 1.7 GPa Considerable Ductility High-Strength Low-Alloy Steel Using Hot-Rolling and Tempering Processes," *Materials*, vol. 17, no. 18, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/ma17184495>
47. L.-F. Zuo, Z.-L. Wei, R. Ni, Z.-D. Wang, and X.-H. Chen, "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 800 MPa grade low carbon bainitic steel," *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 24, pp. 37–41, Dec. 2012, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.415-417.943>