



GERDAU
CORSA
El futuro se moldea

PROPIEDADES MECÁNICAS **DE PERFILES IR** **DISPONIBLES EN MÉXICO**

Gerdau Corsa. El futuro se moldea.

gerdaucorsa.com.mx

1. INTRODUCCIÓN

Los esfuerzos del acero en tensión y en la ruptura en la etapa de diseño tienen una influencia trascendente en la respuesta global de las estructuras de acero. Por esta razón, algunas investigaciones (FEMA 355A 2000; Bruneau et al. 2011; García y Tapia 2015) han dedicado esfuerzos a establecer la magnitud real de los esfuerzos de perfiles de acero como una función de los esfuerzos teóricos del material. De hecho, algunas investigaciones (Engelhardt y Husain 1993; Tapia y Tena 2014) han demostrado diferencias significativas en la respuesta global de edificios cuando se considera el esfuerzo de fluencia teórico contra los modelos analizados con el esfuerzo real mediante un factor de incremento de la capacidad denominado sobrerresistencia del material.

En pruebas experimentales, la determinación de los esfuerzos de los perfiles de acero depende de las condiciones físicas en las que se efectúan las pruebas para la determinación de las propiedades mecánicas. Por ejemplo, las condiciones de apoyo, temperatura y velocidad de la prueba, así como la composición química y el proceso termo-mecánico del acero (FEMA 355A, 2000).

En particular, las pruebas mecánicas en tensión proveen información sobre la resistencia y la ductilidad de los materiales sometidos a esfuerzos uniaxiales y pretenden contribuir a mejorar las aleaciones existentes, sirven como control de calidad y en circunstancias muy específicas sirven con fines de diseño (ASTM E8/E8M 2013). De hecho, en México esos certificados de calidad usualmente son un requisito para la aceptación de los embarques de acero laminado con fines estructurales.

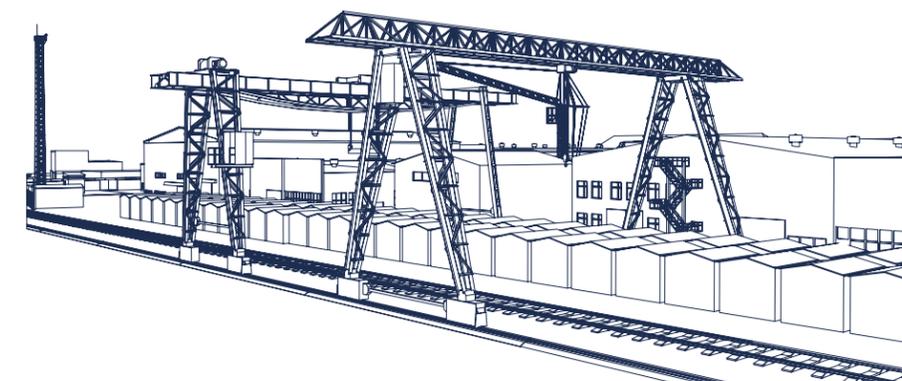
Las empresas fabricantes de acero efectúan pruebas experimentales para obtener los certificados por lotes de material que pretenden proveer confianza sobre la calidad de la colada completa y comprobar que el lote cumple con las especificaciones normativas. Sin embargo, algunos estudios (FEMA 355A 2000; Bruneau et al. 2011) han demostrado que existen fluctuaciones importantes en las

propiedades de aceros producidos en la misma colada y a la misma temperatura. Por esta razón, considerar el esfuerzo reportado en un certificado de calidad en el proceso de análisis y diseño podría no ser una decisión conservadora, puesto que no asegura que el resto del lote mantenga la capacidad supuesta.

Usualmente, las pruebas para determinar las propiedades mecánicas se realizan en probetas extraídas del alma de los perfiles IR, debido a que es complicado obtener especímenes de ensaye con espesor constante de los patines (FEMA 355A-2000). Sin embargo, en perfiles laminados, la determinación de las propiedades en probetas de patines es una mejor referencia de la capacidad, puesto que el patín es la componente principal en la resistencia a flexión.

Al respecto, se han realizado varios estudios sobre las capacidades de los aceros estructurales en Estados Unidos (e.g. NIST 2005); sin embargo, la información disponible es limitada. Esto, aunado al hecho que los resultados están basados en ensayos realizados para los casos y condiciones de aceros disponibles en el extranjero y que no deben ser equivalentes para el mercado mexicano, hacen notar la necesidad de elaborar estudios locales.

Por lo anterior, en este documento se discuten los resultados de un conjunto de ensayos realizados a probetas de acero ASTM A992 Gr. 50 (ASTM A992 2006), equivalente al acero ASTM A572 Gr. 50 extraídas de patines de perfiles IR fabricadas en México. El estudio pretende evaluar la sobrerresistencia del material en el esfuerzo de fluencia F_y , el esfuerzo relacionado con una deformación unitaria del 0.02% $F_{0.02}$ y el esfuerzo último F_u . Además, se evalúa la influencia de las características físicas los perfiles laminados IR (peralte, espesor de las placas y peso del perfil) en las propiedades mecánicas. El acero A992 es el más comúnmente usado en perfiles laminados en Estados Unidos (Guanyu et al. 2009) y cada vez tiene una mayor influencia en el mercado mexicano.



Coordinación Técnica
Gabriel A. Guerra Vanegas

Elaboró
Dr. Edgar Tapia Hernández

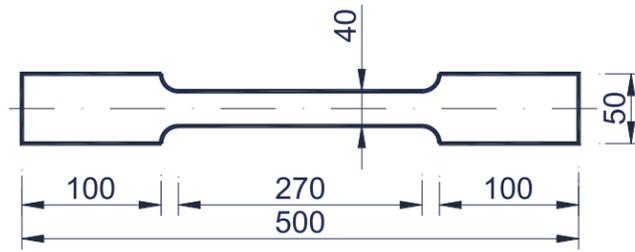
Arte
Valeria Giselle Uribe Pérez
Artroom Innovative Thinking

2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYE

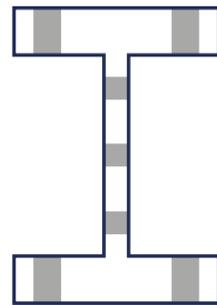
Se efectuaron pruebas experimentales en una Máquina Universal (Satec System, Inc.) con capacidad de 181.4 toneladas (400 kilolibras), donde se verificó su calibración conforme a la norma ASTM E4 (2016) y ASTM E83 (2016) sobre estándares de verificación de máquinas de ensayos y prácticas de verificación y clasificación de extensómetros. En cada prueba experimental de las probetas en tensión se midió la carga axial y la elongación mediante dos transductores de deformación (uno de ellos como respaldo) con una sensibilidad de 0.002 pulgadas.

Las probetas se extrajeron de los patines de perfiles laminados IR de distintos tamaños desde una sección IR 152mm x 13.4 kg/m (W 6"x 9 lb/pie) hasta un perfil IR 610mm x 113.2 kg/m (W 24"x76lb/pie). En total, se ensayaron 119 probetas extraídas de almas y 154 probetas extraídas de patines de perfiles IR de diferentes coladas de fabricación nacional en la planta de Ciudad Sahagún, Hgo. Las probetas se cortaron y esmerilaron considerando las disposiciones de la Norma ASTM E8/E8M-13 (2013) sobre los métodos estándar para el ensaye en tensión de materiales metálicos. En la figura 1a se muestran las características estipuladas en la norma.

Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente siguiendo el método C de la Norma ASTM E8/M8-13 (2013), donde se controla la velocidad del cabezal a 0.015 ± 0.003 mm/mm/min. Los esfuerzos axiales se determinaron como la división entre la carga de fluencia y carga última dividida entre el área transversal medida cuidadosamente con un vernier previo a la prueba. En la figura 2 se muestran algunas probetas montadas previas a la prueba experimental.



a) Dimensiones de la norma ASTM E8/M8-13



b) Posición de la extracción de las probetas

Figura 1. Probetas de perfiles de acero laminados en México

En el procedimiento de ensaye, después de que la probeta fue medida y etiquetada, se alineó siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM E1012 (2014) para asegurar que la homogeneidad de las pruebas y que la aplicación de la carga transmita únicamente demandas axiales. En la figura 3 se muestran vistas de las probetas clasificadas y después de la prueba experimental.

c) Vista de las probetas clasificadas



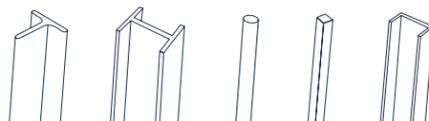
d) Vista de algunas probetas ensayadas



Figura 3. Procedimiento de ensaye de las probetas



Figura 2. Vista de probetas montadas preparadas para el ensaye



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados se discuten en términos de la sobrerresistencia del material como una proporción de los esfuerzos teóricos. Así, se define

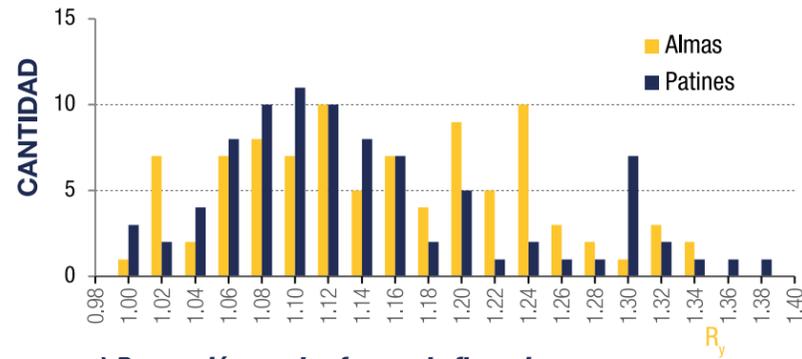
$$R_y = F_y / F_{y \text{ Teórico}}, R_{0.02} = F_{0.02} / F_{y \text{ Teórico}} \text{ y } R_u = F_u / F_{u \text{ Teórico}}$$

donde el esfuerzo de fluencia teórico es igual a

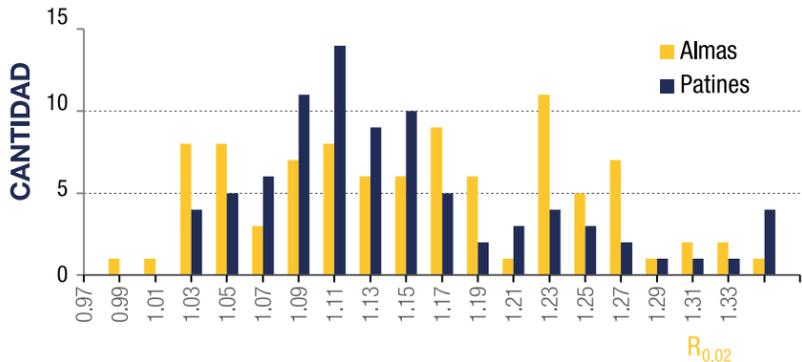
$$F_{y \text{ Teórico}} = 3,515 \text{ kg/cm}^2 \text{ y el esfuerzo último teórico } F_{u \text{ Teórico}} = 4,570 \text{ kg/cm}^2 \text{ para el acero ASTM A992 Gr. 50}$$

Así, en la figura 4 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas experimentales en función de la cantidad de veces que se obtiene una magnitud de la sobrerresistencia del material definida por intervalos. La tendencia de los

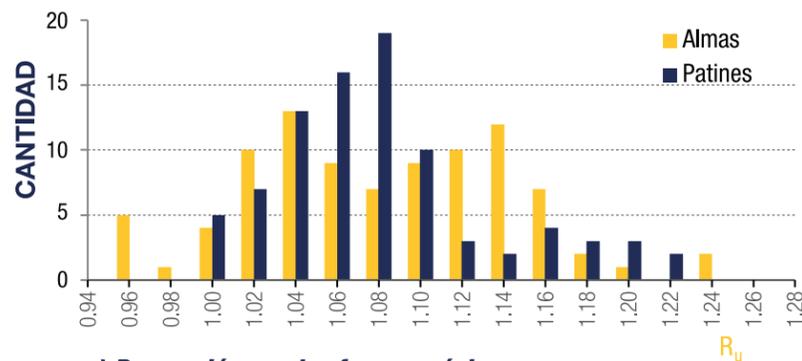
resultados señala que la magnitud de las capacidades en las pruebas experimentales supera la magnitud teórica (tal que se cumple que $R_y > 1.00$; $R_{0.02} > 1.0$; $R_u > 1.0$). Además, se nota que existen variaciones entre la magnitud reportada en la fluencia del material R_y y el esfuerzo en el 0.02% de la deformación unitaria $R_{0.02}$, pese a que evalúan el comportamiento del esfuerzo en puntos bastante similares en la curva esfuerzo - deformación. De hecho, los resultados de los esfuerzos relacionados con el 0.02% son ligeramente menores a los reportados en el máximo esfuerzo de fluencia.



a) Proporción en el esfuerzo de fluencia



b) Proporción en el esfuerzo al 0.02 de la deformación unitaria



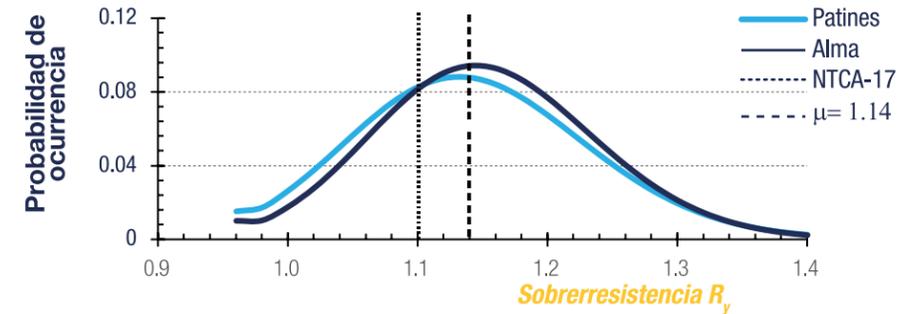
c) Proporción en el esfuerzo máximo

Figura 4. Intervalos de ocurrencia

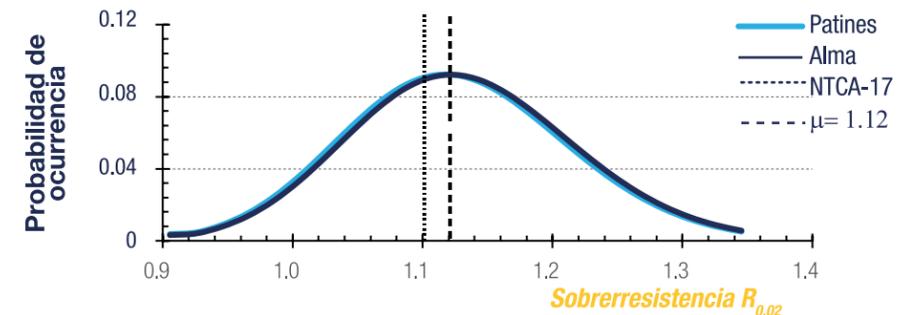
Las propiedades del acero varían ligeramente en función de la placa de extracción del espécimen (patín o alma). En general, se espera que la capacidad del acero del alma sea un poco mayor que la que desarrollan los patines debido a que el alma tiene un proceso de enfriamiento más favorable, lo que resulta en una diferencia en la microestructura del acero. Beedle y Tall (1959) ensayaron perfiles IR donde encontraron que la resistencia de la placa del alma es entre el 4% y 7% más grande que la reportada por la placa del patín. En la actualidad, la producción de

perfiles de acero vigila constantemente que el proceso de fabricación y enfriamiento sea uniforme. Quizá por esta razón, la resistencia entre los esfuerzos de las probetas extraídas del alma con respecto a las extraídas de patines es apenas el 1.0% si se compara la magnitud promedio.

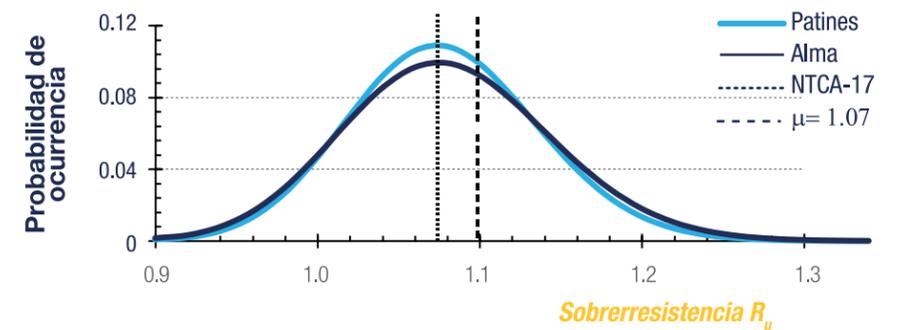
Con esta información se efectuó un estudio estadístico, donde se obtuvieron las curvas de densidad de probabilidad considerando una distribución log-normal (Ang y Tang 2007) que se muestran en la figura 5.



a) Proporción en el esfuerzo de fluencia



b) Proporción en el esfuerzo al 0.02 de la deformación unitaria



c) Proporción en el esfuerzo máximo

Figura 5. Curvas de densidad de probabilidad

Conforme a las NTCA-17(2017), el factor de sobrerresistencia del material en la fluencia y en la ruptura es igual a $R_y = R_u = 1.10$ para perfiles estructurales laminados con acero ASTM 992 Gr. 50 (tabla 1). Con base a los resultados de este estudio, las magnitudes propuestas parecerían una representación aceptable de las condiciones de los perfiles de acero que pueden encontrarse en México si se consideran únicamente las magnitudes medias iguales a $R_y = 1.14$ y $R_u = 1.07$ (figura 5). Esta observación concuerda parcialmente con estudios estadísticos similares efectuados en México y Estados Unidos. Por ejemplo, Bartlett et al. (2003) estudiaron las propiedades mecánicas del acero ASTM A992 Gr. 50 mediante 207 certificados, donde concluyeron que la recomendación del manual AISC 341-10 (2010) es una buena representación de la capacidad del acero ($R_y = R_u = 1.10$). En contraparte, Tapia et al. (2016) con base en 850 certificados de calidad de acero ASTM A572 Gr. 50 (que es equivalente al ASTM A992 Gr. 50) y aplicando

un nivel de confianza del 98% establecieron magnitudes medias iguales a $R_y = R_u = 1.17$. Con el propósito de evaluar la conveniencia de las magnitudes obtenidas en esta investigación, se calcularon los índices de confiabilidad, que asignan la probabilidad de que la magnitud del factor por sobrerresistencia sea igual a una cierta magnitud a partir de los resultados de los ensayos. Un índice de confiabilidad igual a uno representa el caso en el que la propuesta de estimación del factor contiene los datos obtenidos en el estudio experimental. Mientras que el caso de un índice de confiabilidad igual a cero representa una propuesta de estimación donde todos los datos del estudio superaron esa magnitud.

La magnitud del índice de probabilidad de ocurrencia de la media μ , la media más una desviación estándar $\mu + \sigma$ y los límites normativos se muestran en la tabla 1 en función del tipo de placa de extracción.

Sobrerresistencia del material	ÍNDICE DE PROBABILIDAD					
	Probetas extraídas de alma			Probetas extraídas de patín		
	NTCA-17	μ	$\mu + \sigma$	NTCA-17	μ	$\mu + \sigma$
R_y	0.31	0.49 ($\mu = 1.14$)	0.82 ($\mu + \sigma = 1.23$)	0.37	0.55 ($\mu = 1.13$)	0.83 ($\mu + \sigma = 1.22$)
$R_{0.20}$	0.36	0.48 ($\mu = 1.12$)	0.80 ($\mu + \sigma = 1.21$)	0.39	0.51 ($\mu = 1.12$)	0.82 ($\mu + \sigma = 1.21$)
R_u	0.68	0.46 ($\mu = 1.07$)	0.85 ($\mu + \sigma = 1.14$)	0.71	0.46 ($\mu = 1.07$)	0.89 ($\mu + \sigma = 1.13$)

Tabla 1. Probabilidad de ocurrencia según las pruebas experimentales

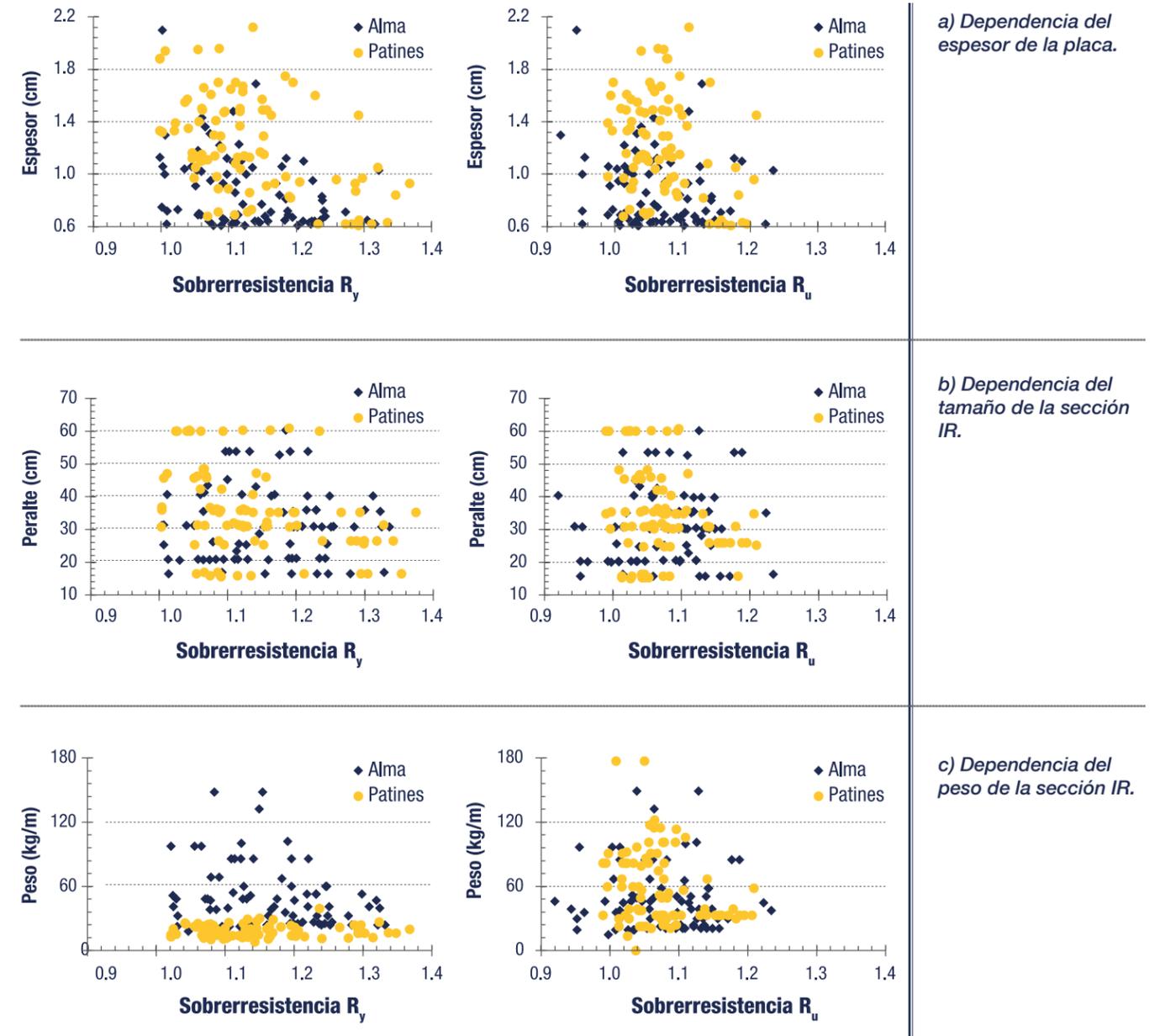
El factor de sobrerresistencia en la fluencia normativo R_y (AISC 341-16; NTCA-17) tiene un índice de confiabilidad igual a 0.34 si se consideran todos los resultados de probetas extraídas de almas y patines, por lo que existe la probabilidad mayor al 60% de que una probeta desarrolle una capacidad mayor a $R_y F_y$. La tendencia es muy parecida cuando se consideran los resultados del esfuerzo de fluencia en el 0.02% de la deformación unitaria independientemente de la placa de donde se haya extraído la probeta (alma o patín).

Por otra parte, la propuesta normativa para estimar el esfuerzo máximo igual a $R_u = 1.10$ está relacionado con un índice de confiabilidad de 0.68 y 0.71 para probetas extraídas de almas y patines, respectivamente (tabla 2). Otros estudios (Tapia et al. 2016) que están basados en certificados de calidad disponibles en México, recomiendan una magnitud igual a $R_u = 1.12$.

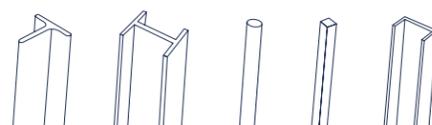
4. INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL PERFIL

En esta investigación también se dedicaron esfuerzos para estimar la posible influencia de las características físicas de los perfiles IR en las propiedades mecánicas de las placas en la sobrerresistencia del material en la fluencia R_y y en el esfuerzo último R_u . En el estudio se consideraron 154 probetas extraídas de patines y 119 probetas extraídas de almas de perfiles IR de un amplio universo de tamaños. Las probetas se extrajeron de perfiles IR desde 13.4 kg/m (9 lb/pie) hasta 177.2 kg/m (79 lb/pie) en la figura 6a; los espesores de las placas desde 0.47 cm hasta 2.91 cm en la figura 6b y peraltes desde 15.2 cm (6 plg) hasta 61.3 cm (24 plg) en la figura 6c.

Figura 6. Dependencia de las características físicas



Con base en los resultados, no se nota ninguna tendencia clara entre la sobrerresistencia que puede desarrollar el material y el espesor de la placa de la probeta (figura 6a), el peralte del perfil IR (figura 6b) ni el tamaño del perfil estimado mediante el peso de la sección (figura 6c). Igualmente, la tendencia entre la sobrerresistencia del material en la fluencia R_y y la magnitud última R_u no tienen una interdependencia clara en relación al tipo de placa de la extracción.



5. MÁS INFORMACIÓN

Al final de este documento se incluyen referencias bibliográficas que pueden complementar la información discutida. Este documento discute los resultados de una investigación experimental con el propósito de mejorar, difundir y promover las buenas prácticas del uso del acero; su correcta interpretación, aplicación y uso es responsabilidad del lector. Para una mayor referencia de los resultados discutidos y/o mayor información escribir a etapiah@hotmail.com.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al **M.I. Gilberto Rangel Torres grt@azc.uam.mx** por su apoyo y participación activa en el desarrollo de las pruebas en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco y a los alumnos César Escutia, Nathaly Gutiérrez, Carlos Hernández, Martha Lorenzo, Flor Sánchez, Patricia Huitrón y Edgar Miranda por su participación en alguna de las etapas de esta investigación.

5. MÁS INFORMACIÓN

- [1] AISC 341-16 (2016), “Seismic provisions for structural steel buildings”, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, Estados Unidos.
- [2] Ang, A.H-S. y Tang, W. H. (2007), “Probability Concepts in Engineering Planning and Design”, 2nd. Ed, Vol. I – Emphasis on civil and environmental engineering. John Wiley and Sons, New York.
- [3] ASTM E4-16 (2016), “Standard Practices for Force Verification of Testing Machines”, Subcommittee E28.01. American Standard Testing Material. West Conshohocken, PA. Estados Unidos.
- [4] ASTM E83-16 (2016), “Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems”, American Standard Testing Material. West Conshohocken, PA. Estados Unidos.
- [5] ASTM E1012-14 (2014), “Standard Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application”, American Standard Testing Material. West Conshohocken, PA. Estados Unidos.
- [6] ASTM A992 (2006), “Active Standard ASTM A992/ A992M”, Standard Specification for Structural Steel Shapes. American Standard Testing Material. West Conshohocken, PA. Estados Unidos.
- [7] ASTM E8/E8M-13 (2013), “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, American National Standard, ASTM..
- [8] Bartlett, F. M., Dexter, R. J., Graeser, M. D., Jelinek, J. J., Schmidt, B. J. y Galambos, T. V. (2003), “Updating

standard shape material properties database for design and reliability”, Engineering Journal American Institute of Steel Construction, Vol. 40, No. 1, pp. 2-14.

- [9] Beedle, L.S. y Tall, L. (1959), “Basic column strength”, Proceedings, American Society of Civil Engineers (ASCE), 86 (ST-7), Fritz Laboratory Reports, Paper 1507.
- [10] Bosco M. y Rossi P.P (2009), “Seismic behaviour of eccentrically braced frames”, Engineering Structures, Vol. 31, pp. 664-674.
- [11] Bruneau M., Uang C.-M. y Sabelli R. (2011), “Ductile Design of Steel Structures”, 2nd edition. Mc Graw Hill.
- [12] Engelhardt M.D. y Husain A.S. (1993), “Cyclic-loading Performance of Welded Flange-bolted Web Connections”, Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 12. pp. 3537-3550.
- [13] FEMA-355A (2000), “State of the Art Report on Base Metals and Fracture”, Federal Emergency Management Agency, Program to reduce the earthquake hazards of Steel Moment-Frame Structures. September.
- [14] García S. y Tapia E. (2015), “Observaciones sobre las previsiones sísmicas para marcos de acero con contraviento excéntrico”, Memorias, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco. Noviembre
- [15] Guanyu H., Mohammed A.M., Jinwoo L. y Engelhardt M. (2009), “Elevated Temperature Properties of ASTM A992 Steel”, Structures Congress, American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 1067-1076.
- [16] NIST (2005) “Mechanical Properties of Structural Steels”, NIST NCSTAR 1-3D, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. National Institute of Standards and Technology.
- [17] NTCA-17 (2017). Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Acero. En Gaceta Oficial de la Ciudad de México. No. 220Bis. Vigésima época. Gobierno de la Ciudad de México. Diciembre.
- [18] Tapia E., García S. y Del Rincón A. (2016), “Estudio paramétrico del modelado inelástico de contravientos de acero”, Revista de Ingeniería Sísmica, Vol. 94, pp. 49-74.
- [19] Tapia E. y Tena A. (2014), “Code-Oriented methodology for the seismic design for regular steel moment resisting braced frames”. Earthquake Spectra Journal. Vol. 30. No. 4, pp. 1683-1709.



DIRECTORIO

OFICINAS COMERCIALES

T. +52 55 5262 7300 / Av. Ejército Nacional 216 P.2, Anzures, Miguel Hidalgo, CDMX, 11590

PLANTAS

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 913 8105 / Km. 3 Ctra. Mex – Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. De México, 54187

DISTRIBUCIÓN

CDMX

T. +52 55 5089 8930 / Año 1857 8, Ticomán, Gustavo A. Madero, CDMX, 07330

MONTERREY

T. +52 81 8748 7610 / Blvd. Carlos Salinas de Gortari 404, Centro Apodaca, Nuevo León, 66600

PATIOS DE CHATARRA Y CENTROS DE RECOLECCIÓN

CD. SAHAGÚN

T. +52 791 9138 105 / Km. 3 Ctra. Mex – Cd. Sahagún, Zona Ind. Tepeapulco, Cd. Sahagún, Hidalgo, 43990

LA PRESA

T. +52 55 5003 4030 / 5062 1916 / Av. La Presa 2, Zona Industrial La Presa, Tlalnepantla, Edo. de México, 54187

LOS REYES

T. +52 55 5856 1651 / Tepozanes Los Reyes, Acaquilpan, México, 56428

GUADALAJARA

T. +52 33 3668 0285 / 36702769 / Av. 18 de Marzo 531, La Nogalera, Guadalajara, Jalisco, 44470

SAN JUAN

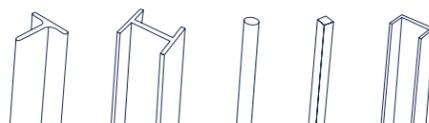
T. +52 55 2603 3275 / 5262 7359 / San Juan 675, Granjas Modernas, CDMX, 07460

TULTITLÁN

T. +52 55 5894 0044 / 2487 2065 / Primera Sur S/N, Independencia, Tultitlán, Edo. de México, 54915

VERACRUZ

T. +52 229 923 1359 / Ctra. Fed. Aluminio L. 7 o Camino Puente Roto Km. 1.5, Nuevo Veracruz, Veracruz, 91726





GERDAU CORSA

El futuro se moldea

Somos más allá del acero.

gerdaucorsa.com.mx



Gerdau Corsa. El futuro se moldea.