



COMPORTAMIENTO ELASTOPLÁSTICO DE CONEXIONES SOLDADAS EN TUBOS DE ACERO DE SECCIÓN CUADRADA SOMETIDOS A CARGA MONOTÓNICA

ELASTOPLASTIC BEHAVIOR OF WELDED CONNECTIONS IN SQUARE SECTION STEEL PIPES SUBMITTED TO MONOTONIC LOAD

Carlos Alberto Romero Romero¹; Antonio Ramón Sarcos Portillo²

Recibido 25/05/2018; Aprobado: 15/09/2018

DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27720.57600>

RESUMEN

Esta investigación tuvo por objetivo analizar el comportamiento elasto-plástico de conexiones soldadas de tubos de acero de sección cuadrada, sometidas a carga monotónica mediante el análisis comparativo teórico – experimental de la distorsión de la geometría de la sección transversal de los elementos de la unión viga-columna. Para los ensayos se construyó un marco soporte rígido diseñado con el software STAAD. Pro v8i, de fijación y ensamblaje a los pórticos y sistema de aplicación de carga de la máquina universal del laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia, Venezuela. Cada prueba consistió en imponer carga progresiva en la conexión superior del pórtico, para medir en desplazamientos y distorsión de la geometría de los elementos unión viga columna de la conexión inferior. El modelo teórico fue realizado utilizando el programa de elementos finitos ANSYS Workbench. Los resultados evidenciaron: la conexión soldada presenta falla local por punzonado en la columna, reduciendo la capacidad de momento plástico teórico del pórtico M_p en un 46%, escenario de preocupación por ser ésta capacidad utilizada en el diseño bajo la teoría Diseño por Factores de Carga y Resistencia. La conexión soldada (nodo) no cumple con el criterio columna fuerte viga débil establecido por la Norma COVENIN 1618:1998. La columna de la unión soldada debe ser reforzada para evitar la formación de la rótula plástica y un posible mecanismo de colapso en el pórtico. Las simulaciones teóricas presentan un error relativo promedio con respecto a los ensayos experimentales de aproximadamente 9,67%.

Palabras clave: carga monotónica; distorsión de la geometría, ANSYS Workbench

¹Carlos Alberto Romero Romero. Ingeniero civil. Magister Scientiarum en ingeniería estructural. Docente investigador en la Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador. Correo: cromero@ups.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-8408>

²Antonio Ramón Sarcos Portillo Ingeniero civil. Magister Scientiarum en ingeniería estructural. Docente investigador en la Universidad del Zulia. Venezuela. Correo: asarcos@luz.edu.ve. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1169-0559>

ABSTRACT

This research aims to analyze the elastoplastic behavior of welded connections of square section steel tubes subjected to monotonic loading, by means of the theoretical - experimental comparative analysis of the distortion of the cross section geometry of the elements of the beam - column joint. For the experimental tests it was necessary to build a rigid support frame designed with STAAD software. Pro v8i, of fixing and assembly to the gantries and load application system of the universal machine of the Materials Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Zulia. In every test a progressive load (monotonic load) was applied on the upper connection of the gantry to systematically to measure displacements and distortion of the geometry of the beam jointing elements column of the lower connection. While the theoretical model was performed using the finite element program [4] ANSYS Workbench. The obtained results show that: the welded connection presents a local failure by punching in the column that reduces the theoretical plastic moment capacity of the gantry " M_p " by 46%, scenario of concern for being this capacity used in the design under the theory Design for Load and Resistance Factors (LRFD). The welded connection (node) does not meet the weak beam strong column criterion established by Norma. The column of the welded joint must be reinforced to avoid the formation of the plastic ball joint and a possible mechanism of collapse in the gantry.

Keywords: *monotonic charge; distortion of geometry, ANSYS Workbench*

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento teórico-experimental de conexiones soldadas en tubos de acero de sección cuadrada de producción nacional venezolana conocidos comercialmente como CONDUVEN ECO [1] sometidos a cargas monotónicas. Para esto el modelo teórico fue realizado utilizando el programa de elementos finitos ANSYS Workbench [2]. Mientras que, para la realización de los ensayos experimentales, primeramente, fue necesario construir un marco soporte rígido, diseñado con el software STAAD. Pro v8i [3], de fijación y ensamblaje a los pórticos y sistema de aplicación de carga de la maquina universal del laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Cada prueba consistió en imponer carga progresiva (carga monotónica) en la conexión superior del pórtico para medir en forma sistemática, desplazamientos y distorsión de la geometría de la sección trasversal de los elementos unión viga columna de la conexión inferior.

Los resultados obtenidos evidenciaron que: la conexión soldada presente una falla local por punzonado en la columna que reduce la capacidad de momento plástico teórico del pórtico M_p en un 46% [4]. Escenario de preocupación por ser esta capacidad utilizada en el diseño bajo la teoría Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) [4]. La conexión soldada (nodo) no cumple con el criterio columna fuerte viga débil establecido por Norma COVENIN 1618:1998 [5]. La columna de la unión soldada debe ser reforzada para evitar la formación de

la rótula plástica y un posible mecanismo de colapso en el pórtico. Las simulaciones teóricas presentan un error relativo promedio con respecto a los ensayos experimentales de aproximadamente 9,67%.

2. DESARROLLO

La simulación del marco metálico fue realizada con el software estructural STAAD. Pro v8i. [3]. La modelación consistió de dos partes; una que contenía la geometría del soporte visualizado en la Figura 1, la introducción de apoyos, las propiedades de los materiales (perfiles HEA200) [1], las cargas, los parámetros y comando de diseño. En la otra parte, la obtención e interpretación de los resultados, como se muestra en la Figura 2.

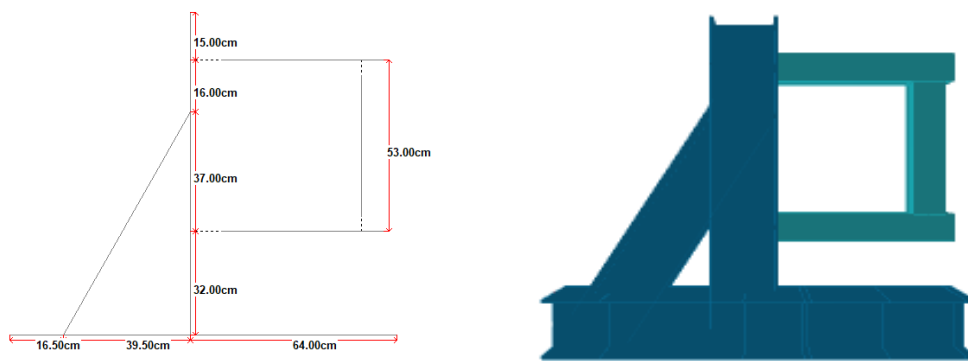


Figura 1. Geometría del marco soporte modelado en el programa STAAD. Pro v8i. Fuente: [3]



Figura 2. Resultados del modelado en el programa STAAD. Pro v8i. Fuente: [3]

De los resultados se observó que la relación entre el momento último y la capacidad minorada de la sección a flexión $M_u \leq \phi M_n$, resultó ser de $0.948 \leq 1$ valor permisible según Norma COVENIN 1618:1998 [5], lo que implica que el diseño es satisfactorio. Por otra parte, la fuerza cortante en régimen de servicio y última corresponde a $V=5203$ kgf y $V_u=8322$ kgf, el

momento en condición de servicio y último es $M=1345$ kgf.m y $M_u=2152$ kgf.m, y la fuerza de tensión actuante en los pernos en condición de servicio y última es de $T=7912$ kgf y $T_u=12653$ kgf, valores que resultan de dividir el momento entre la distancia eje a eje de pernos la cual corresponde a 0,17m.

2.1. Diseño de conexión emperrada tipo deslizamiento crítico

Las conexiones emperradas tipo deslizamiento crítico, en régimen de servicio, sometidas a fuerzas cortantes y tracción combinada [6] se calculan de acuerdo a la ecuación:

$$\phi P_{iv} \eta n \left(1 - \frac{T}{T_b \eta} \right) \geq V \quad (1)$$

Siendo:

- V fuerza total de corte actuante en la unión, en régimen de servicio, en agujeros standard $\phi=1''$
- T fuerza de tracción (demanda) total
- T_b fuerza de tracción mínima de cada perno, como se muestra en la Tabla 1
- η número de pernos de la conexión
- n número de planos de corte
- P_{iv} esfuerzo admisible a corte de los pernos como se muestra en la Tabla 2

Tabla 1. Fuerzas mínimas de tracción T_b . Fuente: [6]

Diámetro del Perno (mm)	Pernos A325 T_b (kgf)	Pernos A490 T_b (kgf)
13	5440	6800
16	8620	10900
19	12700	15900
22	17700	22200
25	23100	29000

Tabla 2. Esfuerzo admisible a corte en los pernos P_{iv} . Fuente: [6]

Diámetro del perno (mm)	Pernos A325			Pernos A490		
	Aplastamiento (CR)	Desliz. (SR)	Crítico P_{iv} (kgf)	Aplastamiento (CR)	Desliz. (SR)	Crítico P_{iv} (kgf)
13	4270	5346	1514	5346	7247	1875
16	6669	8351	2365	8351	11230	2929
19	9604	12027	3405	12027	16302	4218
22	13072	16369	3635	16369	22187	5740
25	17075	21382	6055	21383	29983	7499

Nota: Siendo (SR) y (CR) sin y con rosca incluida en el plano de corte

Por otro lado, las conexiones emperradas tipo deslizamiento critico en agotamiento resistente,

pernos solicitados a fuerzas mayoradas de tracción y corte combinadas tiene una capacidad resistente como se indica en las ecuaciones 2 y 3 [6]:

$$\phi R_{str} \geq Vu \quad (2)$$

$$\phi R_{str} = 1.13 \cdot \mu T_b \eta \cdot n \left(1 - \frac{T_u}{1.13 T_b \eta} \right) \geq Vu \quad (3)$$

Donde:

T_u fuerza de tracción última actuante total en la conexión.

V_u cortante último actuante en la unión.

μ coeficiente de fricción estática para superficies clase A, B, C, cuya clasificación se detalla a continuación:

$\mu = 0,33$ en superficies clase A. Son las superficies libres de cascarillas de laminación no pintadas o superficies limpias sometidas a tratamiento con chorro de arena y a las que se ha aplicado un protector clase A.

$\mu = 0,50$ en superficies clase B. Son las superficies limpias, sometidas a tratamiento con chorro de arena y no pintadas o superficies limpias sometidas a tratamiento de chorros de arena y a las que se han aplicado un protector clase B.

$\mu = 0,40$ en superficies clase C. son las superficies galvanizadas en caliente y las superficies rugosas.

2.2. Diseño de la placa extremo

Para determinar el espesor de la placa extremo, el momento último efectivo M_{eu} fue calculado utilizando la ecuación 4, y fuerza factorizada P_{uf} con la ecuación 5 [6]:

$$M_{eu} = \frac{\alpha m \cdot P_{uf} \cdot p_e}{4} \quad (4)$$

$$P_{uf} = \frac{M_u}{(d - t_f)} \quad (5)$$

Siendo:

M_u Momento último actuante

d peralte del perfil

t_f espesor de ala del perfil

αm variable que depende del tipo de perno, fluencia del material de la lámina, área del área traccionada del perfil, diámetro del perno y área de la sección transversal del perfil

determinada en la ecuación 6

$$\alpha m = C_a C_b \left(\frac{A_f}{A_w} \right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{pe}{d_b} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

A_f área del ala traccionada en cm^2

A_w área del alma del perfil, sin las alas

C_a corresponde a la constante que depende del tipo de perno y la fluencia del material aporte de la lámina, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de C_a para el diseño de planchas extremas. Fuente: [6]

Tipo de pernos	Fy de la Plancha Extrema kgf/cm^2	C_a
A325	2500	1,45
	3500	1,31
A490	2500	1,48
	3500	1,33

C_b variable que depende del ancho del perfil y de la plancha, en ecuación 7 [6].

$$C_b = \left(\frac{b_f}{b_{pef}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

b_f ancho de ala del perfil

b_{pef} ancho efectivo de la plancha $b_f + 2,54\text{cm}$

p_f distancia entre el baricentro de los pernos y la cara exterior de la cara traccionada $d_b + 1,27\text{cm}$

p_e variable determinada por la ecuación 8, que depende de la distancia desde el baricentro de los pernos al borde de la lámina, y del tamaño nominal de la soldadura.

$$p_e = p_f - \left(\frac{d_b}{4} \right) - D \quad (8)$$

D tamaño nominal del cordón de soldadura

d_b diámetro del perno en cm

Finalmente, el espesor de la plancha viene dado por la ecuación 9 [6].

$$t_p = \sqrt{\frac{4M_{ue}}{\phi F_y * b_{pef}}} \quad (9)$$

2.3. Fuerzas y momento actuantes en la conexión empernada

Utilizando la fuerza de tracción última obtenida de la simulación del marco soporte (ver Figura 2), en las ecuaciones 1 y 3, considerando conexión empernada con 04 pernos ASTM A490, (CR) $\phi=3/4"$, se concluye que los pernos no fallan. Al hacer uso de las ecuaciones 4 hasta 9, el espesor de la placa extremo resulta de $1/2"$ calidad ASTM A36 [7].

- $1 \times 12027 \times 4 \times 1 \left(1 - \frac{7912}{15900 \times 4} \right) = 42123 \geq \frac{5203}{4} Ok$
- $1 \times 12027 \times 4 \times 1 \left(1 - \frac{7912}{15900 \times 4} \right) = 42123 \geq \frac{5203}{4} Ok$
- P_{uf} 15371 kgf
- C_a 1,48 de acuerdo a la Tabla 3
- b_{pef} 11,54 cm
- C_b 0,88
- p_e 3,17
- αm 1,16
- M_{eu} 14130 kgf.cm
- t_p 1,4 cm espesor de plancha $1/2"$

En la Figura 3 se muestra el espesor y geometría de la placa, así como el diámetro de los agujeros para pernos de $3/4"$.

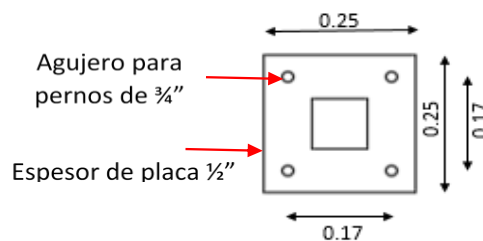


Figura 3. Geometría de la placa y agujeros para pernos de diámetro $3/4"$. Fuente: [8]

3. METODOLOGÍA

3.1. Ensayos realizados

Para evaluar el comportamiento experimental de la conexión soldada fueron construidos y ensayados tres pórticos, con tubos estructurales denominados comercialmente CONDUVEN ECO [1] de dimensiones y propiedades mecánicas descritas en las Tablas 4 y 5 (ver Figura 4).

Tabla 4. Ensayos realizados. Fuente: [8]

Numero de Ensayos	Pórticos Construidos por Tubos Estructurales	Tipo de Ensayo
01	60x60x2,25 mm	Monotónico
01	70x70x2,25 mm	Monotónico
01	90x90x2,50 mm	Monotónico

Tabla 5. Propiedades mecánicas de los tubos. Fuente: [1]

CONDUVEN ECO	Tubo 60x60x2,25mm	Tubo 70x70x2,25mm	Tubo 90x90x2,50mm
h/t	26,67	31,11	36,00
A(cm ²)	5,02	5,92	8,54
Ix=Iy (cm ⁴)	27,40	44,06	107,46
Zx=Zy (cm ³)	10,74	14,89	27,76
Fy (kgf/cm ²)	3515	3515	3515

Nota: A: Área de la sección. Ix, Iy: Inercia de la sección. Zx: Modulo de sección plástico. Fy: Esfuerzo de fluencia del material.

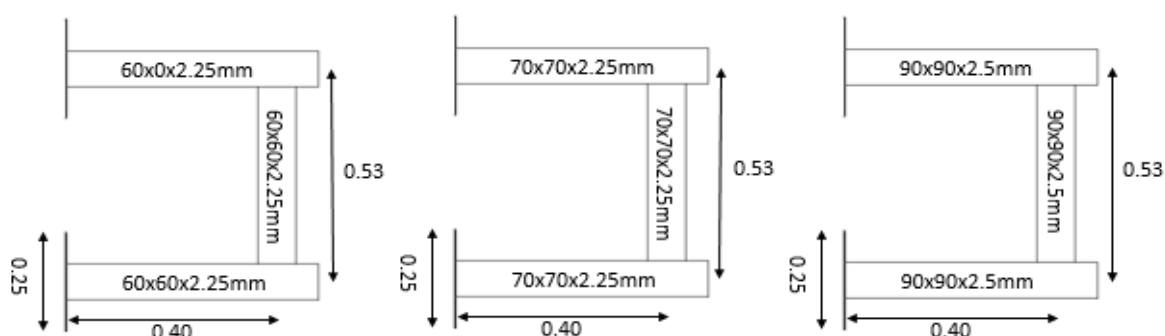
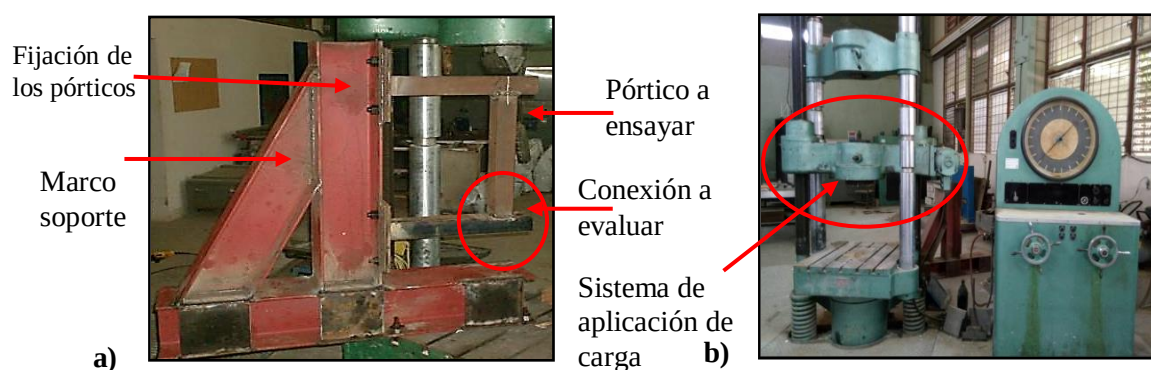


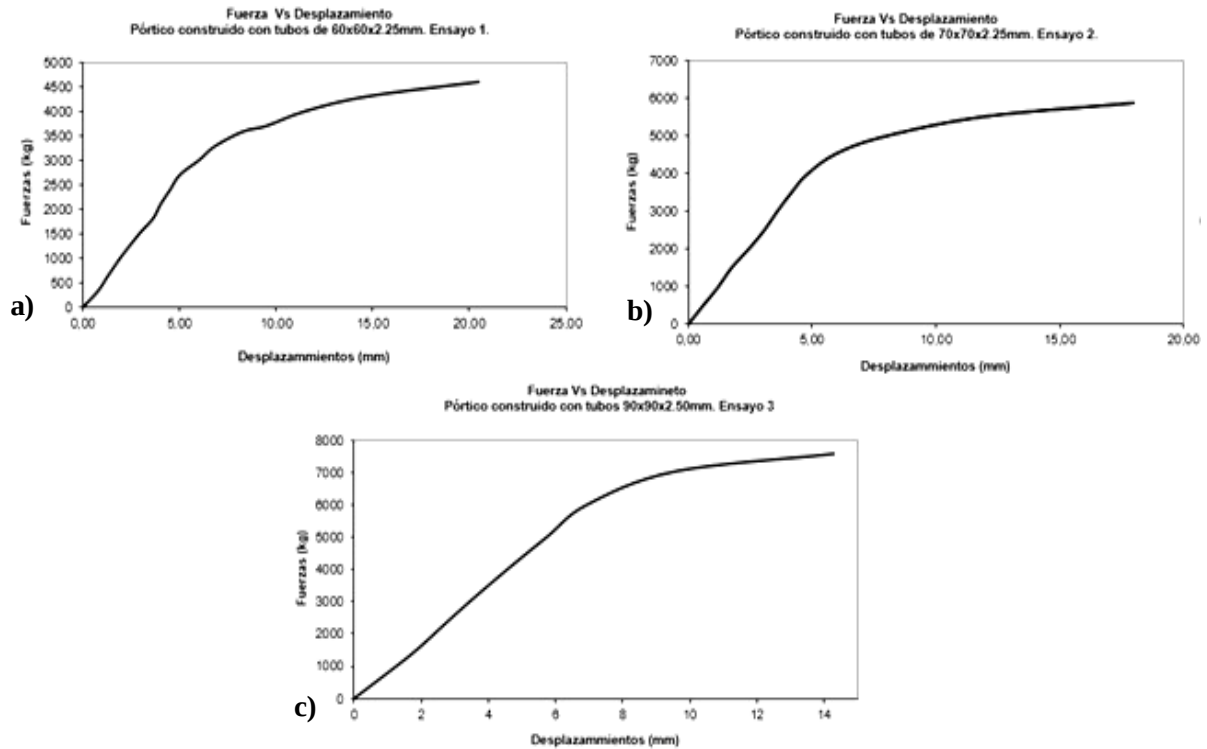
Figura 4. Geometría de los pórticos ensayados Fuente: [8]

Para realizar los ensayos fue necesario fabricar un marco soporte rígido (ver Figura 5a) de fijación a los pórticos. El conjunto fue colocado al sistema de aplicación de carga de la maquina universal (ver Figura 5b), de transmisión hidráulica del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Zulia.



Figuras 5. a) Marco soporte de fijación, b) maquina universal. Fuente: [8]

Cada ensayo consistió en imponer una carga progresiva (carga monotónica), en la junta superior del pórtico, (ver Figura 6), midiendo a la vez en forma sistemática el desplazamiento, en la junta inferior utilizando un extensómetro de reloj, como se muestra en la Figura 7.



Figuras 6. Historia de carga progresiva vs desplazamiento ensayos: a) 1, b) 2 y c) 3. Fuente: [8]

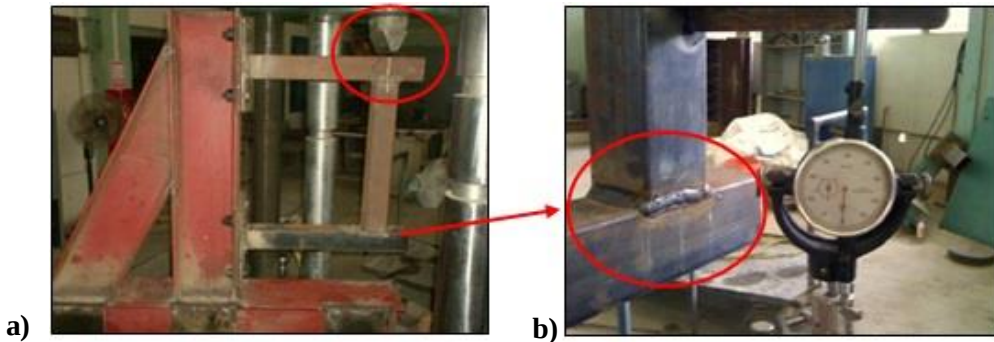


Figura 7. a) Sistema progresivo de aplicación de carga junta superior del pórtico, b) Medición desplazamiento junta inferior del pórtico utilizando extensómetro de reloj. Fuente: [8]

Después de la aparición del pandeo local en la columna de la conexión inferior, fue necesario establecer y medir nuevos parámetros como: el ensanchamiento de la sección transversal de la columna del pórtico llamado (b₁), y profundidad del pandeo local en la sección transversal de la columna del pórtico llamado (b₂) como se observa en la Figura 8.

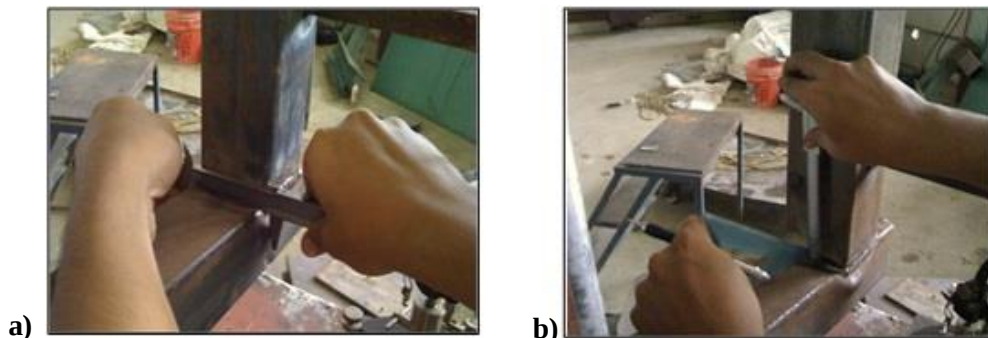


Figura 8. a) Ensanchamiento de la sección transversal de la columna del pórtico (b₁), b) Profundidad del pandeo local de la sección transversal de la columna del pórtico (b₂) Fuente: [8]

3.2. Modelo teórico

El modelo teórico fue realizado con el programa de elementos finitos ANSYS Workbench [2]. La simulación consistió, primeramente, en crear el módulo de geometría y mallado, como se muestra en la Figura 9.

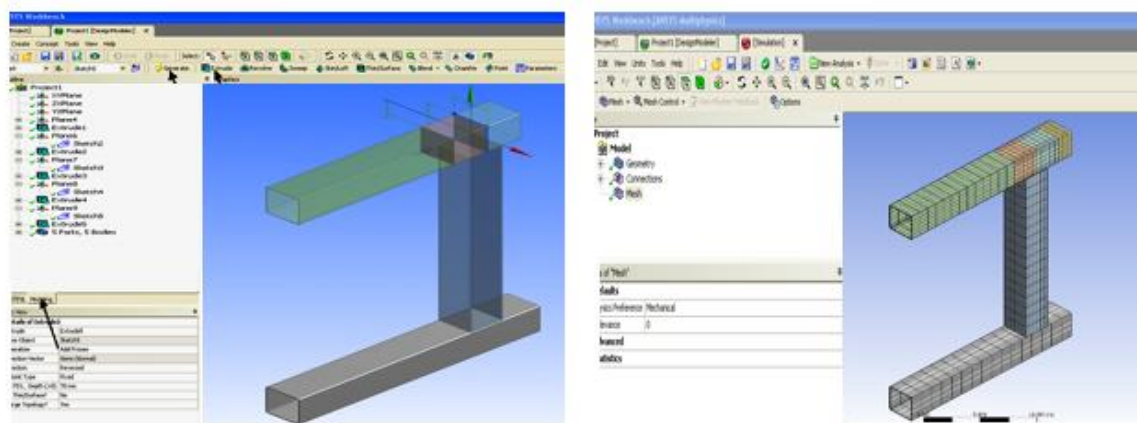


Figura 9. Geometría y generación de malla modelo en ANSYS Workbench. Fuente: [8]

Seguidamente se procedió a determinar las deformaciones plásticas, obtenidas de restar las deformaciones totales menos las elásticas mostrados resultados en Tabla 6.

Tabla 6. Deformaciones plásticas del acero. Fuente: [8]

	ε	σ (kgf/cm ²)	σ (Psi)
ε_y	0,0000	3515	f_y 49995
ε_{st}	0,0116	3515	f_y 49995
ε_b	0,0195	4218	f_b 59994
ε_u	0,1378	4394	f_u 62497

Posteriormente fueron definidos los parámetros del diagrama multilíneas – deformación del acero e introducidos en el programa ANSYS Workbench (ver Tablas 7 y 8, y Figura 10).

Tabla 7. Parámetros del diagrama de multilíneas del acero. Fuente: [8]

Material	E (kgf/cm ²)	E (Psi)	F _y (kgf/cm ²)	F _y (Psi)	F _u /F _y	F _b /F _y	$\varepsilon_{st}/\varepsilon_y$	$\varepsilon_b/\varepsilon_y$	$\varepsilon_u/\varepsilon_y$
Acero	1,02E+06	14,50E+06	3515	49983	1,25	1,20	4,35	10	50

Tabla 8. Diagrama de multilíneas esfuerzo - deformación del acero. Fuente: [8]

	ε	σ (kgf/cm ²)	σ (Psi)
Inicial	0,0000	0	Inicial 0
ε_y	0,0034	3515	F_y 49995
ε_{st}	0,0150	3515	F_y 49995
ε_b	0,0345	4218	F_b 59994
ε_u	0,1723	4394	F_u 62497
ε_u	0,3000	4183	F_u 59496

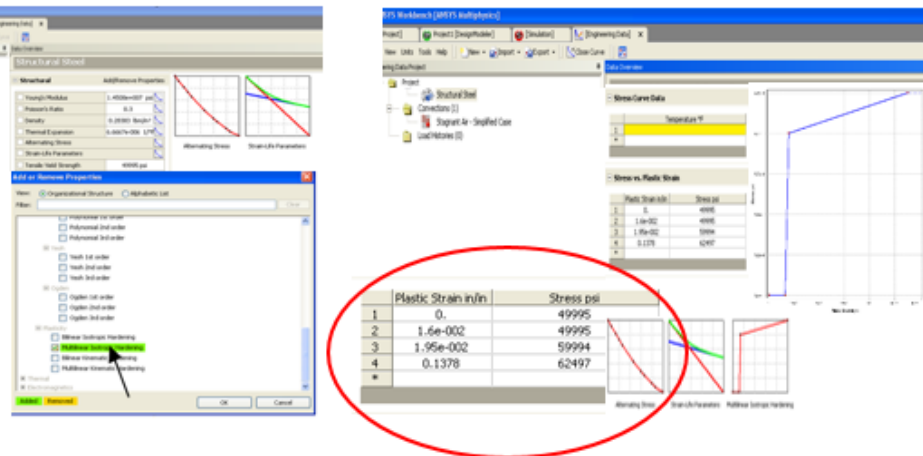


Figura 10. Parámetros - diagrama de multilíneas esfuerzo deformación del acero en ANSYS Workbench. Fuente [8]

Posteriormente se introdujo el historial de carga, finalmente el análisis del modelo como se muestra en la Figura 11.

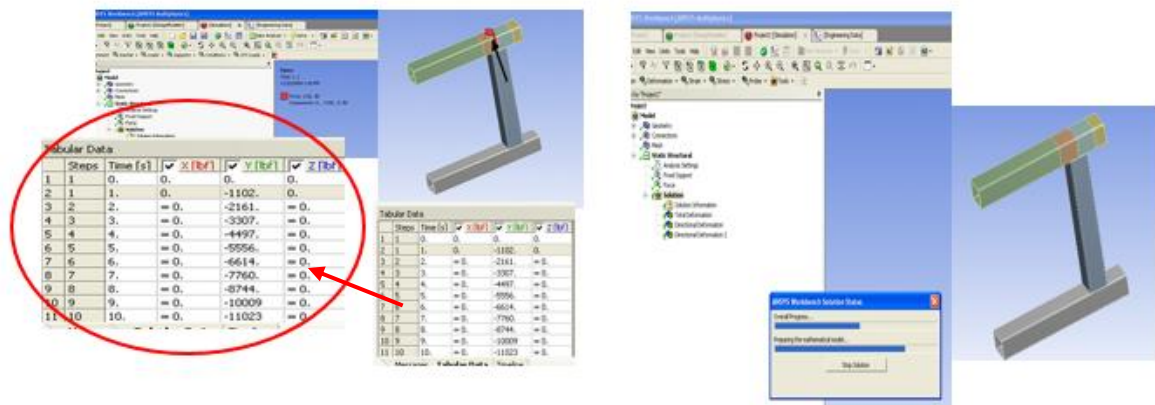


Figura 11. Historial de cargas y análisis del modelo en ANSYS Workbench. Fuente: [8]

4. RESULTADOS

4.1. Procesamiento de datos teóricos y experimentales

Obtenidos los resultados teóricos y experimentales se procedió a registrar los datos, como se muestra en las Tablas 9, 10, 11 para esto se consideraron los siguientes parámetros:

- Las cargas verticales aplicadas a los pórticos ensayados fueron registradas en kgf.
- Los desplazamientos verticales en la dirección de la carga aplicación fueron registrados con ayuda de un extensómetro de reloj en mm
- El ensanchamiento de la sección transversal de la columna del pórtico registrado en mm
- La profundidad del pandeo local de la sección transversal de la columna del pórtico (b2) registrado en mm

Tabla 9. Registro datos teóricos – experimentales pórtico de tubos de 60x60x2,25mm. Ensayo 1. Fuente: [8]

Carga P (kgf) Exp	Desp Exp (mm)	Desp Teó (mm)	Ensn Col (b ₁) Exp (mm)	Ensn Col (b ₁) Teó (mm)	Profun Pand Col (b ₂) Exp (mm)	Profun Pand Col (b ₂) Teó (mm)	Error relativo Despl Teó- Exp	Error relativo Ensn Col Teó- Exp	Error relativo Profun Col Teó- Exp
0,00	0,00	0,00	-	0,00	-	0,00	0,00	-	-
320	0,75	0,53	-	0,04	-	0,03	29,33	-	-
620	1,25	1,03	-	0,08	-	0,04	17,60	-	-
940	1,80	1,56	-	0,11	-	0,05	13,33	-	-
1200	2,30	1,99	-	0,15	-	0,09	13,48	-	-
1520	2,95	2,52	-	0,19	-	0,10	14,58	-	-
1800	3,60	2,99	-	0,22	-	0,12	16,94	-	-
2100	4,00	3,47	-	0,26	-	0,14	13,25	-	-
2400	4,50	4,00	-	0,30	-	0,16	11,11	-	-
2700	5,00	4,47	-	0,32	-	0,18	10,60	-	-
3000	6,00	5,01	-	0,36	-	0,21	16,50	-	-
3280	6,80	5,68	-	0,40	-	0,31	16,47	-	-
3580	8,25	7,00	0,5	0,48	0,50	0,48	15,15	4,00	4,00
3700	9,50	7,70	0,52	0,52	1,00	0,97	18,95	0,00	3,00
4000	11,50	10,27	0,70	0,64	1,50	1,35	10,70	8,57	10,00
4300	14,70	14,29	1,00	0,92	2,00	1,90	2,79	8,00	5,00
4600	20,50	19,55	1,50	1,30	3,00	2,75	4,63	13,33	8,33
							14,09	6,78	6,07

Donde:

Carga P Exp

Carga experimental aplicada en (kgf)

Desp Exp / Desp Teó

Desplazamiento experimental / teórico en (mm)

Ensn Col (b₁) Exp / Ensn Col (b₁) Teó

Ensanchamiento experimental / teórico de la sección transversal de la columna del pórtico en (mm)

Profun Pand Col (b₂) Exp / Profun Pand Col Teó (b₂)

Profundidad del pandeo local experimental / teórico de la sección transversal de la columna del pórtico en (mm)

Error relativo Despl Exp- Teó

Error relativo desplazamiento experimental – teórico

Error relativo Ensn Col Exp- Teó

Error relativo ensanchamiento experimental - teórico de sección transversal de la columna de la unión soldada

Error relativo Profun Col Exp- Teó

Error relativo profundidad del pandeo experimental - teórico de sección transversal de la columna de la unión soldada

Tabla 10. Registro de datos teóricos – experimentes pórtico de tubos de 70x70x2,25mm. Ensayo 2. Fuente: [8]

Carga P (kgf) Exp	Desp Exp (mm)	Desp Teó (mm)	Ensn Col (b ₁) Exp (mm)	Ensn Col (b ₁) Teó (mm)	Profun Pand Col (b ₂) Exp (mm)	Profun Pand Col Teó (b ₂) (mm)	Error relativo Despl Teó - Exp	Error relativo Ensn Col Teó - Exp	Error relativo Profun Col Teó - Exp
0,00	0,00	0,00	-	0,00	-	0,00	0,00	-	-
500	0,60	0,55	-	0,06	-	0,04	8,33	-	-
980	1,20	1,08	-	0,11	-	0,08	10,00	-	-
1500	1,75	1,65	-	0,16	-	0,12	5,71	-	-
2040	2,50	2,23	-	0,22	-	0,17	10,80	-	-
2520	3,10	2,77	-	0,28	-	0,20	10,65	-	-
3000	3,60	3,30	-	0,32	-	0,25	8,33	-	-
3520	4,20	3,87	-	0,38	-	0,28	7,86	-	-
3980	4,80	4,38	-	0,42	-	0,33	8,75	-	-
4540	6,00	5,31	-	0,48	-	0,38	11,50	-	-
5000	8,00	6,76	0,60	0,58	0,50	0,48	15,50	3,33	4,00
5520	12,00	9,90	0,95	0,82	0,80	0,64	17,50	13,68	20,00
5880	18,00	17,00	1,50	1,30	1,20	0,90	5,56	13,33	25,00
							10,04	10,12	16,33

Tabla 11. Registro de datos teóricos – experimentes pórtico de tubos de 90x90x2,50mm. Ensayo 3. Fuente: [8]

Carga P (kgf) Exp	Desp Exp (mm)	Desp Teó (mm)	Ensn Col (b ₁) Exp (mm)	Ensn Col (b ₁) Teó (mm)	Profun Pand Col Exp (b ₂) (mm)	Profun Pand Col Teó (b ₂) (mm)	Error relativo Despl Teó - Exp	Error relativo Ensn Col Exp-Teó	Error relativo Profun Col Exp-Teó
0,00	0,00	0,00	-	0,00	-	0,00	0,00	-	-
1360	1,70	1,49	-	0,26	-	0,13	12,35	-	-
2300	2,70	2,50	-	0,48	-	0,21	7,41	-	-
3000	3,45	3,27	-	0,64	-	0,28	5,22	-	-
3980	4,55	4,35	-	1,02	-	0,37	4,40	-	-
5000	5,75	5,50	-	1,50	-	0,45	4,35	-	-
6000	6,95	6,66	2,20	2,18	0,54	0,52	4,17	0,94	3,70
7020	9,55	8,08	3,50	3,20	0,65	0,60	15,39	8,57	7,69
7570	14,30	13,50	5,20	4,40	0,80	0,70	5,59	15,38	12,50
							7,39	8,29	7,97

Las Figuras 12, 13 y 14, representan el comportamiento teórico – experimental mediante curvas fuerza versus desplazamiento, y carga versus distorsión de la sección transversal de los elementos de la unión soldada. En ellas se aprecia que a medida que la historia de carga se incrementa, el desplazamiento en la dirección al estímulo aplicado aumenta progresivamente. Sin embargo, en la zona plástica los desplazamientos aumentan con mayor proporción, sin que los pórticos presenten resistencia alguna. En relación a la distorsión de la geometría de la sección trasversal de los elementos de la conexión soldada, se aprecia deformación progresiva en la sección trasversal de la columna, generándose la rótula plástica en dicho elemento, mientras que en la viga de unión soldada no se evidencian deformaciones.

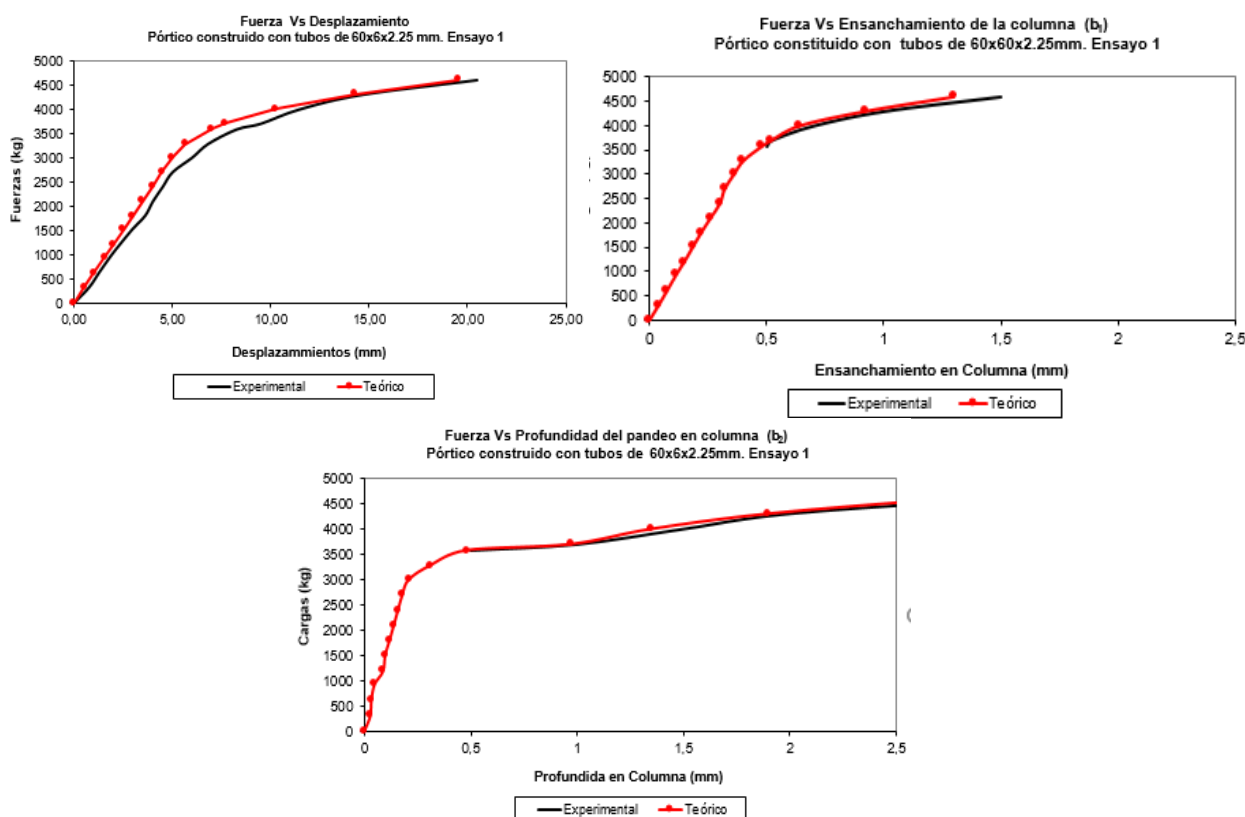


Figura 12. Comparación teórica – experimental del comportamiento de la conexión soldada tubos 60x60x2,25mm. Ensayo 1. Fuente: [8]

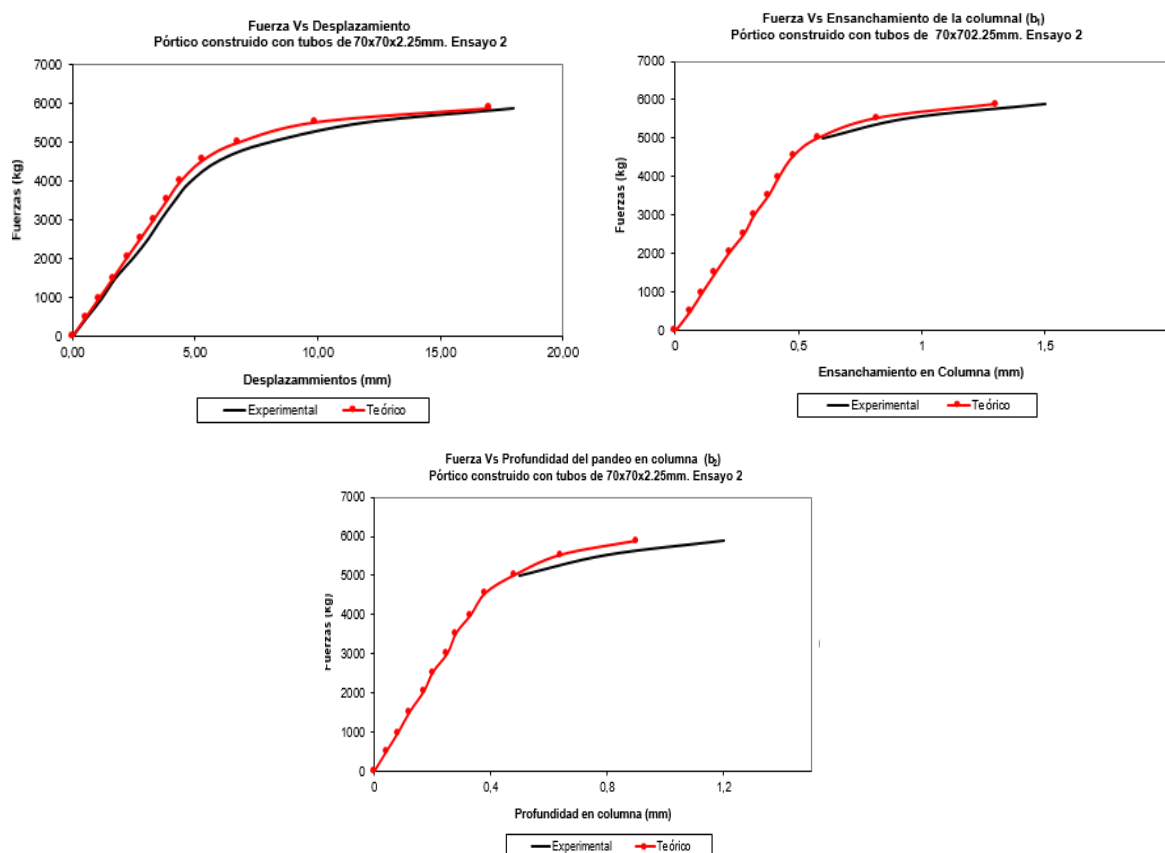


Figura 13. Comparación teórica – experimental del comportamiento de la conexión soldada tubos 70x70x2,25mm. Ensayo 2. Fuente [8]

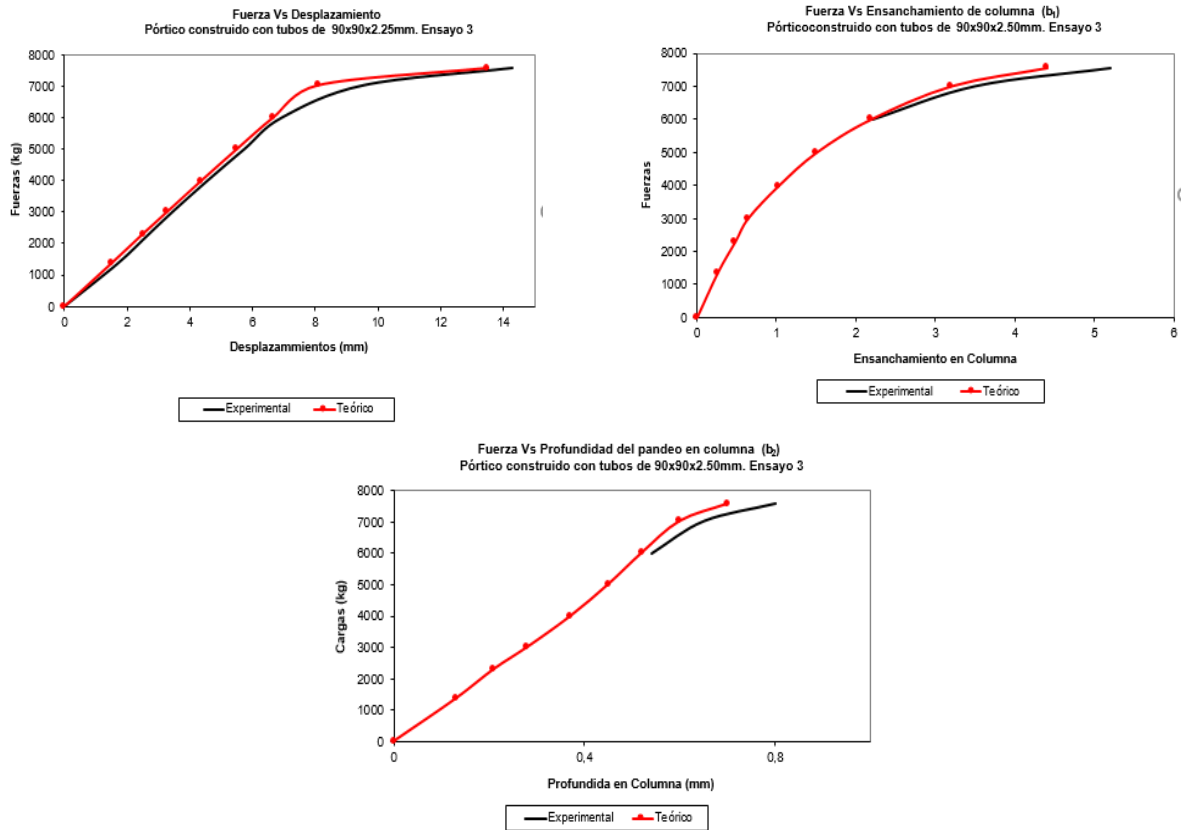


Figura 14. Comparación teórica – experimental del comportamiento de la conexión soldada tubos 90x90x2,50mm. Ensayo 3. Fuente: [8]

4.1.1. Comparación teórica- experimental de la distorsión de la sección transversal de los tubos en la unión viga-columna

En las Figuras 15, 16 y 17, se observa la similitud de los resultados del comportamiento teórico-experimental de la distorsión de sección trasversal de los elementos de la conexión, en ellas se aprecia un tipo de falla local por punzonado en la columna de la unión soldada, fumándose la rótula plástica en el elemento no deseado, por ende, la formación de un posible mecanismo de colapso en el pórtico.

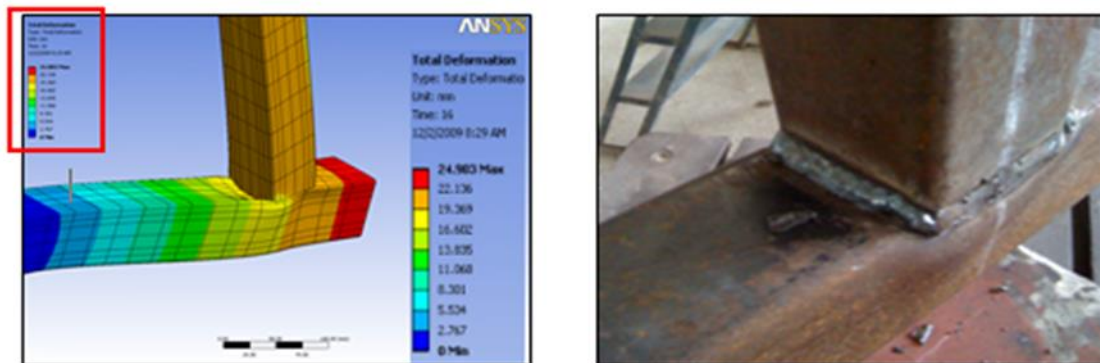


Figura 15. a) Distorsión teórica 20, b) Distorsión experimental ensanchamiento de la sección transversal de la columna del pórtico parámetro llamado (b₁) tubos de 60x60x2.25mm. Ensayo 1. Fuente: [8]

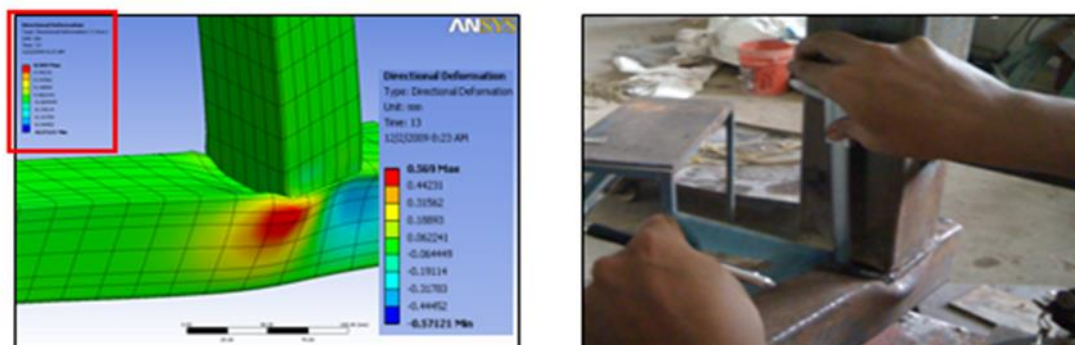


Figura 16. a) Distorsión teórica. 20, b) Distorsión experimental ensanchamiento de la sección transversal de la columna del pórtico parámetro llamado (b_1) tubos de 70x70x2.25mm. Ensayo 2. Fuente: [8]

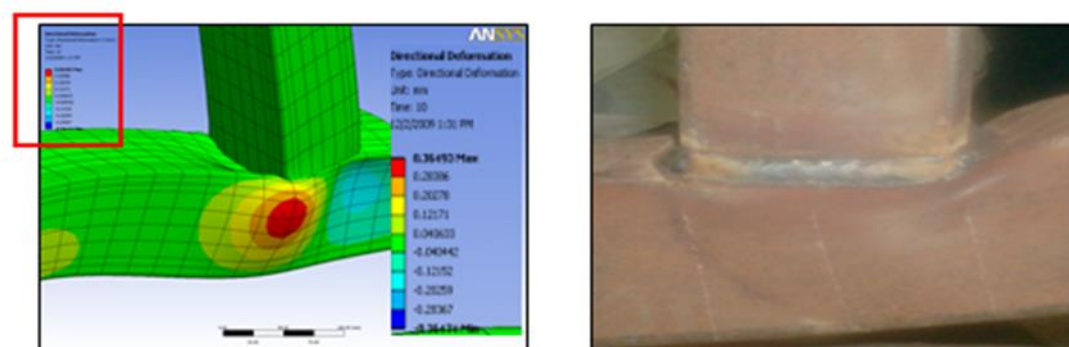


Figura 17. a) Distorsión teórica 20, b) Distorsión experimental ensanchamiento de la sección transversal de la columna del pórtico parámetro llamado (b_1) tubos de 90x90x2.50mm. Ensayo 3. Fuente: [8]

5. CONCLUSIONES

La conexión soldada presenta una falla local por punzonado en la columna que reduce la capacidad de momento plástico teórico del pórtico M_p en un 46%, escenario de preocupación por ser esta capacidad utilizada en el diseño bajo la teoría Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD) [4]. Paralelamente, dicha conexión no cumple con el criterio columna fuerte viga débil establecido por Norma COVENIN 1618:1998 [5]. La columna de la conexión soldada debe ser reforzada para evitar la formación de la rótula plástica y un posible mecanismo de colapso en el pórtico.

Los resultados de las simulaciones teóricas realizadas con el programa ANSYS Workbench presentan un error relativo promedio con respecto a los ensayos experimentales de aproximadamente 9,67%.

7. REFERENCIAS

- [1] FERRUM, «Catálogo Productos siderúrgicos», Maracaibo, Venezuela, 2006
- [2] ANSYS Workbench, Swanson Analysis Systems, Software de simulación ingenieril, 2008
- [3] STAAD. Pro v8i, Bentley software de análisis y diseño estructural, 2017
- [4] S. Wiliam, «Diseño de Estructuras de Acero con LRFD» Editorial Thomson, México, 1999

- [5] Norma COVENIN 1618:1998, “Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites (1era. Revisión)”. Caracas – Venezuela, 1998
- [6] M. Fratelli, «Temas Especiales de Estructuras Metálicas. Estados Límites LRFD» Caracas, Venezuela, Ediciones Unive, 2005
- [7] ASTM, «ASTM - American Society for Testing and Materials», EUA, 2014
- [8] C. Romero, «Comportamiento de Conexiones Soldadas de Tubos Estructurales de Acero de Sección Cuadrada Sometidos a Flexión Monotónica», Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 2010