

COMPARATIVE STUDY OF TENSILE BEHAVIOR IN TRACTION AND FLEXION OF STRUCTURAL STEEL ASTM A500

ESTUDIO COMPARATIVO DE COMPORTAMIENTO TENSIL EN TRACCIÓN Y FLEXIÓN DEL ACERO ESTRUCTURAL ASTM A500

Alex M. Tipán S.¹ Rodrigo A. Cárdenas Y.² Edwin A. Chamba M.³ Diego G. Cuasapud P.⁴

¹Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador
E-mail: atipan.mdm@uisek.edu.ec

²Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi, Latacunga, Ecuador
E-mail: racardenasy@istx.edu.ec

³Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC) EP, Quito, Ecuador
E-mail: echamba.monar1989@gmail.com

⁴TECNOREV, Quito, Ecuador
E-mail: dcuasapud.mdm@uisek.edu.ec

RESUMEN

En el presente trabajo, se busca determinar la magnitud de las diferencias que pueden presentarse en los valores del factor de seguridad, y de los esfuerzos generados en condiciones de tracción y flexión, cuando se varían las propiedades mecánicas como la resistencia a la fluencia, en iguales consideraciones geométricas y de carga para cada caso. Las estimaciones, se consiguen efectuando un análisis comparativo de los esfuerzos generados por cargas de tracción y flexión en un elemento plano y una viga estructural de perfil cuadrado 50x50x3mm, basándose en las diferencias de las propiedades mecánicas del material constructivo, acero A500. Los análisis, se basan en la información de ensayo de laboratorio efectuado para un acero A500 y los normativos de ASTM A500C. Los resultados indican una convergencia en los valores de los estados generales de esfuerzo, conseguidos en forma analítica y con el método del elemento finito, MEF. El campo de estudio es el elástico lineal.

Palabras clave-- ASTMA500, Flexión, Tracción, MEF, Esfuerzos

ABSTRACT

In the present work, we seek to determine the magnitude of the differences that may occur in the values of the safety factor, and of the stresses generated in tensile and flexural conditions, when mechanical properties such as yield strength are varied, in equal geometric and load considerations for each case. The estimates are obtained by carrying out a comparative analysis of the stresses generated by tensile and bending loads in a flat element and a structural beam with a 50x50x3mm square profile, based on the differences in the mechanical properties of the construction material, A500 steel. The study is based on information from a laboratory test performed for an A500 steel and the ASTM A500C standards. The results indicate a convergence in the values of the general stress states, achieved analytically and with the finite element method, FEM. The field of study is linear elastic.

Index terms-- ASTMA500, Bending, Tensile, MEF, Stress

1. INTRODUCCIÓN

Se conoce que el método del elemento finito MEF aporta ventajas significativas en las fases de diseño y prueba de productos (Cook, Malkus, Plesha, & Witt, 2002), (Bathe, 2016), (López G. , 2013), en el presente trabajo se plantea comparar resultados de estados de esfuerzos, determinados analíticamente y con apoyo del método del elemento finito (MEF), en un elementos plano y en una viga estructural de perfil cuadrado 50x50x3mm, a partir de las propiedades mecánicas normalizadas y de resultado de ensayo físico del material constructivo de los mismos, tal que se consiga predecir su comportamiento elástico.

Se han efectuado proyectos de investigación sobre análisis estructurales de la carrocería de buses urbanos, provinciales, escolares y turísticos, con la finalidad de verificar su comportamiento en las ubicaciones críticas detectadas, donde se observa que gran parte de los elementos de la superestructura está compuesta por tubo estructural de perfil cuadrado ASTM A500 (López S. , 2016), (Esmeraldas, 2016), (Hernández, 2016), razón por lo que ha sido tomado como objeto de análisis de este estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el análisis virtual, se sigue el procedimiento general utilizado en los estudios apoyados con el MEF, como son el preprocesamiento, procesamiento, resultados, análisis de resultados, particularizado a los ensayos de tracción y flexión; los análisis básicos cuantitativos, se basan en la teoría clásica general de comportamiento de los materiales.

En el ensayo físico, se utiliza la norma ASTM e INEN, en los ensayos virtuales, se hace uso de la herramienta Simulation SolidWorks® 2014. El modelo para el ensayo de tracción se efectúa a

partir de (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2009), en “probeta plana para ensayo de tracción”.

2.1 Material

Con el objeto de la comparación, se utilizaron las propiedades mecánicas obtenidas en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela Politécnica de Chimborazo (Tabla 1) para el acero A500, mediante ensayo de tracción, tal como se reporta en (Tipán, 2020), se le llamará A500Lab. Para la contrastación de los ensayos, las propiedades mecánicas del material a utilizar, son las proporcionadas por la norma ASTM A500 (Subcommittee A01.09 on Carbon Steel Tubular Products, 2015), de donde se escoge el A500 grado C, por mayor resistencia a la fluencia (S_Y) y resistencia última (S_u), (Tabla 2).

Tabla 1
Ensayo de tracción laboratorio

Norma: ASTM E8/E89-09			
Material: Tubo estructural 50x50x3			
Tipo de material: Acero estructural ASTM A500			
	CMax	CYield	CRot
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Media	407,127	371,176	273,162
Desv. Std.	17,826	29,582	16,219
Coef. V.	0,044	0,056	0,060
+3 Sigma	460,601	433,824	322,035

Fuente: modificado de (Tipán, 2020)

Tabla 2
Propiedades mecánicas de tracción ASTM A500

	Grado	Grado	Grado	Grado
	A	B	C	D
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
S_u	310	400	425	400
S_Y	270	315	345	250
Elongación	25 %	23 %	21 %	23 %

Fuente: modificado de (Subcommittee A01.09 on Carbon Steel Tubular Products, 2015)

Las propiedades generales de los ensayos efectuados con el A500Lab y el ASTM A500C, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3
Propiedades generales de ensayos

Nombre	A500Lab	ASTM A500C
Tipo modelo	Isotrópico elástico lineal	
Criterio de error	Tensión max. von Mises	
Límite elástico MPa	371.176	345
Límite tracción MPa	407.127	425
Módulo elástico MPa	200000	
Coeficiente Poisson	0.3	
Densidad kg/m ³	7861	

Los modelos se efectuaron para los análisis con el MEF y analíticos; en caso de la tracción (Figura 1), según la norma INEN y en la flexión (Figura 2), según el perfil 50x50x3 mm, con longitud de 600 mm, usado en la construcción del piso de la carrocería para autobús, como indican en (Hernández, 2016), (Cháfuel, 2017).

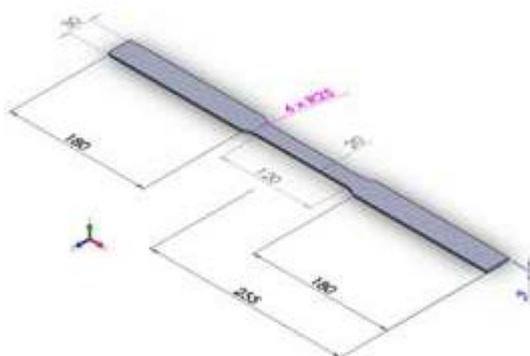


Figura 1: Modelo ensayo a tracción

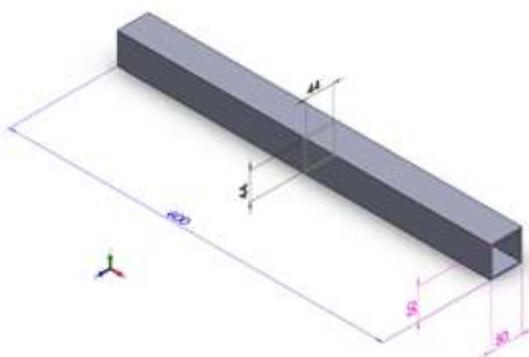


Figura 2: Modelo ensayo a flexión

2.2 Ensayos

Análisis de tracción y flexión.

2.2.1 Ensayo de tracción

Se ejecuta en las mismas condiciones para el A500Lab y A500C.

Propiedades de estudios

Tipo de análisis: Análisis estático

Tipo de malla: Malla sólida

Tipo de solver: FFEPlus

Condiciones de borde

Restricciones de desplazamiento en la frontera y cargas en la superficie, en este caso se tiene restricción de inamovilidad total en una de las caras perpendiculares al eje longitudinal y carga de tracción de 16000 N en la otra.

La carga de tracción a utilizar en los ensayos se estima con la resistencia a la fluencia menor entre el A500Laboratorio y el ASTM A500C, tomándose un valor de 16000 N, lo cual aleja de la fluencia a la probeta en un 22,70 %, ya que la fuerza necesaria para producir un esfuerzo $S_y=345$ MPa, en un área transversal de 20×3 mm², es de 20700 N

Mallado

Tipo de malla: Malla sólida

Mallador utilizado: Malla estándar

Puntos jacobianos: 4 Puntos

Tamaño de elementos: 3.52388 mm

Tolerancia: 0.176194 mm

Calidad de malla: Elementos cuadráticos de alto orden

Número total de nodos: 15509

Número total de elementos: 7392

2.2.2 Ensayo de flexión

Análisis efectuado para los dos materiales A500Lab, ASTM-A500C. Equivalentemente al caso de tracción, se efectúa un ensayo de flexión para cada material, y se incluye un mallado de tipo viga para ambos casos, lo cual permite

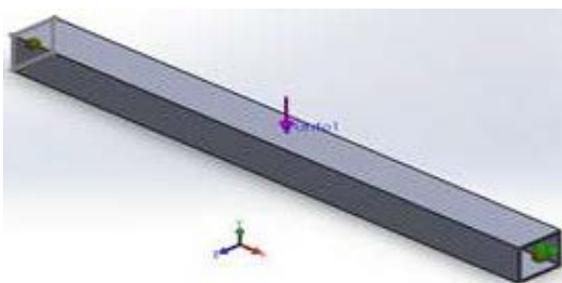
obtener directamente los diagramas de fuerza cortante, momento flector, esfuerzos, flecha.

Propiedades de estudios

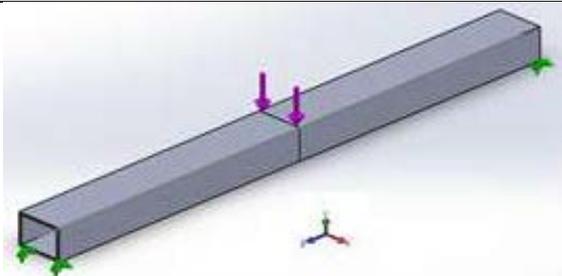
Nombres de estudio: 1) A500Lab, 2) ASTM A500C
 Tipo de análisis: Análisis estático
 Tipo de malla: Malla tipo viga y sólida
 Tipo de solver: FFEPlus

Condiciones de borde

Restricciones en la cara perpendicular al eje longitudinal, arista inferior inamovilidad de traslación, en la otra cara posibilidad de traslación longitudinal, igual en los casos de tratamiento como viga. En el caso del tratamiento como viga, se aplica la carga de 1226N, puntualmente en el centro de la cara superior (Figura 3.2). En el modelo tipo tubo estructural 50x50x3 mm, la carga se aplica perpendicularmente a lo largo de una línea de partición (intersección de la cara con el plano frontal) en la mitad de la misma (Figura 3.1), su módulo es de 1226N, valor tomado de (Tipán, 2020).



3.1



3.2

Figura 3: Cargas y restricciones

Mallado

Viga

Tipo de malla: Malla de viga
 Número total de nodos: 65
 Número total de elementos: 63

Tubo 50x50x3 mm

Tipo de malla: Malla sólida
 Mallador utilizado: Malla estándar
 Puntos jacobianos: 4 Puntos
 Tamaño de elementos: 9.52319 mm
 Tolerancia: 0.47616 mm
 Calidad de malla: Elementos cuadráticos de alto orden
 Número total de nodos: 15492
 Número total de elementos: 7759
 Cociente máximo de aspecto: 11.797

3. RESULTADOS

3.1 Tracción

Valores calculados

El esfuerzo normal en un miembro sometido a carga axial, se determina con (1), donde F : carga axial y A : área de la sección transversal

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad \text{El t}$$

Obteniéndose

$$\sigma_t = \frac{16000N}{20 \times 3mm^2}$$

$$\sigma_t = 266.67MPa$$

La intensidad de esfuerzo de von Mises, se calcula con (2)

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}{2}} \quad \text{El t}$$

En un ensayo de tracción simple monoaxial, una representación del estado de esfuerzos principales, se indica en la Figura 4

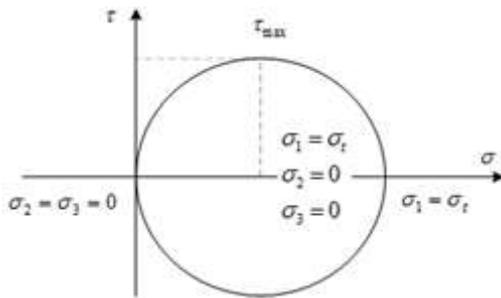


Figura 4: Tracción simple monoaxial

Como $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, y $\sigma_1 = \sigma_t$, sustituyendo en (2) se consigue que:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_t - 0)^2 + (\sigma_t - 0)^2 + (0 - 0)^2}{2}}$$

$$\sigma_{VM} = \sigma_t$$

$$\sigma_{VM} = 266.67 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad $FDS = \psi$, al considerar el límite de fluencia σ_y , como el valor permisible de diseño, se define como (3)

$$\psi = \frac{\sigma_y}{\sigma_{VM}}$$

El t

Para la tracción y los dos materiales utilizados, se tiene:

$$\psi_{A500Lab} = \frac{371.17 \text{ MPa}}{266.67 \text{ MPa}}$$

$$\psi_{A500Lab} = 1.392$$

$$\psi_{A500C} = \frac{345 \text{ MPa}}{266.7 \text{ MPa}}$$

$$\psi_{A500C} = 1.294$$

Valores MEF

Los resultados se reportan para una línea de partición creada en la cara superior del modelo, como intersección de la misma con un plano paralelo al lateral (Y-Z) trazado por el punto medio, (Figura 5).

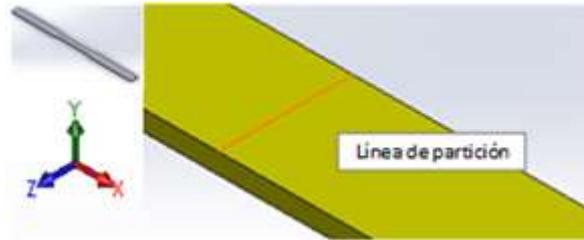


Figura 5: Zona de estudio

La ubicación de los nodos que pertenecen a la línea de partición creada, se muestra en la Figura 6 y detalladamente en la Tabla 4

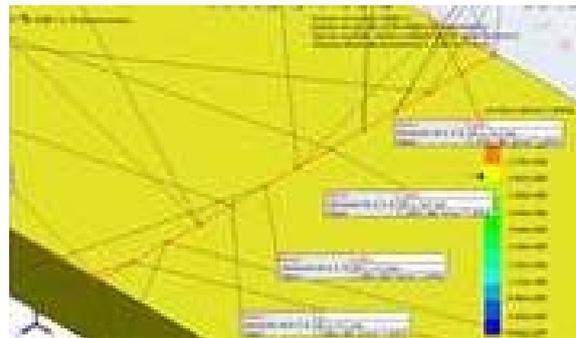


Figura 6: Ubicación de nodos para esfuerzo axial Sx

Tabla 4

Ubicación de nodos en línea de partición - Tracción

Nodo	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
18	65.00	3.00	-25.00
16957	65.00	3.00	-23.33
19	65.00	3.00	-21.67
16953	65.00	3.00	-20.00
20	65.00	3.00	-18.33
16943	65.00	3.00	-16.67
21	65.00	3.00	-15.00
16932	65.00	3.00	-13.33
22	65.00	3.00	-11.67
16921	65.00	3.00	-10.00
23	65.00	3.00	-8.33
16910	65.00	3.00	-6.67
24	65.00	3.00	-5.00

En la tabla 5, se encuentran los valores de los esfuerzos principales y la intensidad del esfuerzo de von Mises, en la línea de partición

Tabla 5

Esfuerzos principales y von Mises

Nodo	P1 *	P2	P3	EVM **
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
18	267.000	0.186	0.008	266.900
16957	267.000	0.661	0.018	267.000
19	267.000	0.277	0.008	266.900

16953	266.900	0.030	-0.026	266.900
20	266.900	0.149	-0.018	266.900
16943	266.800	-0.009	-0.025	266.800
21	266.800	-0.064	-0.006	266.800
16932	266.800	-0.144	-0.014	266.800
22	266.800	0.217	-0.016	266.800
16921	266.800	0.323	-0.004	266.800
23	266.800	0.256	-0.011	266.800
16910	266.800	0.173	-0.005	266.800
24	266.800	0.151	0.004	266.800
Prom	266.862	0.170	-0.007	266.846

* P=Esfuerzo principal

** EVM=Intensidad de esfuerzo de von Mises σ_{VM}

En la Tabla 6, se identifican los esfuerzos normales y cortantes en cada ubicación de nodo

Tabla 6
Esfuerzos normales y cortantes

Nodo	Sx *	Sy	Sz	Txy **	Txz	Tyz
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
18	267.00	0.01	0.01	-0.13	-0.08	0.00
16957	267.00	0.03	0.05	-0.07	-0.09	0.01
19	267.00	0.01	0.03	-0.02	-0.08	0.00
16953	266.90	-0.02	-0.01	-0.01	-0.08	0.00
20	266.90	-0.01	0.00	-0.01	-0.07	0.00
16943	266.80	-0.01	-0.01	0.00	-0.04	0.00
21	266.80	0.00	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01
16932	266.80	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	0.01
22	266.80	0.00	0.01	0.00	-0.03	0.01
16921	266.80	0.00	0.03	0.00	-0.03	-0.01
23	266.80	0.00	0.01	0.00	-0.02	-0.01
16910	266.80	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00
24	266.80	0.02	0.00	0.01	-0.01	0.00
Prom	266.86	0.00	0.01	-0.02	-0.05	0.00

* S=Esfuerzos normales σ

** T=Esfuerzos cortantes τ

Los resultados de esfuerzos son los mismos para los ensayos con A500Lab y A500C, excepto el factor de seguridad, como se indica en la Tabla 7

Tabla 7
Factor de seguridad

Nodo	A500Lab *FDS	A500C FDS
18	1.390	1.292
16957	1.390	1.292
19	1.390	1.292
16953	1.391	1.293
20	1.391	1.293
16943	1.391	1.293
21	1.391	1.293
16932	1.391	1.293

22	1.391	1.293
16921	1.391	1.293
23	1.391	1.293
16910	1.391	1.293
24	1.391	1.293
Prom	1.391	1.293

* FDS=Factor de seguridad ψ

3.2 Flexión

Estimación convencional

El cálculo de momento flector y la deflexión máxima, se efectúan según la Figura 7.

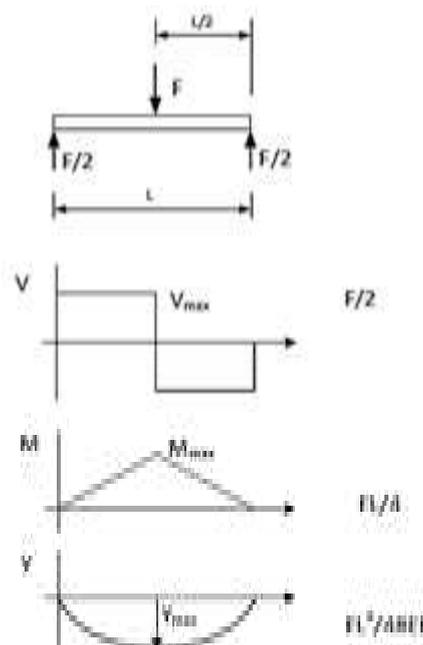


Figura 7: Fuerza cortante, momento flector y deflexión

Donde:

$$M_{max} = FL/4 = 183900 \text{ mmN}$$

$$Y_{max} = FL^3 / (48EI) = 0.1323 \text{ mm}$$

El esfuerzo de flexión, se estima según (4), es normal a la superficie transversal de la viga, cero en la superficie neutra que pasa por el centroide si los esfuerzos permanecen en el rango elástico y se trata de flexión pura, y máximo en la superficie (Figura 8).

$$\sigma_z = -\frac{My}{I} \quad \text{El } t$$

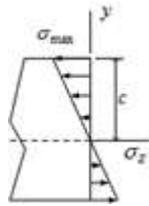


Figura 8: Esfuerzo de flexión

En el estudio, se tiene $M_{max}=183900\text{mmN}$, $c=25\text{mm}$, $I_{xx}=208492\text{mm}^4$, sustituyendo en (4), se obtiene $\sigma_{max}= 22.0512\text{ MPa}$

Resultados MEF

Modelo tipo viga

En las Figuras 9 y 10, se muestran los diagramas de fuerza cortante y momento flector, del ensayo a flexión, con carga central de 1226 N, en el modelo tipo viga, resultando $V_{max}=613\text{N}$ y $M_{max}=183.9\text{mN}$

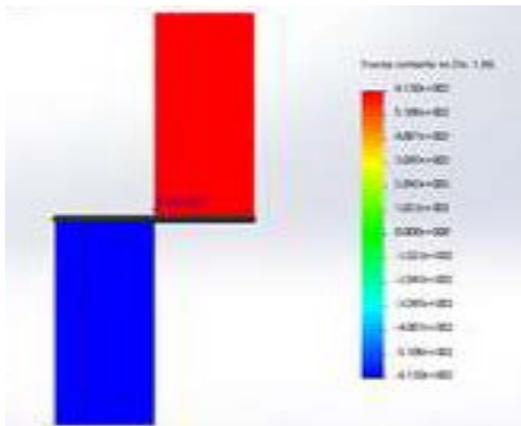


Figura 9: Fuerza cortante

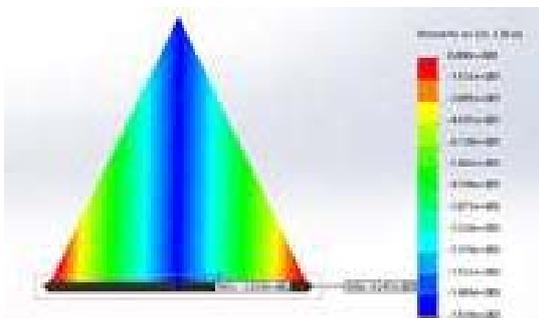


Figura 10: Momento flector

El esfuerzo máximo debido a la flexión y su distribución a lo largo de la viga se indican en la Figura 11, cuyo valor es $S_{max-f}=21.70\text{MPa}$, así como la máxima deflexión (flecha), en la Figura 12, $Y_{max}=0.1419\text{mm}$

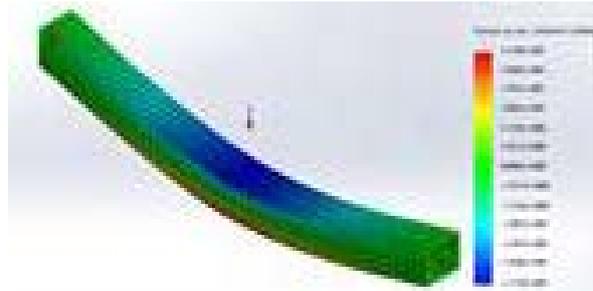


Figura 11: Esfuerzo de flexión en viga

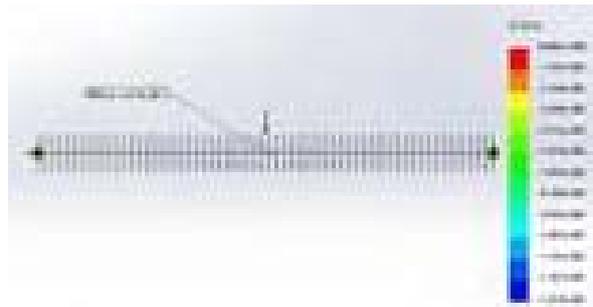


Figura 12: Deflexión máxima

Los valores del factor de seguridad mínimo FDS, se consiguen en el punto de mayor momento flector, $\psi_{A500Lab}=17.1$ y $\psi_{A500C}=15.9$, como se indica en la Figura 13 para el A500Lab y el ASTM A500C

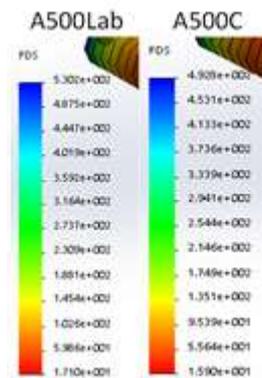


Figura 13: Coeficiente de seguridad A500Lab y A500C

Modelo tipo tubo estructural 50x50x3 mm

Para identificar adecuadamente los resultados, se construye una línea de partición en la mitad de cara inferior del tubo, donde ocurre la flexión máxima, identificando los valores de las variables de estudio en los nodos de esa línea, como se indica en la Figura 14 y la Tabla 8



Figura 14: Ubicación de nodos

Tabla 8
Ubicación de nodos

Nodo	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
33	-25	-25	0
15133	-20.833	-25	0
34	-16.667	-25	0
15128	-12.5	-25	0
35	-8.333	-25	0
15121	-4.167	-25	0
36	0	-25	0
15111	4.167	-25	0
37	8.333	-25	0
15100	12.5	-25	0
38	16.667	-25	0
15090	20.833	-25	0
39	25	-25	0

Los esfuerzos principales e intensidad de esfuerzos de von Mises, se indican en la Tabla 9

Tabla 9
Esfuerzos principales y von Mises

Nodo	P1 [MPa]	P2 [MPa]	P3 [MPa]	EVM [MPa]
33	21.500	-0.047	-3.571	23.510
15133	21.120	0.019	-3.118	22.840
34	20.180	0.440	-4.045	22.320
15128	19.360	-0.120	-3.687	21.490
35	19.020	-0.018	-3.412	20.940
15121	18.890	-0.020	-3.260	20.720
36	18.800	-0.044	-3.056	20.520
15111	18.840	-0.046	-3.292	20.700
37	18.980	-0.048	-3.430	20.930
15100	19.300	-0.178	-3.727	21.470
38	20.170	0.461	-4.047	22.310
15090	21.160	0.060	-3.089	22.840
39	21.480	-0.026	-3.624	23.510
Prom	19.908	0.033	-3.489	21.854

En la Tabla 10, se muestran los esfuerzos normales y cortantes en los planos X-Y, Y-Z, Z-X

Tabla 10
Esfuerzos normales y cortantes

Nodo	Sx [MPa]	Sy [MPa]	Sz [MPa]	Txy [MPa]	Txz [MPa]	Tyz [MPa]
33	-1.82	-1.80	21.50	1.76	0.03	-0.02
15133	-2.95	-0.15	21.12	0.71	0.02	0.02
34	-4.04	0.44	20.18	-0.14	0.02	0.02
15128	-3.69	-0.12	19.36	-0.01	0.00	0.02
35	-3.41	-0.02	19.02	-0.03	-0.01	0.00
15121	-3.26	-0.02	18.89	-0.07	-0.02	0.00
36	-3.06	-0.04	18.80	-0.01	-0.01	0.01
15111	-3.29	-0.05	18.84	0.06	-0.04	0.02
37	-3.43	-0.05	18.98	0.02	-0.04	0.01
15100	-3.73	-0.18	19.30	0.01	-0.02	-0.01
38	-4.04	0.46	20.17	0.13	0.03	-0.02
15090	-2.92	-0.11	21.16	-0.71	0.04	0.00
39	-1.83	-1.82	21.48	-1.80	0.04	0.03
Prom	-3.19	-0.27	19.91	0.00	0.00	0.01

Los resultados del factor de seguridad se listan en la Tabla 11

Tabla 11
Factor de seguridad

Nodo	A500Lab FDS	A500C FDS
33	15.79	14.68
15133	16.25	15.11
34	16.63	15.45
15128	17.27	16.05
35	17.72	16.47
15121	17.91	16.65
36	18.09	16.82
15111	17.93	16.66
37	17.73	16.48
15100	17.29	16.07
38	16.64	15.47
15090	16.25	15.11
39	15.79	14.67
Promedio	17.02	15.82

La deflexión en los nodos de la partición, se indica en la Tabla 12

Tabla 12
Deflexión Y (Uy)

Nodo	Y [mm]
33	-0.1430
15133	-0.1416
34	-0.1405
15128	-0.1396
35	-0.1390
15121	-0.1387
36	-0.1385
15111	-0.1387
37	-0.1390

15100	-0.1396
38	-0.1405
15090	-0.1416
39	-0.1430
Promedio	-0.1403

4. DISCUSIÓN

Las relaciones constitutivas son las expresiones que relacionan el estado de deformaciones con el de esfuerzos (Martínez, 1998), (Goncalves, 2002), en este estudio se consideran independientes del tiempo y se asume que el material es homogéneo, isótropo con comportamiento elástico lineal. Se consiguen seis ecuaciones de deformación, tres normales y tres tangenciales, las mismas son funciones de tres constantes elásticas E, G, u, módulo de elasticidad, módulo de corte, coeficiente de Poisson (Chandrupatla & Belegundu, 2002), respectivamente, (en realidad dos, puesto que $G=E/[2(1+u)]$), las cuales se invierten y producen las ecuaciones de esfuerzos en función de las deformaciones, utilizadas en la descripción del estado general de esfuerzos. Dado que el valor de E y u, es compartido por el A500Lab y el A500C, es de esperarse que para las mismas condiciones de carga y geometría, sean iguales los valores de esfuerzos y deformaciones para los ensayos efectuados, la diferencia entre ambos, atiende a los factores de seguridad calculados con el criterio de von Mises, por lo que a mayor S_y , será mayor FDS, lo cual significa que el material con FDS mayores, admite mayores cargas antes que comience a fluir plásticamente.

Tracción

En la tracción simple monoaxial, los esfuerzos principales son $\sigma_2=\sigma_3=0$ y $\sigma_1=\sigma_t=266.86\text{MPa}$, es decir $\sigma_x=\sigma_1=\sigma_t$, $\sigma_y=\sigma_z=0$, $\tau_{xy}=\tau_{xz}=\tau_{yz}=0$, la representación del estado de esfuerzos principales, en un plano $(\sigma-\tau)$, se indica en la figura 15, por lo que las diferencias tienden a cero entre los resultados analíticos y efectuados con el MEF, como se muestra en las Tablas 13 y 14

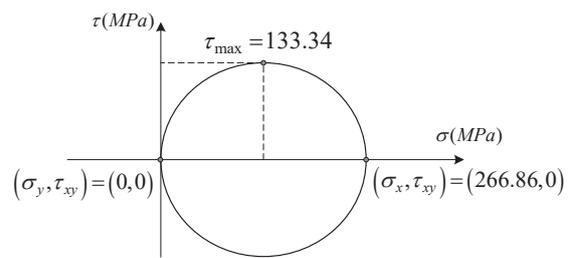


Figura 15: Esfuerzos en tracción

Tabla 13
Resistencia a la Fluencia y EVM

	S_y		EVM	
	A500Lab [MPa]	A500C [MPa]	A500Lab [MPa]	A500C [MPa]
Cálculo	371.176	345	266.667	266.667
MEF	371.176	345	266.846	266.846

Tabla 14
Error entre estimaciones de FDS

	FDS	
	A500Lab	A500C
Cálculo	1.392	1.294
MEF	1.391	1.293
Error %	0.067	0.067

Flexión

En la Figura 16, se muestran los esfuerzos principales en el nodo 36 (mitad de la cara inferior), en la Figura 17, se tienen los esfuerzos del estado general, que coinciden con los principales.

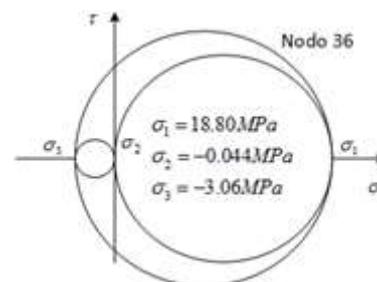


Figura 16: Esfuerzos principales nodo 36

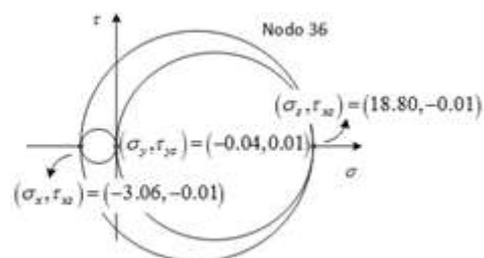


Figura 17: Estado general de esfuerzos nodo 36

A pesar de las diferencias entre los esfuerzos de punto a punto en la línea de partición (Figura 18), conocer el valor promedio de los mismos, como se observa en la Figura 19, permite una visión más general en el momento del diseño.

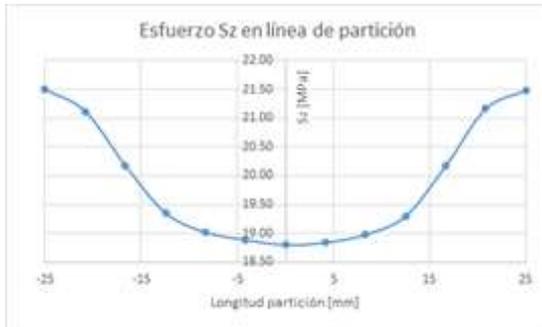


Figura 18: Esfuerzos longitudinales en línea de partición cara inferior de modelo

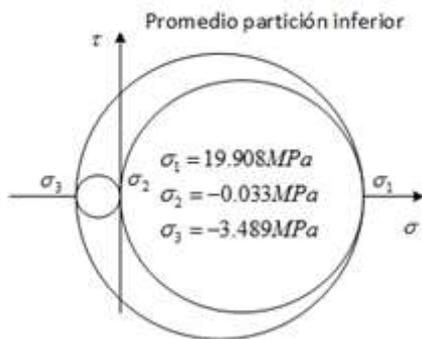


Figura 19: Esfuerzo principales promedio en línea de partición cara inferior de modelo

El error en la estimación del esfuerzo flexionante y la intensidad de esfuerzo de von Mises (Tabla 15), se debe a que en la estimación analítica se considera que en las fibras extremas sólo hay esfuerzos longitudinales por flexión, no existen esfuerzos laterales, ni de corte, (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009), (Budynas, Nisbett, & Keith, 2008), mientras en los resultados por el MEF, se visualizan esfuerzos normales S_x , producto del ensanchamiento lateral que si es considerado cuando se estiman los desplazamientos totales del dominio

Tabla 15
Error entre estimaciones de esfuerzo flexionante y EVM

	Cálculo [MPa]	MEF [MPa]	err %
Sflex	22.05	19.91	9.7052
EVM	22.05	21.9	0.68

A partir de la ecuación generalizada de esfuerzos - deformación, $\sigma = D\epsilon$, en el campo elástico, donde **D** representa la matriz de esfuerzo - deformación (5)

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} \quad \text{El t}$$

Se calcula σ (6) tomando los valores de ϵ producidos por el MEF (Tabla 17), a lo largo de la línea de partición y se comparan los valores del esfuerzo de flexión reportados por el MEF.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{El t}$$

La Tabla 16, muestra las deformaciones a lo largo de la línea de partición

Tabla 16
Deformaciones en línea de partición

Nodo	ϵ_x $\times 10^{-5}$	ϵ_y $\times 10^{-5}$	ϵ_z $\times 10^{-5}$	γ_{yz} $\times 10^{-5}$	γ_{xz} $\times 10^{-5}$	γ_{xy} $\times 10^{-5}$
33	-3.93	-3.83	11.25	0.27	-0.31	2.52
15133	-4.82	-2.71	10.97	0.17	0.01	0.82
34	-5.08	-2.27	10.61	0.05	0.14	-0.23
15128	-4.75	-2.38	10.26	-0.03	0.02	-0.05
35	-4.56	-2.35	10.03	-0.01	0.03	-0.05
15121	-4.46	-2.34	9.93	0.00	0.06	-0.03
36	-4.37	-2.36	9.85	0.02	0.07	-0.03
15111	-4.45	-2.36	9.91	0.04	0.04	0.02
37	-4.51	-2.35	9.99	0.02	0.07	0.00
15100	-4.71	-2.40	10.20	0.08	0.03	0.05
38	-5.05	-2.28	10.51	-0.02	-0.01	0.17
15090	-4.71	-2.79	10.93	0.06	-0.04	-0.86
39	-3.91	-3.83	11.29	-0.01	0.17	-2.47

Los esfuerzos calculados con (5) y (6), se indican en la Tabla 17

Tabla 17
Esfuerzos calculados en partición

Nodo	Sx [MPa]	Sy [MPa]	Sz [MPa]	Tyz [MPa]	Txz [MPa]	Txy [MPa]
33	-1.96	-1.81	21.47	0.21	-0.24	1.94
15133	-3.41	-0.17	20.93	0.13	0.01	0.63
34	-4.07	0.26	20.06	0.04	0.11	-0.18
15128	-3.65	0.00	19.50	-0.02	0.01	-0.04
35	-3.45	-0.05	18.95	-0.01	0.03	-0.04
15121	-3.25	0.01	18.89	0.00	0.04	-0.02
36	-3.12	-0.03	18.75	0.02	0.05	-0.02
15111	-3.27	-0.05	18.82	0.03	0.03	0.02
37	-3.33	0.00	18.98	0.02	0.05	0.00
15100	-3.68	-0.13	19.26	0.06	0.02	0.04
38	-4.11	0.15	19.81	-0.01	-0.01	0.13
15090	-3.32	-0.37	20.69	0.04	-0.03	-0.66
39	-1.91	-1.78	21.49	-0.01	0.13	-1.90
Prom	-3.27	-0.31	19.82	0.04	0.02	-0.01

Los esfuerzos en los planos, generados con el MEF, se encuentran en la Tabla 10. A partir de los resultados descritos, se determina el error de los promedios de esfuerzos en la partición, obteniéndose reportados con el MEF contra los calculados con la ecuación generalizada, como se indica en la Tabla 18

Tabla 18
Diferencia relativa de esfuerzos en línea de partición

Prom	Cálculado [MPa]	MEF [MPa]	err %
Sx	-3.272	-3.189	2.52
Sy	-0.306	-0.267	12.85
Sz	19.816	19.908	0.46
Tyz	0.038	-0.005	112.18
Txz	0.017	0.004	76.73
Txy	-0.008	0.006	171.49

A pesar de los valores de error entre los esfuerzos cortantes, relativamente altos, la magnitud de los mismos frente a los axiales no es significativa.

5. CONCLUSIONES

El cálculo exacto de los esfuerzos a que está sometido un sólido, es factible en contados casos, razón que la distribución de esfuerzos en un sólido sea una aproximación, debido al

conjunto de hipótesis simplificativas utilizadas con el fin de lograr una formulación matemática relativamente simple.

Los valores de las propiedades mecánicas de un material, no son valores exactos, presentan siempre una desviación, que tiene diversas fuentes de origen, como la homogeneidad, las impurezas, la isotropía.

Las diferencias de los esfuerzos generados en los casos de análisis de tracción y flexión, entre los dos materiales considerados, A500Lab y ASTM A500C no son significativas, dada la igualdad en módulo elástico, coeficiente de Poisson y los modelos utilizados en las simulaciones.

En iguales condiciones de geometría y de borde, es menor el factor de seguridad para el material que tiene una resistencia a la fluencia mayor.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bathe, K. (2016). *Finite Element Procedures* (2nd edition: fourth printing ed.). Watertown, USA: Prentice Hall, Pearson Education, Inc.

Beer, F., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek, D. (2009). *Mecánica de Materiales* (Quinta ed.). México D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

Budynas, R. G., Nisbett, & Keith, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (8va. ed.). (M. Á. Ríos Sánchez, Trad.) México, D. F.: McGraw-Hill/Interamericana. doi:ISBN: 978-970-10-6404-7

Cháfuel, V. (2017). *Análisis estructural por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial basado en simulación virtual de impacto frontal y posterior para verificar materiales y geometrías de construcción*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga: ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13434>

- Chandrupatla, T., & Belegundu, A. (2002). *Introduction to finite elements in engineering* (Third ed.). New Jersey, USA: Prentice Hall. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/3135>
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (Fourth ed.). University of Wisconsin-Madison, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Esmeraldas, C. (2016). *Análisis estructural basado en simulación por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial sometida a prueba de impacto lateral para determinar la geometría y materiales aplicables que garanticen la seguridad de los pasajeros*. ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga: ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11776>
- Goncalves, R. (2002). *Introducción al análisis de esfuerzos* (Segunda ed.). (R. Goncalves, Ed.) Caracas, Venezuela: USB.
- Hernández, J. (2016). *Análisis estructural basado en simulación por el método de elementos finitos de una carrocería de bus interprovincial sometida a prueba de volteo para determinar la geometría y materiales aplicables que garanticen la seguridad de los pasajeros*. ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas. Latacunga: ESPE. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11774>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). *Ensayo de tracción para materiales metálicos a temperatura ambiente*. First ed. Quito, Ecuador: INEN. Obtenido de <http://www.inen.gov.ec>
- López, G. (2013). *Estudio comparativo de los métodos de elementos finitos y fotoelástico en la determinación de esfuerzos para mejorar el diseño mecánico de piezas*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato: UTA. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24621/>
- López, S. (2016). *Determinación de configuraciones estructurales de un frente de autobús interprovincial y su incidencia en la resistencia al impacto frontal mediante el método de elementos finitos*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato: UTA. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24621/>
- Martínez, A. (1998). *Criterios fundamentales para resolver problemas de resistencia de materiales* (Primera ed., Vol. I). Valle de Sartenejas, Venezuela: Equinoccio USB.
- Subcommittee A01.09 on Carbon Steel Tubular Products. (2015). *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes*. West Conshohocken: ASTM International. Obtenido de www.astm.org
- Tipán, A. (2020). *Estudio comparativo de ensayos físicos vs métodos de elementos finitos del comportamiento tenso-deformacional de aceros estructurales en tubos cuadrados de 50x50x3, en el sector carrocerero*. UISEK. Quito: Universidad Internacional SEK. Obtenido de <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/3714>