

El área “efectiva” residual de aceros corroídos de un edificio de 100 años en la metodología de evaluación de estructuras existentes

“Effective” Residual area of corroded bars of a building 100 years old for the assessment methodology of existing structures

Carmen Andrade Perdrix^a, Juan J. Muñoz Nicolas^b Alejandro Bernabeu Larena^c Alfonso Gonzalez Fanjul^d

^a Dr. Química Industrial. CIMNE. Investigador Distinguido. candrade@cimne.upc.edu

^b Ingeniero Industrial. SAFECOR INGENIERIA. Director Técnico. jmunoz@safecoringenieria.com

^c Dr. Ingeniero. Bernabeu Ingenieros. UPM, E. T.S. Arquitectura. abernabeu@ciccp.es

^d Arquitecto. Bernabeu Ingenieros. E. T.S. Arquitectura CEU. agf@bernabeu.net

RESUMEN

El edificio de los “Grandes Molinos Vascos” situado en la ría de Bilbao fue construido en 1923-24. En la actualidad la Diputación Foral de Vizcaya está considerando su rehabilitación para lo que colabora con “Arquitectos Xortu” y “Bernabeu Ingenieros” para la evaluación de su estado. En el presente trabajo se presentan resultados de la resistencia residual de la armadura y postula el uso de lo que se ha llamado “área residual efectiva” que es la resultante de dividir la fuerza obtenida en el ensayo de tracción para cada barra por la tensión de una armadura similar sin corrosión o por el valor característico de la resistencia a tracción indicado en las normas.

ABSTRACT

The building “Grandes Molinos Vascos” located in the Bilbao estuary, was built in 1923-24. The Diputación Foral of Vizcaya is currently considering its rehabilitation, for which it is collaborating with “Arquitectos Xortu” and “Bernabeu Ingenieros” to assess its condition. This paper presents the results of the residual strength of the reinforcement and proposes the use of what has been called the “effective residual area”, which is the result of dividing the force obtained in the tensile test by the tension of a similar reinforcement without corrosion or by the characteristic value of the tensile strength indicated in the standards.

PALABRAS CLAVE: Durabilidad, evaluación, armadura, residual, área efectiva.

KEYWORDS: Durability, assessment, reinforcement, residual, effective area.

1. Introducción

El edificio “Grandes Molinos Vascos” es uno de los primeros edificios en hormigón armado del norte de España. Fue construido entre 1923 y 1924, por lo que acaba de cumplir 100 años. Está

ubicado en la orilla de la ría de Bilbao y se utilizaba como molino y almacenamiento de cereales y otros productos. En la actualidad está fuera de uso, si bien la Diputación Foral de

Vizcaya ha promovido con Xortu Arquitectos una evaluación del estado de su estructura para su posible rehabilitación. Esta evaluación ha consistido en realizar un inventario de las geometrías, la medida de algunas características como su resistencia mecánica y su estado de degradación. Dentro de esta evaluación se planteó, además de la típica extracción de testigos del hormigón, la posibilidad de una caracterización de la resistencia residual de la armadura debido a su larga vida en servicio. Dado lo delicado de extraer muestras de armadura, no se suele caracterizar sus propiedades mecánicas, pero en este caso era sencillo encontrar zonas donde la toma de muestras no comprometiera la estabilidad del edificio, ya que el deterioro era ya grande y el acceso a la armadura y su corte era posible.

Cuando se ensaya una barra de acero normalmente se divide la fuerza por el área inicial o nominal para obtener la tensión, pero en el caso de armaduras corroídas no debe usarse el área inicial ya que no existe más. Por ello, dado que la corrosión produce en general una pérdida de diámetro irregular o incluso localizada el principal problema es identificar cual es el área residual. En un trabajo anterior (1) se llamó “área efectiva” a aquella que resulta o bien de medir el diámetro remanente con un calibre o la pérdida de peso de una muestra, o bien la que resulta de tomar como tensión la especificada en los códigos y dividirla por la fuerza para obtener el área efectiva característica que correspondería. Son varios los trabajos en la literatura sobre la resistencia residual de barras corroídas (2-8). El más antiguo encontrado fue publicado en 1991 (2) que fue realizado sobre barras que se corroyeron de forma acelerada aplicando una corriente eléctrica, y ya entonces detectaron que la disminución de las características mecánicas del acero solo era aparente porque si se introducía la sección reducida, las características se mantenían. En 2001 Almusallan (3) y Du et al. en 2005 (4) también aplicando una corriente eléctrica a las barras para corroerlas

artificialmente, concluyeron igualmente que si la fuerza se dividía por el área residual las propiedades no disminuían. Otras publicaciones prestaron más atención al impacto en la ductilidad (5) y es necesario mencionar otras donde se ha abordado el modelado numérico de las barras corroídas (5-7), pero siempre sin sugerir ninguna aplicación práctica sobre como calcular el área residual aparte de con la pérdida de peso. Contrario a estas conclusiones una publicación reciente (8) hace un estudio comparativo de resultados, pero usando el área inicial y planteando que las propiedades mecánicas disminuyen, lo que conceptualmente resulta incorrecto, ya que el área inicial ha desaparecido por la corrosión. Se transmite así el mensaje erróneo de que las propiedades residuales disminuyen con el grado de corrosión, lo que podría ocurrir, pero solo es posible comprobarlo, si el área a utilizar para calcular la tensión es la residual. Esta fue la propuesta en el trabajo anterior (1) junto con un marco de posibles escenarios y modos de fallo de las barras.

En el presente trabajo se ha aprovechado la disponibilidad de las muestras del edificio “Grades Molinos Vascos”, que tiene el atractivo adicional de que ya tiene una vida de 100 años, para mostrar un ejemplo de cómo en la práctica se puede abordar la determinación del área efectiva residual.

2. Experimental

En la inspección visual realizada se comprobó que el edificio tenía zonas bastante deterioradas. En general no se detectó la presencia de cloruros, aunque dado que se ha almacenado a lo largo de su vida útil una variedad de sustancias, no se descarta que haya sulfatos y cloruros en cantidades superiores a las normales aportadas por los materiales originales del hormigón. La corrosión de la armadura, es pues mayoritariamente debida a la

carbonatación o neutralización de la alcalinidad del hormigón.

Para este estudio se seleccionaron las 8 barras que se muestran en la figura 1 que no estaban excesivamente corroídas. Las barras son lisas con diámetros entre 8 y 18 mm, como se muestra en la tabla 1. No presentan picaduras notables y la corrosión, aunque irregular, es bastante uniforme.

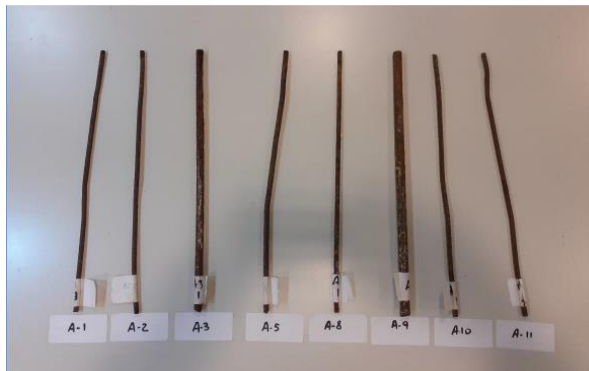


Figura 1. Aspecto e identificación de las barras estudiadas

Tabla 1. Identificación de las barras ensayadas, de su área y diámetro nominales, área residual, pérdida de peso y diámetro después del ensayo.

Identificación	Diámetro Nominal (mm)	Área Nominal (mm ²) (A_{ini})	Pérdida de peso (%)	Área residual Uniforme (mm ²)	Diámetro después de rotura (mm)
A1-3	8	50.27	7.1	46.70	4.33
A8-1	8	50.27	2.1	49.21	4.54
A10-1	8	50.27	6.3	47.10	3.77
A11-1	8	50.27	7.1	46.70	4.81
A2-2	10	78.54	39.6	47.44	3.64
A5	10	78.54	3.7	75.63	4.1
A3-1	14	153.9	10.2	138.24	8.1
A9	18	254.5	21.2	200.52	9.93

La Tabla 1 muestra las características de las barras y en particular la pérdida de peso que se

obtuvo mediante limpieza de las barras en ácido clorhídrico al 50% con 3% de urotropina (9) como inhibidor. Una vez limpias se pesaron y el peso perdido se calculó usando como referencia el volumen inicial de la barra y una densidad del acero de 7,85 g/cm³.

Después se determinaron las curvas tensión-deformación mediante ensayos normalizados de tracción según la norma UNE-EN ISO 15630-1: 2003. El Laboratorio de Gikesa en Bilbao utilizó una máquina “Servosis” de 60 t y clase I.

En la tabla 2 se aportan los acrónimos que se van a utilizar en esta comunicación.

Tabla 2. Notación y definiciones empleadas

Notacion	DEFINICIONES
A_{ini}	Area inicial sin corrosión
A_{res}	Area residual después de corrosión
$A_{res,uni}$	Area residual con corrosion uniforme.
$A_{res,uni,y}$	Referida al limite eástico
$A_{res,uni,u}$	Referida a la tensión de rotura
$A_{res, ef}$	Area residual efectiva es la que se deriva de lso datos experimentales
σ_{ini}	Tensión calculada a partir de la fuerza experimental con el area inicial
$\sigma_{res,uni}$	Tension calculada a partir de la fuerza experimental con el area residual
Y	Factor del limite elastico (f_y)
T	Factor de la tension de rotura (f_u)
ξ	Factor del modulo de deformación (E)
δ	Factor de la elongación (ϵ)

3. Resultados

Las pérdidas de peso que se deducen de la tabla 1 son menores del 10% en el caso de las barras de 8 mm ϕ . Solo una barra de 10 mm ϕ presenta una pérdida de cerca del 40%.

Las curvas tensión-deformación se muestran en la figura 2 usando para calcular la tensión la sección residual ($A_{res,uni}$) considerada la pérdida uniforme. En el caso de usar el área inicial, los valores serían menores al ser esa área inicial más elevada. La barra más gruesa de 18 mm presenta un alargamiento mucho mayor que el resto. Los alargamientos son muy variables.

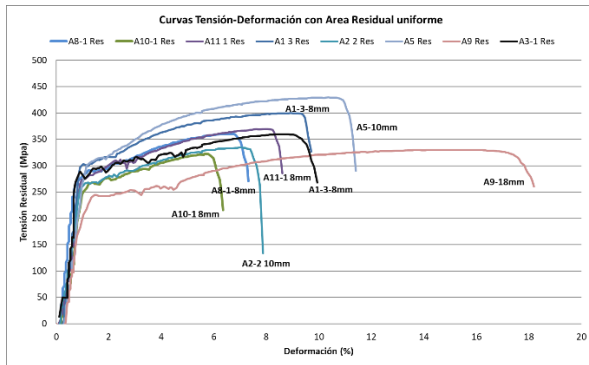


Figura 2. Curvas σ - ϵ de las ocho barras usando el área residual supuesta uniforme su pérdida ($A_{res,uni}$).

Las secciones de rotura presentaron un aspecto con estricción más o menos importante, como se deduce en el ejemplo de la figura 3.

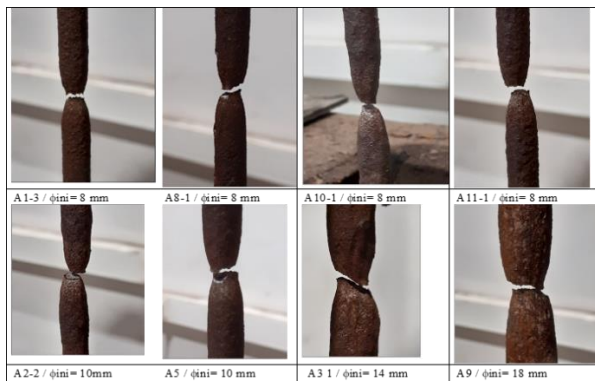


Figura 3. Aspecto de las barras ensayadas después de su rotura.

Las figuras 4 a 6 muestran respectivamente, el límite elástico, la tensión de rotura, el módulo de deformación calculados el área inicial y residual y la 7 el alargamiento.

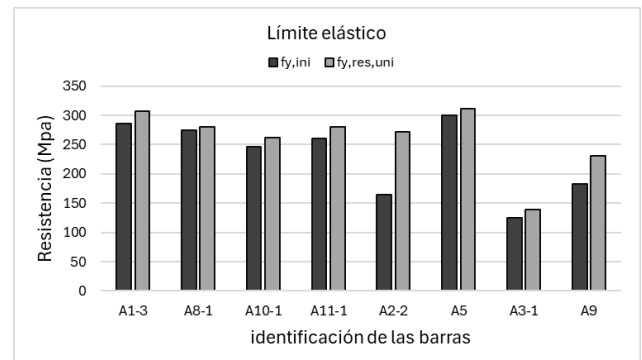


Figura 4. Valores del límite elástico con el área inicial y con el área residual.

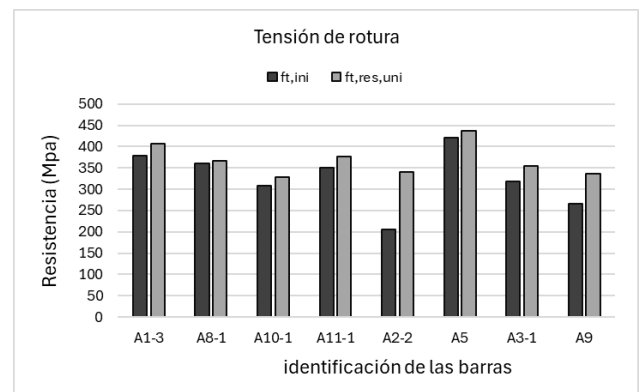


Figura 5. Valores de la tensión de rotura calculados con el área inicial y con el área residual.

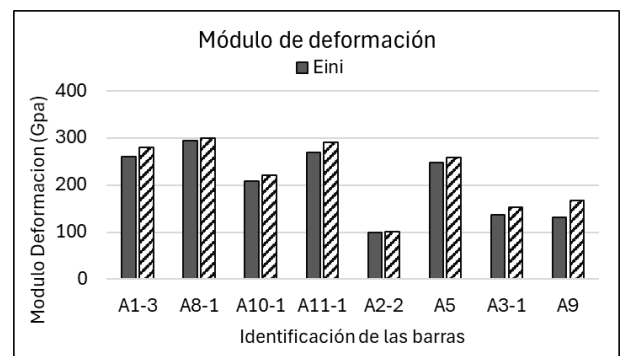


Figura 6. Módulos elásticos calculados con el área inicial y con el área residual.

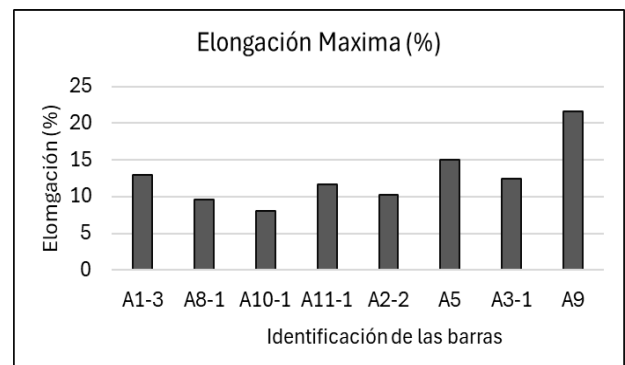


Figura 7. Alargamientos.

4. Discusión

No existen reglas generales para la evaluación de estructuras existentes y tampoco, por tanto, sobre como establecer las propiedades remanentes de los materiales dañados. En el caso del acero, por un lado es necesario buscar las requisitos que existieran en el momento de construcción y de ellos, deducir las cuatro propiedades mecánicas principales: límite elástico, carga de rotura, módulo de deformación y elongación.

En 1924, no existía todavía un código para el hormigón en España ya que el primero se publicó en 1939 (10). Este es pues el que se tomará como referencia. Los valores que se especificaban en aquel momento para los aceros se reproducen en la Tabla 3 y permiten clasificar los del edificio “Grandes Molinos Vascos” como “acero normal” y son los que se usaran para los cálculos.

Table 3 Características requeridas a los aceros de armadura en el Código español de 1939 (10)

Para Diámetros:		
5 - 6 - 7 - 8- 10 - 12-14 -16-18 - 20 - 25 - 30.		
Propiedad	Acero Normal	Acero especial
Resistencia ultima	36 kg/mm ²	54 kg/mm ²
Límite elástico*	24 kg/mm ²	36 kg/mm ²
Elongación mínima**	20 (%)	18 (%)

* El límite elástico debe ser superior al 0,65 de inferior que el 0,80 de la tensión de rotura.

** La elongación mínima nunca debe ser inferior al 10%

4.1 Área efectiva residual

Como la corrosión es bastante uniforme se usará la pérdida de peso como indicativo de la pérdida de área. La figura 8 muestra las fuerzas

en el límite elástico y en la rotura en función del porcentaje de pérdida de peso uniforme. Las barras de 8 mm no muestran una relación clara con la pérdida, lo que se atribuye a su pequeño porcentaje. Las barras de mayor diámetro lógicamente muestran mayores fuerzas, excepto la barra con el 40% de pérdida de peso que falla a mucha menor fuerza de la que le correspondería.

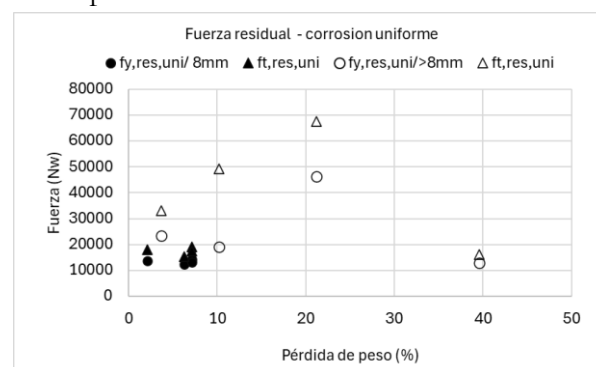


Figura 8. Fuerzas experimentales en el límite elástico y en la rotura.

Para calcular ahora la tensión es necesario dividir por el área residual. Para ello hay tres alternativas que se muestran en la figura 9 que se pueden usar:

1. El área original (nominal) A_{ini}
2. El área residual ($A_{res,uni}$) que se supone uniformemente corroída.
3. La misma área residual, pero usando la tensión requerida por los códigos, lo que permite considerarlo como un valor “característico” ($A_{res,ef,y}$ or t,k) (por ejemplo 240 MPa como se deduce de la tabla 3 que reproduce las condiciones requeridas para estos aceros en el código español de 1939).

La alternativa a usar debe seleccionarse en función de los objetivos específicos del estudio. Así el área efectiva residual es mas específica de cada barra, mientras que el uso de un valor característico permite evaluar el cumplimiento de los requisitos de un código. Las diversas áreas se representan en la figura 9. En esta figura se puede apreciar que en las barras de 8 mm ϕ , las diferencias entre las ($A_{res,uni}$ and $A_{res,ef,y}$ or t,k) no son

lógicamente significativas por su pequeña pérdida de peso, mientras que las barras de más de 10 mm ϕ si presentan importantes diferencias. Así la barra A2-2 muestra valores de área residual efectiva mucho mas pequeños que la inicial (nominal) y la barra A3-1 de 14 mm ϕ lo indica en el límite elástico, pero no para la carga última. La barra de 18 mm ϕ muestra que las áreas residuales son mucho mas pequeñas en todos los casos. Estas comprobaciones son pues útiles para deducir gráficamente la degradación relativa de cada barra. El uso del área que correspondería al cumplimiento del código permite además acceder a un valor “característico” aunque no sea estadísticamente calculado de un número de muestras elevado.

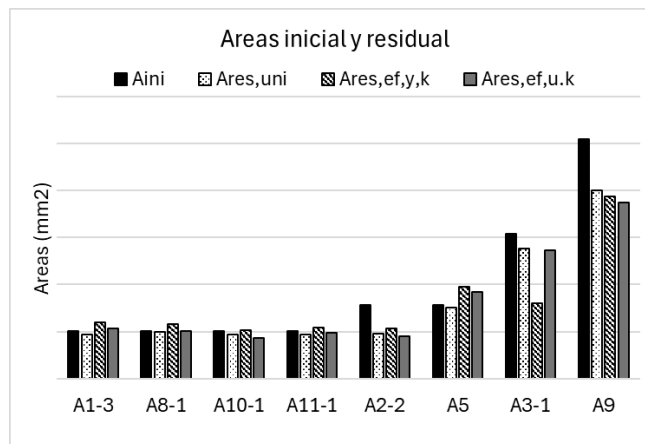


Figura 9. Áreas inicial (A_{ini}), Residual uniforme ($A_{res,uni}$), Efectiva para el límite elástico ($A_{res,ef,y,k}$) y para al carga de rotura ($A_{res,ef,u,k}$).

Como se ha comentado anteriormente, en casa caso debe decidirse cual área usar. En el presente trabajo se usarán las experimentales deducidas de la pérdida de peso.

4.2 Tensión residual

4.2.1. Límite elástico y tensión de rotura

La figura 10 muestra los valores del límite elástico y la tensión de rotura en función de la pérdida de peso usando el área residual suponiendo corrosión uniforme ($A_{res,uni}$). Los resultados indican que hay una tendencia decreciente con el nivel de corrosión, aunque

por encima del límite del código de 1939 hasta perdidas del 10%. Es decir, parece que estos dos parámetros sufren un deterioro con corrosiones superiores al 10% cuyas causas pueden ser varias. Una sería una entrada de hidrogeno dada la acidificación típica de las zonas corroídas que haría que cuanta más corrosión más acidez y con ello la posibilidad de acumulación de hidrogeno procedente de la reacción catódica en esas áreas acidificadas. Otra causa podría ser que, aunque la corrosión es uniforme, haya pequeñas irregularidades locales que actúen como pequeñas picaduras y concentradores de tensión en los momentos cercanos a la rotura (11), o en esos momentos, por una generación de excentricidad que afecte a la evolución del cuello de estricción. Aclarar cuál de estas tres causas es más responsable exige ensayos más específicos.

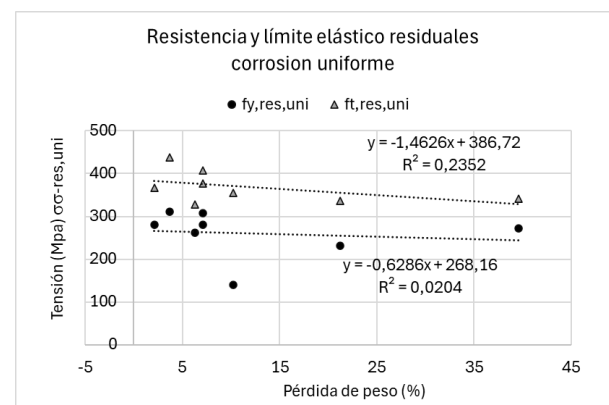


Figura 10. Tendencia del límite elástico y de la tensión de rotura en función de la pérdida de peso.

4.2.2. Módulo de deformación

Esta propiedad es sensible precisamente a la posibilidad de fragilización por la corrosión. En la figura 11 se dan los valores calculados con el ($A_{res,uni,ef}$) con respecto al valor de referencia de 200 GPa (denominado aquí “factor del módulo”, ξ) con respecto a la pérdida de peso ilustrando bien el impacto negativo de la corrosión, como se ha explicado en el apartado anterior.

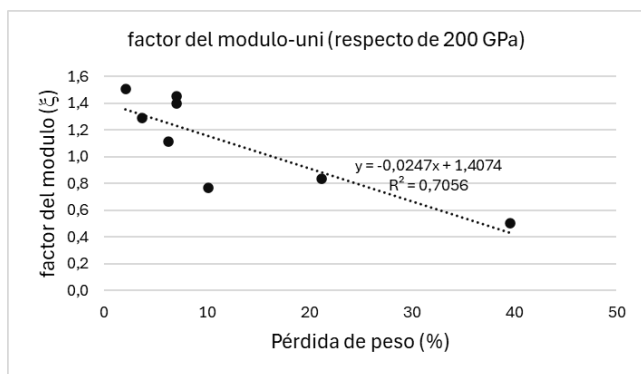


Figura 11. Efecto del nivel de corrosión en el factor del módulo (ξ)(relación con el esperable de 200 GPa)

4.2.3. Elongación

Con respecto al efecto de la corrosión en la rama plástica de la curva σ - ϵ , la figura 12 muestra el “factor (δ) de elongación” calculado frente a la del 10% como se indica debe ser la mínima admisible en el Código de 1939 (Tabla 3- nota inferior). Se aprecia que hay dos barras de 8 mm ϕ (A8-1 and A10-1) que dan valores por debajo de 1. Estas razones serían las comentadas de posible fragilización por hidrogeno o de presencia de irregularidades o defectos locales.

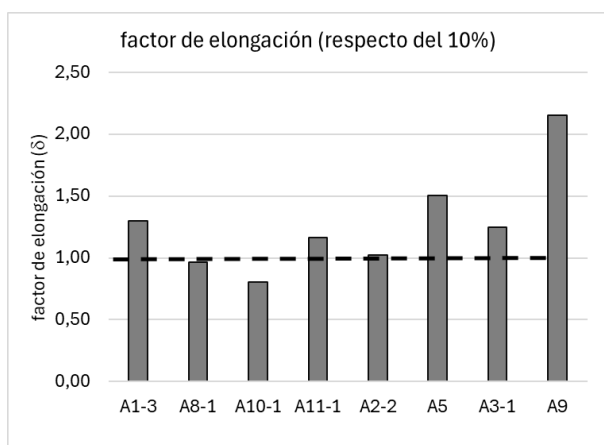


Figura 12. Factor de elongación (δ)(relación con el 10%) (10)

4.2.4. Relación límite elástico y tensión de rotura

A título ilustrativo, ya que es un requisito en los códigos más modernos, se representa la relación entre $f_{t,res,uni}$ y $f_{y,res,uni}$ en la figura 13, Todos los valores son superiores a 1,25.

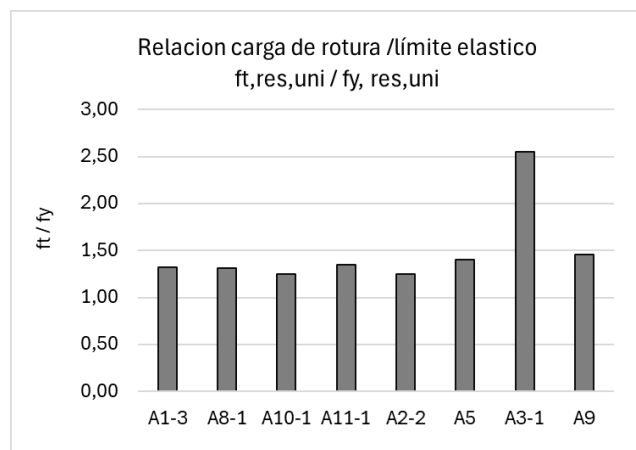


Figura 13. Relación entre el límite elástico y la carga de rotura tomando el área residual ($A_{res,uni}$)

4. Conclusiones

Las principales conclusiones que se quieren resaltar son:

1. En estructuras sin daños no es necesario extraer muestras de la armadura para la evaluación estructural pues se supone que el acero las conserva, pero en las corroídas los resultados muestran la importancia de contar con datos experimentales de cada obra, a pesar del aspecto delicado que supone cortar armaduras. Siempre se puede tomar in situ los diámetros residuales con un calibre.
2. En estas muestras es necesario primero obtener el área efectiva residual por alguno de los métodos mencionados en el trabajo: el diámetro residual tomado en varias zonas, la pérdida de peso o bien a partir de la resistencia característica indicada en los códigos
3. Con esta área residual es posible calcular de las curvas experimentales σ - ϵ y de ella deducir la tensión en el límite elástico y en la carga de rotura, además de deducir el módulo de deformación y la elongación experimental, que serán un indicio de lo uniforme o no que sea la corrosión producida. Los cuatro parámetros pueden caracterizarse con un “factor de daño” que permita deducir si es superior o inferior al esperable.

4. Las barras ensayadas han mostrado mantener sus propiedades si las pérdidas son menores del 10%. Por encima de ese valor, las cuatro características mecánicas ensayadas han disminuido con el nivel de corrosión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Diputación Foral de Bizkaia del País Vasco y a Xortu Arquitectos de Bilbao por la oportunidad de intervenir en este edificio y por permitir los presentes ensayos. También se agradece a Gikesa de Bilbao por haber realizado los ensayos y a Jesus Rodriguez por sus comentarios sobre el trabajo.

Referencias

1. Andrade C, Andrade C, Oller S, Perez FJ. Basis for calculation the residual mechanical properties of corroding bars. *Struct Concr.* 2022;24:1–12.
<https://doi.org/10.1002/suco.202200310>
2. Andrade C, Alonso C, García D, Rodríguez J. Remaining lifetime of reinforced concrete structures: effect of corrosion on the mechanical properties of the steel. *Life prediction of corrodible structures.* Cambridge: NACE; 1991. p. 23–6.
3. Almusallam AA. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Constr Build Mater.* 2001;15:361–8.
4. Du YG, Clark LA, Chan AHC. Residual capacity of corroded reinforcing bars. *Mag Concr Res.* 2005;57(3):135–47.
5. Bazan AM, Cobo A, Montero J. Study of mechanical properties of corroded steels embedded concrete with the modified surface length. *Constr Build Mater.* 2016;117:80–7.
6. Bairan Fernandez I, Bairan JM, Marí AR. Mechanical model to evaluate steel reinforcement corrosion effects on σ – ϵ and fatigue curves. *Experimental Calibration and Validation. Eng Struct.* 2016;118:320–33.
7. Sanchez J. In: Schlangen E, de Schutter G, Savija B, Zhang H, Rodriguez CR, editors. *Fracture of reinforcing steel after corrosion deterioration: proceedings of the Symposium on Concrete Modelling – CONMOD2018.* Delft, Netherlands: Preceeding Rilem no PRO 127. Rilem publications S.A.R.L.; 2018.
8. Imperatore S, Rinaldi Z, Drago C. Degradation relationships for the mechanical properties of corroded steel rebars. *Constr Build Mater.* 2017;148:219–30.
9. ASTM G1-03. Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. 2017.
10. Instruccion para el proyecto y ejecucion de obras de hormigon. Ministerio de Obras Públicas. Orden de 3 de febrero. (Code for the design and construction of concrete Works) Ministry of Public Works - Spain. Order of 9 February 1939.
11. Oller S. *Fracture mechanics, a global approach (in Spanish).* Barcelona, Spain: Polytechnical University of Catalonia; 2001 ISBN 84-89925-76-3.