

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA SOBRRRESISTENCIA EN BARRAS DE ACERO

Teresita Salinas¹; Rocío Mercado¹; Jesús Ceppi¹; Gabriel Agostini¹; Candela Espinoza¹; Joana Avalos¹; Carolina Domizio^{2,3}; Marcelo Guzmán^{2,3}; Gerardo González del Solar^{2,3}

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, FRM - UTN; ² Departamento de Ingeniería Civil, FRM – UTN; ³ CeReDeTeC, FRM - UTN jensalinas0@gmail.com

Resumen: El presente estudio se enfoca en evaluar experimentalmente la capacidad de sobrerresistencia flexional de barras de acero ADN 420-S de diferentes diámetros y marcas comerciales, de acuerdo a la normativa vigente en Argentina. La sobrerresistencia es clave en la ingeniería estructural, ya que garantiza el correcto desempeño de las estructuras ante cargas sísmicas. Este parámetro surge de la diferencia entre la tensión de fluencia nominal y la real, así como del endurecimiento por deformación del acero. El estudio toma muestras de barras de acero de diámetros 8, 12 y 16 mm, correspondientes a tres marcas comerciales disponibles en Mendoza. Las muestras fueron sometidas a ensayos de tracción uniaxial, donde se midió su comportamiento mecánico, permitiendo establecer las curvas tensión-deformación para cada probeta. A partir de estas curvas, se determinaron los valores de sobrerresistencia, los cuales fueron comparados con los límites establecidos por la normativa INPRES-CIRSOC 103 Parte II de 2021, aplicable a zonas sísmicas. Los resultados obtenidos permiten señalar que la mayoría de las muestras evaluadas cumplen con las exigencias reglamentarias, en particular con la relación entre la tensión de fluencia real y la nominal, la cual no debe exceder de 1,30. Además, las barras cumplieron con la nueva disposición reglamentaria para zonas sísmicas 3 y 4, que establece que la relación entre la tensión última real y la tensión de fluencia real debe estar entre 1,15 y 1,39. Sin embargo, el tamaño de la muestra ensayada no permite obtener conclusiones definitivas, por lo que se recomienda ampliar el estudio, incluyendo más diámetros y evaluando aceros ADN 420 no soldables.

Palabras claves: sobrerresistencia, acero, tracción, soldable.

INTRODUCCIÓN

Los aceros se obtienen a partir de una aleación entre hierro y carbono cuya participación relativa permite su clasificación en aceros con aplicación y aceros de fundición. Los aceros con aplicación son aquellos diseñados para desempeñar funciones específicas en diversos sectores industriales, gracias a sus propiedades mecánicas, resistencia y adaptabilidad a distintos procesos de manufactura. Los aceros de fundición son aleaciones de hierro y carbono que se producen mediante un proceso de colado en moldes siendo utilizados en componentes estructurales y de maquinaria. En particular, son de interés aquellos aceros aplicados en la industria de la construcción.

Las barras de acero nervuradas se tratan de aleaciones que poseen entre 0,30% a 0,50% de contenido de carbono y reciben el nombre de aceros de dureza media. Dentro de estos, se hallan los aceros de dureza natural (ADN) denominados ADN 420 y ADN 420-S, en donde el número indicado hace referencia a la tensión de fluencia que es capaz de desarrollar el material, indicada en MPa. A su vez, la letra S permite identificar si el acero es soldable. Esta característica resulta de interés ya que, ante una misma deformación en la zona de endurecimiento, el ADN 420-S alcanza menores tensiones de rotura.

La sobrerresistencia en el acero es un concepto esencial en la ingeniería civil y construcción, ya que permite garantizar un correcto desempeño sísmico de las estructuras. La misma proviene de la variabilidad entre la tensión de fluencia nominal, f_y^{nom} , y la tensión de fluencia real, f_y^{real} , y del endurecimiento por deformación del acero (Paulay y Priestley, 1992). En tal sentido, el reglamento sismorresistente vigente a nivel nacional, INPRES-CIRSOC 103 parte II (2021), establece dos condiciones. En primer lugar, un escalón de fluencia seguido por un endurecimiento gradual, y, en segundo lugar, una baja variabilidad entre la tensión real y la tensión de fluencia nominal. Estas propiedades permiten garantizar que la resistencia al corte de los componentes y la resistencia a flexión de las secciones donde no se desea el desarrollo de rótulas plásticas, son mayores a la necesaria para el desarrollo de la sobrerresistencia flexional de dichas rótulas plásticas (Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 2021).

El acero debe presentar un adecuado balance entre la longitud del escalón de fluencia, $\epsilon_y - \epsilon_s$, y la tasa de endurecimiento real, obtenida como la relación entre la resistencia última real, f_u^{real} , y la tensión de

fluencia real f_y^{real} (Figura 1). Un escalón de fluencia amplio y una baja tasa de endurecimiento, permiten reducir la sobrerresistencia flexional en las rótulas plásticas, pero acortan la longitud de desarrollo de dichas rótulas. Si, por el contrario, el escalón de fluencia es muy prolongado, la falta de rigidez del acero induce a una mayor posibilidad de pandeo de las barras longitudinales sometidas a compresión.

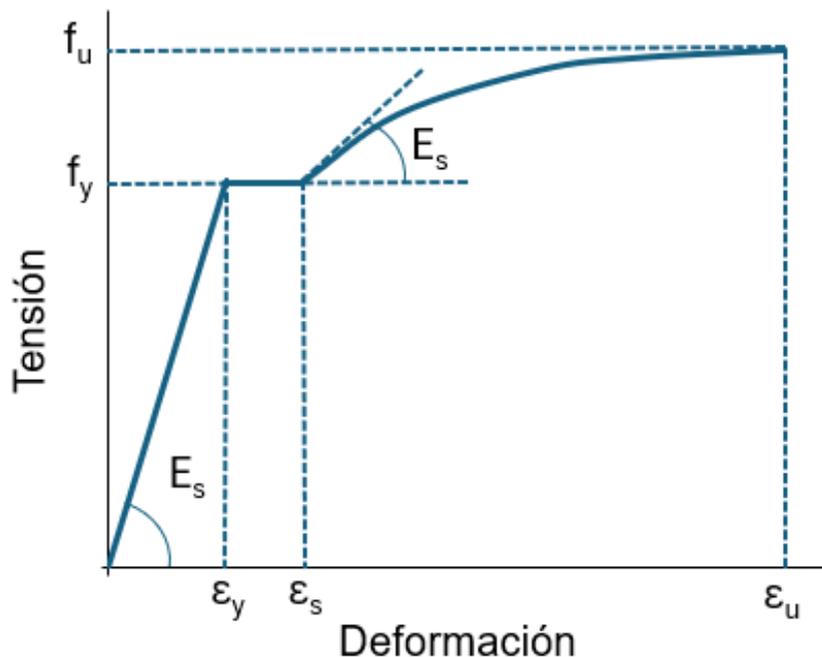
Para garantizar un desempeño adecuado, el artículo 1.2.2 del Reglamento INPRES-CIRSOC 103 parte II del año 2005, establece dos condiciones a cumplir por la armadura longitudinal. Por un lado, indica que la relación entre la tensión de fluencia real y la tensión de fluencia nominal, $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$, no podrá ser mayor que 1,30. Adicionalmente, especifica que la relación entre la tensión de rotura real y la tensión de fluencia real, $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$ no deberá ser menor que 1,25 (INPRES), 2005). Sin embargo, este valor fue modificado en la edición del año 2021 del mencionado reglamento. La nueva edición establece que, para un acero con endurecimiento post-fluencia normal a emplearse en zonas sísmicas 3 y 4, la relación $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$ debe estar comprendido entre 1,15 y 1,39 (INPRES), 2021).

Vega et al. (2018) realizaron un extenso estudio sobre muestras de acero ADN 420-S de 8, 10, 12, 16, 20 y 25 mm de diámetro, y de diferentes marcas comerciales disponibles en la Provincia de Mendoza. El estudio dio a conocer que las muestras evaluadas dieron resultados diversos. Al considerar los límites establecidos en la edición del año 2005 del mencionado reglamento (vigente al momento del estudio), se observa que 4 de los 7 diámetros en estudio cumplieron con la condición para la relación $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nominal}}$, en tanto que solamente 1 diámetro cumplió con la condición establecida para $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$.

Debido al cambio reglamentario mencionado, el objetivo del presente estudio es evaluar experimentalmente la capacidad de desarrollar sobrerresistencia flexional en barras de acero ADN 420-S de diferentes diámetros y comercialmente disponibles en la provincia de Mendoza, de acuerdo a la reglamentación vigente.

Figura 1

Representación esquemática de la curva tensión-deformación del acero.



METODOLOGÍA

Preparación de los especímenes

A fin de evaluar la sobrerresistencia se seleccionaron muestras de barras de acero de diferentes diámetros correspondientes a tres marcas comerciales, identificadas genéricamente como marca 1, 2 y 3. Las muestras seleccionadas corresponden a los diámetros 8, 12 y 16 mm, las cuales fueron ensayadas a tracción uniaxial según Norma IRAM IAS U 500-102 (1987), empleando para ello una Máquina Universal de Ensayos. La Tabla 1 presenta la designación de las muestras de acuerdo con su marca y diámetro.

Tabla 1*Identificación de muestras*

	ADN 420-S		
Diámetro [mm]	8	12	16
Marca 1	M1-8-S	M1-12-S	M1-16-S
Marca 2	M2-8-S	M2-12-S	M2-16-S
Marca 3	M3-8-S	M3-12-S	M3-16-S

Se dispusieron de tres probetas por cada muestra seleccionada en estudio, obtenidas de una misma barra. Cada probeta fue medida y pesada para determinar el área equivalente de la barra. Para ello, se consideró un peso específico del acero de 7,85 gr/cm³. Las Tablas 2, 3 y 4 presentan los parámetros determinados para las muestras de 8, 12 y 16 mm, respectivamente.

Tabla 2*Cálculo de área equivalente para muestras de 8 mm de diámetro nominal.*

Diám. nom.	Muestra	Id. Prob.	Longitud	Peso	Área equivalente
mm			mm	g	mm ²
8	M1-8-S	1	298	115	49.2
		2	301	116	49.0
		3	297	114	49.0
8	M2-8-S	1	305	115	48.0
		2	296	113	48.6
		3	300	115	48.8
8	M3-8-S	-	-	-	-
		-	-	-	-
		-	-	-	-

Tabla 3*Cálculo de área equivalente para muestras de 12 mm de diámetro nominal.*

Diám. nom. mm	Muestra	Id. Prob.	Longitud mm	Peso g	Área equivalente mm ²
12	M1-12-S	1	303	278	116.9
		2	300	277	117.6
		3	290	268	117.7
12	M2-12-S	1	305	268	111.9
		2	300	264	112.1
		3	299	263	112.1
12	M3-12-S	1	298	264	112.9
		2	299	268	114.2
		3	295	261	112.7

Tabla 4

Cálculo de área equivalente para muestras de 16 mm de diámetro nominal.

Diám. nom.	Muestra	Id. Prob.	Longitud	Peso	Área equivalente
mm			mm	g	mm ²
16	M1-16-S	1	400	624	198.7
		2	398	613	196.2
		3	399	610	194.8
16	M2-16-S	1	312	482	196.8
		2	293	464	201.7
		3	300	479	203.4
16	M3-16-S	1	299	466	198.5
		2	296	460	198.0
		3	299	468	199.4

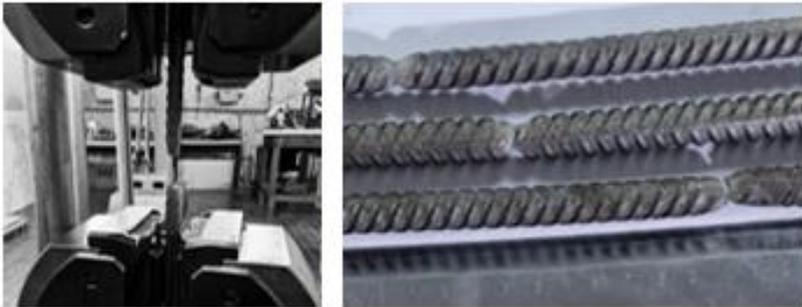
Descripción del ensayo

Se procedió al ensayo de dos probetas por muestra, dejando la tercera probeta como contramuestra. Una vez preparadas las probetas, se procedió a su montaje en la Máquina Universal de Ensayos asegurando su verticalidad. La velocidad y escala de carga fueron ajustadas de acuerdo con el diámetro de la barra a ensayar, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma IRAM IAS U 500-102 (1987). A medida que aumenta la fuerza de tracción, el equipo registra el alargamiento obteniendo la curva fuerza-desplazamiento. La fuerza de tracción es incrementada hasta alcanzar la carga de rotura de la probeta. La Figura 2 presenta la disposición de la probeta en la máquina universal, al momento de alcanzar la carga de rotura, y la rotura en tres probetas ensayadas.

A partir de considerar el área equivalente de la sección transversal y la longitud inicial de la probeta, es posible establecer la curva tensión-deformación, y en particular, determinar la tensión de fluencia real, f_y^{real} , y la resistencia última real, f_u^{real} .

Figura 2

Rotura de probeta.



RESULTADOS

Los ensayos realizados permitieron obtener las curvas tensión-deformación para cada probeta. Las Figuras 3, 4 y 5 presentan las curvas obtenidas durante los ensayos a tracción de las probetas correspondientes a las muestras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal, respectivamente. Las curvas presentadas dieron lugar a la identificación de los puntos de interés correspondientes a la tensión de fluencia real y la tensión de rotura última. Con estos parámetros, se procedió a la determinación de los factores de sobrerresistencia. Las Tablas 5, 6 y 7 resumen los valores obtenidos para las muestras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal, respectivamente.

Figura 3

Curva tensión-deformación de las muestras de 8 mm de diámetro nominal.

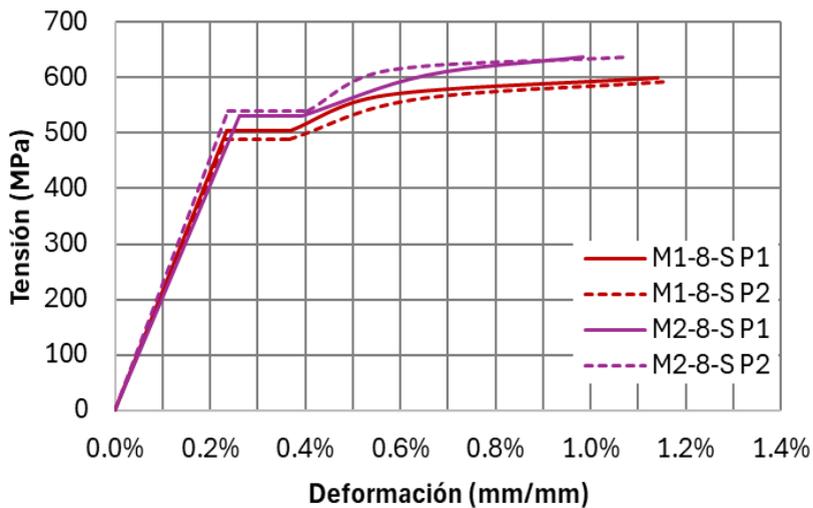


Figura 4

Curva tensión-deformación de las muestras de 12 mm de diámetro nominal.

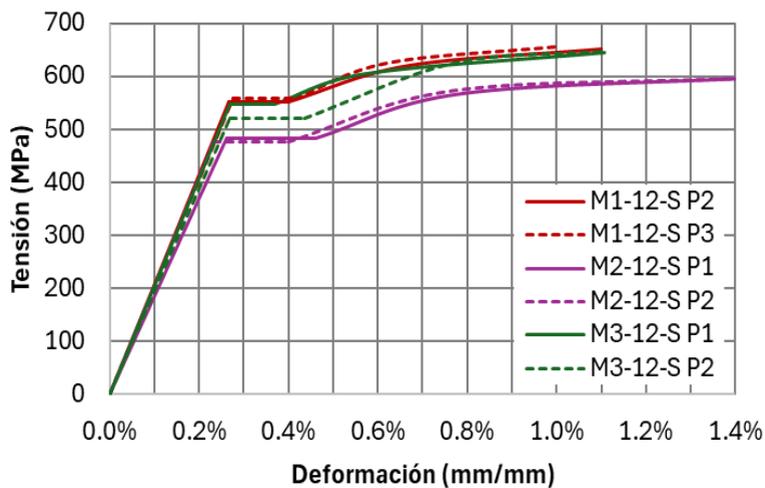


Figura 5

Curva tensión-deformación de las muestras de 16 mm de diámetro nominal.

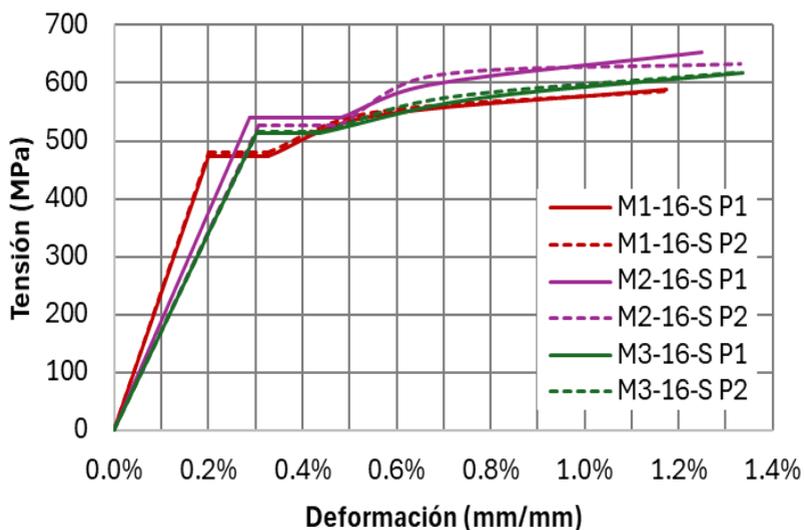


Tabla 5

Valores característicos y factores de sobrerresistencia para muestras de 8 mm de diámetro nominal.

Muestra	Id. Pr.	ϵ_y	ϵ_s	ϵ_u	E MPa	f_y^{nom}	f_y^{real}	f_u^{real}	f_y^{real}/f_y^{nom}		f_u^{real}/f_u^{nom}	
		%	%	%		MPa	MPa	MPa	Pr.	Md.	Pr.	Md.
M1-8-S	1	0.235	0.369	1.141	214902	420	505	600	1.20	1.18	1.19	1.20
	2	0.233	0.365	1.163	210162	420	489	593	1.16	1.18	1.21	1.20
M2-8-S	1	0.262	0.393	0.984	202453	420	531	637	1.26	1.28	1.20	1.19
	2	0.236	0.405	1.081	228602	420	541	637	1.29	1.28	1.18	1.19

Tabla 6

Valores característicos y factores de sobrerresistencia para muestras de 12 mm de diámetro nominal.

Muestra	Id. Pr.	ϵ_y	ϵ_s	ϵ_u	E	f_y^{nom}	f_y^{real}	f_u^{real}				
		%	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa	Pr.	Md.	Pr.	Md.
M1-12-S	2	0.267	0.400	1.100	207047	420	552	652	1.31	1.32	1.18	1.18
	3	0.276	0.414	1.000	202992	420	560	657	1.33		1.17	
M2-12-S	1	0.262	0.459	1.475	184439	420	484	599	1.15	1.14	1.24	1.25
	2	0.233	0.400	1.400	204023	420	476	598	1.13		1.26	
M3-12-S	1	0.268	0.369	1.107	203994	420	548	645	1.30	1.27	1.18	1.21
	2	0.268	0.435	1.104	195236	420	522	647	1.24		1.24	

Tabla 7

Valores característicos y factores de sobrerresistencia para muestras de 16 mm de diámetro nominal.

Muestra	Id. Pr.	ϵ_y	ϵ_s	ϵ_u	E	f_y^{nom}	f_y^{real}	f_u^{real}				
		%	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa	Pr.	Md.	Pr.	Md.
M1-16-S	1	0.200	0.325	1.175	236949	420	474	588	1.13	1.14	1.24	1.23
	2	0.201	0.327	1.181	238795	420	480	587	1.14		1.22	
M2-16-S	1	0.288	0.481	1.250	187494	420	541	654	1.29	1.27	1.21	1.20
	2	0.307	0.478	1.331	171768	420	528	632	1.26		1.20	
M3-16-S	1	0.301	0.435	1.338	170721	420	514	618	1.22	1.23	1.20	1.20
	2	0.304	0.439	1.318	169494	420	515	617	1.23		1.20	

DISCUSIÓN

Las muestras ensayadas permitieron establecer los valores de sobrerresistencia para las barras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal, y para las tres marcas comerciales disponibles en la Provincia de Mendoza.

El reglamento vigente, establece que el acero de construcción debe cumplir que la relación entre la tensión de fluencia real y la tensión de fluencia nominal, $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$, no sea mayor que 1,30. Los resultados presentados precedentemente, dan cuenta que en general este aspecto se cumple satisfactoriamente. La Figura 6 presenta gráficamente los

resultados obtenidos para cada muestra, en relación al límite reglamentario.

Adicionalmente, la nueva edición del reglamento prescribe que la relación entre la tensión última real y la tensión de fluencia real, $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$, debe estar comprendida entre 1,15 y 1,39 para aceros a emplearse en zonas sísmicas 3 y 4. Las muestras ensayadas permiten verificar el cumplimiento de lo indicado. La Figura 7 presenta de manera gráfica, la distribución del factor de sobrerresistencia $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$, obtenido para cada muestra en estudio, dentro de los límites reglamentarios. Por otro lado, en relación a la edición 2005 del Reglamento INPRES CIRSOC 103 Parte II, puede establecerse que la modificación incorporada ha representado un avance en este sentido.

Figura 6

Distribución del factor de sobrerresistencia de $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$ de cada muestra dentro de los límites prescritos.

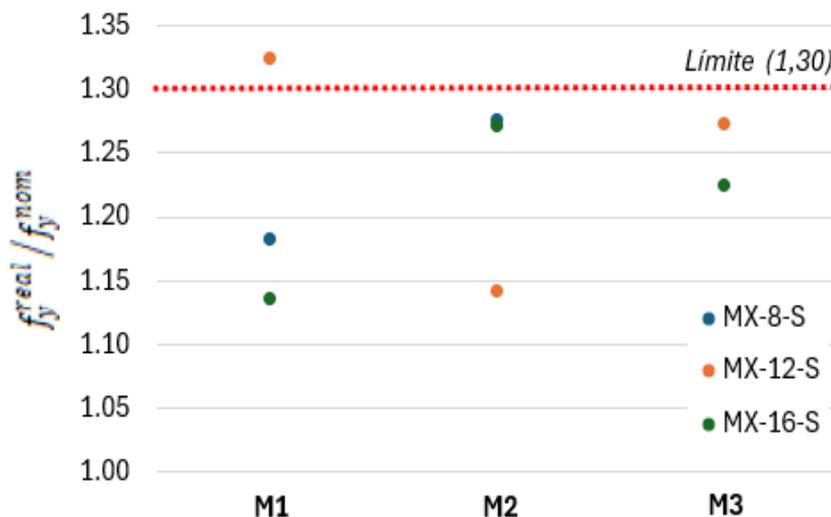
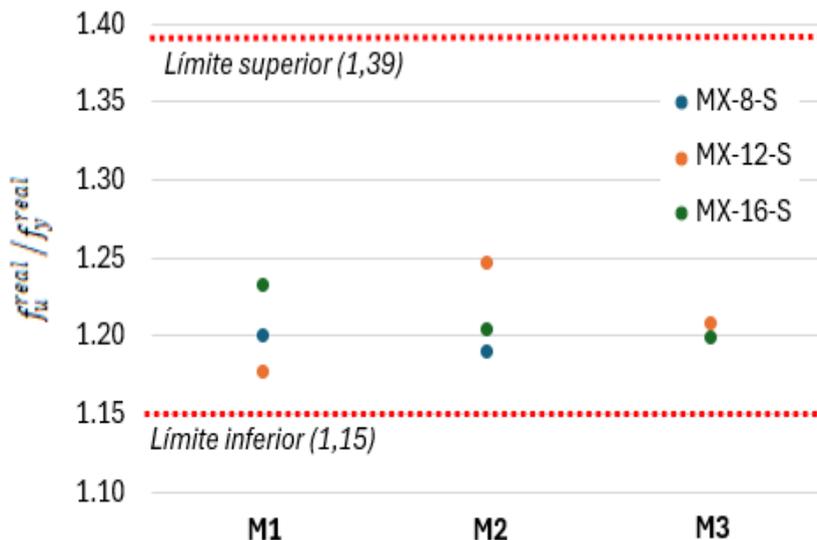


Figura 7

Distribución del factor de sobrerresistencia de $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$ de cada muestra dentro de los límites prescriptos.



CONCLUSIONES

El presente estudio experimental sobre barras de acero de diferentes diámetros y marcas comerciales disponibles en la provincia de Mendoza ha permitido obtener conclusiones significativas en cuanto a la capacidad de desarrollar sobrerresistencia flexional, de acuerdo a la reglamentación vigente.

Los resultados obtenidos en los ensayos indican que la mayoría de las muestras evaluadas cumplen con las exigencias establecidas por el Reglamento INPRES-CIRSOC 103 Parte II (2021). En particular, se verificó que la relación entre la tensión de fluencia real y la tensión de fluencia nominal, $\frac{f_y^{real}}{f_y^{nom}}$, en general, no supera el límite de 1,30, garantizando así un comportamiento adecuado del acero en aplicaciones estructurales.

Se demostró que las barras de acero ensayadas cumplen con el requisito reglamentario más reciente, que establece que la relación entre la tensión última real y la tensión de fluencia real, $\frac{f_u^{real}}{f_y^{real}}$, debe estar comprendida entre 1,15 y 1,39 para zonas sísmicas 3 y 4. Este hallazgo sugiere que el cambio reglamentario de la edición 2021 ha representado un avance en el control de la sobrerresistencia de los aceros utilizados en construcción. Los factores de sobrerresistencia determinados para las muestras de 8, 12 y 16 mm de diámetro nominal proporcionan información valiosa para el diseño y la construcción en regiones de alta actividad sísmica. Las muestras ensayadas demostraron un comportamiento mecánico que contribuye a mejorar el desempeño estructural, cumpliendo con los estándares de seguridad exigidos.

En resumen, este estudio confirmaría que las barras de acero de las tres marcas comerciales evaluadas ofrecen una respuesta adecuada para el desarrollo de estructuras resistentes en condiciones sísmicas, cumpliendo con los requisitos de la reglamentación vigente. Estos resultados son fundamentales para asegurar la confiabilidad y seguridad de las construcciones en zonas sísmicas, destacando la importancia de la sobrerresistencia flexional como un parámetro clave en el diseño estructural. El tamaño de las muestras ensayadas no es suficiente para obtener conclusiones definitivas, por lo que resulta necesario ampliar la investigación. En este sentido, sería valioso no solo aumentar el número de muestras en los casos presentados, sino también incorporar la evaluación de la sobrerresistencia en aceros ADN 420 no soldables y extender el estudio a los diámetros restantes en el caso de los aceros ADN 420-S.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Mendoza, por el apoyo técnico brindado para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1987). Productos de Acero. Método de ensayo de tracción. Condiciones generales (Norma IRAM-IAS U 500 102 Parte I). <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/11950>
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (2005). *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte II. Construcciones de Hormigón Armado* [INPRES-CIRSOC 103-II]. http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/INPRES-CIRSOC-103_Parte_II-Reglamento.pdf
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (2021). *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte II. Construcciones de Hormigón Armado* [INPRES-CIRSOC 103-II]. <http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/reglamentos/Reglamento%20INPRES-CIRSOC-103%20Parte%20II%20-%20Abril%202021%20Construcciones%20Sismorresistentes%20de%20Hormigón%20Armado.pdf>
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons, Inc. DOI:10.1002/9780470172841
- Vega, E., Llopiz, C., Crisafulli, F., & Mercier, J. (2018, septiembre 26–29). *Aceros ADN-420 S (soldables) vs aceros ADN-420. Situación normativa en Argentina* [Conference presentation]. 25° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Chaco, Argentina. <https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-anteriores/2018-25JAIE-Resistencia/trabajos.html>

* * *