

San Pedro, 18 de mayo del 2020

Señores
Universidad Latina de Costa Rica

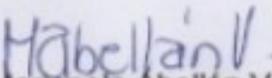
Estimados señores:

El estudiante Gerardo Esteban Herrera Martínez, cédula 206130273, me ha presentado para efectos de corrección de estilo, en mi calidad de profesional graduado en filología española, el proyecto de graduación denominado **"Análisis comparativo experimental y analítico de conexiones apernadas en cortante doble usando pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5."**

He revisado, de acuerdo con los lineamientos de la corrección de estilo señalados por la Universidad, los aspectos de estructura gramatical, la puntuación, acentuación, ortografía y los vicios de dicción que se trasladan al escrito, y he verificado que se han realizado todas las correcciones indicadas en el documento.

Por lo tanto, considero que se encuentra listo para presentarlo ante la Universidad.

Atentamente,


M.Sc. Mariánela Abellán Vargas

Cédula: 106810769

Filóloga

Carné del Colegio de Licenciados y Profesores, 10702



AUTORIZACIÓN DEFENSA ORAL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

(TPG E806)

Yo, González Arroyo Wilson Alberto

Docente con grado de: Licenciatura Maestría Doctorado

Otro: Especificar _____

y en calidad del Tutor (a) de la / del: Defensa de Tesis Proyecto

Titulada(o):

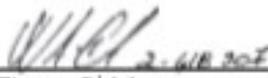
Análisis comparativo experimental y analítico de conexiones apernadas en cortante doble usando pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5

Del / La estudiante: Gerardo Esteban Herrera Martínez

De la carrera: Ingeniería Civil

Doy fe por este medio que el estudiante cumplió con todos los requisitos y acatamientos exigidos por la Universidad Latina de Costa Rica; y así mismo autorizo que continúe con el procedimiento que corresponda para su Defensa Oral.

Atentamente,



Firma y Cédula

25/11/2020

Fecha

**CARTA DE APROBACION POR PARTE DEL PROFESOR
LECTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN MODALIDAD
PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Heredia, 11 de mayo del 2020

Sres. Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación
SD

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado: "Análisis comparativo experimental y analítico de conexiones apernadas en cortante doble usando pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5", elaborado por parte de la estudiante: **Gerardo Esteban Herrera Martínez**, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por la Licenciatura en Ingeniería Civil.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su defensa oral ante el Consejo Asesor.

Suscribe cordialmente,


Ing. Gerardo Chacón Rojas

“Carta autorización del autor (es) para uso didáctico del Trabajo Final de Graduación”

Vigente a partir del 31 de Mayo de 2016, revisada el 24 de Abril de 2020

Instrucción: Complete el formulario en PDF, imprima, firme, escanee y adjunte en la página correspondiente del Trabajo Final de Graduación.

Yo (Nosotros):

Escriba Apellidos, Nombre del Autor(a). Para más de un autor separe con " ; "

Gerardo Esteban Herrera Martínez

De la Carrera / Programa:

autor(es) del trabajo final de graduación titulado:

Licenciatura en Ingeniería Civil

Análisis comparativo experimental y analítico de conexiones apernadas en cortante doble usando pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5

Autorizo (autorizamos) a la Universidad Latina de Costa Rica, para que exponga mi trabajo como medio didáctico en el Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI o Biblioteca), y con fines académicos permita a los usuarios su consulta y acceso mediante catálogos electrónicos, repositorios académicos nacionales o internacionales, página Web institucional, así como medios electrónicos en general, Internet, intranet, DVD, u otro formato conocido o por conocer; así como integrados en programas de cooperación bibliotecaria académicos, que permitan mostrar al mundo la producción académica de la Universidad a través de la visibilidad de su contenido.

De acuerdo a lo dispuesto en la Ley No. 6683 sobre derechos de autor y derechos conexos de Costa Rica, permita copiar, reproducir o transferir información del documento, conforme su uso educativo y debiendo citar en todo momento la fuente de información; únicamente podrá ser consultado, esto permitirá ampliar los conocimientos a las personas que hagan uso, siempre y cuando resguarden la completa información que allí se muestra, debiendo citar los datos bibliográficos de la obra en caso de usar información textual o paráfrasis de la misma.

La presente autorización se extiende el día (Día, fecha) lunes 11 del mes Mayo de año 2020 a las 5:00 PM. Asimismo doy fe de la veracidad de los datos incluidos en el documento y eximo a la Universidad de cualquier responsabilidad por su autoría o cualquier situación de perjuicio que se pudiera presentar.

Firma(s) de los autores

Según orden de mención al inicio de ésta carta:





**UNIVERSIDAD LATINA
DE COSTA RICA**

**Facultad de Ingenierías y Tecnologías de la
Información**

Escuela de Ingeniería Civil

Trabajo final de graduación para optar por el grado
académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Análisis comparativo experimental y analítico de
conexiones apernadas en cortante doble usando
pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5

Proponente: Esteban Herrera Martínez

Heredia, Costa Rica

Fecha

11/05/2020

RESUMEN

En la elaboración de este proyecto de investigación se busca comprobar si los tornillos de la norma SAE J429 satisfacen los criterios de diseño para las conexiones a doble cortante. Normalmente, las normas de diseño para las estructuras metálicas en Costa Rica se basan en la literatura del AISC, las cuales fueron desarrolladas por medio de varios ensayos e investigaciones para llegar a ser normas; como es el caso de los tornillos estructurales ASTM A325 que siguen normas de diseño. Se considera una importante relación entre pernos grado 5 y A325 en cuanto a su resistencia, por lo que en Costa Rica los tornillos J429 grado 5 bajo la norma SAE podrían ser una opción para ser utilizados en la construcción de estructuras metálicas; específicamente en conexiones sometidas a doble cortante y aplastamiento, y reducir así los costos, o bien demostrar que utilizarlos como un perno estructural, no es adecuado.

El enfoque de esta investigación se centra en realizar ensayos con los materiales que se utilizan para la construcción de una conexión a doble cortante, a través de las normas ASTM para la realización de probetas y los correspondientes ensayos a tensión. Posteriormente, se compararán los resultados obtenidos en la literatura y en los ensayos. Además, se pretende revisar si los resultados son satisfactorios según los parámetros que brindan los fabricantes en cuanto a su resistencia; todo esto con el fin de diseñar una conexión con las propiedades mecánicas adecuadas de resistencia de los aceros, para luego realizar un análisis virtual a través del software ANSYS, el cual utiliza el método de análisis numérico de elementos finitos para el análisis elástico, inelástico y ruptura de medios continuos con modelos estáticos y dinámicos. Este consiste en un análisis de elementos prismáticos por medio de otros más simples que generan un mallado virtual en las geometrías y en donde se

aplican métodos matemáticos como matrices de rigidez. Por lo tanto, este análisis mostrará las posibles zonas de falla teóricas y virtuales que se podrán comparar con los resultados de un ensayo de falla de una conexión a doble cortante real.

ABSTRACT

The preparation of this research project seeks to verify if the bolts SAE J429 standard satisfy the design criteria for double shear connections. Typically, design standards for metal structures in Costa Rica are based on the AISC specification, which is developed through various trials and investigations to become standards; as is the case of the ASTM A325 structural screws that meet the design standards. An important relationship is considered between grades 5 and A325 in terms of resistance, so in Costa Rica the J429 grade 5 bolts under the SAE standard could be an option to be used in the construction of metal structures; specifically in double shear and crush connections, thus reducing costs, or demonstrating that using them as a structural bolt is not suitable.

His research is focused on conducting tests with the materials used for the construction of a double shear connection, through the ASTM standards for the realization of probes and the corresponding tension tests. Subsequently, the results obtained in the literature and in the trials will be compared. In addition, it is intended to verify whether the results are satisfactory according to the parameters that the manufacturers provide regarding their resistance; all this in order to design a connection with the appropriate mechanical properties of steel strength, and then perform a virtual analysis through the ANSYS software, which uses the method of numerical finite element analysis for elastic, inelastic and Rupture

of continuous media with static and dynamic models. This consists of an analysis of prismatic elements by means of simpler ones that have a virtual mesh in the geometries and where mathematical methods such as stiffness matrices are used. Therefore, this analysis will be able to evaluate the possible theoretical and virtual failure zones that can compare the results of a failure test of a real double shear connection.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	II
ABSTRACT.....	III
Tabla de Contenidos	V
Índice de ilustraciones	XII
Índice de tablas.....	XVII
Índice de gráficos	XIX
Índice de ecuaciones.....	XXI
Capítulo I.....	1
1.) Introducción.....	1
1.1.) Antecedentes.....	2
1.2.) Planteamiento del problema de investigación	4
1.3.) Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1.) Objetivos generales	4
1.3.2.) Objetivos específicos.....	4
1.4.) Justificación	5
1.5.) Alcance	6
1.6.) Limitaciones	7
1.7.) Impacto	8
1.8.) Hipótesis	8
Capítulo II	9
2.) Marco teórico conceptual.....	9

2.1.)	Conceptos de esfuerzos	9
2.1.1.)	Fuerza axial	10
2.1.2.)	Esfuerzo axial	10
2.1.3.)	Esfuerzo a cortante	11
2.2.)	Deformación unitaria	12
2.3.)	Esfuerzo de fluencia	13
2.3.1.)	Criterios de falla Von Mises	14
2.4.)	Propiedades físico-mecánicas de los materiales	16
2.4.1.)	Propiedades obtenidas por ensayos a tensión	16
2.4.2.)	Propiedades del acero estructural laminado A36	17
2.4.2.1.)	Grado del acero estructural	17
2.4.2.2.)	ASTM A 36	18
2.5.)	Términos para la interpretación de las capacidades de los materiales en ensayos a tracción y sus propiedades mecánicas	19
2.5.1.)	Prueba de carga	19
2.5.2.)	Resistencia del material	19
2.5.3.)	Resistencia a la tracción	19
2.5.4.)	Ductilidad	19
2.5.4.1.)	Porcentaje de elongación	19
2.5.4.2.)	Porcentaje de reducción de área	20
2.6.)	Propiedades perno A325	20
2.7.)	Propiedades del tornillo SAE J 429-grado 5	22
2.7.1.)	Grado del acero	22
2.7.2.)	Temple	23
2.7.3.)	Revenido	23
2.8.)	Conexiones a doble cortante	25
2.8.1.)	Cortante	26

2.8.2.)	Planos de corte X y N.....	26
2.8.3.)	Separación y distancia a bordes de tornillos.....	27
2.8.4.)	Separación mínima.....	28
2.8.5.)	Distancias mínimas al borde.....	28
2.8.5.1.)	Separación máxima y distancia al borde.....	29
2.9.)	Resistencia al cortante.....	30
2.9.1.)	Capacidad nominal para pernos sometidos a cortante.....	30
2.10.)	Resistencia al aplastamiento.....	31
2.10.1.)	Supuestos para el diseño por aplastamiento.....	31
2.11.)	Teoría del método finito, ANSYS.....	33
2.11.1.)	Análisis lineales, bilineal y no lineales.....	35
2.11.2.)	Análisis estático por ANSYS.....	35
2.11.3.)	Análisis dinámico por ANSYS.....	36
2.12.)	Normas para materiales metálicos para sus ensayos y probetas.....	36
2.12.1.)	ASTM F606.....	37
2.12.2.)	ASTM E8M.....	38
2.13.)	Ensayo a cortante.....	39
2.14.)	Distribución T de Student.....	39
2.14.1.)	Pasos para la distribución T alternativa.....	42
Capítulo III.....		43
3.)	Marco metodológico.....	43
3.1.)	Enfoque y método de investigación.....	43
3.2.)	Enfoque cuantitativo.....	43
3.3.)	Población y muestra.....	44
3.4.)	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	49
3.5.)	Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos.....	50

3.6.)	Método de investigación por medio de ensayos	50
3.7.)	Ensayo a tracción de los pernos.....	50
3.7.1.)	ASTM E8M.....	51
3.7.2.)	Equipo ASTM E1012.....	52
3.7.3.)	Equipo.....	53
3.7.4.)	Diseño de probetas	58
3.7.5.)	Dimensiones de probeta circulares.....	58
3.7.6.)	Dimensiones de los especímenes maquinados	61
3.7.7.)	Equipo por utilizar para la medición de las probetas	62
3.7.8.)	Dimensiones de probetas rectangulares.....	64
3.8.)	Pasos para los ensayos a los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325.....	65
3.8.1.)	Datos de esfuerzos.....	66
3.8.1.1.)	Datos experimentales de esfuerzos de los pernos SAE J429 grado 5 y los ASTM A325	66
3.8.1.2.)	Gráficos esfuerzo versus deformación para los pernos SAE J429 y ASTM A325.	67
3.9.)	Pasos para los ensayos de acero estructural A36.....	68
3.9.1.)	Datos de esfuerzos para el acero A36.....	68
3.9.2.)	Gráficos esfuerzo versus deformación para el acero A36.....	69
3.10.)	Revisión de los datos obtenidos por medio de Distribución T de Student	69
3.11.)	Comparación de datos experimentales con la literatura	72
3.12.)	Conexión a doble cortante y diseño de sus dimensiones	72
3.13.)	Diseño de conexión doble cortante.....	73
3.13.1.)	Capacidad del perno	73
3.13.2.)	Cálculo de la magnitud de la fuerza para la falla de los pernos	74
3.13.3.)	Diseño de las placas de la conexión	75
3.14.)	Modelado en ANSYS	82

3.15.)	Fabricación de conexión real	89
3.16.)	Ensayo a cortante real	92
3.17.)	Análisis virtual dinámico de la conexión a doble cortante por el método elemento finito en ANSYS	97
3.18.)	Comparación de ensayos a cortante.....	100
3.19.)	Presupuesto de trabajo	102
Capítulo IV		104
4.)	Análisis de resultados	104
4.1.1.)	Análisis estadístico de resultados	104
4.1.1.1.)	Análisis estadístico mediante distribución T para establecer los esfuerzos por usar en los análisis numéricos por elemento finito	104
4.1.1.2.)	Análisis estadístico mediante distribución T con valores de esfuerzos experimentales y teóricos	106
4.2.)	Comparación de curvas de esfuerzo y deformación	108
4.2.1.)	Curva de esfuerzo deformación para el perno SAE J429 grado 5.....	109
4.2.2.)	Curva de esfuerzo de deformación para el perno ASTM A325	111
4.2.3.)	Curva de esfuerzo deformación para el acero A36	114
4.2.4.)	Curvas de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325	116
4.3.)	Comparación de valores de esfuerzo de fluencia y ruptura, teórico contra experimental	118
4.3.1.)	Valores teóricos y experimentales para el perno SAE J429 grado 5.....	118
4.3.2.)	Valores teóricos y experimentales para el perno ASTM A325	119
4.3.3.)	Valores teóricos y experimentales para el acero A36	120
4.4.)	Valores experimentales de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325	121
4.5.)	Análisis comparativo de resultados de los esfuerzos a doble cortante, teóricos, experimentales y simulaciones numéricas por elemento finito.....	124

4.5.1.)	Análisis comparativo de los esfuerzos a cortante experimentales de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325.....	124
4.5.2.)	Análisis comparativo de esfuerzos a doble cortante utilizando valores de esfuerzo últimos, teóricos, experimentales por ensayos a tracción y experimentales por ensayo a doble cortante	127
4.5.2.1.)	Esfuerzo cortante para el perno SAE J429 grado 5.....	128
4.5.2.2.)	Esfuerzo cortante para el perno ASTM A325.....	129
4.5.3.)	Comparación de los esfuerzos cortantes teóricos y experimentales entre los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325	130
4.5.4.)	Comparación entre los esfuerzos cortantes por ensayo a doble cortante, datos experimentales a tracción y modelado numérico de elemento finito mediante un análisis estático en ANSYS de los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325	133
4.5.4.1.)	Modelado numérico estático por elemento finito de conexión a doble cortante con perno SAE J429 grado 5 aplicando 36,2 Ton.....	134
4.5.4.2.)	Modelado numérico estático por elemento finito de conexión a doble cortante con perno ASTM A325 aplicando 35,6 Ton.....	138
4.5.4.3.)	Modelado MEF estático de conexión a doble cortante con los pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5 aplicando 35 Ton.....	142
4.5.5.)	Análisis comparativo de las deformaciones de la conexión a doble cortante entre la prueba virtual por un análisis estático y el ensayo a doble cortante.....	145
4.5.6.)	Análisis comparativo entre el modelado numérico por elemento finito mediante análisis estáticos y dinámicos y el ensayo a doble cortante de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325	150
4.5.7.)	Análisis comparativo por el MEF mediante un análisis dinámico de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325 al aplicar un mismo desplazamiento nodal a la conexión.....	158
4.6.)	Análisis comparativos final de las diferentes metodologías realizadas a los pernos SAE J429 grado 5 y al ASTM A325.....	161

Capítulo V.....165

5.) Conclusiones..... 165

 5.1.) Recomendaciones 166

Capítulo VI.....167

6.) Bibliografía..... 167

Índice de ilustraciones

Ilustración 1.. Concepto de esfuerzo.....	10
Ilustración 2.. Esfuerzo normal.....	11
Ilustración 3. Esfuerzo cortante	12
Ilustración 4. Ejemplo de gráfico de esfuerzos y deformación.....	13
Ilustración 5. Condición de falla en tracción	14
Ilustración 6. Esfuerzo cortante	15
Ilustración 7. Demostración de los rangos plástico, fluencia y ruptura	17
Ilustración 8. Curva de esfuerzo-deformación A36.....	18
Ilustración 9. Identificación de perno estructural A325.....	21
Ilustración 10, Curva de esfuerzo - deformación teórica de perno A325.....	21
Ilustración 11. Identificación del perno SAE J429 grado 5	22
Ilustración 12. Diagrama de esfuerzo deformación de tornillos bajo la norma SAE J429...24	24
Ilustración 13. Gráfico de esfuerzo de tornillos SAE	24
Ilustración 14. Conexión a doble cortante	25
Ilustración 15. Tabla J3.2 AISC.....	27
Ilustración 16. Definición de las distancias de las perforaciones	27
Ilustración 17. Discretización y malla	34
Ilustración 18. Sección de tornillo donde se puede obtener el material para la probeta.....	37
Ilustración 19. Dimensiones para probeta circular en pernos	38
Ilustración 20. Ficha técnica Perno grado 5.....	46
Ilustración 21. Ficha técnica Perno A325	47
Ilustración 22. Identificación de pernos grado 5 y A325.....	48

Ilustración 23. Pernos grado 5 y A325 para la fabricación de probetas	49
Ilustración 24. Especímenes.....	52
Ilustración 25. Diagrama prueba a tracción	53
Ilustración 26. Alcance y acreditación por ECA al INA	54
Ilustración 27. Pruebas acreditadas de interés para la investigación	55
Ilustración 28. Máquina Universal de Ensayos de 250 Newton para ensayos de pernos	56
Ilustración 29. Máquina Universal de Ensayos de 1 Mega Newton para ensayos de Acero A36.....	57
Ilustración 30. Probetas.....	59
Ilustración 31. 3 probetas SAE J429 grado 5 y 3 probetas ASTM A325	60
Ilustración 32. Elementos para sujetar especímenes.....	61
Ilustración 33. Calibrador Vernier común para utilizar en la medición	62
Ilustración 34. Método offset.....	65
Ilustración 35. Gráficos Esfuerzos versus Deformación para los pernos SAE J429 Grado 5 y ASTM A325	67
Ilustración 36. Gráficos de esfuerzo versus deformación A36.....	69
Ilustración 37. Gráfica y tabla T de Student de dos colas.....	70
Ilustración 38. Conexión típica doble cortante	73
Ilustración 39. Dimensiones para conexión real.....	81
Ilustración 40. Conexión virtual realizada en SpaceClaim.....	83
Ilustración 41. Creación de nuevos materiales con datos experimentales a ANSYS Engineering Data, Uniaxial Tension Test Data	86

Ilustración 42. Creación de nuevos materiales con datos experimentales a ANSYS Engineering Data, Multilinear Isotropic Hardening	87
Ilustración 43. Demostración del mallado de los sólidos ANSYS, Static Structural, Mechanical.....	88
Ilustración 44. Comparación de calidad del mallada	89
Ilustración 45. Proceso de Soldadura S.M.A.W	90
Ilustración 46. Proceso de fabricación conexión a doble cortante.....	91
Ilustración 47. Conexión a doble cortante A36 final	92
Ilustración 48. Ensayo a cortante personalizado.....	94
Ilustración 49. Conexión para ensayo a cortante personalizado	95
Ilustración 50. Módulo Tangencia	97
Ilustración 51. Introducción de los módulos tangenciales de los materiales en ANSYS	99
Ilustración 52. Ejemplo de introducción de desplazamiento y deformación máxima para la ruptura ASTM A325	100
Ilustración 53. Cronograma de trabajo.....	101
Ilustración 54. Curva de esfuerzo-deformación teórica para el perno grado 5 (Psi-in).....	109
Ilustración 55. Curvas de esfuerzo-deformación datos experimental perno SAE grado 5 .	109
Ilustración 56. Fotografía de probetas de pernos SAE J429 grado 5, falladas por ensayo a tensión ASTM E8M.....	110
Ilustración 57. Curva de esfuerzo teórica para el perno A325, Ksi	111
Ilustración 58. Curva de esfuerzo-deformación datos experimentales perno A325	112
Ilustración 59. Fotografía de probetas de pernos ASTM A325 falladas por ensayo a tensión ASTM E8M	113

Ilustración 60. Curva de esfuerzo-deformación. Datos teóricos, Ksi	114
Ilustración 61. Curva de esfuerzo-deformación datos experimentales para el material A36, Mpa-mm/mm	114
Ilustración 62. Fotografía de probeta de acero A36 fallada por ensayo a tensión ASTM E8M.....	115
Ilustración 63. Gráficos de curvas de esfuerzo-deformación de los pernos grado 5 y A325	116
Ilustración 64. Curva de esfuerzo-deformación de las probetas 3 para el perno grado 5 y la probeta 6 para el perno A325.....	117
Ilustración 65. Esfuerzos principales por conexión a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando pernos grado 5	134
Ilustración 66. Esfuerzo a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando pernos grado 5.....	135
Ilustración 67. Esfuerzos principales por conexión a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando perno A325	139
Ilustración 68. Esfuerzo a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando perno A325.....	140
Ilustración 69. Esfuerzos principales al aplicar una fuerza de 35 Ton.	143
Ilustración 70. Esfuerzos cortantes máximos al aplicar una fuerza de 35 Ton a los pernos SAE grado 5 y A325	143
Ilustración 71. Deformación en perno SAE grado 5 al aplicar fuerza de 35 Ton.....	144
Ilustración 72. Deformación de perno A325 al aplicar fuerza de 35 Ton.....	144

Ilustración 73. Deformación placa central mediante el programa ANSYS y de ensayo a doble cortante.....	146
Ilustración 74. Deformación plástica en placas externa de la conexión	147
Ilustración 75. Pernos SAE J429 grado5 falla por doble cortante virtual y por ensayo a doble cortante.....	147
Ilustración 76. Fotografía de la cara del plano de ruptura por cortante del perno SAE J429 grado 5	148
Ilustración 77. Perno ASTM A325. Falla por doble cortante virtual y por ensayo a doble cortante.....	149
Ilustración 78. Fotografía de la cara del plano de ruptura por cortante del perno ASTM A325.....	150
Ilustración 79. Ruptura por doble cortante virtual y real del perno ASTM A325	151
Ilustración 80. Esfuerzo último por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno A325.....	152
Ilustración 81. Esfuerzo cortante por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno A325.....	153
Ilustración 82. Ruptura por doble cortante virtual y real del perno SAE grado 5	154
Ilustración 83. Esfuerzo último por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno SAE grado 5.....	155
Ilustración 84. Esfuerzo cortante por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno SAE grado 5.....	156
Ilustración 85. Esfuerzos principales, equivalentes por von-Mises, de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar un mismo desplazamiento de 5 mm	158

Ilustración 86. Esfuerzos cortantes máximos de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar un desplazamiento nodal de 5mm.....	159
Ilustración 87. Deformaciones de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar un desplazamiento nodal de 5mm a la conexión	159

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla según de esfuerzo de fluencia y ruptura para el acero A 36	18
Tabla 2. Propiedades de perno ASTM A325	21
Tabla 3. Propiedades para tornillos SAE J429.....	23
Tabla 4. Dimensiones mínimas.....	29
Tabla 5. Distribución T o T Student para el método alternativo utilizando dos colas.....	41
Tabla 6. Dimensiones de los pernos con que se realizaron los especímenes.....	48
Tabla 7. Dimensiones de probeta.....	58
Tabla 8. Dimensiones de los especímenes	63
Tabla 9. Dimensiones para especímenes rectangulares mayores a 19 milímetros de espesor	64
Tabla 10. Dimensiones de los especímenes por ensayar	64
Tabla 11. Esfuerzos SAE J429 grado 5	66
Tabla 12. Esfuerzos A325.....	67
Tabla 13. Esfuerzos A36.....	68
Tabla 14. Propiedades mecánicas de pernos de los ensayos por ensayos a tracción	74
Tabla 15. Propiedades mecánicas teóricas y experimentales del acero A36	76
Tabla 16. Memoria de cálculo de los posibles espesores para las placas A36	78

Tabla 17. Propuesta de dimensiones para la conexión a doble cortante.....	80
Tabla 18. Valores experimentales para desarrollar la gráfica de esfuerzo y deformación de los materiales SAE J429 grado 5, ASTM A325 y A36	85
Tabla 19. Desplazamiento, fuerza y esfuerzo a cortante de los ensayos a doble cortante....	96
Tabla 20. Módulo tangencial para SAE J429 grado5, ASTM A325, Acero A36 en Mpa ...	98
Tabla 21. Costos del proyecto.....	103
Tabla 22. Valores puntos críticos y puntos T para las muestras de los pernos SAE J429 grado 5	105
Tabla 23. Valores puntos críticos y puntos T para las muestras de los pernos ASTM A325	106
Tabla 24. Distribución T esfuerzos experimentales y teóricos del perno SAE J429 Grado 5	107
Tabla 25. Distribución T para esfuerzos experimentales y teóricos del perno A325	107
Tabla 26. Tabulación de esfuerzos obtenidos por ensayos a tracción a pernos SAE J429 grado 5	118
Tabla 27. Tabulación de esfuerzos obtenidos por ensayos a tracción a pernos ASTM A325	119
Tabla 28. Tabulación de esfuerzos obtenidos por ensayos a tracción al acero estructural A36.....	120
Tabla 29. Comparación de los valores de los esfuerzos de los pernos SAE grado 5 y los A325 por ensayos a tracción.....	121
Tabla 30. Tabulación de los desplazamientos y esfuerzo cortante en los pernos por los ensayos a cortante doble realizados con pernos SAE grado 5 y el A325	125

Índice de gráficos

Gráfico 1. Gráfico de esfuerzo de fluencia entre pernos SAE G5 y A325, por ensayos a tracción.....	122
Gráfico 2. Gráfico de esfuerzos últimos entre los pernos SAE G5 y A325.....	123
Gráfico 3. Gráfico de desplazamientos y esfuerzo a cortante de los ensayos a cortante doble en pernos SAE grado 5 y el A325.....	126
Gráfico 4. Gráfico comparativo de esfuerzos a doble cortantes teóricos y experimentales para el perno SAE grado 5.....	128
Gráfico 5. Gráfico comparativo de esfuerzos a doble cortantes teóricos y experimentales para el perno ASTM A325.....	129
Gráfico 6. Gráfico comparativo de los esfuerzos a doble cortante de los pernos SAE grado 5 y el ASTM A325.....	130
Gráfico 7. Gráfico resistencia esperada versus fuerza de ruptura en ensayos a doble cortante de los pernos SAE grado5 y A325.....	131
Gráfico 8. Gráfico de resistencia de diseño a doble cortante por LRFD.....	132
Gráfico 9. Esfuerzos principales por MEF de una conexión a doble cortante realizada en ANSYS vs los esfuerzos últimos por ensayo a tracción de perno SAE grado 5.....	136
Gráfico 10. Esfuerzos cortantes por ensayo a doble cortante, por FEM mediante ANSYS y por datos experimentales a tracción para el perno SAE grado 5.....	137
Gráfico 11. Esfuerzos principales por MEF de una conexión a doble cortante realizada en ANSYS vs los esfuerzos últimos por ensayo a tracción de perno ASTM A325.....	141

Gráfico 12. Esfuerzos cortantes por ensayo a doble cortante, por FEM mediante ANSYS y por datos experimentales a tracción para el perno ASTM A325	141
Gráfico 13. Esfuerzos principales y cortantes por MEF mediante un análisis estático de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar una fuerza de 35 Ton.....	145
Gráfico 14. Comparativa de análisis MEF estático y dinámico con el perno SAE grado 5	157
Gráfico 15. Comparativa de análisis MEF estático y dinámico con el perno ASTM A325	157
Gráfico 16. Esfuerzos principales por MEF mediante un análisis dinámico de los pernos SAE grado 5 y ASTM A325 al aplicar un desplazamiento nodal de 5 mm a la conexión.	160
Gráfico 17. Gráfico final comparativos de los datos de esfuerzos últimos obtenidos para el SAE J429 grado y perno ASTM A325	161
Gráfico 18. Gráfico final comparativos de los datos de esfuerzos a doble cortante obtenidos para el SAE J429 grado y perno ASTM A325	163
Gráfico 19. Deformaciones totales de los pernos SAE grado 5 y A325 por todos los métodos empleados.....	164

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Esfuerzo	11
Ecuación 2. Esfuerzo por doble cortante	12
Ecuación 3. Deformación.....	12
Ecuación 4. Criterio de falla von Mises.....	14
Ecuación 5. Criterio de Falla	15
Ecuación 6. Criterio de falla a cortante Von Mises	15
Ecuación 7. Criterio de falla a cortante Von Mises	16
Ecuación 8. Porcentaje de elongación	20
Ecuación 9. Porcentaje de reducción de área.....	20
Ecuación 10. Capacidad nominal a cortante de pernos.....	30
Ecuación 11. Capacidad a aplastamiento de la placa 1.....	32
Ecuación 12. Capacidad a aplastamiento de la placa 2.....	32
Ecuación 13. Capacidad a aplastamiento de la placa 3.....	32
Ecuación 14. Puntos T	42

Capítulo I

1.) Introducción

El acero, como material constructivo, brinda una gran variedad de posibilidades en los diseños y la fabricación de elementos estructurales en taller, para posteriormente ser ensamblados en un determinado proyecto. Estos elementos pueden ser soldados o apernados en sus conexiones, las cuales son las encargadas de transmitir las cargas de un elemento estructural a otro; por lo que son de gran relevancia en todas las estructuras. Existen varios tipos de conexiones apernadas: las de cortante simple y las de cortante doble; ambas muy utilizadas para rigidizar las estructuras por medio de riostras metálicas. La investigación tiene como fin el estudio de las conexiones a doble cortante, donde los pernos que están transversalmente con respecto a la dirección de la fuerza, son sometidos a fuerzas cortantes y de aplastamiento por las placas de la conexión debido a las fuerzas de tensión. En estas conexiones, normalmente los elementos conectores usados son los pernos estructurales A325, por lo que la investigación tiene como objetivo analizar y comparar el comportamiento entre los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325, por medio de ensayos a tracción de tres especímenes de cada tipo de perno y el ensayo del material base para la conexión que está compuesta por tres partes de placas de acero A36, a las cuales se les consideró el espesor, de manera que sufrieran la mínima deformación plástica alrededor de la perforación que atraviesa el perno; y con ello el mínimo aplastamiento de la placa de conexión con el fin de garantizar la falla exclusiva del perno y observar y recolectar solamente datos de deformación tanto del perno SAE J429 grado 5 como del ASTM A325. Posteriormente, con las propiedades de capacidad de fluencia y ruptura presentes, tanto en la literatura como en las

muestras de laboratorio por los ensayos de todos los materiales de la conexión, se pretende crear un modelo virtual de la conexión analizada por el método de elementos finitos con el software ANSYS, para su posterior comparación; y de esta forma garantizar la idoneidad de los resultados por medio de ambos análisis.

1.1.) Antecedentes

El perno SAE J429, conocido comercialmente como grado 5, no ha sido estudiado para realizar funciones estructurales en conexiones de estructuras metálicas, dado que es de uso automotriz; aunque teóricamente, tiene las mismas propiedades mecánicas de esfuerzos de fluencia y esfuerzo último al compararlo con el ASTM A325. Existen varios estudios acerca de esta conexión tales como “Comparación simulada de conexiones apernadas de acero mediante pernos SAE y ASTM”, realizada en el 2018 en la Universidad Latina de Costa Rica, donde Mármol concluye que el perno SAE J429 grado 5 se deforma más que el perno tipo ASTM A325, el cual es más usado en la construcción. También existen otros acerca del perno SAE J429 grado 5, como el realizado por Swanson (2002) denominado “Efectos de la pretensión variable en el comportamiento de la conexión atornillada” donde se estudian las conexiones en T con el perno SAE J429 y se comparan con el perno A325. En este se concluye que no hay mucha diferencia entre las resistencias de ambos, pero sí en su rigidez. También Gutiérrez y Méndez en el 2017 realizan un análisis de la composición molecular del acero de tornillos SAE J 429 grado 5 y grado 8, utilizados en los puentes de Transmilenio Colombia; y concluyen que la mejor opción para su uso es el de grado 5 debido a que cuenta con mayor ductilidad y menos fragilidad con respecto al otro. Por otra parte, la investigación realizada por Marianela Fallas (2019), consiste en pruebas de resistencia a tracción a probetas a los pernos y con estos datos experimentales obtenidos lleva a cabo un

análisis numérico por elemento finito a conexiones a doble cortante para los pernos SAE J429 grado 5 y otra con los datos teóricos del A325. Esta concluye que el perno J429 grado 5, al analizar cada uno de los elementos, presenta valores mayores en todos los parámetros, desde deformación, hasta esfuerzos, y determinó que el perno J429 es menos rígido que el A325 y que uno de los parámetros que influye en los espesores de las placas de la conexión, es la deformación y plastificación que sufre la placa interna alrededor de la perforación; según los análisis virtuales. Por último el artículo *Structural Bolting* en el 2009 de las guías de Fastenal Industrial & Construction Supplies indica que no se deben utilizar los pernos grado 5 en conexión de estructuras de edificaciones, aunque tenga las mismas propiedades mecánicas, ya que la geometría del perno estructural A325 tiene diferencias respecto al grado 5 en su cabeza hexagonal y longitud de rosca, lo cual influye en su capacidad de distribuir los esfuerzos. Esto, también refuerza el comentario de Larry Muir, director técnico de asistencia del AISC en el artículo de *Steelwise* llamado *The nuts and bolts of nuts and bolts*, donde menciona en el punto 6.2.5 que no es aceptable remplazar pernos A325 por grado 5, aunque tengan los mismos valores. Además, menciona que los pernos estructurales tienen mayor garantía de calidad y son más estrictos en sus revisiones. Sin embargo, Portland Bolt & Manufacturing Company indica en el artículo *ASTM A325 Alternatives*, que una opción para remplazar un perno A325 podría ser el SAE grado 5 ya que tienen similitudes en sus características físicas y químicas. Por todo lo mencionado, se justifica la realización de la presente investigación que tiene como objetivo un análisis más completo de la conexión, al comparar los resultados virtuales y teóricos obtenidos hasta la fecha, con los resultados experimentales en laboratorio, para ambos pernos.

1.2.) Planteamiento del problema de investigación

En la construcción y diseño de un proyecto con acero como material principal, es muy importante conocer bien sus propiedades físico-mecánicas con el fin de hacer mejores diseños y mantener su seguridad. El perno A325 es uno de los recomendados en las especificaciones para construcciones de acero por el AISC, para funcionar como un elemento conector a tracción o cortante; por otro lado el perno SAE grado 5 no es recomendado por las metodologías de diseño para este tipo de aplicaciones; por lo que surge la idea de investigar si estos pernos presentan similitudes en su resistencia estructural, en conexiones a doble cortante y si es aceptable sustituir un perno ASTM A325 por uno de uso automotriz de la norma SAE J429 grado 5, ya que posee similitudes en los valores de esfuerzo de fluencia como esfuerzo último, según sus respectivas normas; y además, son construidos con aceros y tratamientos térmicos parecidos, lo que lo vuelve una gran opción de sustitución.

1.3.) Objetivos de la investigación

1.3.1.) Objetivos generales

Comparar analítica y experimentalmente el perno SAE J429 grado 5 y el ASTM A325 en sus capacidades estructurales para funcionar como un elemento conector en una conexión a doble cortante.

1.3.2.) Objetivos específicos

- Ejecutar pruebas a tracción a muestras, mediante la norma ASTM E8M, a los pernos en estudio.
- Demostrar la veracidad de los datos experimentales obtenidos por un análisis

- estadístico y comparativo con la teoría.
- Calcular las dimensiones de una conexión mediante la metodología del AISC 360-16, utilizando datos experimentales de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325, para el estado de falla por ruptura.
 - Realizar pruebas a doble cortante a los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325.
 - Demostrar la capacidad de los análisis numéricos por elemento finito mediante el programa ANSYS, en su proceso de calibración, al comparar los datos de pruebas virtuales con los datos experimentales de ensayos a tracción y a doble cortante.
 - Modelar una conexión a doble cortante igual a la del ensayo mediante un análisis numérico por elemento finito con un sistema de análisis estático y dinámico, para comparar las capacidades estructurales de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325.
 - Comparar los resultados obtenidos por las diferentes metodologías desarrolladas, para demostrar si existen similitudes entre los pernos SAE J429 grado 5 y el A325.

1.4.) Justificación

Esta investigación se justifica dado que los pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5, comparten los mismos valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último, según sus respectivas normas. Además, el perno SAE grado 5 se ha convertido en una opción en las construcciones como elemento conector, al ser usado como opción de sustitución del perno A325. El artículo *Alternatives* de Portland Bolt & Manufacturing Company indica que una opción para remplazar un perno A325 podría ser el SAE grado 5 ya que tiene similitudes en sus características físicas y químicas.

Otro punto justificante es que existe una diferencia significativa en los costos de

adquisición; pues el del perno SAE J429 grado 5 es inferior. Este valor de costo es considerable cuando una estructura demanda la compra de muchos de ellos, como es el caso de las estructuras metálicas, pues algunas llevan bastantes elementos conectados por medio de pernos; por lo que uno de menor valor, como el SAE grado 5, podría ser una buena opción para optimizar costos.

1.5.) Alcance

La presente investigación busca, de manera descriptiva, brindar datos que demuestren si existe similitud de resistencia estructural entre los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325, en el uso de conexiones a doble cortante, mediante análisis y comparaciones de sus propiedades mecánicas, a través de datos teóricos y experimentales. En el caso de los datos experimentales, se utilizarán cuatro especímenes para cada tipo de perno y solo una para el acero estructural A36 debido a su costo, lo cual limita el número de muestras y datos para efectuar las comparaciones de manera veraz y precisa. Estos datos serán analizados estadísticamente mediante el supuesto de que la población tiene un comportamiento normal. Lo mismo ocurre con el ensayo a cortante, pues se realizará solo uno para cada tipo de perno. Otra limitación para la obtención de datos es que este tipo de ensayo a cortante no tiene una metodología o norma establecida por seguir, por lo cual se toma la decisión de realizar un ensayo personalizado a doble cortante bajo criterios ingenieriles, de tal manera que los datos recopilados de desplazamiento solo fueran del perno y las fuerzas que lo provocaba. Los datos experimentales por ensayos a tracción y por ensayo a doble cortante se van comparar con datos de modelos numéricos por elemento finito, para la calibración del programa ANSYS y una vez calibrado este, realizar comparaciones entre los pernos, la complejidad de las geometrías de la conexión virtual aumenta la demandan mayor capacidad computacional.

Sin embargo, para minimizar esta limitante se tratará de utilizar modelos más simples, tanto para el análisis estático como el dinámico, donde se modificarán las geometrías más complejas o innecesarias por unas más simples, como es el caso de la cabeza y tuerca para cada respectivo perno, al detallarse con geometría cilíndrica y eliminarse el paso de las roscas para detallarlo como una superficie lisa. También se eliminará una placa central de la conexión y sus depósitos de soldadura. Para el modelo de análisis estático se establecerá un comportamiento lineal en el rango elástico y uno no lineal para el inelástico; y para el modelo de análisis dinámico se establecerá un comportamiento simplificado bilineal para los datos no lineales ya que el método analítico explícito dinámico de ANSYS no acepta comportamientos multilineales en los materiales. El análisis dinámico es necesario para alcanzar la ruptura y comparar la prueba virtual con la del ensayo a doble cortante. La importancia de los modelos de análisis numéricos por elemento finito, bien calibrados, está en obtener más datos que demostrar si existe similitud entre los pernos.

1.6.) Limitaciones

Dentro de las limitaciones se presenta la poca información que existe de la aplicación constructiva del tornillo SAE J429 grado 5.

La trazabilidad del origen de los pernos se limita al lugar donde se compraron, dado que en la ficha técnica del perno grado 5 no dice SAE J429.

El número de muestras de los materiales es una de las grandes limitantes debido al valor de los materiales y al costo de los procesos de mecanización en la fabricación de las probetas, lo cual suma considerables montos de dinero para el investigador.

No se conoce la variación estándar poblacional de los esfuerzos teóricos para demostrar con certeza que los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio están dentro

de los rangos de aceptación.

El análisis numérico por elemento finito de la conexión en el programa ANSYS presenta limitantes ya que no se puede representar de una forma idónea los hilos de la rosca del perno, pues para lograrlo con esta geometría tan irregular, se deben realizar un mallado muy fino en un segmento considerable del área del vástago perno. Al analizar geometrías irregulares con mallados muy finos, la demanda de capacidad computacional se incrementa considerablemente lo que se vuelve una gran limitante para obtener resultados más coherentes o similares a los reales.

1.7.) Impacto

La investigación tendrá un impacto muy importante en el costo en la construcción de estructuras metálicas donde existan elementos conectados ya que la diferencia de precios entre los pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5 es significativo; pues el primero es casi dos veces más costoso que el segundo. Además, es más común encontrar el SAE J429 grado 5 en el mercado nacional de tornillos lo que podría brindar una gran opción, tanto por costo como por facilidad de acceso; siempre y cuando el perno demuestre tener las propiedades necesarias para los diseños estructurales; de lo contrario, no será una opción válida para un proyectista al poner en riesgo la integridad de las estructuras y por lo tanto, las vidas y el dinero de los inversionistas.

1.8.) Hipótesis

Se estima que los pernos SAE J429 grado 5 pueden llegar a ser una opción para sustituir un perno de tipo estructural ASTM A325.

Capítulo II

2.) Marco teórico conceptual

En este capítulo se presentan todos los fundamentos teóricos necesarios para realizar la investigación comparativa entre pernos sometidos a doble cortante. Algunos de los fundamentos necesarios para comprender la investigación son los conceptos de fuerza, propiedades mecánicas de los elementos de la conexión en estudio, diseño de la conexión a doble cortante, modelado virtual por elemento finito en el software ANSYS, comportamientos de los materiales expresados en los gráficos de esfuerzo-deformación, normas para realizar ensayos a materiales y análisis estadístico por distribución T.

2.1.) Conceptos de esfuerzos

Uno de los más importantes conceptos en la ingeniería es conocer la capacidad de los materiales para resistir la aplicación de las fuerzas internas. Popov (2000) señala que:

Uno de los problemas principales de la mecánica de sólidos es la investigación de la resistencia interna de un cuerpo; es decir, la naturaleza de las fuerzas que se generan dentro de un cuerpo para equilibrar el efecto de las fuerzas aplicadas externamente (p. 3).

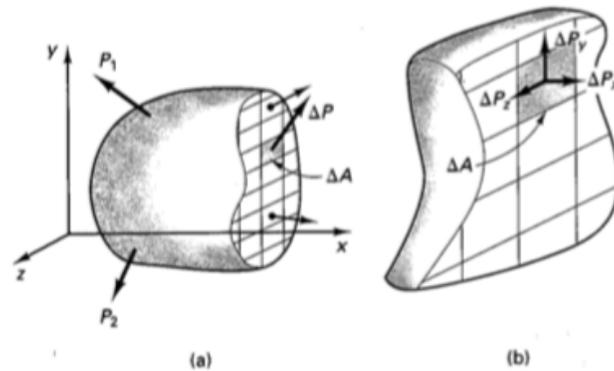


Fig. 1-2 Cuerpo seccionado: (a) cuerpo libre con algunas fuerzas internas, (b) vista ampliada con componentes de ΔP .

Ilustración 1.. Concepto de esfuerzo

Fuente: Mecánica de materiales, 2000, p. 4

En la ilustración 1 se muestra el análisis de un cuerpo mediante elementos más simples; los cuales, al aplicarles una fuerza externa en un área dada, desarrollan sus esfuerzos principales con magnitud y dirección.

2.1.1.) Fuerza axial

Fuerza que actúa a lo largo del eje longitudinal de un miembro estructural, aplicada al centroide de su sección transversal produciendo un esfuerzo uniforme.

2.1.2.) Esfuerzo axial

Es perpendicular al plano sobre el que se aplica la fuerza de tracción o compresión, distribuida de manera uniforme por toda su superficie. También se llama esfuerzo normal.

Popov (2000) indica que:

Esos esfuerzos se desarrollan sobre secciones perpendiculares al eje de la barra. Para tales secciones, el área de la sección transversal de una barra es un mínimo y la componente de la fuerza aplicada es un máximo, lo que resulta en un esfuerzo normal máximo (p.12)

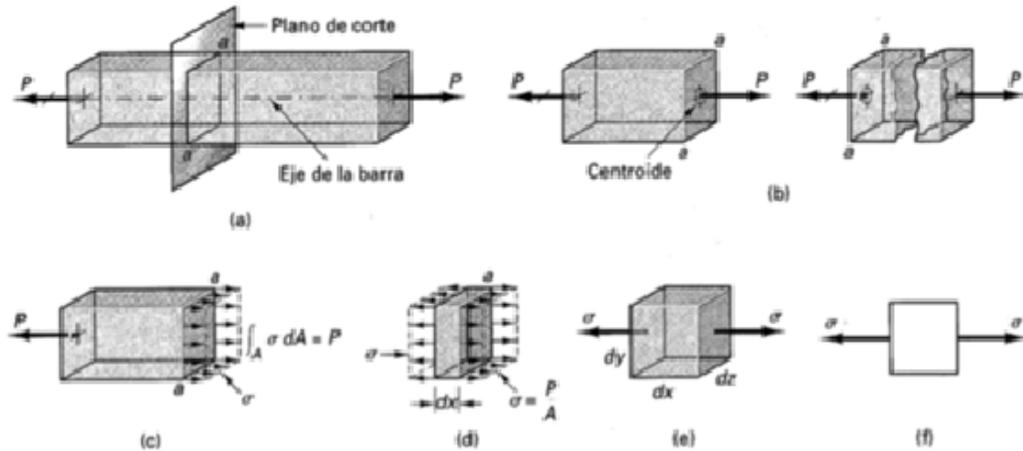


Ilustración 2.. Esfuerzo normal

Fuente: Mecánica de materiales, 2000, p.13

2.1.3.) Esfuerzo a cortante

Conocer la capacidad de un acero ante los esfuerzos a cortante es importante debido a que los aceros de bajo carbono son más débiles a cortante. Según Popov (2000) “Algunos materiales de la ingeniería (por ejemplo, el acero al bajo carbono) son más débiles en cortante que en tensión, y, bajo cargas grandes se desarrollan deslizamientos a lo largo de sus planos de esfuerzos cortante máximo” (p.19).

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{área}} = \frac{V}{A}; \frac{N}{m^2}; \frac{lb}{in^2}$$

Ecuación 1. Esfuerzo

Fuente: Mecánica de materiales, 2000, p.20

Existen diferentes configuraciones de carga a partir de un esfuerzo cortante simple, donde el elemento se somete a una fuerza cortante interna que solo corta una vez su sección transversal. También está la condición donde el elemento está sometido a doble esfuerzo cortante, y cuyo esfuerzo promedio se puede calcular de la siguiente manera.

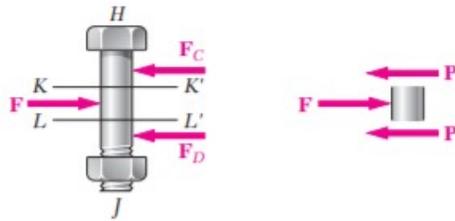


Ilustración 3. Esfuerzo cortante

Fuente: Mecánica de Materiales, 2010

$$\tau_{promedio} = \frac{P}{A} = \frac{F/2}{A} = \frac{F}{2A}$$

Ecuación 2. Esfuerzo por doble cortante

Fuente: Mecánica de Materiales, 2010

Como se observa en la ecuación 2, la expresión P/A es igual a esfuerzo cortante promedio. Cuando un elemento está supeditado a una fuerza que somete dos veces el área transversal del elemento se dice que está sometido a un esfuerzo cortante doble.

2.2.) Deformación unitaria

La deformación unitaria (ε), se puede definir como la relación existente entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, la cual permitirá determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos de tensión o compresión axial.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$$

Ecuación 3. Deformación

Fuente: Mecánica de Materiales, 2010, p.59

2.3.) Esfuerzo de fluencia

Es el esfuerzo máximo de un material, sin que este desarrolle deformaciones permanentes visibles o cause una deformación plástica. En él, un material exhibe una deformación permanente especificada y es una aproximación práctica del límite elástico, el cual está determinado a partir de un diagrama carga-deformación que trata del esfuerzo que corresponde a la intersección de la curva de carga-deformación y un paralelo de línea a la parte de la línea recta del diagrama por una deformación especificada.

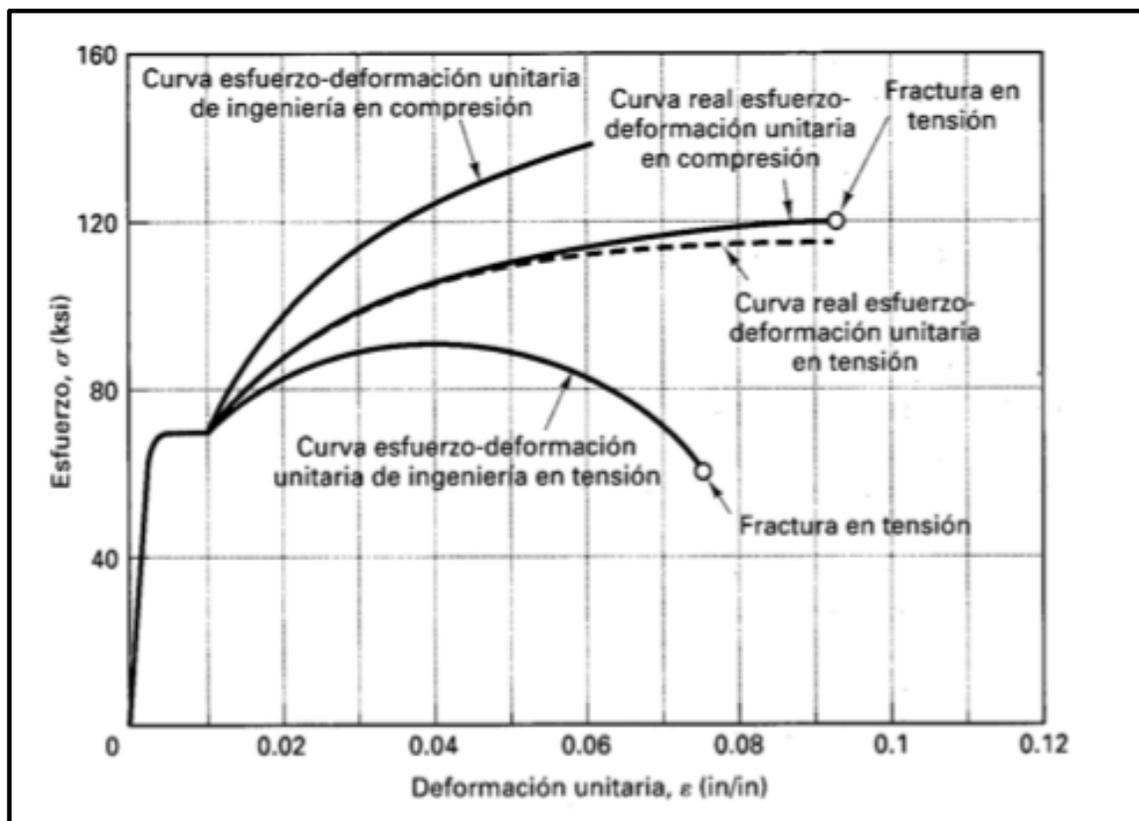
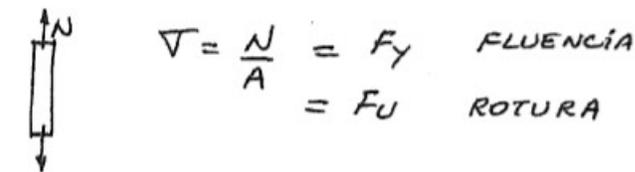


Ilustración 4. Ejemplo de gráfico de esfuerzos y deformación

Fuente: Mecánica de materiales, 2000, p.63

2.3.1.) Criterios de falla Von Mises

Los criterios de Von Mises, también llamados de la máxima energía de distorsión, son criterios de resistencia estática aplicables a materiales dúctiles como el acero. Expresan que el material no llegará a la falla mientras la energía de distorsión no sea igual o mayor a la obtenida en el momento de llegar a los puntos de esfuerzo de fluencia o último, por ensayos a tracción. Juárez (2000) señala que “Von Mises, establece que la fluencia inicia cuando la densidad e energía de distorsión en un punto es igual a la densidad de la energía de distorsión de una prueba uniaxial en tensión o compresión” (página 121 En http://materiales.azc.uam.mx/gjl/Clases/MA10_I/S15.pdf)



$$\sigma = \frac{N}{A} = F_y \quad \text{FLUENCIA}$$

$$= F_u \quad \text{ROTURA}$$

Ilustración 5. Condición de falla en tracción

Fuente: Instituto Chileno del Acero, 2000, p. 194

$$\sigma_{von\ mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Ecuación 4. Criterio de falla Von Mises

Fuente: Instituto Chileno del Acero, (2000)

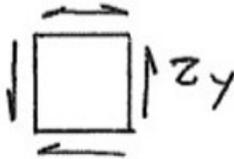
Al utilizar la ecuación 4 para una condición de falla en tracción, el criterio de falla Von Mises sería el siguiente:

En la falla por tracción pura, donde σ_1 es igual a F_y y σ_2, σ_3 son iguales a 0.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{2\sigma_1^2}{2}} = \sigma_1; \text{Criterios de falla } \sigma_{vm} = F_y \text{ o } F_u$$

Ecuación 5. Criterio de Falla

Fuente: Instituto Chileno del Acero, (2000)



$$\text{donde: } \sigma_1 = \tau_y; \sigma_2 = -\tau_y; \sigma_3 = 0$$

Ilustración 6. Esfuerzo cortante

Fuente: Instituto Chileno del Acero, 2000, p. 194

Para encontrar el criterio de falla en cortante se utiliza la ecuación 4 y se sustituyen los valores según la igualdad que existe entre los esfuerzos principales y los esfuerzos a cortante en un elemento infinitesimal.

$$\sigma_{von\ mises} = \sqrt{\frac{(2\tau_y)^2 + \tau_y^2 + \tau_y^2}{2}} = \sqrt{3}\tau_y$$

$$\text{En la condición de falla } \sigma_{vm} = \sqrt{3}\tau_y = \tau_{\text{último}}$$

Ecuación 6. Criterio de falla a cortante Von Mises

Fuente: Instituto Chileno del Acero, (2000)

De la ecuación 6 se obtiene la relación de los criterios de falla de Von Mises, con los criterios de falla utilizados en las especificaciones de diseño para estructuras de acero para pernos estructurales por el AISC 360-16, expresados en las siguientes ecuaciones

$$\tau_y = \frac{F_y}{\sqrt{3}} \approx 0.60 F_y ; \tau_y = \frac{F_u}{\sqrt{3}} \approx 0.60 F_u$$

Ecuación 7. *Criterio de falla a cortante Von Mises*

Fuente: Instituto Chileno del Acero, 2000

2.4.) Propiedades físico-mecánicas de los materiales

Los materiales dúctiles como el acero tienen propiedades que los definen y caracterizan, dado que les otorgan ventajas y desventajas en cuanto a su aplicación estructural; además de que determinan su capacidad para desempeñar un trabajo en el uso constructivo, específicamente en aplicaciones estructurales. Algunas de sus propiedades físico-mecánicas más importantes son dureza, ductilidad, tenacidad, fragilidad y estricción, característico de los metálicos, todas relacionadas con su composición química, principalmente a su porcentaje de carbono, lo que a su vez determina su comportamiento cuando se someten a esfuerzos, o al ser rayados.

2.4.1.) Propiedades obtenidas por ensayos a tensión

Las propiedades más importantes de la prueba de tensión son el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tracción última F_u , las tensiones en la ruptura, tenacidad, la deformación unitaria y la deformación total (ϵ_u y ϵ_{st}), la reducción del área, y la relación Y/F_u . (Steel Comp, 2015)

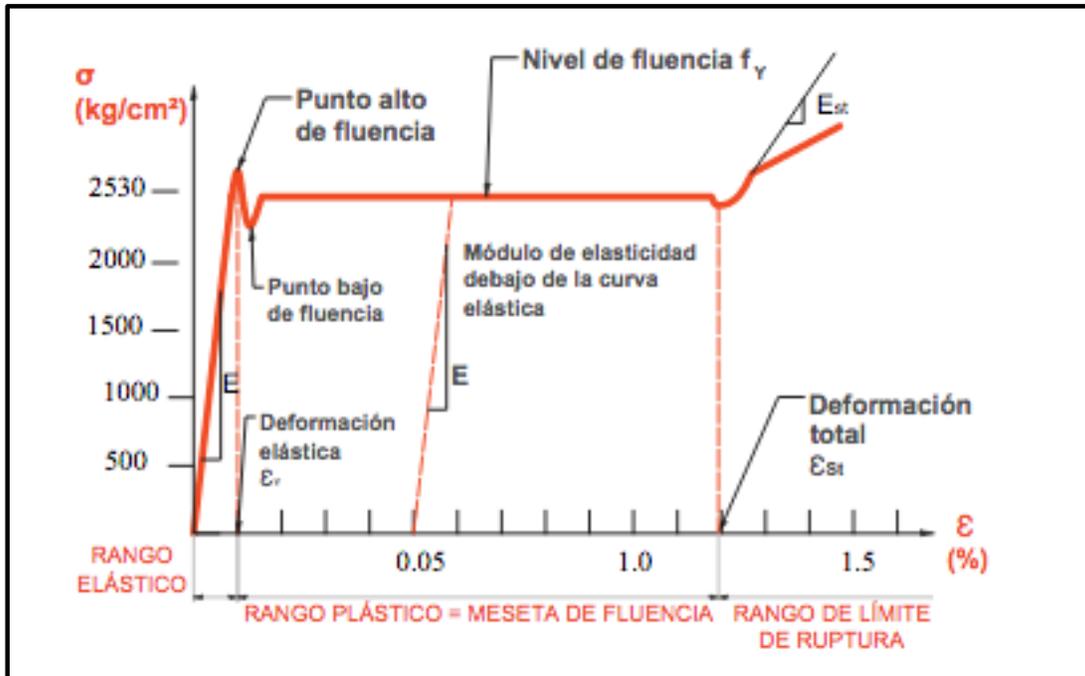


Ilustración 7. Demostración de los rangos plástico, fluencia y ruptura

Fuente: Steel Comp, 2015, p. 15

2.4.2.) Propiedades del acero estructural laminado A36

El acero estructural ASTM A36 es un material muy usado en la construcción de estructuras metálicas, específicamente en la confección de muchas piezas de las estructuras de edificación con acero; por ejemplo, las conexiones de los elementos estructurales principales de una edificación. A continuación, se describen algunas de las propiedades mecánicas del acero estructural que son de interés para el presente proyecto de investigación.

2.4.2.1.) Grado del acero estructural

La característica del acero, según su grado, está dada en función de su resistencia a los esfuerzos, que a su vez está ligada a su composición química y más específicamente al porcentaje de carbono, lo cual determina su potencial aplicación en la buena práctica de la

ingeniería. A continuación, se mencionará la norma que rige sobre los estándares de calidad para el acero de bajo contenido de carbono, A36.

2.4.2.2.) ASTM A 36

El A36 ha sido uno de los grados de acero primarios para todos los tipos de estructuras; con especificaciones mínimas de f_y y de f_u de 36 y 58 ksi (2,530 y 4,080 kg/cm²).

(American Society for Testing and Material, 1990)

Tabla 1

Tabla según de esfuerzo de fluencia y ruptura para el acero A 36

Propiedades Mecánicas	KSI	PSI	Mpa
Resistencia a la Tracción	58 - 80 Ksi	58000 - 80000	400 - 550
Punto de Fluencia	36 ksi	36000	250
Elongación en 8"		min. 20%	
Elongación en 2"		min. 23%	

Fuente: American Society for Testing and Material, 1990

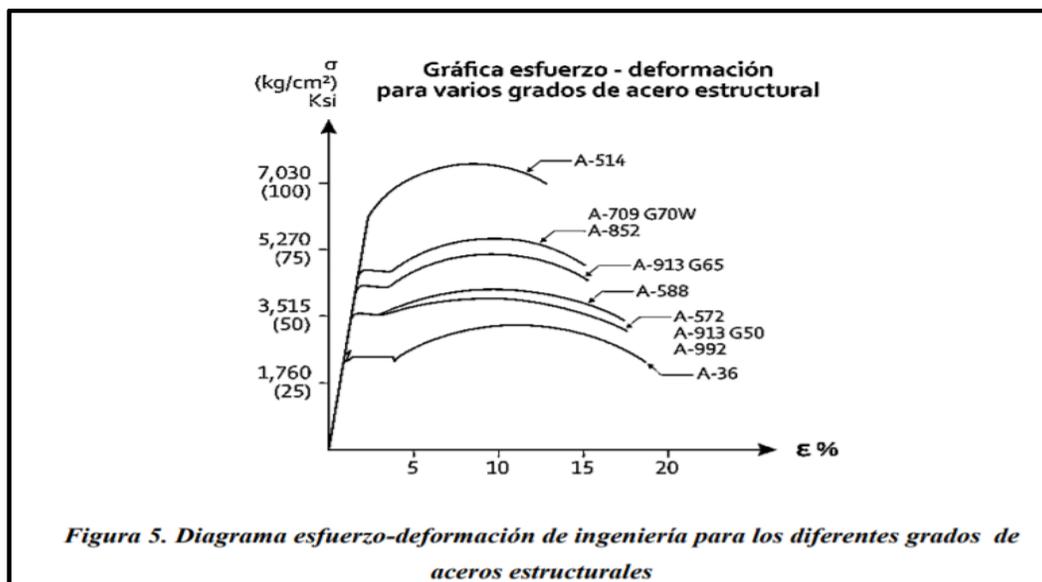


Ilustración 8. Curva de esfuerzo-deformación A36

Fuente: Perfiles Estructurales, 2019.

2.5.) Términos para la interpretación de las capacidades de los materiales en ensayos a tracción y sus propiedades mecánicas

2.5.1.) Prueba de carga

Mide la carga directa (tensión aplicada) que un tornillo pasador debe soportar sin una distorsión visible. Esta medida se da en libras por pulgada cuadrada (psi) (kgf/cm cuadrado).

2.5.2.) Resistencia del material

Mide la carga directa (tensión aplicada) que un tornillo pasador debe soportar con una cantidad específica de distorsión visible. Esta medida también se da en libras por pulgada cuadrada (psi) (kgf/cm cuadrado).

2.5.3.) Resistencia a la tracción

Mide la cantidad de resistencia que el material provee contra cualquier fuerza que intente estirar, deformar o romperlo.

2.5.4.) Ductilidad

La ductilidad es la capacidad que tiene un material de deformarse por una fuerza aplicada sin llegar a su fractura. Algunas maneras de medir la ductilidad son las siguientes:

2.5.4.1.) Porcentaje de elongación

Indica la ductilidad con que cuenta el material para deformarse antes de llegar al punto de ruptura y se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ de Elongacion} = \frac{L_f - L_i}{L_i} * 100$$

donde

L_f: Longitud final

L_i: Longitud inicial

Ecuación 8. *Porcentaje de elongación*

Fuente. Mecánica de Materiales, 2010

2.5.4.2.) Porcentaje de reducción de área

El porcentaje de reducción expresa la ductilidad de material y se obtiene de la siguiente manera:

$$\% \text{ de Reducción de Area} = \frac{A_f - A_i}{A_i} * 100$$

donde

Af: Área final

Ai: Área inicial

Ecuación 9. *Porcentaje de reducción de área*

Fuente. Mecánica de Materiales, 2010

2.6.) Propiedades perno A325

El perno A325 está regulado bajo la norma ASTM A325, que lo califica como un perno para uso estructural. Existen varios tipos, llamados tipo 1, tipo 2, tipo 3, T y M. Además de especificar los parámetros mínimos de esfuerzo en el rango elástico antes del fenómeno de fluencia, y esfuerzo máximo en el rango plástico; también determina ciertos parámetros en relación con la longitud de la rosca, tales como las dimensiones de su cabeza hexagonal; con el fin de ser considerados bajo la especificación ASTM A325. Cabe mencionar que esta norma ASTM A325, a partir del 2016, fue oficialmente retirada y reemplazada por la norma ASTM F3125, lo cual la convierte en un grado bajo la especificación F3125.

Bolt / Nut	Type 1
ASTM A325 bolt	 <p>Three radial line 120° apart are optional</p>

Ilustración 9. Identificación de perno estructural A325

Fuente: Research Council on Structural Connections, 2004

En la ilustración 9 se observa las marcas para identificar los pernos ASTM A325

Tabla 2

Propiedades de perno ASTM A325

Propiedades del perno ASTM A325 Tipo 1		
Prueba de carga (Psi)	Limite elástico (Psi)	Resistencia a la tracción (Psi)
85000	92000	120000

Fuente: ASTM, 2009, p. 5

En la tabla 2 se presentan los valores de los esfuerzos que deben tener los pernos producidos bajo la norma ASTM A325.

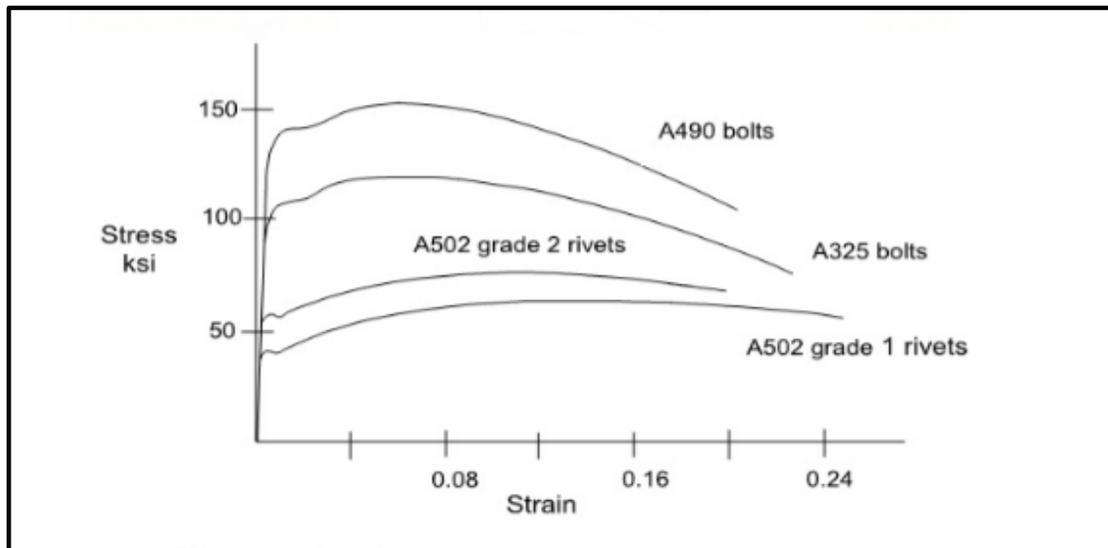


Ilustración 10. Curva de esfuerzo - deformación teórica de perno A325.

Fuente: AISC Design Guide 17, 2003

2.7.) Propiedades del tornillo SAE J 429-grado 5

El tornillo SAE J429 grado 5 abarca pernos de 1/4 a 1-1/2-pulgada (0,64 a 3,81 cm) de diámetro del cuerpo hechos de acero al carbono medio, templado y revenido. El templado y revenido son procesos relacionados con el tratamiento térmico de los tornillos para valores de dureza específica y ductilidad. La norma SAE J429 cubre los requisitos mecánicos y de materiales para los pernos en pulgadas utilizados en la industria automotriz y afines, en diámetros de hasta 1-1/2" según, el artículo de Mechanical and Material Requirements for Externally Threaded Fasteners J429, 2014 “Este estándar SAE cubre los requisitos mecánicos y materiales para los pernos, tornillos, espárragos, tornillos para semsl y pernos en U de la serie en pulgadas 2 en tamaños de 1-1/2" ”.

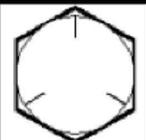
5	1/4 - 1 1/8 - 1 1/2	85 74	120 105	Acero al carbono, Templado y Revenido	
----------	------------------------	-------	---------	---------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------

Ilustración 11. Identificación del perno SAE J429 grado 5

Fuente: Garniet, 2013

En la ilustración 11 se presentan las marcas para identificar pernos de la norma SAE J429 grado 5

2.7.1.) Grado del acero

Es el resultado de los procesos de aleación y tratamientos térmicos realizados a un material ferroso. En el caso del acero, es el porcentaje de aleación de hierro carbono más tratamientos térmicos, de ser necesarios.

2.7.2.) Temple

Es el enfriamiento controlado del acero desde una temperatura superior al punto crítico, producido por agua, aceite o aire, etc. El efecto es producir dureza, puesto que el enfriamiento controlado suprime la fase de transformación de los aceros.

2.7.3.) Revenido

Es el tratamiento a relativamente baja temperatura, que se da a los aceros que han sido previamente templados. El revenido elimina tensiones producidas por la operación de temple, mejorando la ductilidad y la tenacidad del producto para obtener las propiedades mecánicas requeridas por las especificaciones.

Las propiedades teóricas de la capacidad del perno J429 se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Propiedades para tornillos SAE J429

<i>Propiedades del perno SAE J429 grado 5</i>		
<i>Prueba de carga (Psi)</i>	<i>Limite elástico (Psi)</i>	<i>Resistencia a la tracción (Psi)</i>
<i>85000</i>	<i>92000</i>	<i>120000</i>

Fuente: SAE, 1999

En la tabla 3 se presentan los valores de esfuerzos que deben tener los pernos producidos bajo la norma SAE J429 grado 5.

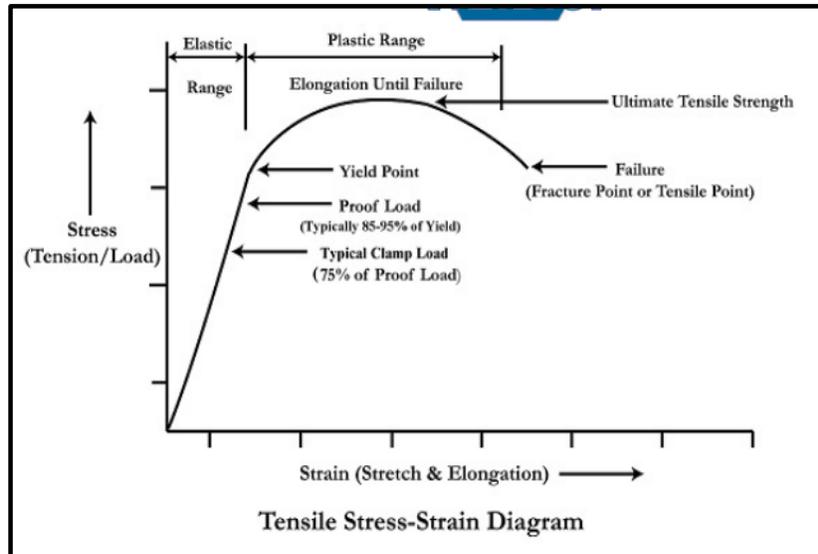


Ilustración 12. Diagrama de esfuerzo deformación de tornillos bajo la norma SAE J429

Fuente: Fastenal Engineering and Design Support, 2009

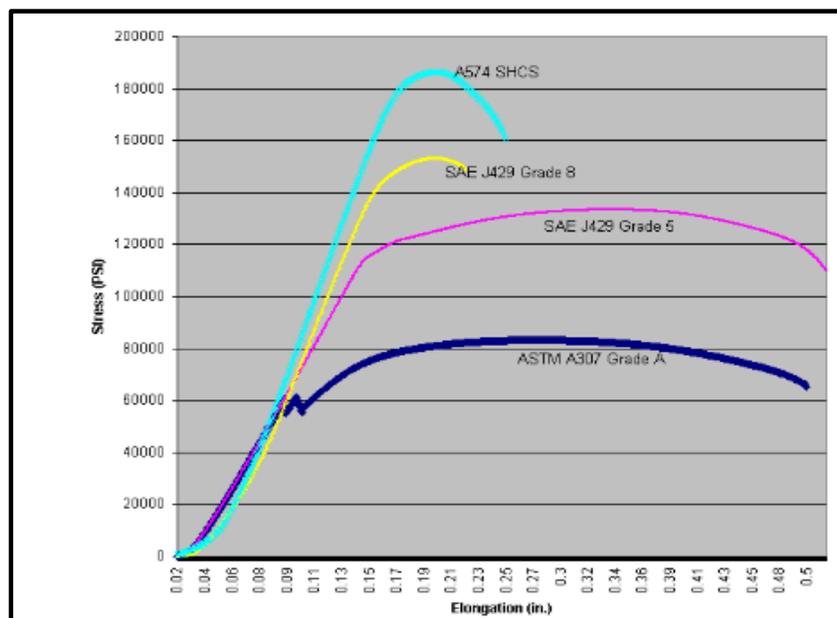


Ilustración 13. Gráfico de esfuerzo de tornillos SAE

Fuente: Fastenal Engineering and Design Support, 2009

En la ilustración 13 se observan las curvas de esfuerzo para varios tipos de pernos de la norma SAE. La del SAE J429 es la del estudio de esta investigación.

2.8.) Conexiones a doble cortante

En este tipo de conexiones, los pernos están sujetos a cortante doble y aplastamiento, pero el momento flexionante no se presenta. En la ilustración 14 se muestra un ejemplo de una conexión apernada en la cual el tornillo está sometido a fuerzas en un sentido y otro, las cuales producirán fallas por esfuerzo cortante o aplastamiento del perno, así como también aplastamiento de la lámina. Para ellas, se debe de diseñar la conexión, según las propiedades mecánicas de sus miembros y los esfuerzos a los que estos serán sometidos de acuerdo con las cargas de la conexión.

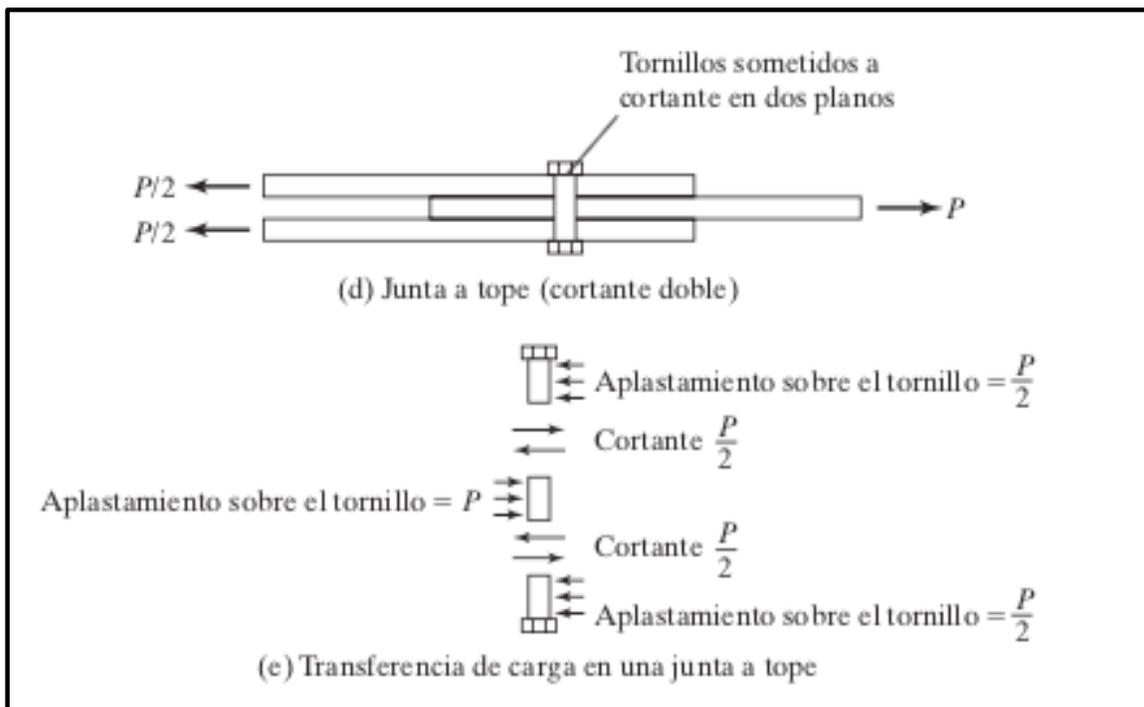


Ilustración 14. Conexión a doble cortante

Fuente: McCormac, 2012, p. 403

En la figura 14 se muestra que al aplicar una fuerza esta tendrá un reacción igual y opuesta, esta fuerza se transmitirá por el elemento conector, a los otros elementos de la

conexión, estos presentarán varias posibilidades de falla, para el elemento conector podría fallar por cortante o aplastamiento y las placas por aplastamiento o desgarre.

2.8.1.) Cortante

La fuerza cortante es aquella en la que la carga aplicada está en ángulo recto con el eje del sujetador o a través del perno. Esta fuerza llega a fallar de la conexión cuando los miembros de la articulación se deslizan de lado a lado y eventualmente cortan el elemento de cierre.

2.8.2.) Planos de corte X y N

En la conexión a cortante la o las áreas transversales están sometidas a fuerzas cortantes. Según indica la literatura, su capacidad de fuerza cortante está en función del área neta y del 60% del esfuerzo último del perno a tensión, si tenemos un perno de un diámetro establecido en su vástago; por ejemplo, 19mm de diámetro; su área neta sería la de este diámetro. Este plano se indicará con una X que significa que no incluye la rosca en el plano de corte; pero cuando se involucra la zona roscada del perno se indica con una N donde existe una reducción del área por el corte del roscado y en consecuencia de su capacidad. La tabla J3.2 de las especificaciones del AISC para construcciones metálicas hace referencia a este tema.

Tabla J3.2 Tensión Nominal de Conectores y Partes Roscadas, kgf/cm² (MPa)		
Descripción del Conector	Tensión de Tracción Nominal, F_{nt} , kgf/cm ² (MPa) ^[a]	Tensión de Corte Nominal en Conexiones de Tipo Aplastamiento, F_{nv} , kgf/cm ² (MPa)
Pernos A307	3160 (310) ^[c]	1900 (188) ^{[b][c][d]}
Grupo A (ej. Pernos A325), cuando la rosca no está excluida en el plano de corte	6320 (620)	3800 (372) ^[b]
Grupo A (ej. Pernos A325), cuando la rosca está excluida en el plano de corte	6320 (620)	4780 (469) ^[b]

Ilustración 15. Tabla J3.2 AISC

Fuente: ANSI/AISC 360-16, 2016

2.8.3.) Separación y distancia a bordes de tornillos

Algunas de las consideraciones en los diseños de las conexiones atornilladas están en la posición correcta de las perforaciones, las cuales deben cumplir ciertos criterios de diseño que están fundamentados en estudios. Según McCormac y Csernak (2012) la separación mínima entre tornillos y la distancia a sus bordes es de suma importancia.

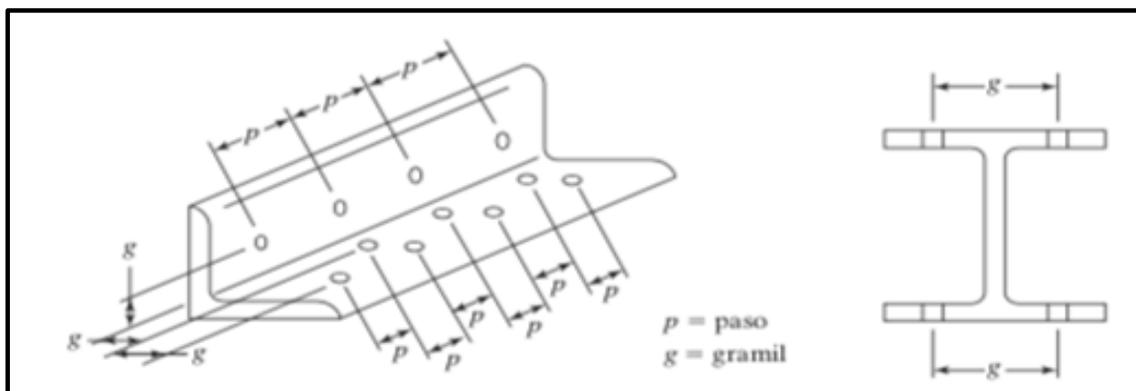


Ilustración 16. Definición de las distancias de las perforaciones

Fuente: McCormac, 2012, p. 405

2.8.4.) Separación mínima

La separación de los tornillos es importante para poder proporcionar una distancia que permita su instalación eficiente y prevenir fallas por tensión en los elementos entre sujetadores. Según McCormac y Csernak (2012) la especificación (J3.3) del AISC estipula una distancia mínima centro a centro para agujeros de sujetadores estándar, holgados o de ranura de 2 y 2/3 de su diámetro, “siendo preferible tres diámetros” (p.406). La importancia de las pruebas realizadas ha demostrado que las resistencias por aplastamiento de los miembros de la conexión están directamente relacionadas a la separación centro a centro hasta un número de 3 veces su diámetro; si las separaciones son mayores no se presenta resistencia adicional.

2.8.5.) Distancias mínimas al borde

La distancia de los bordes a las perforaciones son de suma importancia dado que si las son menores a las mínimas pueden ocasionar posibles fallas. Según Diseño de Estructuras de Acero 5ª (2012) “La práctica común consiste en colocar el sujetador una distancia mínima del borde de la placa igual a 1.5 o 2.0 veces su diámetro, de manera que el metal en esa zona tenga una resistencia al cortante igual a la de los sujetadores” (p.406). A continuación, se presentan las siguientes ilustraciones de las tablas del AISC de las distancias mínimas de los bordes.

Tabla 4

Dimensiones mínimas

TABLA J3.4	
Distancia Mínima al Borde^[a], in, desde el Centro del Agujero Estándar^[b] hasta el Borde de la Parte Conectada	
Diámetro Perno (in)	Distancia Mínima al Borde
$1/2$	$3/4$
$5/8$	$7/8$
$3/4$	1
$7/8$	$1\ 1/8$
1	$1\ 1/4$
$1\ 1/8$	$1\ 1/2$
$1\ 1/4$	$1\ 5/8$
Sobre $1\ 1/4$	$1\ 1/4d$

^[a] De ser necesario, se permite utilizar distancias de borde menores provisto que se satisfacen las disposiciones de las Secciones J3.10 y J4, sin embargo distancias al borde menores que un diámetro del perno no son permitidas sin aprobación del ingeniero a cargo.

^[b] Para agujeros sobretamaño y ranurados, ver la Tabla J3.5.

Fuente: ANSI/AISC 360-16, 2016

2.8.5.1.) Separación máxima y distancia al borde

La separación en el acero estructural también debe cumplir ciertas distancias máximas al borde de la conexión apernada, con el fin de reducir la posibilidad de que se introduzca humedad entre las placas. Estas distancias máximas están dadas por estudios del AISC J3.5, y consisten en 12 veces el espesor de las partes conectadas, pero no más de 150 milímetros. McCormac y Csernak (2012) señalan que “La distancia al borde, máxima permisible, dada por (J3.5) del AISC es de 12 veces el espesor de la parte conectada, pero no más de 6 plg (150 mm)” (p.408).

2.9.) Resistencia al cortante

Cuando en una conexión a tensión las magnitudes de las cargas superan las de la fuerza de fricción entre los miembros (lámina de acero), los cuales están unidos por la fuerza ejercida por los pernos (torque), esta presentará un deslizamiento. El tornillo ejerce una fuerza cortante perpendicular al plano de la fuerza axial a tensión, también un aplastamiento en las zonas donde está en contacto con el área de la perforación en el plano de la fuerza axial a tensión. Para el diseño de la resistencia se aplica el concepto de LFRD, el cual para un tornillo en cortante simple es igual a ϕ veces la resistencia nominal a cortante en klb/plg^2 del tornillo multiplicada por el área de su sección transversal. Los valores para ϕ están dados por las especificaciones LFRD y son de 0,75 para tornillos de alta resistencia.

2.9.1.) Capacidad nominal para pernos sometidos a cortante

La literatura expresa que la capacidad nominal de un perno es el sesenta por ciento de su esfuerzo último por un factor de 0,75 por el método (LFRD) (ver ilustración 6) criterios de falla por Von-Mises.

$$\phi R_n = F_{nv} A_g$$

donde: ϕR_n : resistencia nominal
 F_{nv} : esfuerzos von Mises
 A_g : área total a cortante

Ecuación 10. *Capacidad nominal a cortante de pernos*

Fuente: Sequi, p. 380

2.10.) Resistencia al aplastamiento

La resistencia al aplastamiento de una conexión atornillada no es tan fácil de determinar. No se realiza a partir de la resistencia del tornillo; más bien está en las características geométricas y mecánicas de los arreglos donde está conectado. La distancia crítica es la que existe entre el tornillo y el borde, con la propiedad mecánica del esfuerzo último a tensión del miembro, en ese caso la placa. McCormac y Csernak (2012) señalan que “Específicamente, su resistencia calculada depende de la separación entre los tornillos y de su distancia a los bordes, de la resistencia F_u especificada a tensión de las partes conectadas, así como de sus espesores” (p.408). En la sección J3.10 del AISC se expresa que la resistencia nominal al aplastamiento de valores R_n para las perforaciones de los tornillos en la aplicación de las ecuaciones para el diámetro del tornillo es igual al diámetro del tornillo real más 1/8 plg. De esta manera:

Para ser consistente en este texto, el autor ha supuesto de manera conservadora que el diámetro de un agujero para tornillo es igual al diámetro del tornillo, más 1/8 plg. Esta dimensión se usa para calcular el valor de L_c que debe sustituirse en las expresiones para R_n . (McCormac, 2012, p. 410).

2.10.1.) Supuestos para el diseño por aplastamiento

En los casos en que la deformación alrededor de los agujeros de perno sea una consideración en el diseño, es decir, si queremos que la deformación sea menor a 0.25 plg, entonces se debe aplicar la siguiente ecuación.

$$Rn = 1,2l_c t F_u \leq 2,4dt F_u$$

Ecuación 11. *Capacidad a aplastamiento de la placa 1*

Fuente: ANSI/AISC 360-16, 2016, pág. 136

Normalmente se supone que las deformaciones alrededor de los agujeros de perno son importantes. Entonces, a menos que se indique otra cosa, se usará la Ecuación J3-6a para los cálculos de aplastamiento.

En los casos en que la deformación alrededor de los agujeros de perno no sea una consideración en el diseño, es decir, que las deformaciones mayores a 0.25 plg sean aceptables, entonces se aplica la siguiente ecuación.

$$Rn = 1,5l_c t F_u \leq 3,0dt F_u$$

Ecuación 12. *Capacidad a aplastamiento de la placa 2*

Fuente: ANSI/AISC 360-16, 2016, pág. 136

Para pernos que se usan en conexiones con agujeros de ranura larga, si las ranuras son perpendiculares a las fuerzas se debe aplicar la siguiente ecuación.

$$Rn = 1,0t F_u \leq 2,0dt F_u$$

Ecuación 13. *Capacidad a aplastamiento de la placa 3*

Fuente: ANSI/AISC 360-16, 2016, pág. 136

2.11.) Teoría del método finito, ANSYS

El método de análisis por elementos finitos (MEF) es un método numérico para solucionar problemas de mecánica de sólidos que resulta de gran ayuda y utilidad en la práctica de la ingeniería para obtener resultados aproximados que con criterio ingenieril puede ayudar al profesional para resolver las necesidades en la toma de decisiones a la hora de diseñar. Sin embargo, no proporciona una solución exacta. Su idea está fundamentada en someter al sólido a fuerzas y condiciones, subdividiéndolo en elementos más pequeños, los cuales están interconectados entre sí a través de los nudos de los elementos, de tal manera que se suponen desplazamientos virtuales, de manera iterativa, en el interior de cada elemento para usarlos en cálculos mediante métodos numéricos complejos, hasta que los cálculos numéricos converjan. La versatilidad y potencias del MEF son de gran ayuda para realizar análisis de sólidos complejos, pues con este método, esta complejidad se reduce volviendo el sólido a elementos más pequeños, con geometrías más simples. Uno de los softwares desarrollados para efectuar este tipo de cálculos matemáticos tan complejos es ANSYS. El software ANSYS es básicamente un programa de elementos finitos que resuelve sistemas estáticos/cuasi-estáticos (fuerzas aplicadas en grandes lapsos) en los que el sistema se comporta de forma lineal. Una de las grandes ventajas de utilizar ANSYS es que resuelve el problema en una sola iteración, la cual está definida por grandes intervalos de tiempo y tiene la particularidad de que las soluciones convergen fácilmente, lo que muestra una gran estabilidad y baja necesidad de recursos computacionales, muy importante al analizar elementos grandes muy complejos.

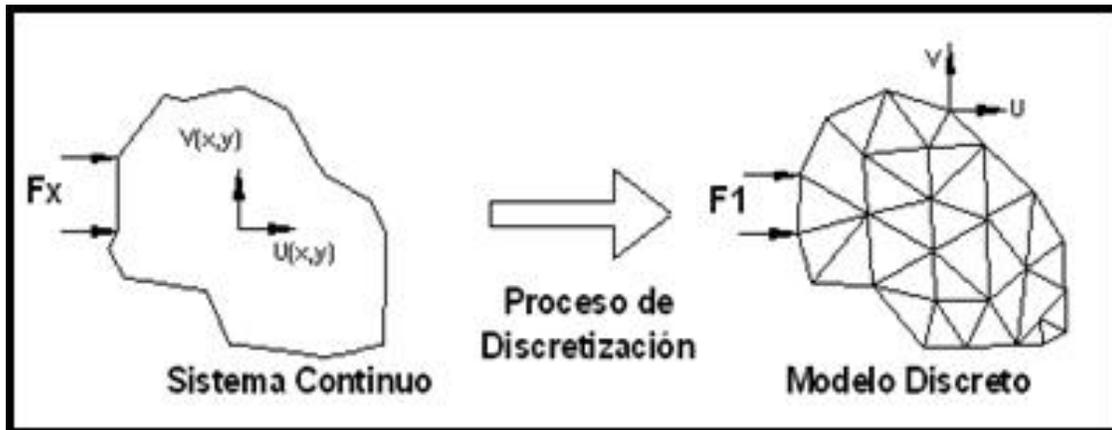


Ilustración 17. Discretización y malla

Fuente: <https://cosasdeingenierossite.wordpress.com/2017/06/28/ansys- metodo-de-los-elementos-finitos-introduccion-al-estudio-de-fatiga-en-un-placa-con-entalla/> , n.d.

Los programas por análisis de MEF por lo general poseen las siguientes características y capacidades:

- Comportamiento estático lineal: estudia cuándo el cuerpo se encuentra en la zona de la elasticidad, respeta la ley de Hooke.
- Comportamiento estático no lineal: cuando no se respeta la Ley de Hooke, es decir, la deformación no es proporcional a los esfuerzos, el análisis está en el rango plástico.
- Comportamientos dinámicos bilineales.
- Análisis de vibraciones.
- Mecánica de fluidos.

2.11.1.) **Análisis lineales, bilineal y no lineales**

Cuando se habla de análisis lineal, bilineal y no lineal de un material se hace referencia a los comportamientos en relación con los esfuerzos y deformaciones. El lineal (rangos elásticos) se rige por el comportamiento lineal que existe entre el esfuerzo y la deformación, lo que se conoce como módulo de elasticidad; el bilineal es representado por dos rectas, una da el comportamiento elástico por el módulo de Young y la otra el comportamiento plástico simplificado por medio del módulo tangencial de la curva obtenido por la diferencia entre el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia dividido por la diferencia de la deformación en el esfuerzo último y la del esfuerzo de fluencia. El comportamiento lineal también denominado idealmente elástico, se rige hasta un punto de esfuerzo de fluencia que indica el esfuerzo máximo o la interfaz que se puede desarrollar en un material sin causar una deformación irre recuperable. En el rango elástico su rigidez es constante como su matriz de rigidez; por otro lado, el comportamiento no lineal hace mención a que la deformación y el esfuerzo no tienen un comportamiento lineal y su rigidez no es constante; por ende, su matriz de rigidez varía constantemente; es decir, cambia a lo largo de su deformación lo que implica que los análisis sean iterativos.

2.11.2.) **Análisis estático por ANSYS**

El análisis estático puede calcular los efectos de cargas constantes sobre la estructura del cuerpo de la pieza mientras se ignora la inercia y los efectos del amortiguamiento, tal como se aplican cargas a lo largo de un tiempo establecido.

- **Análisis de esfuerzos lineales.** Permite validar la calidad, el desempeño y la seguridad al diseñar piezas ya que se pueden calcular los esfuerzos y desplazamientos geométricos provocados por una fuerza.

- **Análisis de deformación.** Permite validar la calidad, rendimiento y la seguridad de las piezas bajo una carga establecida.

2.11.3.) **Análisis dinámico por ANSYS**

El análisis dinámico brinda analizar las propiedades dinámicas de la estructura bajo excitación vibracional; puede ser usado para evaluar el impacto de cargas transitorias y cíclicas. Este tipo de análisis es muy recomendable para evaluar las fallas bajo cargas dinámicas.

- **Análisis modal.** Permite analizar la frecuencia natural del elemento y reducir la posibilidad de la excitación operacional coincida con la frecuencia natural del elemento.

2.12.) **Normas para materiales metálicos para sus ensayos y probetas**

La American Society of Testing Materials o Asociación Americana de Ensayo de Materiales, más conocida por las siglas ASTM, define E8 o E8M como métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos. Estas proporcionan información valiosa de la relación entre el esfuerzo y deformación; y los resultados de los ensayos brindan la posibilidad de caracterizar con valores las propiedades mecánicas de los metales ensayados. Un ejemplo es su ductilidad que se puede medir por medio del porcentaje de elongación, o de su porcentaje de reducción de área. La importancia de la caracterización de los materiales, por medio de sus propiedades mecánicas, radica en que cuando se busca un material para que este desempeñe un trabajo específico, el proyectista buscará el material que cumpla con los requerimientos del diseño por medio de las propiedades que este ofrezca.

2.12.1.) ASTM F606

Esta norma hace referencia a pruebas para obtener las propiedades de pernos y sus diferentes características. Nombra los ensayos que se deben hacer para obtener el punto del esfuerzo de fluencia y del esfuerzo último, lo cual indica que la norma que se debe utilizar es la norma ASTM E8/E8M para ensayo a tracción, con un diámetro de 12,5 milímetros y una longitud calibrada o de control de 50 milímetros, y que el material para fabricar la probeta debe de ser de un perno con un diámetro mayor a las dimensiones de los especímenes de la norma ASTM E8.

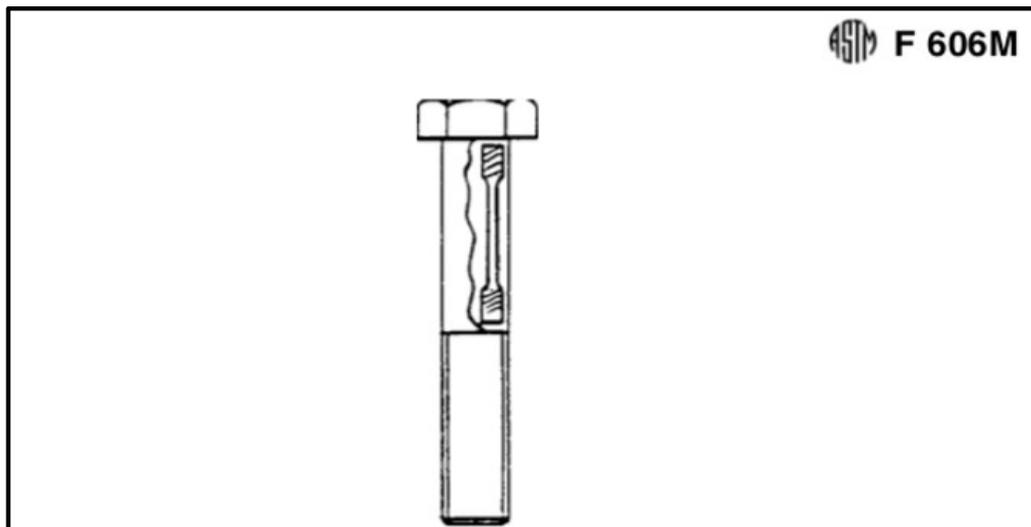


Ilustración 18. Sección de tornillo donde se puede obtener el material para la probeta

Fuente: ASTM F606, 2009

La ilustración 17 denota la manera como obtener un elemento probeta de una sección de tornillo.

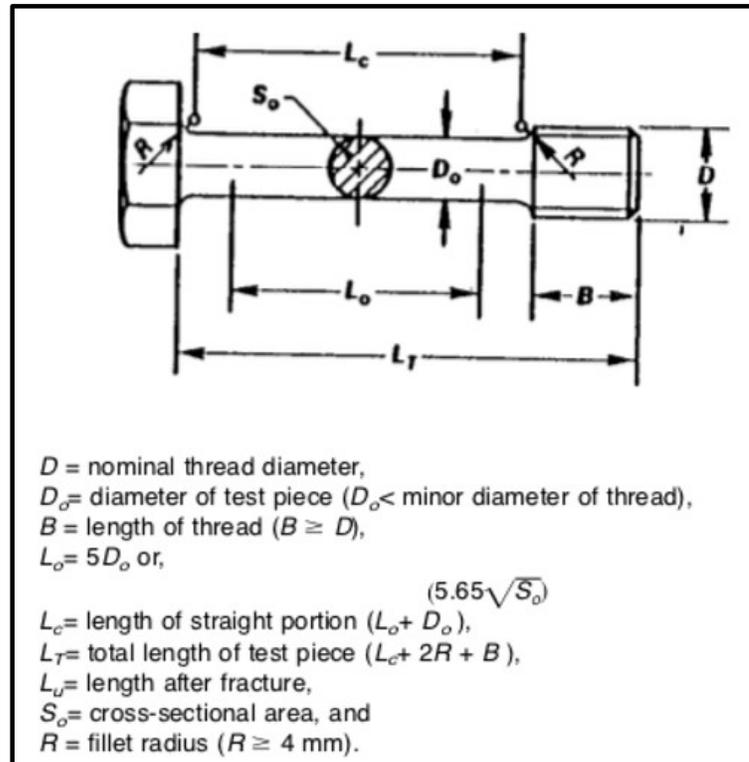


Ilustración 19. Dimensiones para probeta circular en pernos

Fuente: ASTM F 606, 2009

La ilustración 19 muestra las dimensiones que deben tener las probetas para realizar los ensayos a tensión en pernos.

2.12.2.) ASTM E8M

La norma ASTM E8M describe métodos de prueba de tracción para determinar el límite elástico, punto de alargamiento de rendimiento, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área de productos metálicos. La norma define geometrías y dimensiones adecuadas que requieren soluciones específicas de agarre que son críticos para la realización de una prueba exitosa. Los tipos más comunes de especímenes son las geometrías rectangulares y redondas. Para la prueba de especímenes tipo rectangulares se utiliza una

variedad de mordazas de acción de cuña mecánicas, incluyendo manual, neumática, hidráulica y con caras planas dentadas. En el caso de muestras redondas, se sugiere usar caras V cerradas o roscadas, según la geometría de los extremos del espécimen. Es importante mencionar que para obtener resultados satisfactorios las preparaciones de las muestras son de suma importancia.

2.13.) Ensayo a cortante

La literatura no especifica una norma para realizar ensayos a cortante a los materiales estructurales necesarios para la presente investigación con el fin de analizar su comportamiento cuando son sometidos a fuerzas cortantes. A razón de esta limitante, se determinó que debía ser un ensayo cuasi estático, el cual consiste en ir aplicando un desplazamiento de forma muy lenta de tal manera que casi sea estático, tal y como lo establece José María Córdova (2016) al señalar que “En este tipo de ensayos, la historia de carga o deformación se aplica a una velocidad suficientemente baja, de tal forma que se considera casi de forma estática” página 152.

2.14.) Distribución T de Student

En probabilidad y estadística, la distribución T o T de Student, es una distribución de probabilidad que surgió para resolver problemas estadísticos para muestras pequeñas. Se publicó por primera vez por W. S. Gosset en 1908, quien propone que la muestra proviene que una población normal; es decir que tiene un comportamiento normal, no se conoce la desviación estándar poblacional y el número de muestras es menor a 30. Se usa en problemas que tienen como fin comparar las medias para determinar si las muestras son diferentes entre sí, “se usa de manera extensa en problemas que tienen que ver con inferencia acerca de la media de la población o en problemas que implican muestras comparativas” (Ronald. E.

Walpole, R. H, 1999, p. 232)

Para poder utilizar la distribución T, la población debe ser normal y el número de muestras debe ser menos a 30, se debe declarar las hipótesis: una es la nula, donde se dice que la media poblacional es igual a un valor; la otra es la alternativa, donde se dice que la media poblacional es menor, mayor o diferente que la media de la muestra o del valor por comprobar.

Al efectuar las comprobaciones de las hipótesis se necesita conocer los puntos críticos que se obtienen por medio del nivel de significancia y los grados de libertad utilizando la tabla de la distribución T. Para el presente proyecto se utilizó como hipótesis alternativa la diferencia de las medias; es decir, las medias no son iguales, por lo que en este caso se utiliza la distribución T de dos colas, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5

Distribución T o T Student para el método alternativo utilizando dos colas

		Student									
		Niveles de Significancia DOS COLA									
		0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005	
1		1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32	
2		0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09	
3		0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45	
4		0.74	1.34	1.53	2.13	2.78	3.50	3.75	4.60	5.60	
5		0.73	1.30	1.48	2.02	2.57	3.16	3.36	4.03	4.77	
6		0.72	1.27	1.44	1.94	2.45	2.97	3.14	3.71	4.32	
7		0.71	1.25	1.41	1.89	2.36	2.84	3.00	3.50	4.03	
8		0.71	1.24	1.40	1.86	2.31	2.75	2.90	3.36	3.83	
9		0.70	1.23	1.38	1.83	2.26	2.69	2.82	3.25	3.69	
10		0.70	1.22	1.37	1.81	2.23	2.63	2.76	3.17	3.58	
11		0.70	1.21	1.36	1.80	2.20	2.59	2.72	3.11	3.50	
12		0.70	1.21	1.36	1.78	2.18	2.56	2.68	3.05	3.43	
13		0.69	1.20	1.35	1.77	2.16	2.53	2.65	3.01	3.37	
14		0.69	1.20	1.35	1.76	2.14	2.51	2.62	2.98	3.33	
15		0.69	1.20	1.34	1.75	2.13	2.49	2.60	2.95	3.29	
16		0.69	1.19	1.34	1.75	2.12	2.47	2.58	2.92	3.25	
17		0.69	1.19	1.33	1.74	2.11	2.46	2.57	2.90	3.22	
18		0.69	1.19	1.33	1.73	2.10	2.45	2.55	2.88	3.20	
19		0.69	1.19	1.33	1.73	2.09	2.43	2.54	2.86	3.17	
20		0.69	1.18	1.33	1.72	2.09	2.42	2.53	2.85	3.15	
21		0.69	1.18	1.32	1.72	2.08	2.41	2.52	2.83	3.14	
22		0.69	1.18	1.32	1.72	2.07	2.41	2.51	2.82	3.12	
23		0.69	1.18	1.32	1.71	2.07	2.40	2.50	2.81	3.10	
24		0.68	1.18	1.32	1.71	2.06	2.39	2.49	2.80	3.09	
25		0.68	1.18	1.32	1.71	2.06	2.38	2.49	2.79	3.08	
26		0.68	1.18	1.31	1.71	2.06	2.38	2.48	2.78	3.07	
27		0.68	1.18	1.31	1.70	2.05	2.37	2.47	2.77	3.06	
28		0.68	1.17	1.31	1.70	2.05	2.37	2.47	2.76	3.05	
29		0.68	1.17	1.31	1.70	2.05	2.36	2.46	2.76	3.04	
30		0.68	1.17	1.31	1.70	2.04	2.36	2.46	2.75	3.03	
31		0.68	1.17	1.31	1.70	2.04	2.36	2.45	2.74	3.02	
32		0.68	1.17	1.31	1.69	2.04	2.35	2.45	2.74	3.01	
33		0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.35	2.44	2.73	3.01	
34		0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.35	2.44	2.73	3.00	
35		0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.34	2.44	2.72	3.00	
36		0.68	1.17	1.31	1.69	2.03	2.34	2.43	2.72	2.99	
37		0.68	1.17	1.30	1.69	2.03	2.34	2.43	2.72	2.99	
38		0.68	1.17	1.30	1.69	2.02	2.33	2.43	2.71	2.98	
39		0.68	1.17	1.30	1.68	2.02	2.33	2.43	2.71	2.98	
40		0.68	1.17	1.30	1.68	2.02	2.33	2.42	2.70	2.97	
		0.250	0.125	0.100	0.050	0.025	0.013	0.010	0.005	0.003	
		Niveles de Significancia UNA COLA									

Fuente: <https://studylib.es/doc/4680020/tabla-de-valores-cr%C3%ADticos-de-la-distribuci%C3%B3n-t-de-student>

2.14.1.) Pasos para la distribución T alternativa

- Declarar hipótesis: nula (H_0) y alternativa (H_1). La hipótesis alternativa plantea matemáticamente lo que se quiere demostrar y la nula el valor por comparar.
- Determinar el nivel de significancia (rango de aceptación de la hipótesis alternativa): cuanto más pequeño sea, mejor su calidad. En proyectos de investigación rondan desde los 0,01 hasta no más de 0,05.
- Evidencia muestral: se calcula la media y la desviación estándar a partir de la muestra.
- Se establecen los puntos críticos con los grados de libertad y el nivel de significancia según la tabla de distribución T (ver tabla 5).

$$\text{Grado de libertad} = n - 1$$

donde:

$$n = \text{número de muestras}$$

- Se calcula el punto de T

$$\text{Punto } T = \frac{\text{Media poblacional} - \text{Media de la muestra}}{\frac{\text{Desviación estandar de la muestra}}{\sqrt{\text{número de muestra}}}}$$

Ecuación 14. *Puntos T*

Fuente: Walpole, 1999

- Se comparan los puntos críticos con los puntos T para verificar si la hipótesis es correcta; si el punto T es mayor que los puntos críticos, la hipótesis es correcta.

Capítulo III

3.) Marco metodológico

En las siguientes secciones se plantean los métodos utilizados para la recopilación de datos por los ensayos, los aspectos y cuidados que se deben de tomar en la fabricación de las probetas, lo cual influye directamente con los resultados de las pruebas; los diferentes análisis por utilizar en la investigación; una comparación entre los valores de los resultados finales obtenidos de los ensayos y los valores según la teoría expuesta en el marco teórico y las fichas técnicas suministradas por los proveedores que se involucran directamente con el objetivo general. Estas comparativas ayudaran a evidenciar, mediante datos, si los pernos SAE J429 grado 5 tienen un comportamiento similar a un perno estructural ASTM A325 en conexiones sometidas a doble cortante. Por último, se establece una comparación de los resultados de los ensayos a doble cortante en laboratorio a los pernos y los de los modelos numéricos por elemento finito mediante el programa ANSYS para calibrar las pruebas virtuales, para posteriormente efectuar comparaciones entre datos obtenidos por pruebas virtuales con análisis estáticos y dinámicos.

3.1.) Enfoque y método de investigación

El presente trabajo se realiza mediante el método de investigación cuantitativa.

3.2.) Enfoque cuantitativo

La investigación tiene carácter de enfoque cuantitativo, dado que para alcanzar los objetivos se deben recopilar datos teóricos y experimentales, mediante literatura y diferentes métodos, como ensayos a tracción para datos de esfuerzos y deformaciones, análisis estadísticos para aclarar hipótesis y establecer decisiones; memorias de cálculo de la

conexión, para establecer dimensiones de los elementos de la conexión; ensayos personalizados a doble cortante, para identificar datos de fuerza y desplazamiento, y modelos numéricos por elemento finito para realizar las comparaciones.

3.3.) Población y muestra

Para la presente investigación, la población estará compuesta por dos materiales utilizados en las construcciones metálicas, uno son los pernos SAE J429 grado 5 en $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro por 6 pulgadas de largo, el cual es un tornillo de uso automotriz muy común en el mercado costarricense y muy fácil de conseguir en los diferentes establecimientos; el otro es el perno ASTM A325 en $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro por 6 pulgadas de largo, de tipo estructural y utilizado en conexiones estructurales; y no es tan común en el mercado costarricense. Esta población estará representada por cuatro pernos SAE J429 grado 5 y cuatro estructurales ASTM A325. Se maquinarán tres probetas de cada perno bajo las especificaciones geométricas de los especímenes de la norma ASTM E8M, para aplicar los ensayos a tracción. Sin embargo, existe la necesidad de estudiar un material más para realizar los análisis numéricos por elemento finito; el acero estructural A36, más conocido en el mercado costarricense como la lámina de hierro negro y utilizada en las construcciones. De este material solo se utiliza una muestra para fabricar la probeta, extraída de la misma lámina de donde se toma el material para construir la conexión real. Se considera realizar solo una probeta ya que el costo del material y la mecanización de la probeta representan un gran costo económico. Las muestras restantes de cada población de perno se utilizan para ser falladas hasta la ruptura en una conexión real a doble cortante por medio de un único ensayo a cortante personalizado por cada perno, ya que los costos de materiales y fabricación son muy significativos para el investigador. Las pruebas virtuales tienen la ventaja de que la cantidad

de muestras puede llegar a ser infinita, ya que, al ser un modelado por computadora, la variación de la geometría no implica costos significativos, esto aumenta las posibilidades de realizar más modelos de la conexión.

Para obtener las muestras de las poblaciones se opta por comprar pernos en el comercio llamado Universal de Tornillos SA, el cual está ubicado en La Uruca, San José, Costa Rica, con el fin obtener los mismos tipos de pernos que se le brindan al público en general.

El perno SAE J429 grado 5 se compró bajo el nombre de grado 5 que es como es conocido en el mercado y el ASTM A325 se compró en el mismo establecimiento.

Para considerar que las muestras de las poblaciones de los pernos son representativas de las normas SAE J429 grado 5 y la ASTM A325, se realizó un proceso de trazabilidad del origen de los pernos, donde se presentan las siguientes evidencias obtenidas.

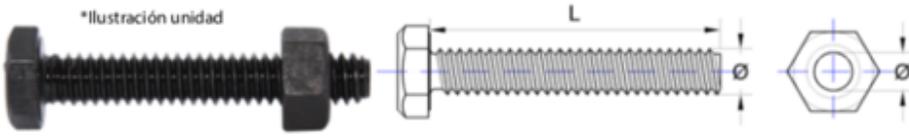


TORNILLERÍA
TORNILLOS HEXAGONALES
TLLO HEX G5 RO



P5C-001 -- P5C-200

*Ilustración unidad



DESCRIPCIÓN

Tornillo hexagonal grado 5 con tuerca incluida. Ideal para todo tipo de sujeción en dónde esté presente la vibración.

Grado	Diámetro	Dureza		Carga	Corte
		Min	Max		
5	1/4" a 1"	C25	C34	85,000 PSI	120,000 PSI
	1" o mas	C19	C30	74,000 PSI	105,000 PSI

CARACTERÍSTICAS

MATERIAL		PUNTA	
GRADO		CABEZA	



Central: 2243-7676 | Mayoreo: 2243-7677 | Fax: 2256-4090 | E-mail: ventas@unitorni.com | Web: www.unitorni.com

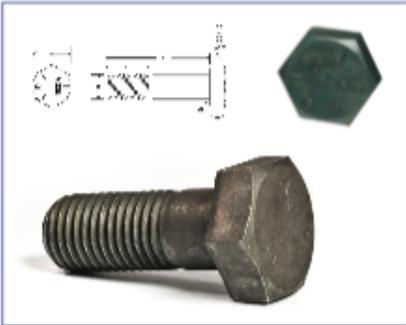
Ilustración 20. Ficha técnica Perno grado 5

Fuente: Universal de Tornillos SA, 2020

La ilustración 20 presenta la ficha técnica suministrada por el comercio donde se compró el perno, el cual es llamado únicamente como grado 5, marcado con rojo en la imagen, y no por el nombre de SAE J429 grado 5 aunque presenta las mismas capacidades de esfuerzos que la norma (ver anexo 5).

TORNILLERIA | Tornillos Hexagonales
TLLLO HEX ESTRUCTURAL A325 TP1 RO

ASTM-003 - ASTM-050
TORNILLO HEX ESTRUCA325 TP1 RO



ESPECIFICACIONES TECNICAS

Grado	Diámetro	Dureza		Carga	Corte	Material
		Min	Max			
A 325 TIPO 1	Todos	C25	C34	85,000 PSI	120,000 PSI	Acero medio carbono tratado termicamente

Ilustración 21. Ficha técnica Perno A325

Fuente: Universal de Tornillos SA, 2020

En el caso del perno estructural, la ficha técnica expresa que es hexagonal estructural A325 Tipo 1, subrayado con rojo en la imagen, pero no nombra exactamente la norma ASTM A325, aunque presenta las mismas capacidades de esfuerzo que la norma ASTM A325 (ver anexo 5).

Tabla 6

Dimensiones de los pernos con que se realizaron los especímenes

Tipo	SAE J429 Grado 5	ASTM A325
Dimensión	mm	mm
hexágono S	16	18
hexágono h	28	31
hexágono w	32,5	35,8
longitud total	138	139
longitud del perno libre	126,5	127
logitud de rosca	48	37,5
paso de rosca (hilos por pulgada)	20	20
Diámetro	19	19
Tuerca hexágono S	15	17
Tuerca hexágono h	28	31
Tuerca hexágono w	32	35

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la tabla 6 se muestra una tabulación de las dimensiones de los pernos SAE J429 grado y ASTM A325 que servirán para analizar las diferencias geométricas que existen entre ellos, al igual que la ilustración 22.



Ilustración 22. Identificación de pernos grado 5 y A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

Otra evidencia de la traza de las muestras son las marcas de identificación de los

pernos, las cuales fueron mostradas en las ilustraciones 9 y 11.



Ilustración 23. Pernos grado 5 y A325 para la fabricación de probetas

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 23 se pueden observar las muestras de cada una de las poblaciones antes del maquinado de las probetas.

3.4.) Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Las técnicas para la recolección de datos son la bibliografía, donde se evidencian las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, su comportamiento en diagramas de esfuerzos deformación; también documentos como tesis, catálogos de los materiales, normas de diseño como AISC, libro de estudio, artículos técnicos, teorías establecidas; y además, la guía del tutor y la pestaña de ANSYS *help* para la recopilación y comprensión de los datos virtuales.

3.5.) Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de los datos

La investigación se realiza mediante técnicas de análisis comparativos. Estos incluyen un análisis estadístico mediante la distribución T, uno comparativo entre los resultados experimentales obtenidos por los ensayos a tracción y la teoría; y otro también comparativo, entre los resultados de los modelos virtuales por elemento finito estáticos y dinámicos utilizando el software ANSYS y los resultados experimentales de un ensayo a cortante personalizado realizados en una máquina universal de ensayos.

3.6.) Método de investigación por medio de ensayos

Inicialmente se realizan pruebas a tracción por medio de la norma ASTM E8M a tres probetas para los pernos SAE J429 de grado 5, tres probetas con los pernos ASTM A325 y una probeta para el acero estructural A36, con el fin de recopilar los datos de esfuerzo, deformación unitaria, porcentaje de elongación y porcentaje de reducción de área. Para los ensayos a doble cortante personalizado se efectúa un ensayo para cada tipo de perno, y se recopilan datos como fuerza aplicada y deformación total antes de la ruptura.

3.7.) Ensayo a tracción de los pernos

El ensayo de pernos a tracción se realiza por medio de la norma ASTM E8M de la organización ASTM, la cual se utiliza para ensayos a tracción de probetas de materiales metálicos. Los ensayos consistieron en aplicar un desplazamiento a una baja velocidad mediante una fuerza hidráulica aplicada a un extremo de la probeta. Así, mientras el otro extremo permanecía sujeto, la fuerza aplicada se recopilaba por medio de una celda de carga

ubicada en una de las mordazas de la máquina universal de ensayos, la cual brindaba la información al software del laboratorio de materiales. Las deformaciones totales se obtuvieron a través de un extensómetro ubicado en la longitud calibrada de las probetas, y los datos finales fueron suministrados por el software de la máquina universal de ensayos del centro de investigación del Instituto Nacional de Aprendizaje.

3.7.1.) ASTM E8M

Describe métodos de prueba de tracción para determinar el límite elástico, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área de productos metálicos. Para realizar estas pruebas con éxito, se debía garantizar que las probetas de los materiales no presentaran deslizamiento en sus extremos al realizar los ensayos. Las geometrías de las probetas rectangulares y cilíndricas eran las más convenientes para las muestras de los materiales. Para la prueba del acero estructural A36 se utilizaron los especímenes del tipo rectangular, con mordazas de acción hidráulica con caras achuradas para sujetar los extremos de la probeta. En el caso de las muestras redondas, se optó usar extremos roscados, los cuales dependían de la geometría de los extremos de las muestras. La decisión del uso de extremos roscados radicó en que el laboratorio cuenta con instrumentos para sujetar probetas con extremos roscados.

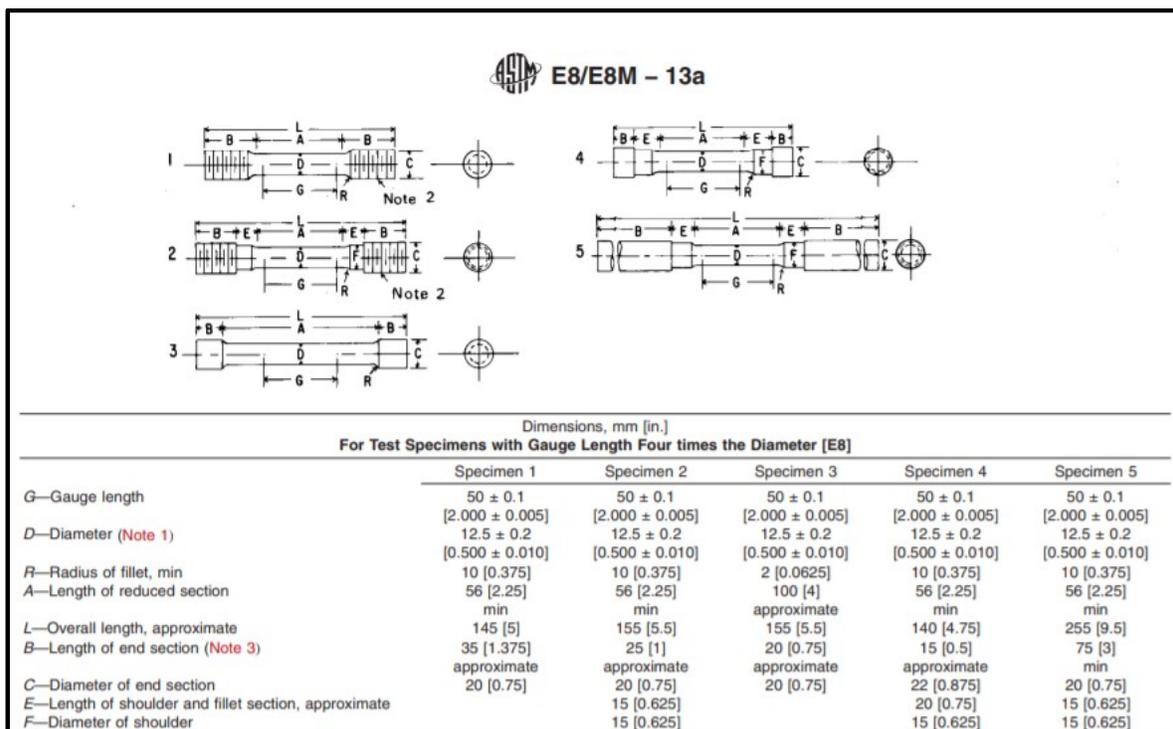


Ilustración 24. Especímenes

Fuente: ASTM E8M, 2013

La ilustración 24 expresa los valores de las dimensiones para los diferentes especímenes según la norma ASTM E8M; de los cuales se escogió el espécimen tipo 1.

3.7.2.) Equipo ASTM E1012

Para que los datos obtenidos por los ensayos a tracción, utilizando la norma ASTM E8M, fueran satisfactorios, los equipos de ensayos debían de estar calibrados con los alineamientos de la norma ASTM E1012, la cual es una prueba de verticalidad entre las mordazas del equipo. En el caso de la investigación, no era necesario aplicar dicha norma, ya que las máquinas se encontraban en el laboratorio de materiales del Instituto Nacional de Aprendizaje, el cual cuenta con acreditación bajo la norma INTE-ISO/IEC 17025:2005 (ver ilustración 26).

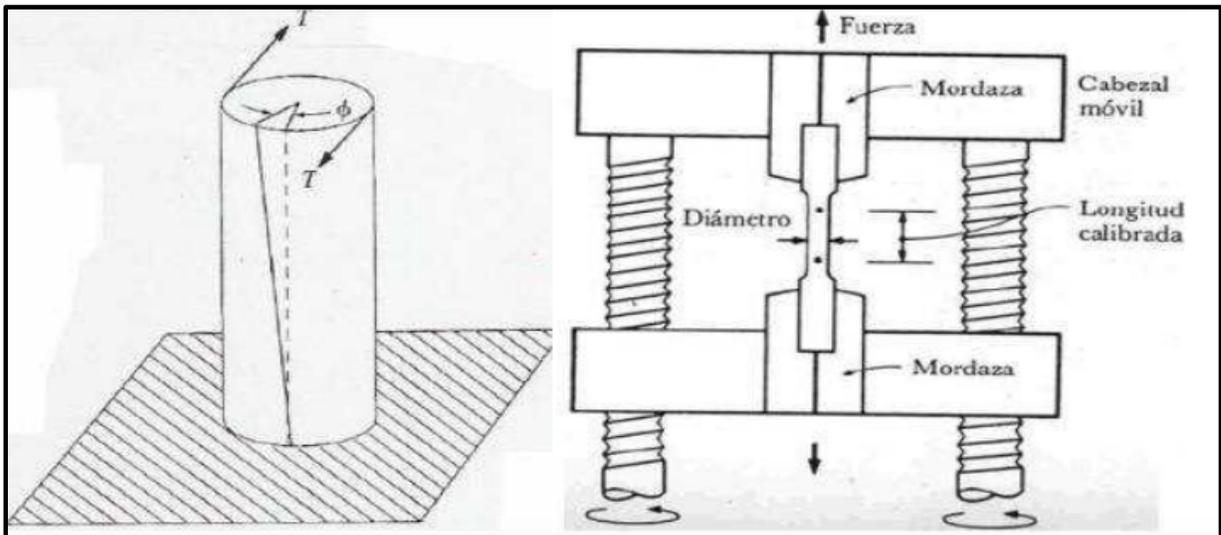


Ilustración 25. Diagrama prueba a tracción

Fuente: ASTM E1012,1994, p.12

3.7.3.) Equipo

Para obtener buenos resultados, las pruebas se realizaron en el laboratorio de materiales del Instituto Nacional de Aprendizaje en la Ciudad Tecnológica Mario Echandi, ubicado en la Playwood de Alajuela, Costa Rica, en cual está acreditado por el Ente Costarricense de Acreditador (ECA) que es el encargado de otorgar y emitir las acreditaciones de control de calidad en el país. ECA acreditó al INA en las buenas prácticas de control de calidad para las pruebas ASTM E8M, con un alcance para una capacidad no mayor a los 500 KN. Las pruebas fueron realizadas en la Máquina Universal de Ensayos Zwick/Roell 1 MegaNewton y en la Máquina Universal de Ensayos Zwick/Roell Z250.



Ilustración 26. Alcance y acreditación por ECA al INA

Fuente: eca.or.cr, 2018

La ilustración 26 muestra el certificado otorgado al laboratorio de materiales del Instituto Nacional de Aprendizaje (INA), en las buenas prácticas para los ensayos necesarios para la investigación y el alcance otorgado para los ensayos a tracción bajo la norma ASTM

E8M de una carga máxima de 500 kN (ver ilustración 27).

Artículos, materiales o productos a ensayar o muestrear	Nombre específico del ensayo o muestreo y propiedades a ensayos o muestrear	Especificación, referencia al método y técnica utilizada	Ámbito de trabajo
Materiales metálicos	P GR 11: Ensayo de Dureza Rockwell de Materiales Metálicos	ASTM E18-18 ISO 6508-1:2016	Escalas HRC y HRB
Materiales metálicos	P GR 12: Ensayo de Tensión de Materiales Metálicos Propiedad medida: • Esfuerzo de fluencia • Resistencia máxima a la tensión • Porcentaje de elongación a la fractura • Porcentaje de reducción de área de fractura	ASTM E8/E8M-16a	Carga máxima 500 kN
Muestras Metálicas Soldadas Ferrosas (A1)	P GR 22: Ensayo de Macroataque de Aleaciones Metálicas	ASTM E340-15 ISO 4969:2015	Ataque a temperatura ambiente de aleaciones ferrosas y soldadas

Ilustración 27. Pruebas acreditadas de interés para la investigación

Fuente: eca.or.cr, 2018

En la ilustración 27 se tabulan los ensayos acreditados para el laboratorio del INA.

A continuación, se presentan ilustraciones de las máquinas por utilizar para los ensayos.



Ilustración 28. Máquina Universal de Ensayos de 250 Newton para ensayos de pernos

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 28 se puede observar la Máquina universal de ensayo utilizada para realizar las pruebas a tracción de los pernos SAE J429 grado 5 y los pernos ASTM A325, por medio de la norma ASTM E8M. La máquina tiene una capacidad de 250 Kilo Newton.



Ilustración 29. Máquina Universal de Ensayos de 1 Mega Newton para ensayos de Acero A36

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 29 se puede ver la Máquina universal de ensayos con la que se realizó el ensayo a tracción del acero estructural A36 y el ensayo personalizado a doble cortante.

3.7.4.) Diseño de probetas

Para establecer las dimensiones de las probetas de los materiales en estudio, tanto para probetas de los pernos de tipo circulares como para el acero estructural A36 de tipo rectangulares, se seleccionaron bajo dos criterios. Uno eran los alineamientos de las dimensiones de los especímenes según la norma ASTM E8M y otro, que las probetas se pudieran sujetar bien en la máquina universal de ensayo. En el caso de esta investigación, las probetas eran del tipo normalizadas y debían cumplir ciertas dimensiones según el tipo de espécimen.

3.7.5.) Dimensiones de probeta circulares

Tabla 7.

Dimensiones de probeta

Dimensiones , mm			
Para especímenes con un longitud de calibre cuatro veces mayor al diámetro (E8)			
		mm	mm
G	Longitud de calibre	50	(+-) 0,1
D	Diámetro	12,5	(+-) 0,005
R	Radios	5	(+-) 0,375
A	Longitud paralela a la sección	55	
L	Longitud general aproximada	120	
B	Longitud al final de la sección	32.5	
C	Diámetro en el final de la sección	20	

Fuente: ASTM, 2016.

La tabla 7 brinda las dimensiones de las probetas circulares de los pernos SAE grado 5 y el ASTM A325, según las dimensiones del espécimen 1 de la norma ASTM E8M, anteriormente nombrado en la ilustración 24.

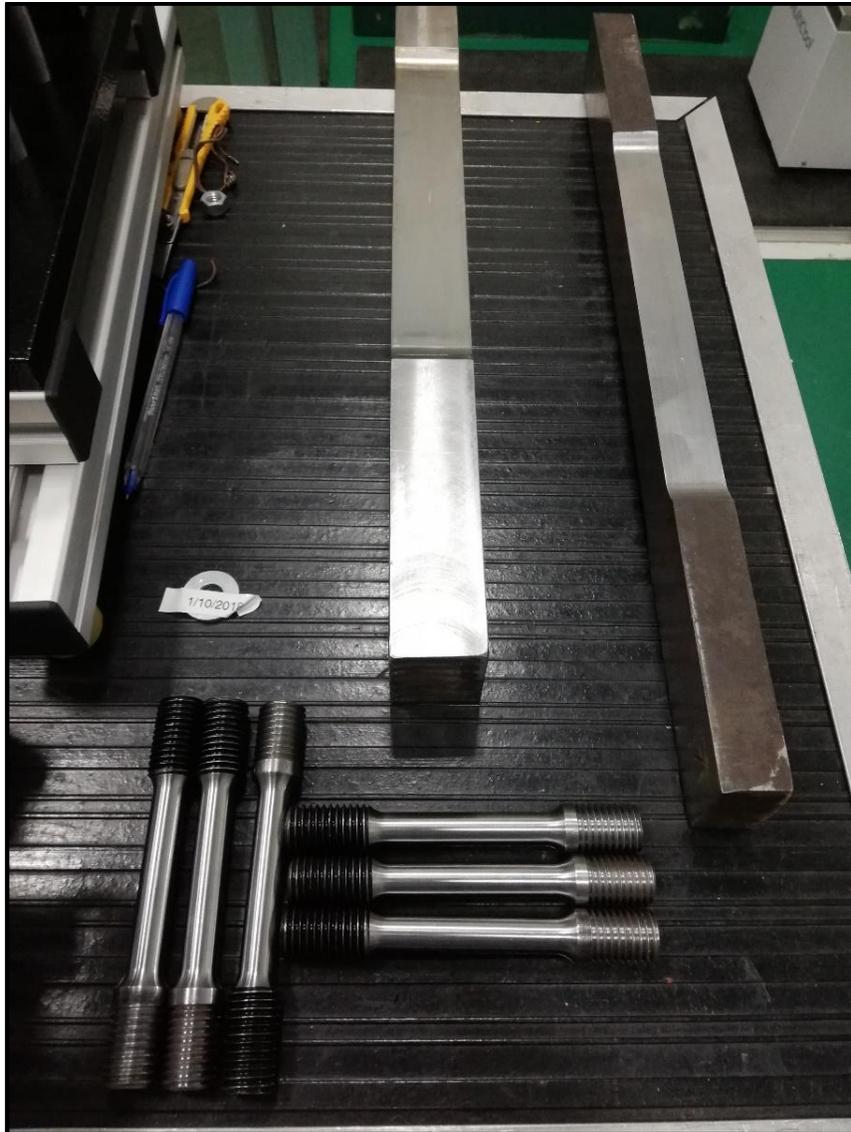


Ilustración 30. Probetas

Fuente: Elaboración propia, 2020



Ilustración 31. 3 probetas SAE J429 grado 5 y 3 probetas ASTM A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

En las ilustraciones 30 y 31 se pueden observar las probetas circulares de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325, así como también la probeta rectangular del acero estructural A36. En este punto se tomaron los cuidados necesarios para que los maquinados de los procesos de fabricación de las probetas fueran lo más detallados posible, para evitar micro fisuras del material en los ensayos (ver anexo 2).

3.7.6.) Dimensiones de los especímenes maquinados

Para los ensayos se optó por fabricar especímenes el tipo 1, los cuales llevan roscas en sus extremos con diámetros de $\frac{3}{4}$ de pulgada y un paso de 20 hilos por pulgada. El fin de la rosca es sujetar los extremos de las probetas acoplándolas a un par de elementos existentes en el laboratorio. La necesidad de utilizar estos conectores yace en que la máquina universal de ensayos por utilizar no sujeta probetas de longitudes menores a 400 milímetros.



Ilustración 32. Elementos para sujetar especímenes

Fuente: Elaboración propia, 2020

La finalidad de utilizar este tipo de elemento conector en el desarrollo de los ensayos de probetas circulares, está en que la máquina no sujeta elementos menores a 400 milímetros y en reducir en lo posible cualquier tipo de desplazamiento por las partes sujetas y con esto lograr obtener los mejores datos de deformación unitaria y elongación.

3.7.7.) Equipo por utilizar para la medición de las probetas

- Calibrador vernier común
- Cinta métrica en unidades del sistema internacional
- Papel y lápiz

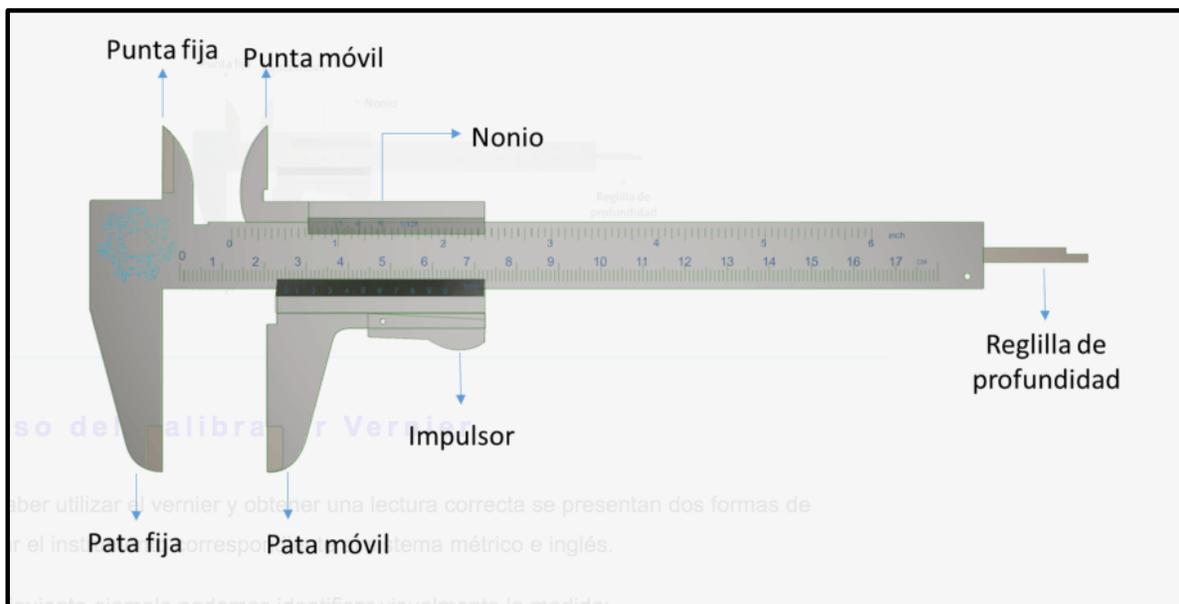


Ilustración 33. Calibrador Vernier común para utilizar en la medición

Fuente: Mecanotrónica LATAM, 2010

En las mediciones de los especímenes se usó la pata fija y la pata móvil de la herramienta de medición. El Vernier tiene un nonio o escala de medición de $1/20$ lo cual brinda una precisión al medir, de 0,05 milímetros.

- Pata fija: corresponde a la mordaza para medir el exterior de la pieza deseada.
- Pata móvil: corresponde a la mordaza para medir el exterior de las piezas, permite ajustar la superficie de medición debido al deslizamiento que tiene.

Tabla 8.

Dimensiones de los especímenes

Número de Muestra		#1	#2	#3	#4	#5	#6	error, +/- (mm)
Tipo		SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5	A325	A35	A325	
Nomenclatura	Dimensiones	milímetros						
G	Longitud de calibre	50	50	50	50	50	50	0,05
D	Diámetro del espécimen	12,53	12,7	12,68	12,69	12,65	12,64	0,05
R	Radios	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	0,05
A	Longitud paralela a la sección	55	55	55	55	55	55	0,05
L	Longitud general aproximada	122,2	122,4	122,2	122,4	122,4	122,4	0,05
B	Longitud al final de la sección	33,5	33,6	33,5	33,6	33,6	33,6	0,05
C	Diámetro en el final de la sección	19	19	19	19	19	19	0,05

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la tabla 8 se aprecian las dimensiones de las probetas circulares de los pernos después del maquinado. Esas dimensiones también se introducen el software para el cálculo de los esfuerzos (ver ilustración 24).

3.7.8.) Dimensiones de probetas rectangulares

En el caso de las probetas rectangulares se utilizarán las siguientes dimensiones, según la norma ASTM E8M y las recomendaciones del laboratorio, en la longitud general del espécimen para que quede bien sujeta a las mordazas.

Tabla 9.

Dimensiones para especímenes rectangulares mayores a 19 milímetros de espesor

Características de los especímenes de lámina A36			
Muestra	#1	Unidad	error, +/-
Espesor	Propuesta	mm	0,05 mm
Ancho	40	mm	0,05 mm
Longitud inicial en control	200	mm	0,05 mm
radio	12,5	mm	0,05 mm
Longitud general	550	mm	0,05 mm
Ancho de extremos	50	mm	0,05 mm

Fuente: ASTM, 2016

En la tabla 9 se muestran las dimensiones que debe tener la probeta rectangular según la norma ASTM E8M.

Tabla 10.

Dimensiones de los especímenes por ensayar

Características de los especímenes de lámina A36			
Muestra	#1	Unidad	error, +/-
Tipo	A36		
Espesor	25,70	mm	0,05 mm
Ancho	40,01	mm	0,05 mm
Longitud inicial en control	200,00	mm	0,05 mm
radio	12,50	mm	0,05 mm
Longitud general	500,00	mm	0,05 mm
Ancho extremo	50,00	mm	0,05 mm

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la tabla 10 se observan las dimensiones de la probeta del acero estructural A36 después del maquinado.

3.8.) Pasos para los ensayos a los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325

- Ajuste de máquina universal de ensayo.
- Configuración del equipo para el tipo de ensayo.
- Colocación de probetas con una buena linealidad entre sus extremos.
- Cálculo de velocidad por el método Cross head speed control method. La velocidad para las propiedades en fluencia es de 0,86 mm/min y después de pasar la fluencia, de 2,8 mm/min.
- El esfuerzo se calculó mediante el offset method, con un 0,2% de la norma ASTM E8M. (ver ilustración 34)
- El porcentaje de elongación será el resultado de la relación de la longitud inicial entre la final.

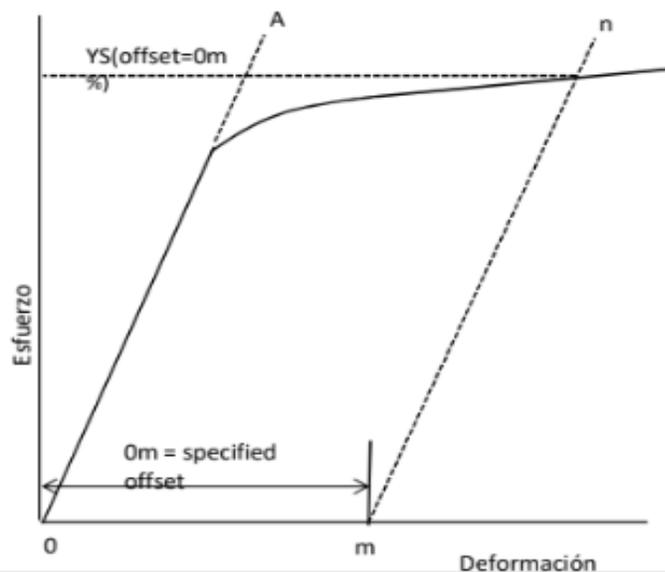


Figura 1. Método offset para la determinación del Esfuerzo de Fluencia. (Tomado de ASTM E8/E8M-16a, fig. 21).

Ilustración 34. Método offset

Fuente: ASTM E8M, 2016

3.8.1.) Datos de esfuerzos

Los datos de los esfuerzos son suministrados por el software del laboratorio, el cual brinda los datos con un gran porcentaje de confiabilidad.

3.8.1.1.) Datos experimentales de esfuerzos de los pernos SAE J429 grado 5 y los ASTM A325

Tabla 11.

Esfuerzos SAE J429 grado 5

Número de Muestra	#1	#2	#3
Tipo	SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5
Dimensiones			
Diámetro del espécimen (mm) (+- 0,1) Incertidumbre	12,53	12,7	12,68
Longitud controlada (mm) (+-0,1) Incertidumbre	50	50	50
Datos recopilados del ensayo			
Fluencia 0.2% (Mpa) (+-) Incertidumbre	701	829	739
Esfuerzo último (Mpa) (+-) Incertidumbre	924	931	929
% Elongación (mm/mm) (+-) Incertidumbre	15,35	19,83	17,01
% Reducción de área (mm ² /mm ²) (+-) Incertidumbre	48,52	59,72	48,72

Fuente: Elaboración propia, 2020

Tabla 12

Esfuerzos A325

Número de Muestra	#4	#5	#6
Tipo	A325 1	A325 2	A325 3
Dimensiones			
Diámetro del espécimen (mm) (+- 0,1) Incertidumbre	12,69	12,65	12,64
Longitud controlada (mm) (+-0,1) Incertidumbre	50	50	50
Datos recopilados del ensayo			
Fluencia 0.2% (Mpa) (+-) Incertidumbre	909	898	869
Esfuerzo último (Mpa) (+-) Incertidumbre	977	968	941
% Elongación (mm/mm) (+-) Incertidumbre	16,14	19,32	19,9
% Reducción de área (mm ² /mm ²) (+-) Incertidumbre	63,18	66,46	64,04

Fuente: Elaboración propia, 2020

Los datos de las tablas 11 y 12 son suministrados por el laboratorio del INA, incluyen valores de incertidumbre en los esfuerzos, obtenidos por el software de la máquina universal de ensayos. (Ver anexo 1)

3.8.1.2.) Gráficos esfuerzo versus deformación para los pernos SAE J429 y ASTM A325.

Los gráficos son suministrados por el software del laboratorio de materiales del INA. (Ver anexo 1)

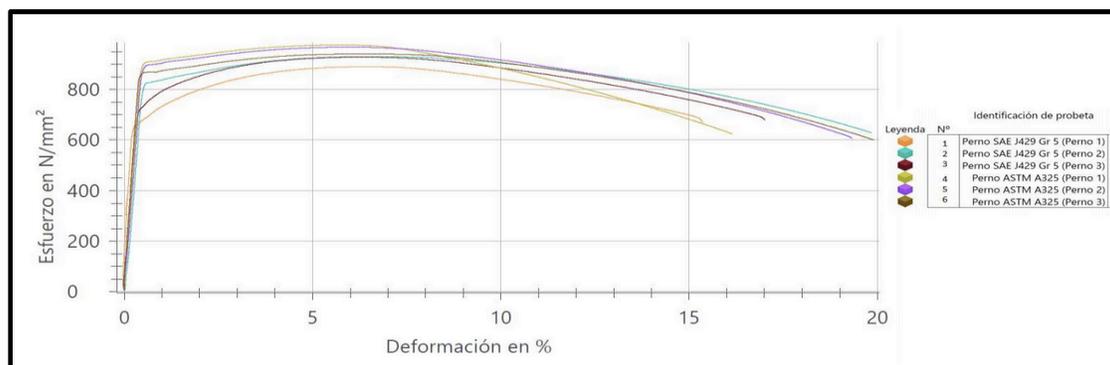


Ilustración 35. Gráficos Esfuerzos versus Deformación para los pernos SAE J429 Grado 5 y ASTM A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

3.9.) Pasos para los ensayos de acero estructural A36

- Ajuste de Máquina universal de ensayo
- Configuración del equipo para el tipo de ensayo
- Colocación de probetas con una buena linealidad entre sus extremos.
- Cálculo de velocidad por el método Cross head speed control method .La velocidad para las propiedades en fluencia es de 3, 375 mm/min y después de pasar la fluencia es de 11,25 mm/min.
- El esfuerzo se calcula mediante el offset method, con un 0,2% de la norma ASTM E8M. (ver ilustración 34)
- El porcentaje de elongación será la relación de la longitud inicial entre la final.

3.9.1.) Datos de esfuerzos para el acero A36

Tabla 13

Esfuerzos A36

Datos recopilados del ensayo lámina A36 espesor de 1 pulgada	
Número de muestra	#1
Tipo	A36
Dimensiones	
Espesor (mm)	25,70
Ancho (mm)	40,01
Datos recopilados del ensayo	
Fluencia 0.2% (Mpa) (+-) Incertidumbre	337,81
Esfuerzo último (Mpa) (+-) Incertidumbre	514,73
% Elongación (mm/mm) (+-) Incertidumbre	28,85
% Reducción de área (mm ² /mm ²) (+-) Incertidumbre	60,95

Fuente: Elaboración propia, 2020

3.9.2.) Gráficos esfuerzo versus deformación para el acero A36

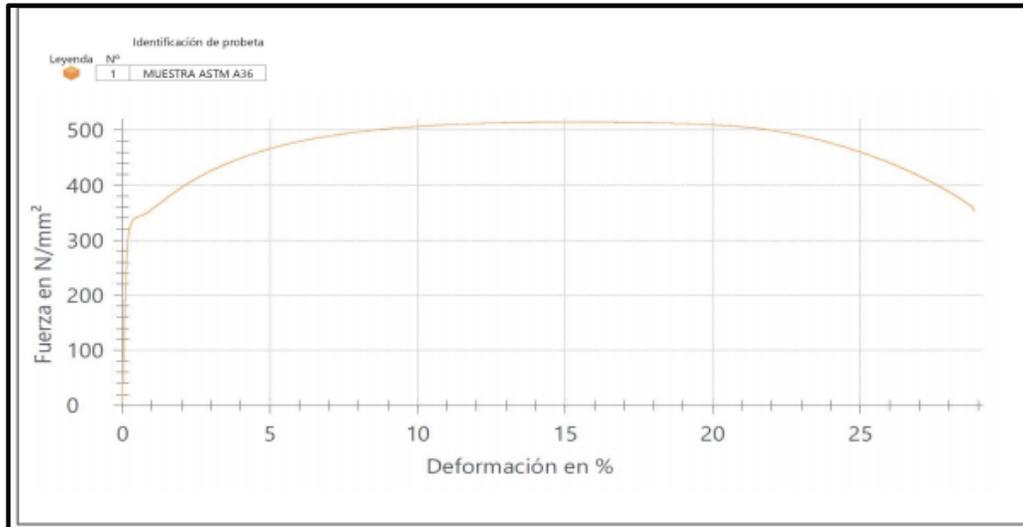


Ilustración 36. Gráficos de esfuerzo versus deformación A36

Fuente: Elaboración propia, 2020

Los valores de los esfuerzos en Mpa, porcentaje de elongación y reducción de área fueron suministrados por el laboratorio de materiales del INA. (Ver anexo 1)

3.10.) Revisión de los datos obtenidos por medio de Distribución T de Student

Una vez obtenidos los datos, se procedió a una revisión de análisis estadístico, dado que, el número de muestras es menor a 30 y la población se considerada con un comportamiento normal. Se aplicó la distribución T con un nivel de confianza de 98%. A continuación, se mencionan los pasos para aplicar el método T de Student.

- Se declara una hipótesis nula y una alternativa.

Ejemplo perno SAE grado 5

$$H_0 = \mu = X$$

$$H_1 = \mu \neq x$$

$$x = Fy 739 \text{ y } Fu 928 \text{ Mpa}$$

$$\mu = Fy 756 \text{ y } Fu 927 \text{ Mpa}$$

donde:

μ = Es la media poblacional. En este caso se utiliza el valor promedio de las tres muestras.

x = Se establece como el valor por comprobar

Al establecer la hipótesis alternativa, de no igualdad, se debe utilizar la tabla de valores críticos para distribución de dos colas.



Student

Niveles de Significancia DOS COLA

	0.500	0.250	0.200	0.100	0.050	0.025	0.020	0.010	0.005
1	1.00	2.41	3.08	6.31	12.71	25.45	31.82	63.66	127.32
2	0.82	1.60	1.89	2.92	4.30	6.21	6.96	9.92	14.09
3	0.76	1.42	1.64	2.35	3.18	4.18	4.54	5.84	7.45

Ilustración 37. Gráfica y tabla T de Student de dos colas

Fuente: <https://studylib.es/doc/4680020/tabla-de-valores-cr%C3%ADticos-de-la-distribuci%C3%B3n-t-de-student>

- Se estipuló un nivel de significancia, el cual marca el área de aceptación y no aceptación para la hipótesis. Dado que la muestra poblacional es normal, se escogió un nivel de significancia de 98% para un 2% de rechazo con 2 grados de libertad.

$$\text{Grado de libertad} = n - 1 = 3 - 1 = 2$$

donde:

n = número de muestras

Ya establecido el nivel de rechazo y los grados de libertad, utilizando la tabla de la distribución T (ver ilustración 36) para dos colas se pueden obtener los puntos críticos para el par 0,02; 2 que son de 6,96, el cual se debe comparar con el punto de prueba T.

- Para obtener el punto de prueba T se aplica la siguiente ecuación.

$$\text{Punto } T = \frac{\text{Media de las muestras} - \text{Valor establecido}}{\frac{\text{Desviación estandar de la muestra}}{\sqrt{\text{número de muestra}}}}$$

Si se observa la ecuación anterior, se notan cambios con respecto a la ecuación 14 donde se estableció que la media poblacional es la de los datos obtenidos. El valor establecido es una media hipotética, la cual, de ser aceptada la hipótesis, representará al perno; en este caso el SAE J429 en los análisis.

El punto de prueba T se compara con los puntos críticos, donde si el punto T es mayor que los puntos críticos la hipótesis es válida; de lo contrario no es válida.

$$\text{Punto } T, \text{Fu para SAE Grado 5} = \frac{927 - 928}{\frac{3,34}{\sqrt{3}}} = 0,041$$

Para este ejemplo, el valor del punto de comparación o punto T es de (-+) 0,041, donde es mayor que -6,96 y menor que 6,96. Esto indicaría que la hipótesis no se rechaza y, por

ende, los valores obtenidos por los ensayos son representativos y aceptables para los análisis.

3.11.) Comparación de datos experimentales con la literatura

Posteriormente a la recopilación de los datos de esfuerzos y deformación unitaria, por medio de los ensayos a tracción de los materiales en estudio, se procedió a realizar un análisis comparativo de los valores con respecto a la literatura expresados en las tablas 1,2 y 3, con el fin de seleccionar los valores más acertados. Los datos seleccionados fueron usados en los cálculos de las dimensiones de la conexión, y representarían los comportamientos de los materiales en los análisis numéricos por elemento finito en el programa ANSYS. Esta selección estaba fundamentada en la similitud de comportamientos de los gráficos de esfuerzo deformación de las probetas ensayadas y los gráficos de las curvas teóricas de esfuerzo deformación de los materiales.

3.12.) Conexión a doble cortante y diseño de sus dimensiones

Para el diseño de la conexión a doble cortante primero se procedió a estimar sus dimensiones necesarias con el fin de que las placas de acero estructural A36 no sufrieran deformaciones plásticas significativas que llegaran a provocar posibles incertidumbres en ensayos posteriores. La solución radicó en utilizar los datos de los esfuerzos experimentales de los materiales y aprovechar su sobre resistencia. Se propuso utilizar los valores máximos de los esfuerzos a tracción. La literatura indica que la resistencia a cortante para pernos es el 60% del esfuerzo último a tracción, el cual se relacionó con la magnitud de la fuerza que podría soportar dicho perno para conocer el espesor de las placas de acero estructural A36. Se efectuó una relación de la magnitud de fuerza necesaria para llegar a la falla del perno y

la magnitud de la fuerza que debe soportar la sección de placa por aplastamiento.

En el diseño de la conexión a doble cortante se utilizaron los valores de los datos obtenidos en los ensayos a tracción de los pernos y del acero estructural A36; las dimensiones se calcularon mediante las especificaciones para estructuras de acero, por AISC 360-16 y la guía de diseño presente en Steel Design, 2016.

3.13.) Diseño de conexión doble cortante

El diseño típico de conexión apernada a doble cortante es el siguiente:

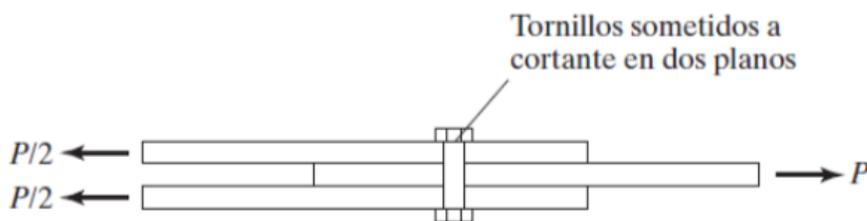


Ilustración 38. Conexión típica doble cortante

Fuente: Diseño de estructuras de acero McCormac and Csernak, 2010, p. 400

3.13.1.) Capacidad del perno

Para calcular la capacidad del perno se utilizaron los valores de los esfuerzos de las muestras más representativas, los cuales fueron seleccionados utilizando las técnicas como el análisis estadístico T y la comparativa entre los gráficos de la literatura (ver ilustraciones 54, 55, 57 y 58) y los obtenidos por datos experimentales de esfuerzo y deformación. A continuación, se presentan los valores de los esfuerzos para cada una de las probetas de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325.

Tabla 14

Propiedades mecánicas de pernos de los ensayos por ensayos a tracción

Propuesta de propiedades de los pernos			
Tipo	Valores		
	Grado 5	A325	Unidades
Esfuerzo de fluencia, F_y	739,40	868,6	Mpa
	107,24	125,9	Kips
	7539,81	8857,2	Kg/cm ²
Esfuerzo último, F_u	928,50	941,2	Mpa
	134,67	136,5	Kips
	9468,10	9598,0	Kg/cm ²
Área sección transversal para perno de 3/4 pulg, A_n	2,85	2,85	cm ²
	0,44	0,44	Pulg ²
Resistencia al cortante, F_{nv}	557,10	564,7	Mpa
	80,80	81,9	Kips
	5680,86	5758,8	Kg/cm ²

Fuente: elaboración propia, 2020

En la tabla 14 se observan los datos seleccionados para realizar los cálculos de capacidad de los pernos, que también representarán los comportamiento elástico e inelástico para los modelos numéricos por elemento finito. Se escogió la probeta 3 para representar al perno SAE J429 grado 5 y la probeta 6 para el perno ASTM A325.

3.13.2.) Cálculo de la magnitud de la fuerza para la falla de los pernos

$$R_n = F_{nv}A_b$$

donde:

F_{nv} : resistencia al cortante en kg/cm²

A_b : área transversal del perno en cm²

- Cálculo de R_n para perno SAE grado 5 en conexión a doble cortante

$$R_n = F_{nv} * A_n$$

$$R_n = 0,6 * 9468,1 * 2.835 = 32,4 \text{ ton}$$

- Cálculo de R_n para perno ASTM A325 en conexión a doble cortante

$$R_n = 0,6 * 9598,01 * 2.835 = 32,8 \text{ ton}$$

3.13.3.) Diseño de las placas de la conexión

Con los resultados del análisis de la capacidad a cortante del perno se pueden estimar los espesores mínimos para las placas.

- Revisión 1. Cuando la deformación en el orificio del perno es una consideración de diseño.

$$R_n = 2,4dt * f_u$$

despejando la ecuación anterior

$$t = \frac{R_n}{2,4 * f_u * d}$$

donde:

R_n: resistencia al cortante del perno

d: diámetro del perno

t: espesor de la placa

f_u: esfuerzo último de la placa

- Revisión 2

$$R_n = 1,2 * l_c * t * f_u$$

despejando la ecuación anterior

$$t = \frac{R_n}{1,2l_c * f_u}$$

donde:

Rn: resistencia a cortante del perno

t: espesor de la placa

fu: esfuerzo último de la placa

Lc: distancia del centro del orificio al borde de la parte conectada

Las propiedades mecánicas de las placas se adjuntan en la siguiente tabla, para un acero estructural A36. Los datos expresados corresponden a datos teóricos y experimentales realizados en la presente investigación.

Tabla 15

Propiedades mecánicas teóricas y experimentales del acero A36

Valor de esfuerzos		
Muestra	#1	Unidad
Tipo	A36	
Esfuerzo último (Kg/cm ²)	5050,77804	Kips
Esfuerzo último (Mpa)	495,32	Mpa
Esfuerzo último (Kips)	71,83992497	Kips
Esfuerzo teórico Fu	4078,8	Kg/cm ²
Esfuerzo teórico Fu	400	Mpa
Esfuerzo teórico Fu	58	Kips

Fuente: elaboración propia, 2020

Para obtener las dimensiones de las láminas de acero estructural A36 que conformarían la conexión a doble cortante, se procedió a realizar una serie de comparaciones de los posibles espesores que debería tener la conexión. Para los cálculos se utilizó la capacidad al aplastamiento de las placas de los valores de esfuerzos experimentales y teóricos del acero estructural A36. Como dato teórico se usó el esfuerzo último teórico de 4078,8 kg/cm² y como valor experimental el de 5050,77 kg/cm². Para obtener los espesores se igualaron las ecuaciones de capacidad nominal a cortante de los pernos (ver ecuación 10) con la ecuación de capacidad al aplastamiento de las placas (ver ecuación 11).

Tabla 16

Memoria de cálculo de los posibles espesores para las placas A36

Cálculo de espesor con valores experimentales para el Acero A36, ($1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot fu$)							
Número de Muestra	#1	#2	#3	#4	#5	#6	Unidades
Tipo	SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5	A325	A35	A325	
Rn	32235,1	32466,0	32380,9	34062,9	33751,8	32825,2	kg
h	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	cm
le	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	cm
Lc	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	cm
fu	5050,8	5050,8	5050,8	5050,8	5050,8	5050,8	kg/cm ²
t	1,91	1,93	1,92	2,02	2,00	1,95	cm
Cálculo de espesor con valores teóricos para Acero A36, ($1,2 \cdot L_c \cdot t \cdot fu$)							
Número de Muestra	#1	#2	#3	#4	#5	#6	Unidades
Tipo	SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5	A325	A35	A325	
Rn	32235,1	32466,0	32380,9	34062,9	33751,8	32825,2	kg
h	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	cm
le	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	cm
Lc	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	cm
fu	4078,8	4078,8	4078,8	4078,8	4078,8	4078,8	kg/cm ²
t	2,37	2,39	2,38	2,51	2,48	2,41	cm
Cálculo de espesor con valores experimentales para el Acero A36, ($2,4dt \cdot fu$)							
Número de Muestra	#1	#2	#3	#4	#5	#6	Unidades
Tipo	SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5	A325	A35	A325	
Rn	32235,1	32466,0	32380,9	34062,9	33751,8	32825,2	kg
d	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	cm
fu	5050,8	5050,8	5050,8	5050,8	5050,8	5050,8	kg/cm ²
t	1,40	1,41	1,40	1,48	1,46	1,42	cm
Cálculo de espesor con valores teóricos para Acero A36, ($2,4dt \cdot fu$)							
Número de Muestra	#1	#2	#3	#4	#5	#6	Unidades
Tipo	SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5	A325	A35	A325	
Rn	32235,1	32466,0	32380,9	34062,9	33751,8	32825,2	kg
d	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	cm
fu	4078,8	4078,8	4078,8	4078,8	4078,8	4078,8	kg/cm ²
t	1,73	1,75	1,74	1,83	1,81	1,76	cm

Fuente: elaboración propia, 2020

En la tabla 16 se presentan las posibles dimensiones que deberían tener los espesores de las placas de acero estructural A36 de la conexión por fabricar. En este punto, también se aplica una revisión previa a la propuesta final mediante un análisis numérico por elemento finito con un comportamiento estático, esto con el fin de observar si las posibles plastificaciones virtuales de las placas del acero estructural A36 eran mayores a las esperadas y de ser así, reconsiderar los espesores propuestos antes de establecerlos como las dimensiones de los espesores de las placas por utilizar en la fabricación de la conexión real. Con estos espesores se buscaba garantizar que en el ensayo real a doble cortante los desplazamientos registrados fueran propiamente los del perno y no los de las placas por una deformación por aplastamiento. Con estas revisiones se propusieron las dimensiones finales para minimizar la plastificación de la conexión, las cuales debían pasar por la revisión y aceptación del laboratorio. Estas debían cumplir con ciertas observaciones dadas por los ingenieros del laboratorio de materiales del INA para que la conexión quedara bien sujeta en la máquina universal de ensayos y así obtener tener el visto bueno por los encargados del laboratorio para realizar los ensayos personalizado a doble cortante. Los pasos mencionados tenían el fin de minimizar posibles incertidumbres en los datos y garantizar en lo posible una buena recolección de datos y la seguridad de los profesionales que realizarían los ensayos a doble cortante. Se propusieron las siguientes dimensiones de espesor para la fabricación de la conexión real y para los modelados numéricos por elemento finito.

Tabla 17

Propuesta de dimensiones para la conexión a doble cortante

Propuesta de dimensiones			
Características de placa de Acero A36		Valor	Unidad
Placa Central	Espesor	3,81	cm
	Ancho	10,16	cm
	Largo	255,0	cm
	Área sección transversal neta	36,6496	cm ²
	Perforación para perno	1,9	cm
	Longitud del centro de perforación al borde	6,5	cm
Placas Exteriores	Espesor	2,54	cm
	Ancho	10,16	cm
	Largo	255,0	cm
	Área sección transversal neta	47,4928	cm ²
	Perforación para perno	1,9	cm
	Longitud del centro de perforación al borde	6,5	cm

Fuente: elaboración propia, 2020

Como se observa en la tabla 17, los espesores de las placas propuestos son superiores a los de los cálculos de la tabla 16, y aunque con espesores menores se cumplía el criterio de diseño, se propusieron mayores ya que al modelar la conexión por el programa ANSYS las placas presentaron plastificaciones considerables que podría provocar incertidumbres en los datos que se deseaban recolectar de los ensayos a doble cortante.

Por lo tanto, es importante recalcar la toma de decisiones en cuanto a las dimensiones de las placas de acero, en especial el espesor de la placa interior ya que allí es donde se sujeta la conexión real en la máquina universal de ensayos. De ahí que fuera importante conocer el espesor ya que cuando las muelas de la máquina sujetaban las placas estas tendían a aumentar

o disminuir la distancia entre muelas; y este movimiento estaba en función del espesor de las placas, lo que provocaba que la longitud total de la conexión se tuviera que establecer para garantizar un buen agarre con la mayor área de contacto posible entre las muelas y las placas centrales de la conexión. Esto minimizaría la posibilidad de deslizamiento en los extremos y que los datos obtenidos no contaran con posibles incertidumbres adicionales. La longitud total de la conexión real se estableció en 49,2 cm con una longitud de agarre de aproximadamente 14 centímetros en los extremos. Todo lo anterior es consecuencia de que no exista una norma o tipo de conexión ya establecida para realizar ensayos a doble cortante en pernos.

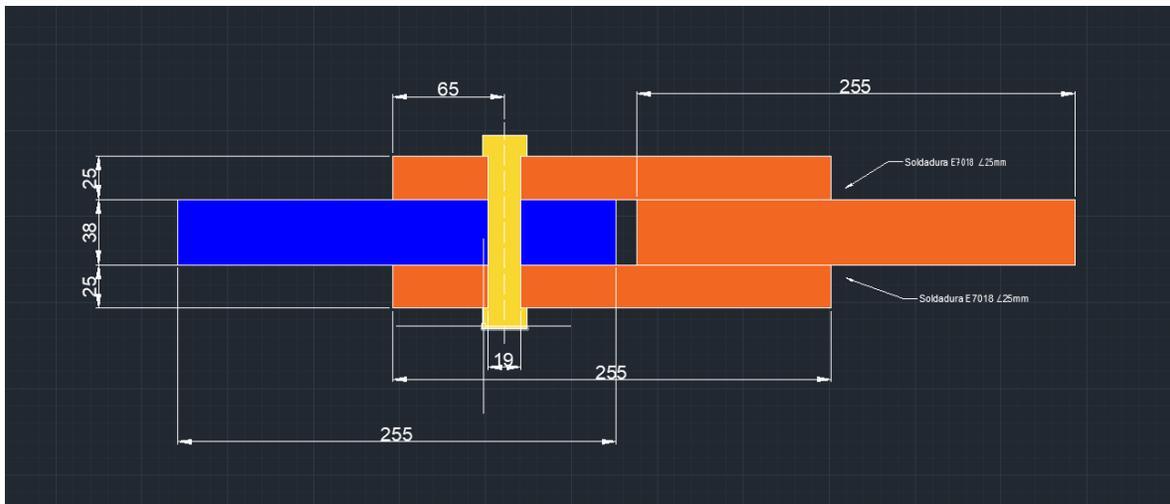


Ilustración 39. Dimensiones para conexión real

Fuente: elaboración propia, 2020

Aparte de la longitud necesaria, también se debía de garantizar una buena linealidad entre los extremos de la conexión, por lo cual se propuso que la longitud total se obtendría con otra placa interna de acero estructural A36 de 3,81 centímetros de espesor.

3.14.) Modelado en ANSYS

En el modelado numérico por elemento finito mediante del programa ANSYS se emplearon las mismas dimensiones de las placas utilizadas para la fabricación de la conexión real. En este punto de la investigación, se tomó la decisión de optimizar la conexión virtual dibujada en SpaceClaim por medio de un análisis previo, donde de manera virtual se analizaron los depósitos de soldadura que demostraron que la esta tenía la capacidad de mantener sujetas las tres placas del lado soldado de la conexión (ver ilustración 40). Lo anterior brindó la posibilidad de optimizar el modelo y con esto reducir la necesidad de realizar mallados más finos, los cuales implicarían mayor capacidad computacional para los modelados. Los modelos consistieron en realizar dos conexiones, una para el perno SAE J429 grado 5 y otra para el perno ASTM A325, ya que estos presentaban geometrías distintas en su cabeza hexagonal y en sus respectivas tuercas. A continuación, se presentan los pasos por seguir para realizar los modelos.

- Realizar la geometría de la conexión en ScapeClaim; una por cada perno.
- Introducir los valores experimentales de las propiedades mecánicas asignadas para caracterizar el comportamiento de los materiales perno SAE J429, ASTM A325 y acero estructural A36 de las placas.
- Realizar una mallado en el sólido que representa la conexión y el conector, de manera que su arista tenga una buena conexión.
- Para el modelado se fijará un extremo de la conexión y se le aplicará una fuerza igual a la del ensayo real a doble cortante para cada tipo de perno.

- Se realizará una calibración del programa comparándolo con los datos experimentales
- Se utilizarán los programas ya calibrados para efectuar comparación entre los pernos.

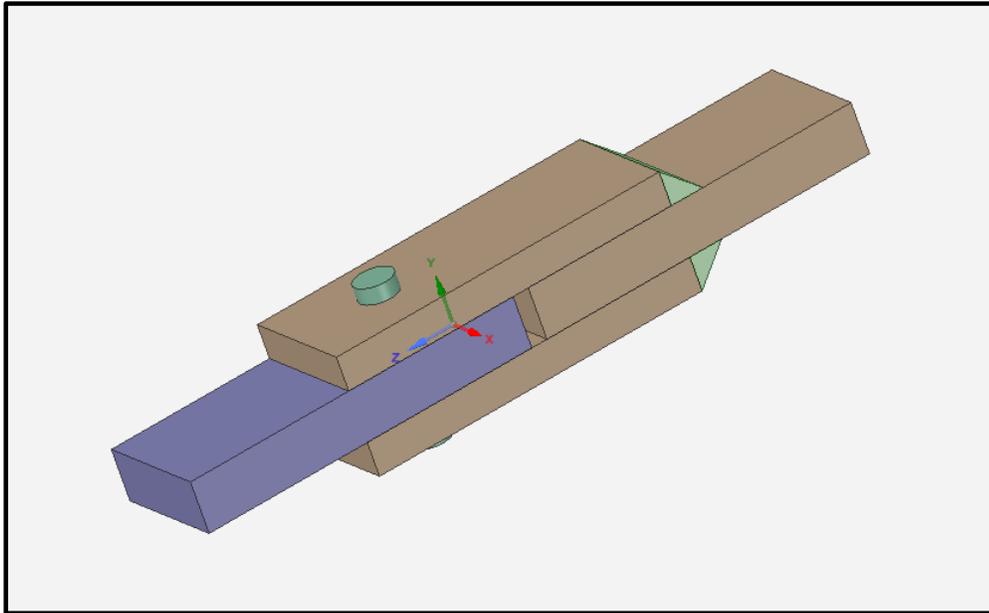


Ilustración 40. Conexión virtual realizada en SpaceClaim

Fuente: elaboración propia, 2020

Para realizar los modelados por el programa ANSYS se utilizó la opción de los sistemas de análisis, llamada estructuras estáticas (Static Structural). Para ello, primero se necesitaba caracterizar los comportamientos de los materiales en estudio por medio de las opciones del programa ANSYS. Este posee la opción de crear nuevos materiales en la pestaña de ingeniería de datos, donde se pueden caracterizar los comportamientos de sus propiedades por medio de datos. Para caracterizar el comportamiento del material en el rango elástico se utilizó la opción llamada datos experimentales hiperelásticos (hyperelastic experimental

data), donde se despliegan opciones para introducir datos de pruebas realizadas a los materiales. De las opciones posibles, se utilizó la llamada datos por ensayos uniaxiales a tensión (Uniaxial Tension Test Data), ya que se contaba con datos de pruebas de este tipo; aquí se iban agregando como pares ordenados los valores experimentales de los esfuerzos y las deformaciones unitarias de las probetas seleccionadas.

Tabla 18

Valores experimentales para desarrollar la gráfica de esfuerzo y deformación de los materiales SAE J429 grado 5, ASTM A325 y A36

A325		Grado 5		A36	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
0	0	0	0	0	0
-5,77205E-06	4,609907459	-4,87204E-06	4,698020406	1,65E-06	5,079049
6,44526E-05	10,91018417	-4,68004E-05	8,832236719	0,000171	36,93998
4,58524E-05	17,06879899	-0,000108001	14,28434398	0,000443	93,76254
1,00921E-05	25,35222244	-0,000140401	21,35734051	0,000827	165,6122
-1,04161E-05	38,1536388	-0,000220802	31,94060839	0,001313	243,6518
1,79402E-05	55,51058668	-0,000145201	48,77935353	0,002273	316,819
7,63567E-05	79,29087213	7,45686E-05	73,70318348	0,00276	327,4082
0,000215474	110,7630764	0,000265154	109,1825802	0,003452	335,092
0,000440164	150,4447786	0,000505204	153,1113735	0,003859	337,8408
0,000685459	200,5501621	0,000775207	203,4483038	0,004297	339,7886
0,000947062	257,4529658	0,001079782	258,5743406	0,005277	342,3397
0,001230265	317,9831044	0,001372814	317,3489746	0,006306	344,0469
0,001530041	381,2123815	0,001650749	379,6628086	0,01018	357,3274
0,001838985	445,6890598	0,001962261	444,1416912	0,016496	382,2172
0,002149478	510,6628496	0,002272345	510,0744261	0,022211	403,004
0,002458686	575,9291347	0,002608998	577,2331247	0,027967	420,5227
0,002775648	641,1430285	0,002966016	644,6491297	0,033571	434,8503
0,002838781	654,2693969	0,00306011	657,9692359	0,038985	446,7858
0,002899058	667,3757177	0,003170452	671,0612372	0,044552	457,3652
0,002961111	680,5314726	0,003318042	683,6409148	0,050404	466,7963
0,003020824	693,7999796	0,003513226	695,7268289	0,056547	475,2393
0,003083093	707,0106475	0,003739682	707,2039681	0,062961	482,5987
0,003402299	773,4788844	0,005364517	739,4333405	0,069658	489,0302
0,003848708	837,2279354	0,005981932	748,8971299	0,076587	494,4422
0,005973861	868,792346	0,007303217	766,2391719	0,083727	499,0984
0,008343261	868,5494715	0,008784376	782,0564307	0,091073	502,9362
0,012100333	879,6185975	0,012682084	813,8542164	0,098629	506,1695
0,018985437	893,5294363	0,01844757	846,4959966	0,106368	508,725
0,025673842	907,7289726	0,024554367	872,7745325	0,1143	510,7925
0,032423351	919,9945405	0,031027133	893,4336553	0,122408	512,362
0,03938823	929,4417428	0,037909238	908,922584	0,13069	513,4939
0,046585989	935,8809994	0,045220222	919,6227928	0,139134	514,275
0,054038687	939,6704894	0,053016105	925,9502779	0,147739	514,608
0,061730518	941,157372	0,061299219	928,396328	0,156473	514,6354
0,069696631	941,23	0,079351888	920,4155612	0,17437	513,7616
0,086353912	929,3583773	0,098751869	888,264946	0,192649	511,3082
0,103996458	899,8311615	0,11853528	845,1506907	0,211286	505,2829
0,122664661	860,5260206	0,138828678	792,9749076	0,230158	489,4967
0,142516079	810,728962	0,161431561	721,7820854	0,249135	461,6941
0,164740829	742,0912287	0,170070381	678,4459118	0,268296	420,899
0,1889888	647,6282948			0,287703	360,9102
0,196652756	612,6878599			0,288462	353,3466

Fuente: elaboración propia, 2020

Los valores de esfuerzo y deformación unitaria de la tabla 18 se iban agregando como pares ordenados en la opción datos de prueba a tensión uniaxial; a su vez se iba creando el gráfico de esfuerzo-deformación. En la tabla 18 los pares de los puntos de fluencia están en las casillas verdes; los que representan la curva de endurecimiento por deformación están en las casillas de color amarillo y los pares de los esfuerzos últimos están en las anaranjadas.

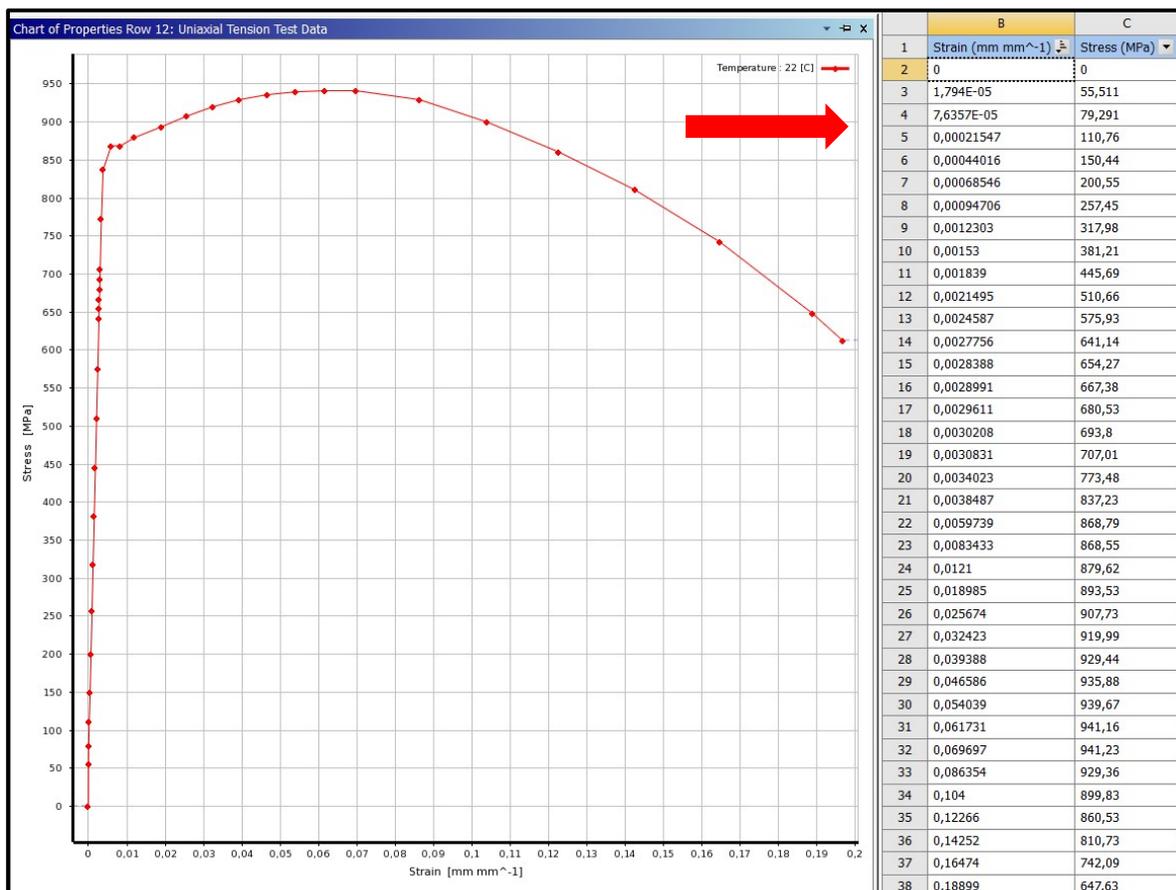


Ilustración 41. Creación de nuevos materiales con datos experimentales a ANSYS Engineering Data, Uniaxial Tension Test Data

Fuente: elaboración propia, 2020

En la ilustración se puede apreciar cómo se formó el gráfico de esfuerzo-deformación al ir introduciendo los datos experimentales con una fecha de color rojo en la ilustración.

Se necesitaba caracterizar el comportamiento del material en el rango inelástico, propiamente en la sección de la curva donde se forma el fenómeno de endurecimiento por

deformación, para el cual se escogió la opción de comportamiento en ingeniería de datos llamada plasticidad (Plasticity), que brinda la opción de caracterizar el material en este rango de endurecimiento. Para este modelado, la opción más adecuada era el endurecimiento isotrópico multilineal (Multilinear Isotropic Hardening), el cual caracteriza el comportamiento del material en el rango plástico muy efectivo cuando existen grandes deformaciones. Esta opción era la más adecuada según la teoría de ANSYS *help* y las características del ensayo a doble cortante; los pares para este tipo de comportamiento se introdujeron con base en la teoría del ANSYS *help*. Comienzan después del punto de fluencia con un valor de cero deformación y el valor de punto de fluencia, agregando pares hasta la deformación con el máximo esfuerzo del rango plástico. (ver tabla 18 e ilustración 42)

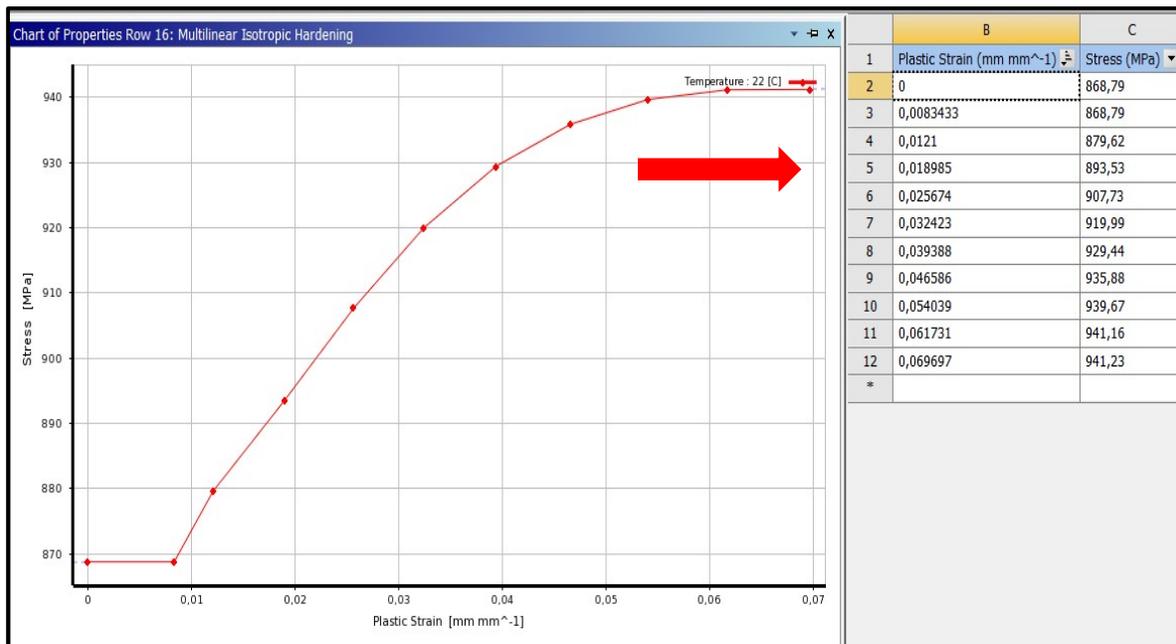


Ilustración 42. Creación de nuevos materiales con datos experimentales a ANSYS Engineering Data, Multilinear Isotropic Hardening

Fuente: elaboración propia, 2020

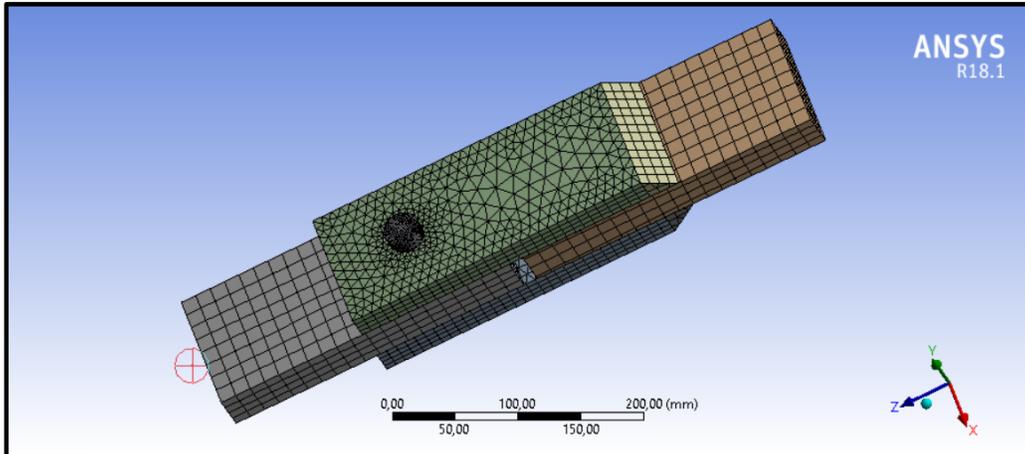


Ilustración 43. Demostración del mallado de los sólidos ANSYS, Static Structural, Mechanical

Fuente: elaboración propia, 2020

La calidad del mallado es muy importante porque ayuda a tener una mejor aproximación en los resultados. Está en función del tipo de mallado métrico escogido para generar la malla. Para los modelados se propuso el Skewness como global y dos mallados MultiZone, donde uno era para el perno y otro para las placas de acero. Ambos con un Mapped Mesh Type en hexágono y un Body Sizing con elementos de 5 milímetros para el perno. Para las superficies en contacto con el perno se creó un Mapped Mesh Type en Prisca, todo con el fin de cumplir con los parámetros recomendados por la teoría en la calidad del mallado.

En la ilustración 44 se pueden observar los valores de la malla y su calidad en relación con el tipo de geometría y los valores logrados en el modelo en ANSYS.

The following table lists the range of **skewness** values and the corresponding cell quality.

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 — < 1	bad (sliver)
0.75 — 0.9	poor
0.5 — 0.75	fair
0.25 — 0.5	good
> 0 — 0.25	excellent
0	equilateral

Details of "Mesh"

Automatic Mesh Based Defeaturing	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,271470 mm)
Minimum Edge Length	3,0 mm
<input checked="" type="checkbox"/> Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
<input type="checkbox"/> Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)	Default (0.040000)
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,3707e-003
<input type="checkbox"/> Max	0,42286
<input type="checkbox"/> Average	9,9282e-002
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	9,026e-002

Ilustración 44. Comparación de calidad del mallada

Fuente: elaboración propia, 2020

3.15.) Fabricación de conexión real

Para la fabricación se utilizó material de la misma lámina de acero estructural A36 utilizada para la probeta del ensayo a tracción de dicho material. Se realizó en el taller de Servicios Profesionales en Soldaduras Especiales, Alajuela, Costa Rica, ya que cuenta con la

experiencia y los estudios en el área de la metalmecánica tales como en la fabricación de elementos de estructuras metálicas y procesos de soldadura de especiales. Para ello, el material se cortó por medio de sierra y del proceso de corte con plasma cuya radiación térmica es menor que la de otros tipos de corte, lo que minimiza la formación de esfuerzos residuales y la pérdida de resistencia. La conexión está compuesta por tres sólidos: una placa de acero estructural A36 de 38,1 milímetros de espesor con una perforación de $\frac{3}{4}$ de pulgada a 65 milímetros del borde, un perno SAE J429 grado 5 de $\frac{3}{4}$ de pulgada o un perno ASTM A325 de $\frac{3}{4}$ de pulgada y un sólido compuesto por dos placas de acero estructural A36 de 25,4 milímetros de espesor con una perforación cada uno de $\frac{3}{4}$ de pulgada a 65 milímetros del borde y una placa de 38,1 milímetros. Estas tres placas están unidas por depósitos de soldadura por medio del proceso de soldadura S.M.A.W con electrodos E7018 de $\frac{1}{8}$ de pulgada de diámetro en su núcleo.

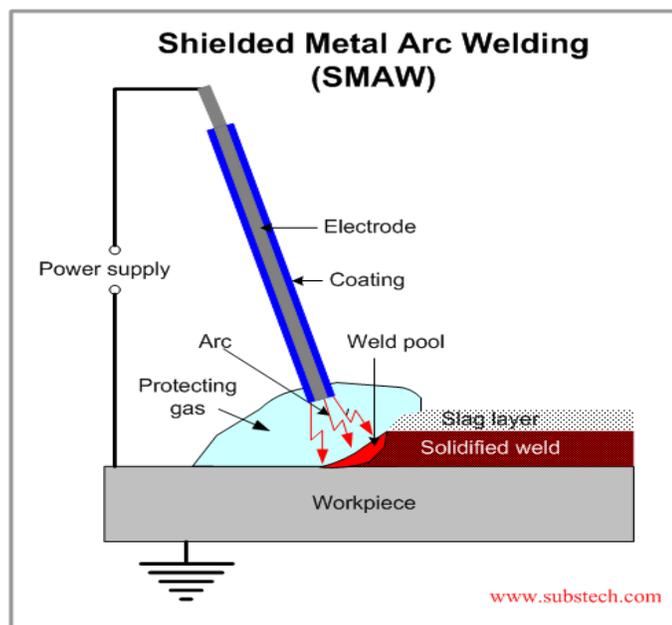


Ilustración 45. Proceso de Soldadura S.M.A.W

Fuente: www.subtech.com

En la ilustración 45 se puede observar el proceso utilizado para unir las partes de la conexión.



Ilustración 46. Proceso de fabricación conexión a doble cortante

Fuente: elaboración propia, 2020

En las imágenes de la ilustración 46 se observa el material antes de la construcción. Los cortes de las láminas fueron realizados con sierra y enfriados con un fluido especial para no aportar calor cuando se estaba cortando y evitar que los materiales no presentaran cambios en su estructura metalográfica y en su resistencia por pérdidas de elementos aleantes del acero. También se puede observar el proceso de aporte de soldadura en filete por medio de una serie de colocación de depósito de soldadura, y por último, la perforación realizada con una broca de acero HSS de 19 mm de diámetro.



Ilustración 47. Conexión a doble cortante A36 final

Fuente: elaboración propia, 2020

La ilustración 47 muestra la conexión terminada. Dado que se buscaba reflejar la misma conexión de las pruebas virtuales, el espacio entre las caras de las placas era mínimo, por lo que aplicar el proceso de soldadura, el material tuvo una expansión volumétrica que dificultó remover la placa central. Para solucionar el problema se optó por hacer un pulido en las caras de la placa central y aumentar el espacio entre las placas.

3.16.) Ensayo a cortante real

El cuidado que se tomó para realizar este ensayo es el reflejo de todos los pasos anteriormente mencionados, tales como la importancia de los espesores de las placas, la revisión por los ingenieros del laboratorio de materiales para que fuera aceptada la conexión y la linealidad entre los extremos donde se sujetaría la conexión real. Estos fueron

fundamentales para realizar los ensayos con el control adecuado y minimizar posibles errores en los datos.

Una vez terminada la conexión real se llevó a las instalaciones de la Ciudad Tecnológica Mario Echandi para ser utilizada con la máquina universal de ensayos, donde se realizarían ensayos destructivos a cortante personalizados, para los pernos SAE grado 5 de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro y a los pernos A325 de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro. Para realizar este tipo de ensayos, por recomendación del laboratorio, se cubrieron los pernos con un material polímero elastómero (hule de neumático para bicicleta) para evitar que al llegar a la falla salieran expulsados, causando daño tanto a los profesionales que estaban realizando el ensayo, como al equipo.

Pasos para realizar el ensayo:

- Colocar el perno grado 5 o el perno A325.
- No aplicar pretensión.
- Colocar paralelamente la conexión en la línea de acción de la fuerza de la máquina universal de ensayo.
- Colocar un elemento elastómero para proteger la expulsión de algún elemento del perno.
- Programar el equipo aplicando un desplazamiento por unidad de tiempo, ensayo de características cuasi estático, 3.5 mm/min.
- Recopilar los datos de esfuerzo cortante y desplazamiento.
- Llegar hasta la ruptura.
- Repetir proceso para el otro perno.



Ilustración 48. Ensayo a cortante personalizado

Fuente: elaboración propia, 2020

En la ilustración 48 se observa la colocación y alineación de la conexión. Es muy importante la calidad de linealidad entre los extremos de la conexión, ya que las muelas de la máquina se desplazan linealmente entre sí y montar una conexión con mala linealidad provocaría presión entre las placas, generando mayor fricción e incertidumbres en los datos recolectados.

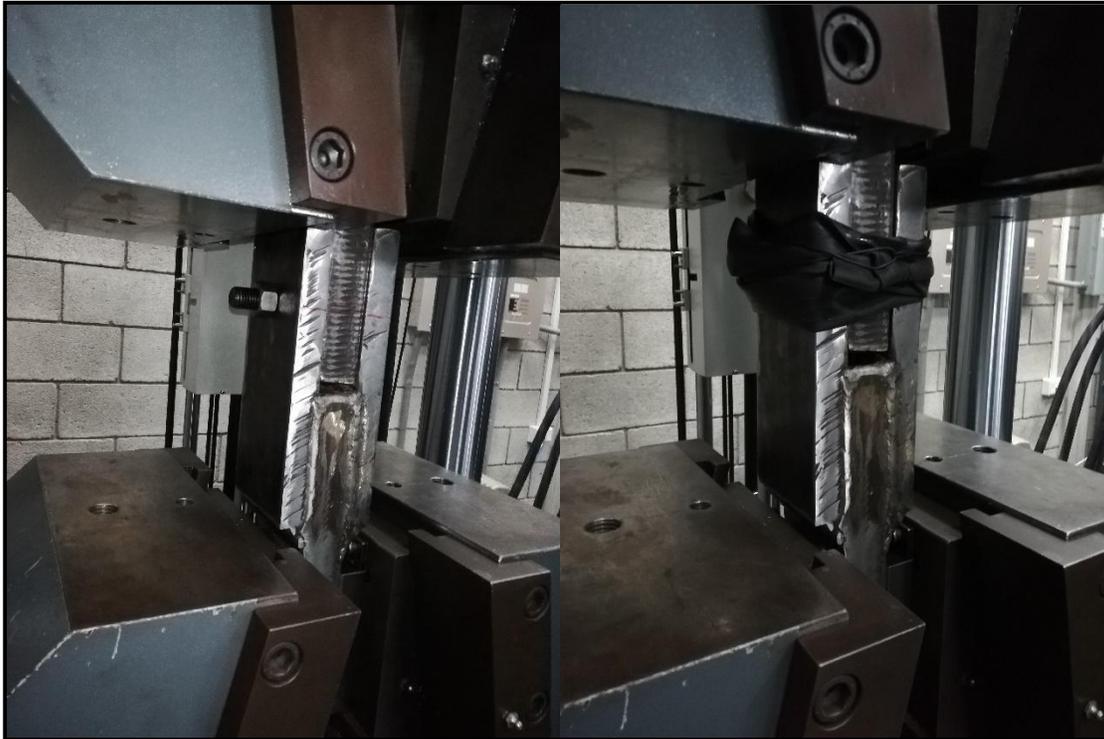


Ilustración 49. Conexión para ensayo a cortante personalizado

Fuente: elaboración propia, 2020

En la ilustración 49 se puede observar la proyección que se realizó a petición del laboratorio, para la protección de los profesionales que realizaban las pruebas y el equipo de ensayo.

Una vez realizado el ensayo a doble cortante, se recopilaban los datos de desplazamiento y fuerza aplicada que llevaron a los pernos a la ruptura.

Tabla 19.

Desplazamiento, fuerza y esfuerzo a cortante de los ensayos a doble cortante

Perno SAE J429 grado 5 de 19 milímetros de diámetro			Perno ASTM A325 de 19 milímetros de diámetro		
Desplazamiento	Fuerza aplicada	Esfuerzo cortante promedio	desplazamiento	Fuerza aplicada	Esfuerzo cortante promedio
mm	KN	Mpa	mm	KN	Mpa
0,00	4,45	7,840	0,00	4,31	7,597
0,51	11,47	20,225	0,51	8,37	14,754
1,08	22,09	38,964	1,08	14,67	25,871
1,64	37,00	65,247	1,64	25,34	44,693
2,20	57,82	101,960	2,20	39,84	70,265
2,76	85,90	151,484	2,76	58,99	104,040
3,33	118,60	209,163	3,33	83,16	146,649
3,89	153,95	271,491	3,89	109,96	193,916
4,45	191,81	338,270	4,45	142,33	251,009
4,61	197,21	347,784	5,01	179,72	316,952
4,61	196,26	346,114	5,58	217,02	382,723
4,70	209,36	369,222	6,14	253,07	446,301
5,26	244,07	430,426	6,70	287,60	507,199
5,82	276,61	487,811	7,26	316,48	558,124
6,39	304,62	537,208	7,83	335,64	591,910
6,95	326,44	575,684	8,39	345,61	609,493
7,51	341,59	602,408	8,87	349,03	615,529
8,17	352,25	621,213	9,14	343,74	606,205
8,68	355,49	626,928	10,87	116,88	206,116
9,80	276,55	487,702	10,94	93,31	164,562
10,41	136,54	240,790			

Fuente: elaboración propia, 2020

En la tabla 19 se observan los desplazamientos, la fuerza aplicada y el esfuerzo cortante promedios a los que estaban sometidos los pernos grado 5 y el A325 de 19 milímetros de diámetro, y se marca con anaranjado los esfuerzos máximos a doble cortante y sus desplazamientos totales.

3.17.) Análisis virtual dinámico de la conexión a doble cortante por el método elemento finito en ANSYS

Este punto de la investigación se realizó por medio del software ANSYS Workbench, una conexión con las mismas dimensiones que la real (ver ilustración 39), con el fin de llegar a comparar la ruptura de forma virtual de los pernos. Para lograr esto se crearon los materiales con un comportamiento bilineal utilizando la opción de Bilinear Isotropic Hardening, que consiste en darle un comportamiento lineal en el rango elástico y un comportamiento no lineal simplificado en el rango inelástico, es decir un comportamiento bilineal al material, cuyo rango elástico está bajo la ley de Hooke mediante un módulo de Young establecido por la relación del esfuerzo elástico y su deformación unitaria; para el rango plástico el comportamiento se estableció mediante el módulo tangencial que es la pendiente de la recta proveniente de la relación del delta de los esfuerzos y el delta de deformación desde la interfaz de los rangos hasta su esfuerzo máximo.

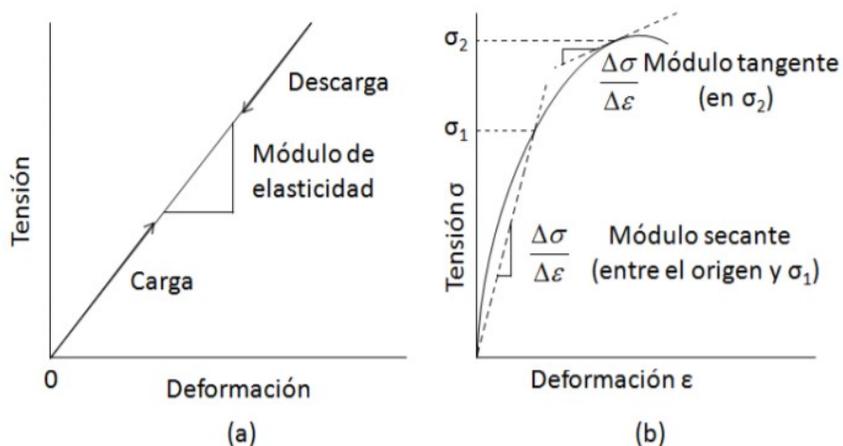


Figura 2. (a) Diagrama esquemático tensión – deformación con deformación elástica lineal para ciclos de carga – descarga. (b) Diagrama esquemático tensión – deformación mostrando comportamiento no lineal, y como se determinan los módulos secante y tangente.

Ilustración 50. Módulo Tangencia

Fuente: Universidad Austral de Chile, 2012.

Es importante aclarar por qué se usó el comportamiento bilinear, el modelo numérico por elemento finito mediante análisis dinámico llamado *explicit dynamics* fue con el único con el que se logró la falla por ruptura en los pernos, necesario para calibrar el programa. Este tipo de análisis no acepta comportamientos multilineales en los materiales y el del rango inelástico es no lineal, lo cual se representa por una curva en el gráfico de esfuerzo-deformación. Esta curva está formada por muchas líneas entre pares ordenados, es decir es multilineal, por lo que se necesitaba analizar la zona inelástica y la opción para lograrlo fue simplificar el comportamiento no lineal por medio del módulo tangencia.

Tabla 20.

Módulo tangencial para SAE J429 grado5, ASTM A325, Acero A36 en Mpa

ASTM A325		SAE J429 Grado 5		Lamina de Acero A36	
<i>Esfuerzo de fluencia</i>	868	<i>Esfuerzo de fluencia</i>	827	<i>Esfuerzo de fluencia</i>	337
<i>Módulo tangencial</i>	1137	<i>Módulo tangencial</i>	1650	<i>Módulo tangencial</i>	1158

Fuente: elaboración propia, 2020

Una vez calculados los valores de los módulos con los valores de la Tabla 18, se introdujeron en la opción de caracterización del comportamiento plástico bilinear Isotropic Hardening (ver ilustración 51).

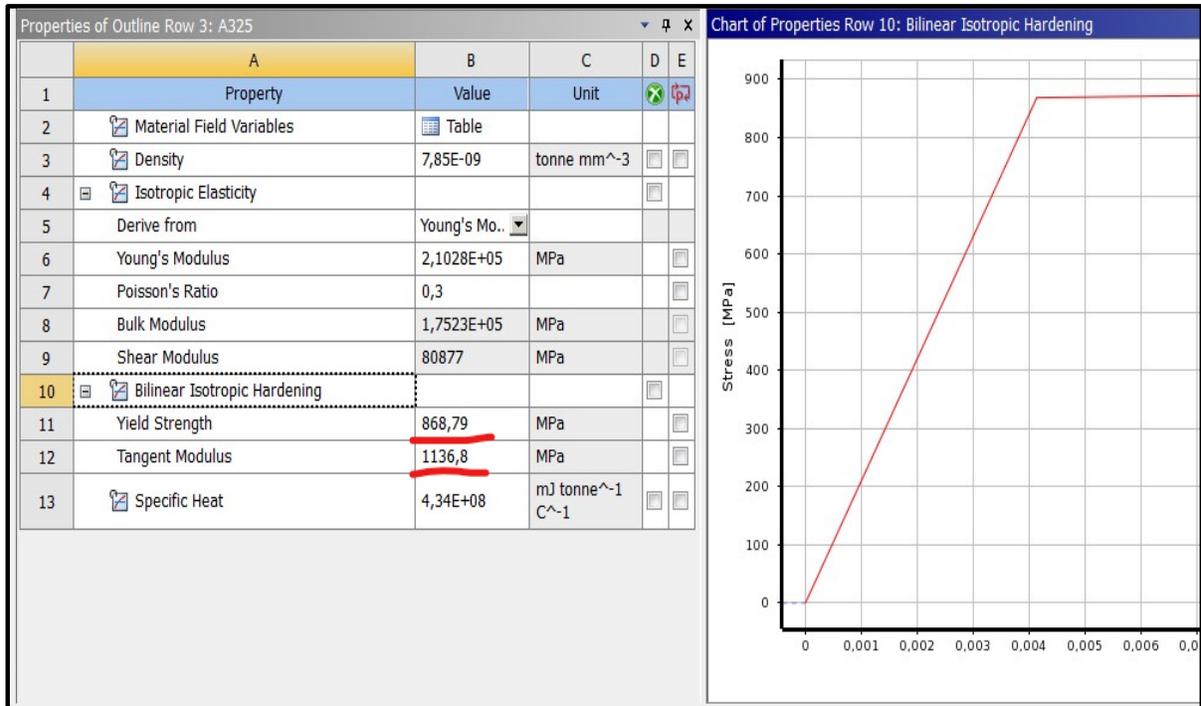


Ilustración 51. Introducción de los módulos tangenciales de los materiales en ANSYS

Fuente: elaboración propia, 2020

Para poder efectuar la fractura en el modelo virtual dinámico se introdujeron los parámetros de deformación unitaria máxima (ver tabla 18), antes de la ruptura por los ensayos a tracción para los pernos y los desplazamientos máximos (ver tabla 19) antes de la ruptura por el ensayo a cortante doble (ver ilustración 52). El análisis dinámico se compone de los siguientes pasos:

- Crear los materiales e introducir sus características mediante la opción de endurecimiento isotrópico bilineal.
- Calibrar el programa mediante comparación con el ensayo a doble cortante.
- Ejecutar una comparativa de los pernos con los MEF calibrados aplicándoles un mismo desplazamiento nodal.

Details of "Nodal Displacement"	
Coordinate System	Nodal Coordinate System
X Component	Free
Y Component	Free
<input type="checkbox"/> Z Component	10,41 mm (ramped)
Suppressed	No
Erosion Controls	
On Geometric Strain Limit	Yes
Geometric Strain Limit	0,19
On Material Failure	Yes
On Minimum Element Time Step	No
Retain Inertia of Eroded Material	Yes

Ilustración 52. Ejemplo de introducción de desplazamiento y deformación máxima para la ruptura ASTM A325

Fuente: elaboración propia, 2020

3.18.) Comparación de ensayos a cortante

Ya con los resultados del ensayo en laboratorio y los MEF estáticos y dinámicos se procedió a realizar análisis comparativos con los esfuerzos últimos a tracción, el esfuerzo último equivalentes Von-Mises, esfuerzos a cortante, deformación unitaria y fuerza aplicada para provocar fallas por ruptura a los pernos.

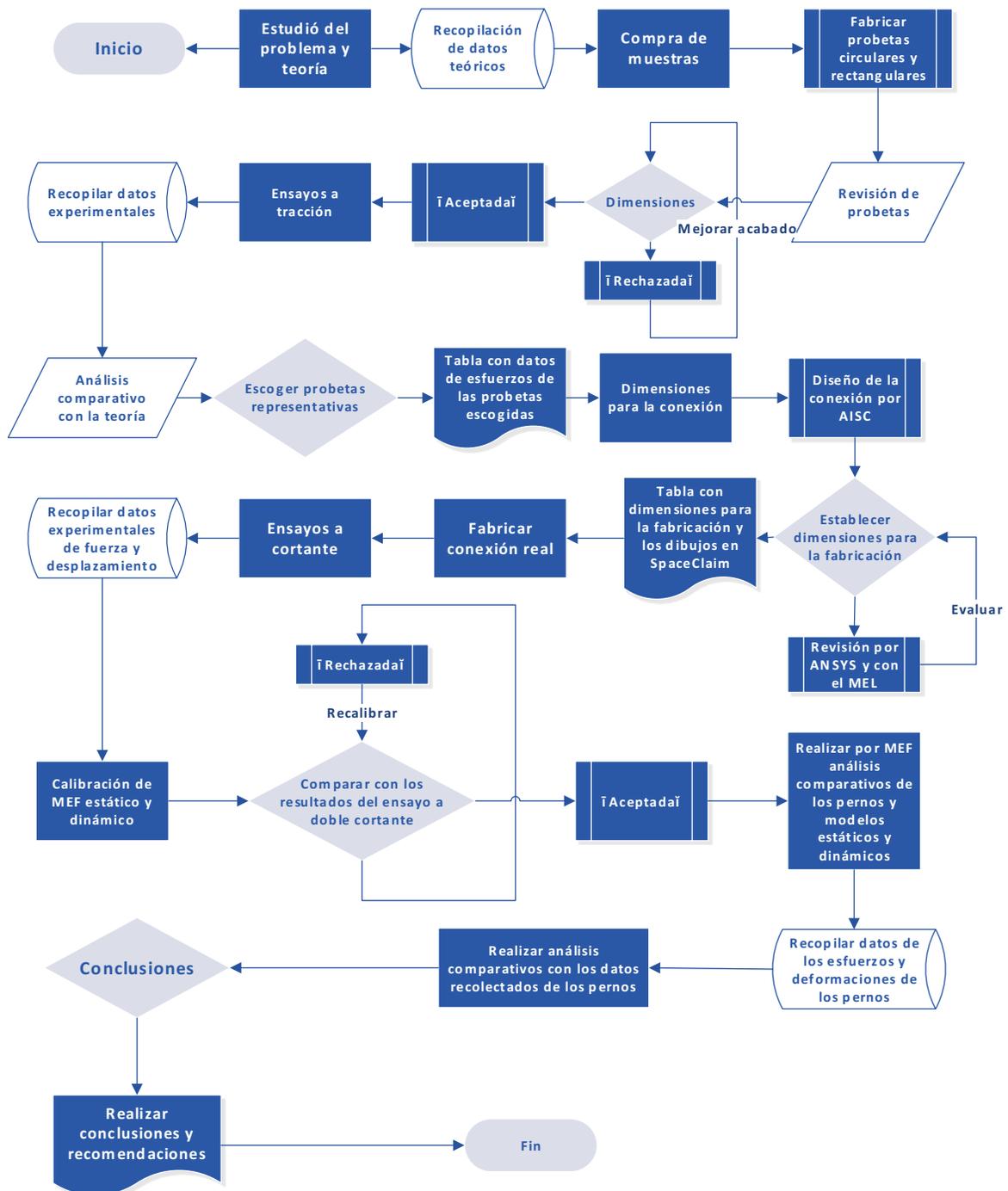


Ilustración 53. Cronograma de trabajo

Fuente: elaboración propia, 2020

3.19.) Presupuesto de trabajo

La presente investigación siguió los siguientes pasos en la obtención de los materiales, transporte y fabricación de probetas y la conexión.

- Compra de tornillos SAE J429 y ASTM A325 en Universal de Tornillos SA. Se compraron en $\frac{3}{4}$ de pulgada con un largo de 6 pulgada para realizar bien las probetas y ensayos a doble cortante; se solicitó la ficha técnica de los pernos.
- Compra de lámina de acero A36 en 25,4 mm y 38,1 mm en Aceros Dume. Se solicitó que al cortarla el proceso fuera por medio de sierra cinta o corte con plasma.
- Pago de servicio de mecánica de precisión en Taller D4 para realizar las probetas de elemento circular (pernos) como indica la norma ASTM E8M.
- Pago de servicio de mecánica de precisión en Taller D4 para realizar la probeta según la norma para elementos rectangulares y las indicaciones del laboratorio.
- Gastos de consumibles para la fabricación de la conexión, como discos de corte y desbaste, soldadura, brocas para perforar y electricidad.
- Gasto de transporte para la compra de los elementos de acero, talleres y laboratorio donde se realizaron los ensayos.

Tabla 21.

Costos del proyecto

Rubro	Detalle	Costo unitario	Cantidad	Totales
Perno SAE grado 5	Material para probetas	₡ 1 740,00	4	₡ 6 960,00
Perno ASTM A325	Material para probetas	₡ 3 820,00	4	₡ 15 280,00
Lámina de acero A36	Material para probeta y conexión	₡ 38 223,00	1	₡ 38 223,00
Maquinado de probetas circulares	Maquinado de espécimen 1, mediante torno	₡ 15 000,00	6	₡ 90 000,00
Maquinado de probeta rectangular	Maquinado de probeta rectangular mediante fresadora	₡ 25 000,00	1	₡ 25 000,00
Transporte	Combustible	₡ 20 000,00	1	₡ 20 000,00
Fabricación de conexión	Consumibles y mano de obra	₡ 70 000,00	1	₡ 70 000,00
			Total	₡ 265 463,00

Fuente: elaboración propia, 2020

Capítulo IV

4.) Análisis de resultados

Antes de efectuar cualquier análisis comparativo de los resultados se procedió a realizar uno por medio del método estadístico T de Student, para demostrar la veracidad de los resultados recopilados en los ensayos a tracción de los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325, con los cuales se realizarán posteriormente comparaciones de los comportamientos de las curvas de esfuerzo-deformación teóricas y experimentales de los materiales en estudio. Además, se comparan los valores de las fuerzas y esfuerzos según la metodología de diseño AISC 360-16 utilizando los valores experimentales obtenidos por los ensayos a tracción y de los modelos numéricos por elemento finito; las deformaciones del ensayo a doble cortante con las de los modelos numéricos por elemento finito.

4.1.1.) Análisis estadístico de resultados

En esta sección se analizan, mediante el método estadístico T, los valores de los esfuerzos obtenidos de las muestras de los pernos ensayados a tracción.

4.1.1.1.) Análisis estadístico mediante distribución T para establecer los esfuerzos por usar en los análisis numéricos por elemento finito

En el análisis de los resultados se toma como media poblacional el promedio de las tres muestras para cada perno (ver tablas 11 y 12); y como la media muestral, el valor que representa a cada perno, según la muestra escogida. (ver tabla 14)

Tabla 22.

Valores puntos críticos y puntos T para las muestras de los pernos SAE J429 grado 5

Media esfuerzo de fluencia	756,4	Mpa
Media esfuerzo último	927,9	Mpa
Desviación estándar fluencia	65,7	Mpa
Desviación estándar último	3,3	Mpa
Grado de libertad	2,0	
Media de la poblacional Fy	739,4	Mpa
Media de la Poblacional Fu	928,5	Mpa
Nivel de significancia	0,02	98%
Punto T. E, fluencia	0,450	Punto crítico
Punto T. E, último	-0,300	
		6,96

Fuente: elaboración propia, 2020

En la tabla 22 se puede observar que los puntos T están fuera de las zonas de rechazo de la hipótesis establecida, lo que indica que la muestra número tres podría ser la opción más adecuada para representar el comportamiento del perno SAE grado 5. (ver ilustración 37 tabla de distribución T)

Tabla 23

Valores puntos críticos y puntos T para las muestras de los pernos ASTM A325

Media esfuerzo de fluencia	892,1	Mpa
Media esfuerzo último	961,9	Mpa
Desviación estándar fluencia	21,1	Mpa
Desviación estándar último	18,5	Mpa
Grado de libertad	2,0	
Media de la poblacional Fy	868,6	Mpa
Media de la poblacional Fu	941,2	Mpa
nivel de significancia	0,02	98%
Punto T. E, fluencia	6,1	Punto crítico 6,96
Punto T. E, último	1,9	

Fuente: elaboración propia, 2020

Para el caso de los datos de los ensayos a tracción de las muestras del perno A325 se puede ver en la tabla 23 que son muy satisfactorios puesto que los puntos T cumplen y se encuentran fuera de las zonas de rechazo de la hipótesis. Se escogió la muestra número seis para representar el comportamiento del perno ASTM A325.

4.1.1.2.) Análisis estadístico mediante distribución T con valores de esfuerzos experimentales y teóricos

En este apartado se estableció que la media poblacional son los valores teóricos de los esfuerzos según las normas y las fichas técnicas del proveedor (ver tablas 2 y 3). Las hipótesis se establecieron de la siguiente forma:

- Para la hipótesis nula se propuso que la media poblacional es igual a los valores de las normas.

- Para la hipótesis alternativa se propuso que la media poblacional era diferente que la media de la muestra.

Tabla 24

Distribución T esfuerzos experimentales y teóricos del perno SAE J429 Grado 5

Media de la poblacional Fy	586,0	Mpa
Media de la poblacional Fu	828,0	Mpa
Nivel de significancia	0,02	98%
Punto T. E, fluencia	4,497	Punto crítico 6,96
Punto T. E, último	51,694	

Fuente: elaboración propia, 2020

Como se puede observar, el punto T, para el esfuerzo último, fue mayor que los puntos críticos, lo cual indica que la hipótesis no es válida pues se cumple que la media poblacional es igual a los valores teóricos.

Tabla 25

Distribución T para esfuerzos experimentales y teóricos del perno A325

Media de la poblacional Fy	586,0	Mpa
Media de la poblacional Fu	828,0	Mpa
nivel de significancia	0,02	98%
Punto T. E, fluencia	79,5	Punto crítico 6,96
Punto T. E, último	12,6	

Fuente: elaboración propia, 2020

Como se puede observar en la tabla 25, la hipótesis no es válida; los valores de los puntos T no están dentro del porcentaje de aceptación, lo que indica que el valor de la media poblacional es igual a los valores teóricos. Es importante mencionar que para lograr validar los datos experimentales, se necesita realizar más ensayos a tracción con el mismo tipo de espécimen.

4.2.) Comparación de curvas de esfuerzo y deformación

En este punto se analizarán y compararán los resultados de las curvas experimentales con las teóricas de los pernos SAE J429 y el perno ASTM A325. También, los datos experimentales del material con que se fabricó la conexión real, el cual fue el acero estructural A36.

Estos análisis comparativos serán de gran ayuda para demostrar y establecer cuál de las muestras de los pernos tiene el comportamiento más similar, con base en las curvas de esfuerzo-deformación teóricas obtenidas y las presentes en el marco teórico, las cuales representan la tendencia de muchos ensayos realizados a los pernos.

4.2.1.) Curva de esfuerzo deformación para el perno SAE J429 grado 5

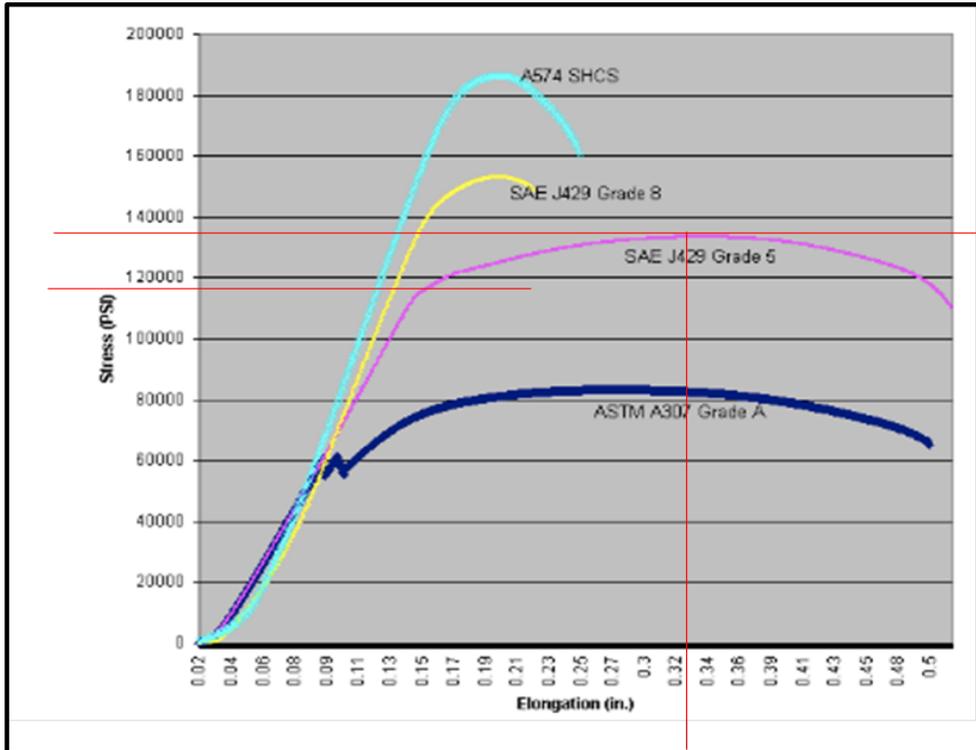


Ilustración 54. Curva de esfuerzo-deformación teórica para el perno grado 5 (Psi-in)

Fuente: Fastenal Engineering and Design Support, 2009

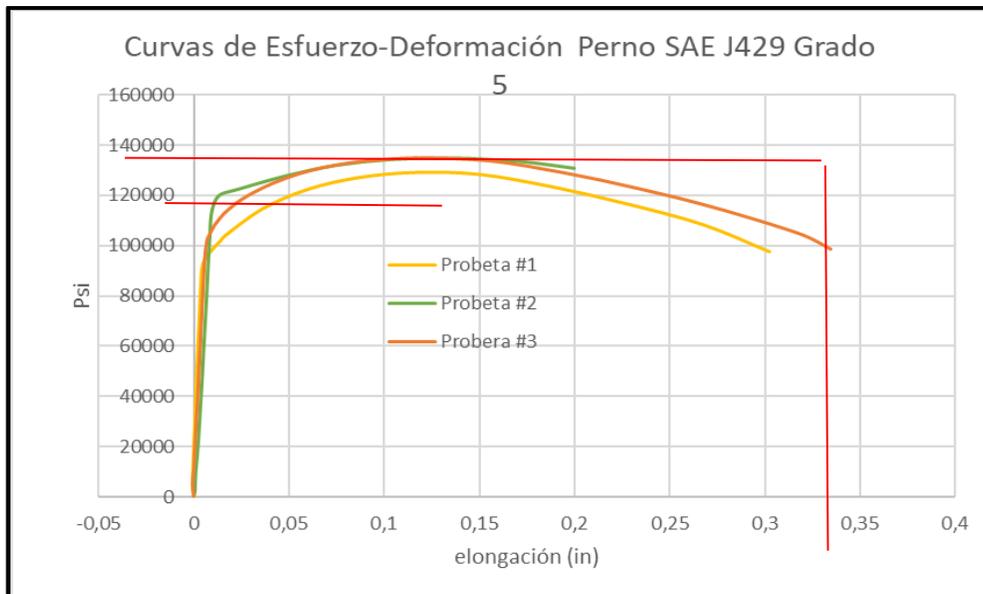


Ilustración 55. Curvas de esfuerzo-deformación datos experimental perno SAE grado 5

Fuente: elaboración propia, 2020

La ilustración 54 presenta un gráfico con la tendencia de la curva de muchas pruebas efectuadas a pernos SAE J429 grado 5, mientras que la 55 expone las curvas formadas por los datos experimentales. Se puede notar que la curva de la probeta #3 es la más similar en comportamiento con la curva teórica, en cuanto a esfuerzos últimos. Una de las diferencias más notables es que en la curva teórica se desarrollan mayores deformaciones totales que en curvas obtenidas por los ensayos a tracción, siendo la probeta #3 la más cercana en su ductilidad.



Ilustración 56. Fotografía de probetas de pernos SAE J429 grado 5, falladas por ensayo a tensión ASTM E8M

Fuente: elaboración propia, 2020

En la ilustración 56 se pueden observar dos características de los materiales dúctiles. A la izquierda, la reducción del área producida en las probetas antes de llegar a la falla, así como la elongación de la zona calibrada producida por la fuerza aplicada con los siguientes porcentajes: para la probeta #1 de 15,2%, para la #2 de 19,8% y para la #3 de 17%; estos porcentajes son con respecto a la longitud calibrada, la cual era de 50 milímetros. Los

porcentajes de reducción de área fueron los siguientes: 48,5% para la probeta #1, 59,7% para la #2 y 48,72% para la #3 (ver tabla 29). En la imagen de la derecha se aprecia la cara de la falla por tensión.

4.2.2.) Curva de esfuerzo de deformación para el perno ASTM A325

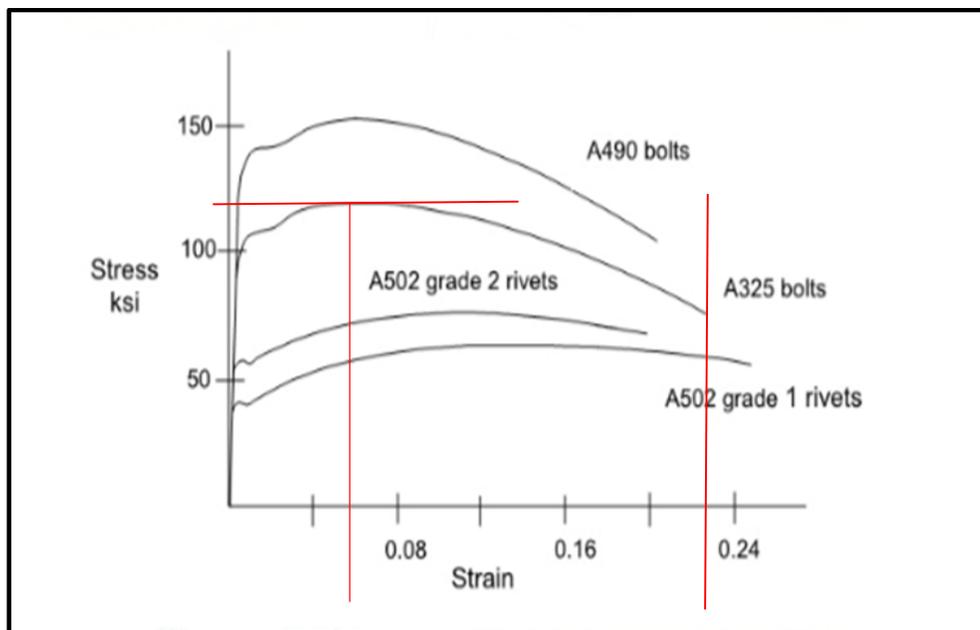


Ilustración 57. Curva de esfuerzo teórica para el perno A325, Ksi

Fuente: AISC Design Guide 17, 2002

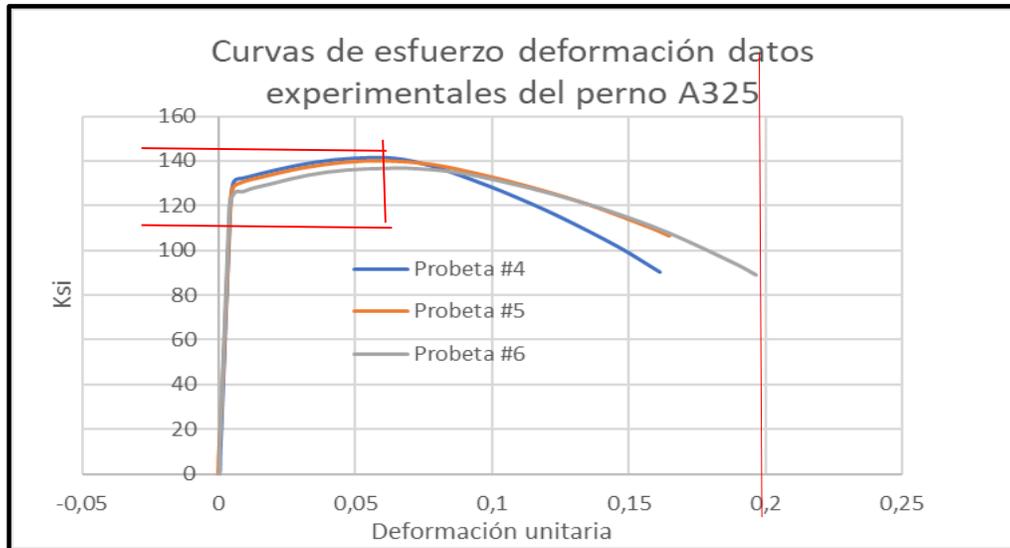


Ilustración 58. Curva de esfuerzo-deformación datos experimentales perno A325

Fuente: elaboración propia, 2020

Al observar el gráfico teórico presentado en la ilustración 57 para el perno A325 y el gráfico experimental en la ilustración 58 se pueden notar las similitudes del comportamiento en el rango elástico en las tres muestras. Con respecto a la zona de endurecimiento por deformación hay gran similitud con las muestras #4 y #6, marcadas entre líneas rojas. Con respecto a los valores de deformación unitaria, la curva del gráfico experimental más representativa es la de la muestra #6, lo que demuestra gran similitud en su ductilidad.



Ilustración 59. Fotografía de probetas de pernos ASTM A325 falladas por ensayo a tensión ASTM E8M

Fuente: elaboración propia, 2020

En la ilustración 59 se observan las características de los materiales dúctiles. En la imagen de la izquierda se encuentra la elongación de la zona calibrada, cuyos porcentajes de son: 16,4% para la probeta #4; 19,32% para la #5 y 19,9% para la #6. Los porcentajes de reducción de área fueron de 63,18% para la probeta #4, 66,46% para la #5 y 64,04% para la #6 (ver tabla 29). En la imagen de la derecha se aprecia la cara de la falla por tensión.

4.2.3.) Curva de esfuerzo deformación para el acero A36

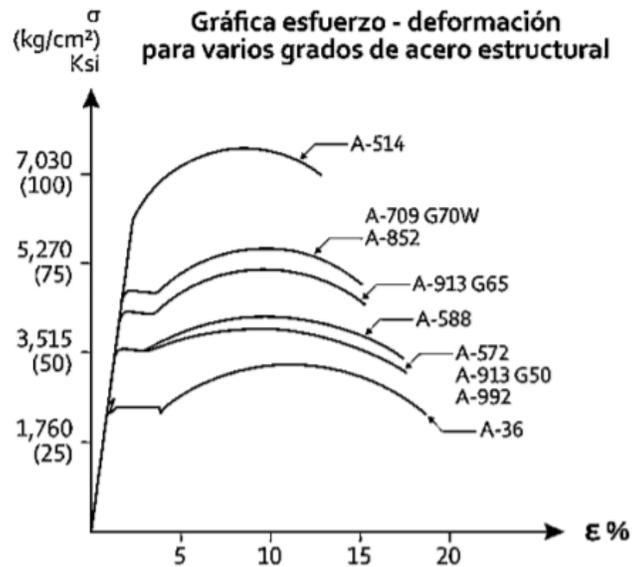


Ilustración 60. Curva de esfuerzo-deformación. Datos teóricos, Ksi

Fuente: Perfiles estructurales, 2019

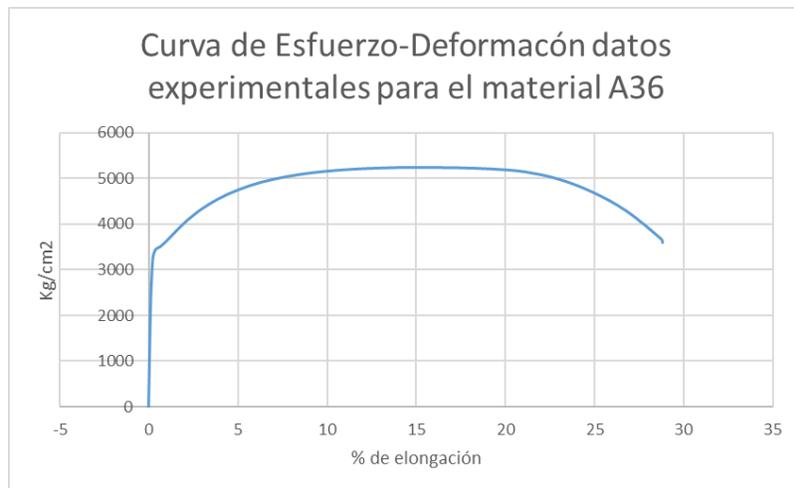


Ilustración 61. Curva de esfuerzo-deformación datos experimentales para el material A36, Mpa-mm/mm

Fuente: Elaboración propia, 2020

En el caso del comportamiento experimental de acero estructural A36, el cual es expresado en el gráfico de la ilustración 61, este presenta grandes similitudes con respecto al comportamiento teórico que se muestra en el gráfico de la ilustración 60, donde los valores

de los esfuerzos experimentales van creciendo con grandes deformaciones; al igual que los teóricos y presentan gran ductilidad en el material en ambos gráficos.

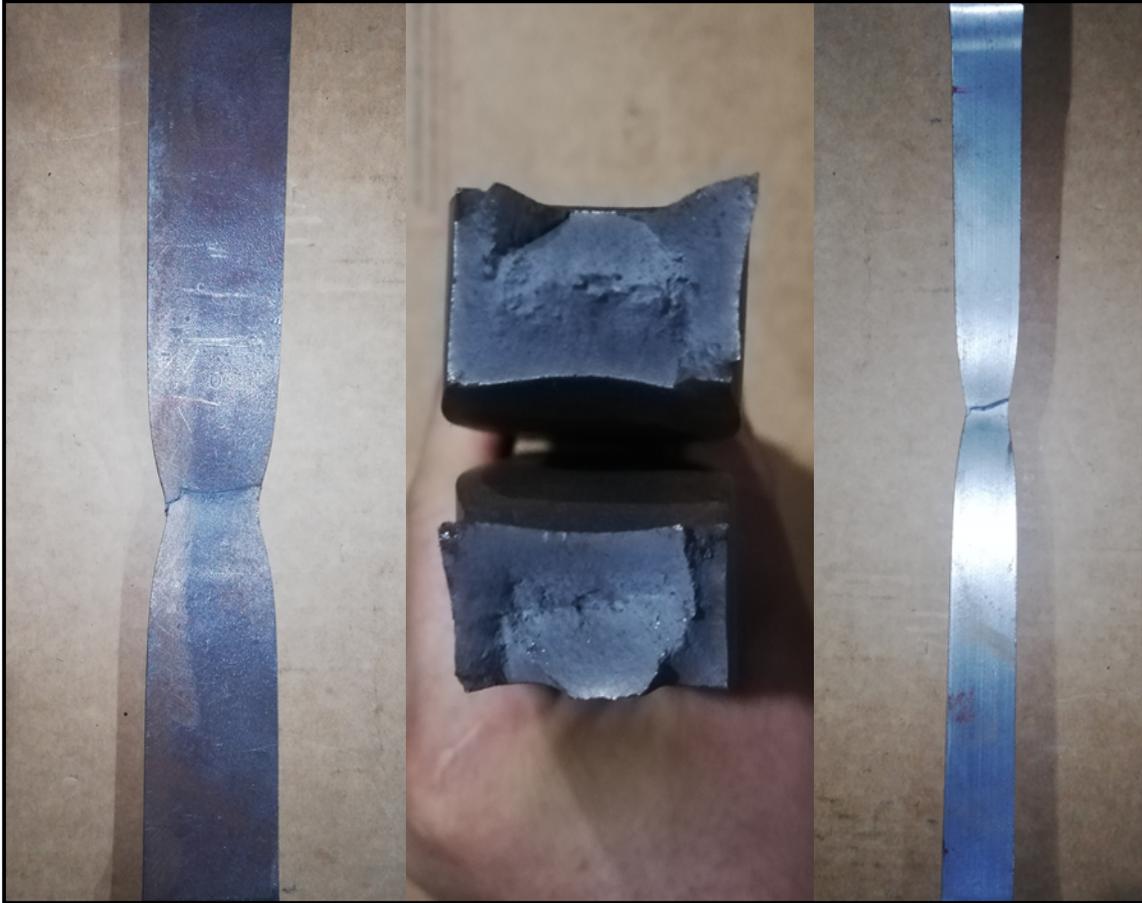


Ilustración 62. Fotografía de probeta de acero A36 fallada por ensayo a tensión ASTM E8M

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en las imágenes de la ilustración 62, el acero estructural A36 presentó una significativa reducción de área y elongación. Su área se redujo un 39,09 % pasando de 1028,2 milímetros cuadrados a 626,2 milímetros cuadrados. Con respecto al alargamiento de material, el porcentaje de elongación fue de 128,8% en la zona calibrada pasando de 200 milímetros a 257,6 milímetros. En la imagen central se muestra la cara de la falla por tensión.

4.2.4.) Curvas de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325

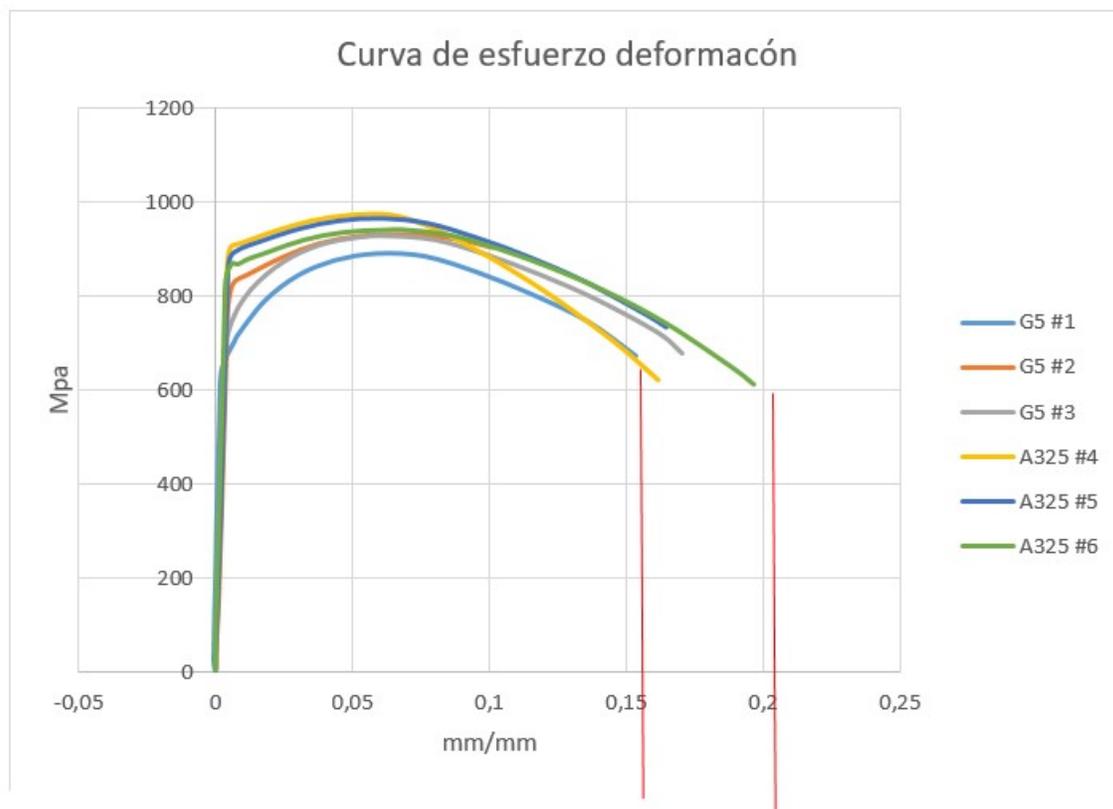


Ilustración 63. Gráficos de curvas de esfuerzo-deformación de los pernos grado 5 y A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

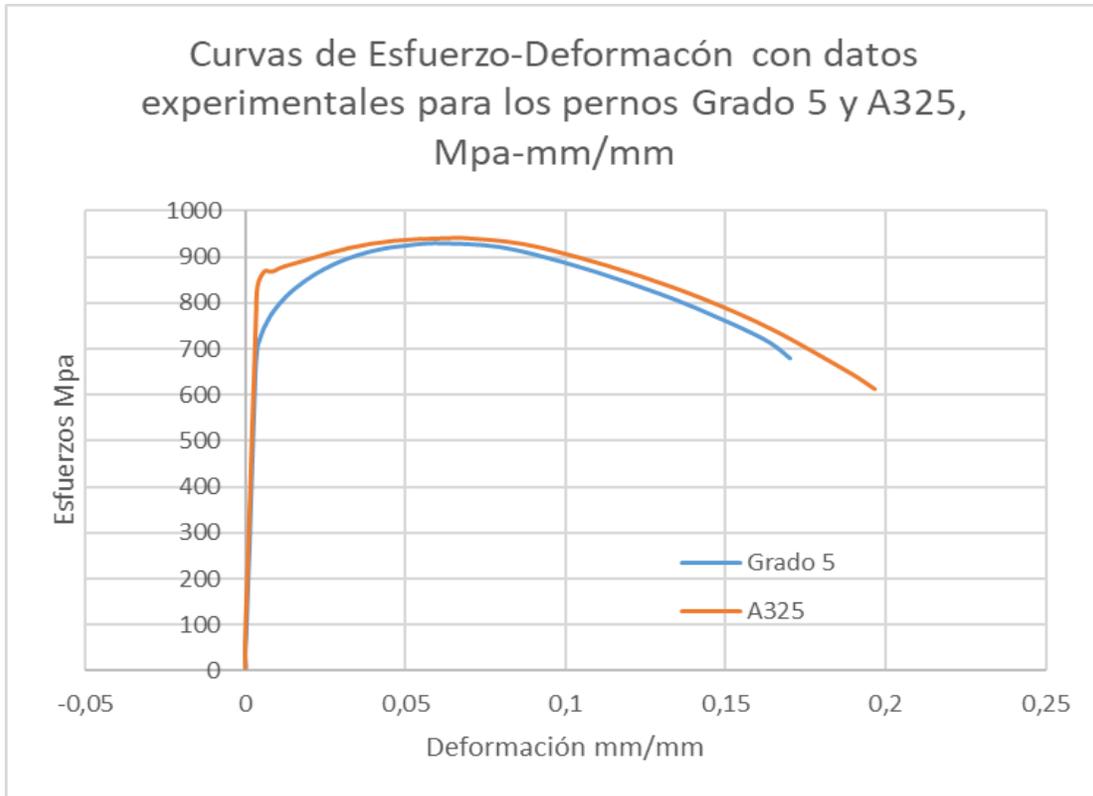


Ilustración 64. Curva de esfuerzo-deformación de las probetas 3 para el perno grado 5 y la probeta 6 para el perno A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

En las ilustraciones 63 y 64 se observan los comportamientos de las curvas de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325. En todos los casos, el perno A325 obtuvo mayores valores de esfuerzo en el rango elástico; por otro lado, el perno grado 5 desarrolló menores esfuerzos en el rango elástico presentado mayores deformaciones. Para los rangos inelásticos, los esfuerzos últimos para ambos pernos presentaron valores muy similares, y en cuanto a la propiedad mecánica de ductilidad, los pernos tienden a ser similares en sus deformaciones totales al llegar a su esfuerzo último. Presentan deformaciones permanentes de 3,09 mm para el A325 y de 3,06 mm en el SAE grado 5. Con respecto a su longitud calibrada, la muestra #6, correspondiente al perno A325 fue la más dúctil. (ver Anexo 1)

4.3.) Comparación de valores de esfuerzo de fluencia y ruptura, teórico contra experimental

En la siguiente sección se comparan los valores obtenidos de esfuerzos de fluencia y esfuerzos últimos por los ensayos a tracción de las probetas de los pernos con los valores teóricos de diseño.

4.3.1.) Valores teóricos y experimentales para el perno SAE J429 grado 5

Tabla 26.

Tabulación de esfuerzos obtenidos por ensayos a tracción a pernos SAE J429 grado 5

Pruebas de laboratorio perno SAE J429 grado 5				Esfuerzos teóricos de diseño
Número de Muestra	#1	#2	#3	
Tipo	SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5	
Fluencia 0.2% (Mpa)	701,41	828,94	739,4	586,2
Esfuerzo último (Mpa)	924,32	930,94	928,5	
Fuerza aplicada en fluencia (Ton)	8,4	10,7	9,5	
Fuerza aplicada en esfuerzo último (Ton)	11,2	12,0	12,0	
Fluencia (Ksi)	102	120	107	85
Esfuerzo último (Ksi)	134	135	135	120
Fuerza aplicada en fluencia (Klb)	18,6	23,6	21,0	
Fuerza aplicada en esfuerzo último (Klb)	24,7	26,5	26,4	

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se puede observar en la tabla 26, los valores de los esfuerzos en fluencia y últimos de las tres muestras para el perno SAE J429 grado 5 fueron superiores a los valores teóricos al comparar la media muestral de los esfuerzos de fluencia experimentales tomando el valor teórico de fluencia de 586 de Mpa, como base. El valor de la media muestral expresa un excedente aproximadamente del 29 %, y en el caso de los esfuerzos últimos es del 12% con respecto al valor teórico de esfuerzo último de 827 Mpa.

4.3.2.) Valores teóricos y experimentales para el perno ASTM A325

Tabla 27.

Tabulación de esfuerzos obtenidos por ensayos a tracción a pernos ASTM A325

Pruebas de laboratorio perno ASTM A325				Esfuerzos teóricos de diseño
Número de Muestra	#4	#5	#6	
Tipo	A325	A35	A325	
Fluencia 0.2% (Mpa)	909,43	898,25	868,6	586,2
Esfuerzo último (Mpa)	976,73	967,81	941,24	827,6
Fuerza aplicada en fluencia (Ton)	11,7	11,5	11,1	
Fuerza aplicada en esfuerzo último (Ton)	12,6	12,4	12,0	
Fluencia (Ksi)	132	130	126	85
Esfuerzo último (Ksi)	142	140	137	120
Fuerza aplicada en fluencia (Klb)	25,9	25,4	24,5	
Fuerza aplicada en esfuerzo último (Klb)	27,8	27,3	26,6	

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la tabla 27 se muestra los valores obtenidos de las tres muestras de los pernos A325. Con respecto a los valores de esfuerzos en fluencia, la media muestral expresa una excedencia aproximadamente del 52% con respecto al valor teórico de 586 Mpa, en el caso de la media muestral de los esfuerzos últimos experimentales, esta presentó una excedencia del 16% con respecto al valor de 827 Mpa,

Los valores teóricos de los esfuerzos de los pernos SAE J429 grado 5 y los ASTM A325 fueron recopilados de las fichas técnicas y de la literatura de los fabricantes. No se puede decir con certeza que la diferencia entre los valores de los esfuerzos teóricos y experimentales son significativas o que estos demuestran mucha diferencia, ya que no se conoce la variación estándar poblacional que manejan los fabricantes en los procesos de producción de los pernos.

4.3.3.) Valores teóricos y experimentales para el acero A36

Tabla 28.

Tabulación de esfuerzos obtenidos por ensayos a tracción al acero estructural A36

Valor de esfuerzos		
Muestra	#1	Unidad
Tipo	A36	
Fluencia 0.2% (Mpa) (-) Incertidumbre	321,77	Mpa
Fluencia 0.2% (Kips) (-) Incertidumbre	46,66868	Kips
Esfuerzo último (Mpa) (-) Incertidumbre	495,32	Mpa
Esfuerzo último (Kips) (-) Incertidumbre	71,83992	Kips
Esfuerzo teórico Fy	248,3	Mpa
Esfuerzo teórico Fy	36	Kips
Esfuerzo teórico Fu	400	Mpa
Esfuerzo teórico Fu	58	Kips

Fuente: Elaboración propia, 2020

Para el caso del acero A36, la muestra que se ensayó, presentó valores muy aceptables. En fluencia se obtuvo 321 Mpa y la teoría indica un 248 Mpa; y para el esfuerzo último se obtuvo 495 Mpa y la teoría indica 400 Mpa.

4.4.) Valores experimentales de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325

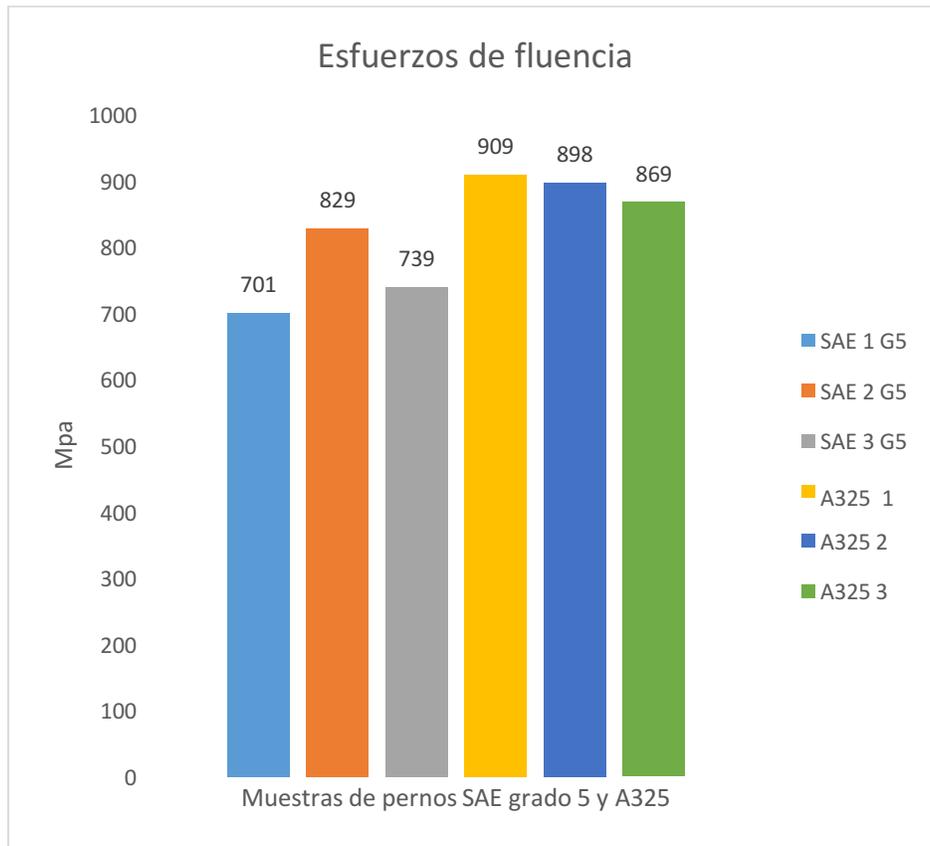
Tabla 29.

Comparación de los valores de los esfuerzos de los pernos SAE grado 5 y los A325 por ensayos a tracción

Valor de Esfuerzo menos la incertidumbre						
Número de Muestra	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Tipo	SAE 1 G5	SAE 2 G5	SAE 3 G5	A325	A35	A325
Fluencia 0.2% (Kips)	101,7	120,2	107,2	131,9	130,3	126,0
Esfuerzo último (Kips)	134,1	135,0	134,7	141,7	140,4	136,5
Fluencia 0.2% (Mpa)	701,41	828,94	739,4	909,43	898,25	868,6
Esfuerzo último (Mpa)	924,32	930,94	928,5	976,73	967,81	941,24
% Elongación (mm/mm)	15,35	19,83	17,01	16,14	19,32	19,9
% Reducción de área (mm ² /mm ²)	48,52	59,72	48,72	63,18	66,46	64,04

Fuente: Elaboración propia, 2020

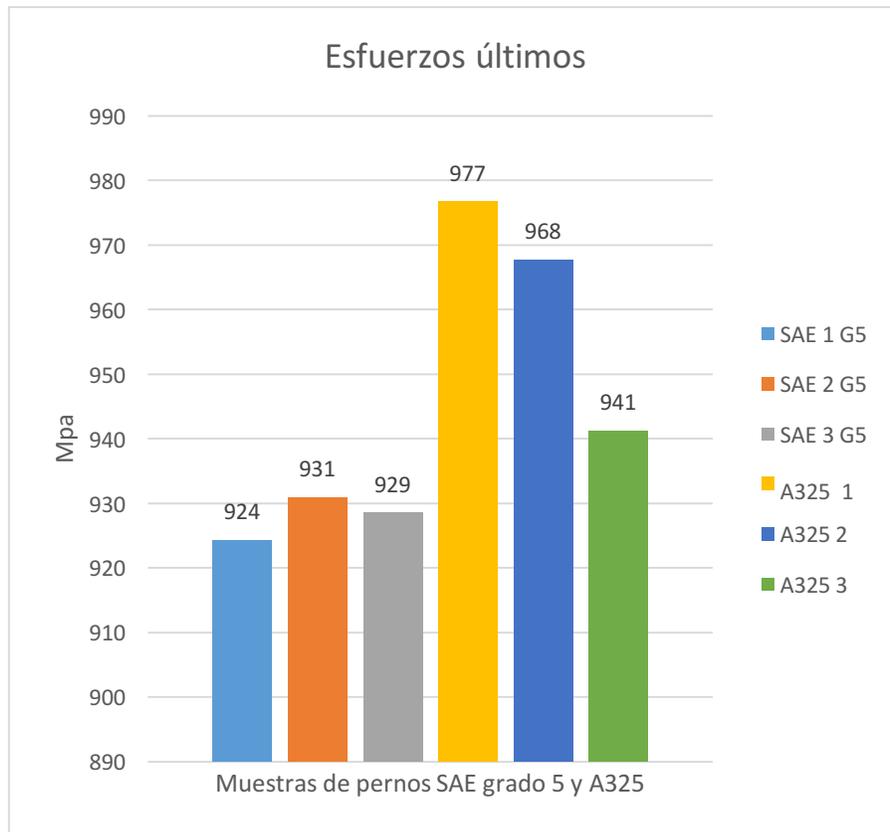
Gráfico 1. Gráfico de esfuerzo de fluencia entre pernos SAE G5 y A325, por ensayos a tracción.



Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en la tabla 29 y en el gráfico 1 los esfuerzos de fluencia de los pernos SAE J429 grado 5 fueron generalmente menores, pues los pernos A325 alcanzaron mayores esfuerzos en el rango elástico en las pruebas realizadas.

Gráfico 2. Gráfico de esfuerzos últimos entre los pernos SAE G5 y A325



Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en el gráfico 2, los pernos ASTM A325 alcanzaron valores superiores de esfuerzo último a los del grado 5.

Si se toma los valores máximos de cada perno en estudio y se promedian para comparar sus medias, la diferencia entre ellas ronda el 3,53%. Sin embargo, si se toman los valores que tienden a ser más similares a los gráficos teóricos, que para el SAE J429 corresponde la muestra 3 y para el ASTM A325 la muestra 6, la diferencia entre ellos ronda el 1,27%. Por lo tanto, con base en los análisis comparativos con la teoría desarrollada anteriormente, la similitud de los pernos grado 5 y A325 en sus esfuerzos últimos es muy notable.

4.5.) Análisis comparativo de resultados de los esfuerzos a doble cortante, teóricos, experimentales y simulaciones numéricas por elemento finito

En las secciones siguientes se realizará análisis comparativos de valores obtenidos por los ensayos a doble cortante personalizados, realizados en laboratorio entre de los pernos SAE grado 5 y el ASTM A325. Posteriormente, se realizará un análisis comparativo individual de cada uno de los pernos según los valores de esfuerzo a doble cortante con datos de esfuerzo últimos teóricos, los valores de esfuerzo a doble cortante con datos de esfuerzo último experimentales, los valores experimentales de esfuerzo a doble cortante por ensayo a los pernos en una conexión real y por último los valores de esfuerzo a doble cortante obtenidos por las simulaciones numéricas por medio de análisis estáticos y dinámicos por elemento finito en el programa ANSYS.

4.5.1.) Análisis comparativo de los esfuerzos a cortante experimentales de los pernos SAE J429 grado y ASTM A325

En esta sección se comparan los resultados de los ensayos a cortante realizados en laboratorio entre los pernos SAE grado 5 y el ASTM A325 donde los parámetros por analizar y comparar son los esfuerzos a cortante y sus desplazamientos.

Tabla 30.

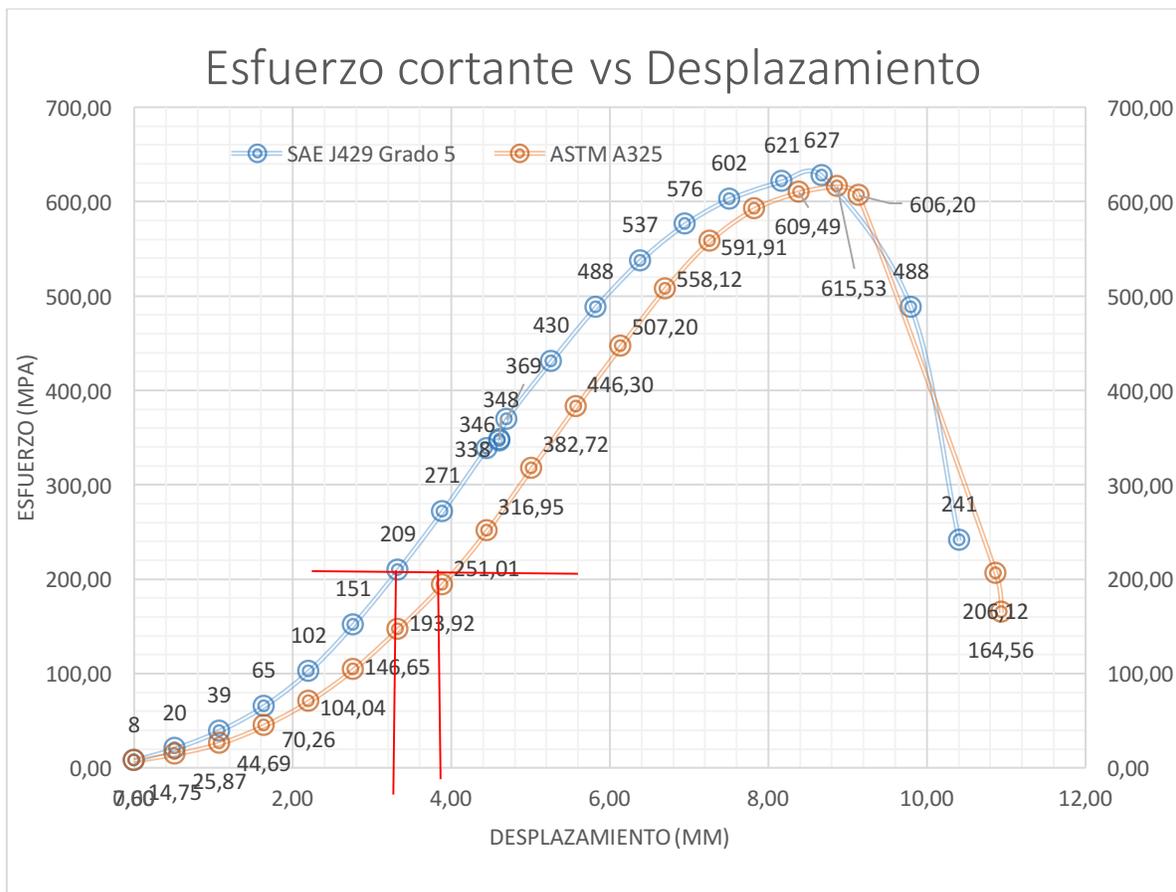
Tabulación de los desplazamientos y esfuerzo cortante en los pernos por los ensayos a cortante doble realizados con pernos SAE grado 5 y el A325

Grado 5		A325	
Desplazamiento (mm)	Esfuerzo C (Mpa)	Desplazamiento (mm)	Esfuerzo C (Mpa)
0,00	7,84	0,00	7,60
0,51	20,23	0,51	14,75
1,08	38,96	1,08	25,87
1,64	65,25	1,64	44,69
2,20	101,96	2,20	70,26
2,76	151,48	2,76	104,04
3,33	209,16	3,33	146,65
3,89	271,49	3,89	193,92
4,45	338,27	4,45	251,01
4,61	347,78	5,01	316,95
4,61	346,11	5,58	382,72
4,70	369,22	6,14	446,30
5,26	430,43	6,70	507,20
5,82	487,81	7,26	558,12
6,39	537,21	7,83	591,91
6,95	575,68	8,39	609,49
7,51	602,41	8,87	615,53
8,17	621,21	9,14	606,20
8,68	626,93	10,87	206,12
9,80	487,70	10,94	164,56
10,41	240,79		

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la tabla 30 se expresan los desplazamientos y los esfuerzos cortantes promedios de los dos ensayos realizados a los pernos. Como se puede observar, los valores de esfuerzos a doble cortante entre los pernos son muy similares, al igual que sus respectivos desplazamientos, los cuales reflejan sus deformaciones totales. Es importante mencionar que solo se cuenta con un ensayo para cada perno, como para lograr compararlos de manera efectiva; pero con los datos obtenidos, las similitudes de sus esfuerzos a cortantes máximos son evidentes, presentaron grandes similitudes en sus deformaciones totales en este punto, aunque el perno A325 es más dúctil que el SAE grado 5.

Gráfico 3. Gráfico de desplazamientos y esfuerzo a cortante de los ensayos a cortante doble en pernos SAE grado 5 y el A325



Fuente: Elaboración propia, 2020

En el gráfico 3 se puede observar que los desplazamientos producidos por la fuerza aplicada a la conexión provocaban deformaciones en los elementos conectores; en este caso los pernos SAE J429 grado 5 y el perno ASTM A325. Se establece que al ir aumentando el esfuerzo cortante se iba incrementando la deformación en ambos casos; su comportamiento expresa curvas suaves con buena ductilidad, y se nota que la curva del perno grado 5 alcanza mayores esfuerzos con menor deformación. Se debe notar que el perno A325 llega a alcanzar

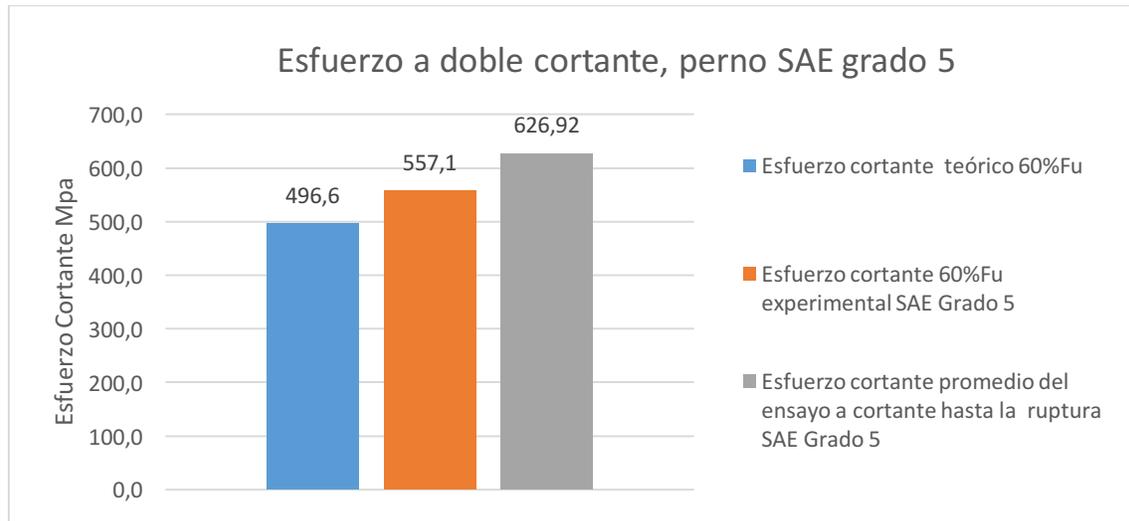
valores similares de esfuerzo con mayor deformación; pero al final ambos pernos alcanzaron valores máximos de esfuerzo a cortante muy aproximados de 615 Mpa para el perno A325 y de 626 Mpa para el perno SAE grado 5 con una diferencia de apenas el 1,78% aproximadamente. Sin embargo, se puede decir que el perno A325 fue más dúctil en este ensayo a cortante en comparación con el perno SAE grado 5.

4.5.2.) Análisis comparativo de esfuerzos a doble cortante utilizando valores de esfuerzo últimos, teóricos, experimentales por ensayos a tracción y experimentales por ensayo a doble cortante

En este punto se analizarán y compararán los esfuerzos a doble cortante. Para obtenerlos se aplicará la metodología de capacidad nominal del AISC 360-16 para pernos sometidos a cortante, y se utilizarán los datos de esfuerzos últimos teóricos y experimentales (ver ecuaciones 7 y 10), los cuales se compararán con los datos experimentales de esfuerzos por un ensayo a doble cortante utilizando el esfuerzo promedio (ver ecuación 2).

4.5.2.1.) Esfuerzo cortante para el perno SAE J429 grado 5

Gráfico 4. Gráfico comparativo de esfuerzos a doble cortantes teóricos y experimentales para el perno SAE grado 5



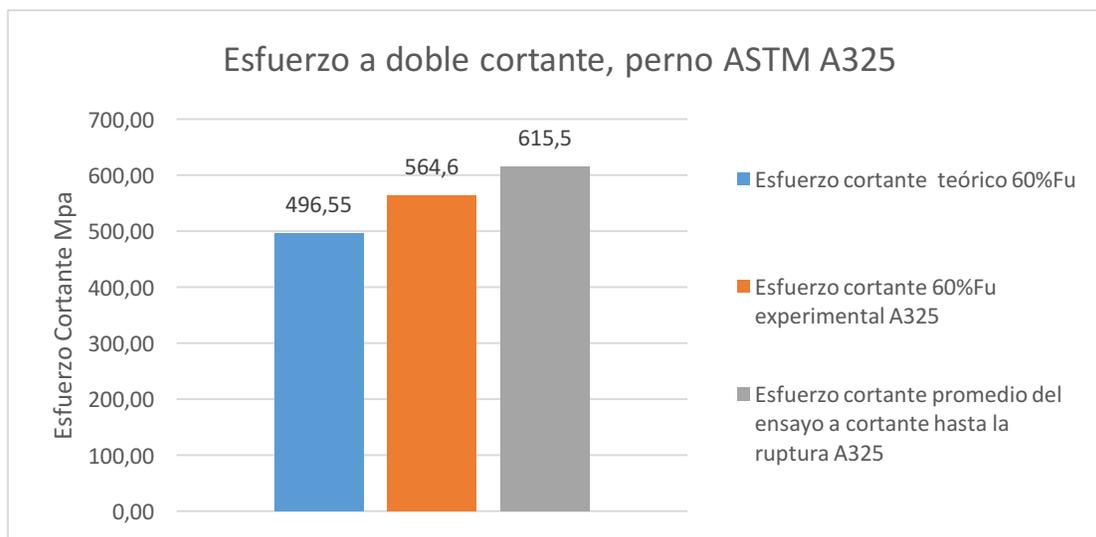
Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en el gráfico 4, al aplicar la teoría de capacidad nominal se obtiene que para los valores teóricos, el esfuerzo cortante en los pernos grado 5 fue de 496,6 Mpa; para los experimentales de 557,1 Mpa y para el ensayo a doble cortante de 626,92 Mpa aplicado la teórica de cortante promedio (ver ecuación 2). De esta manera, se puede observar que los valores de los esfuerzos van en aumento conforme se aplican menos conceptos teóricos, por lo cual se podría decir que los valores teóricos están al lado de la seguridad con respecto a la capacidad final experimental.

Expresado de manera porcentual, la diferencia entre los valores de los esfuerzos teóricos y el experimentales es de 12,1%; entre el experimental y el obtenido por el ensayo a doble cortante es de 12,5% y hay una diferencia del 26,2% entre el máximo experimental y el teórico.

4.5.2.2.) Esfuerzo cortante para el perno ASTM A325

Gráfico 5. Gráfico comparativo de esfuerzos a doble cortantes teóricos y experimentales para el perno ASTM A325



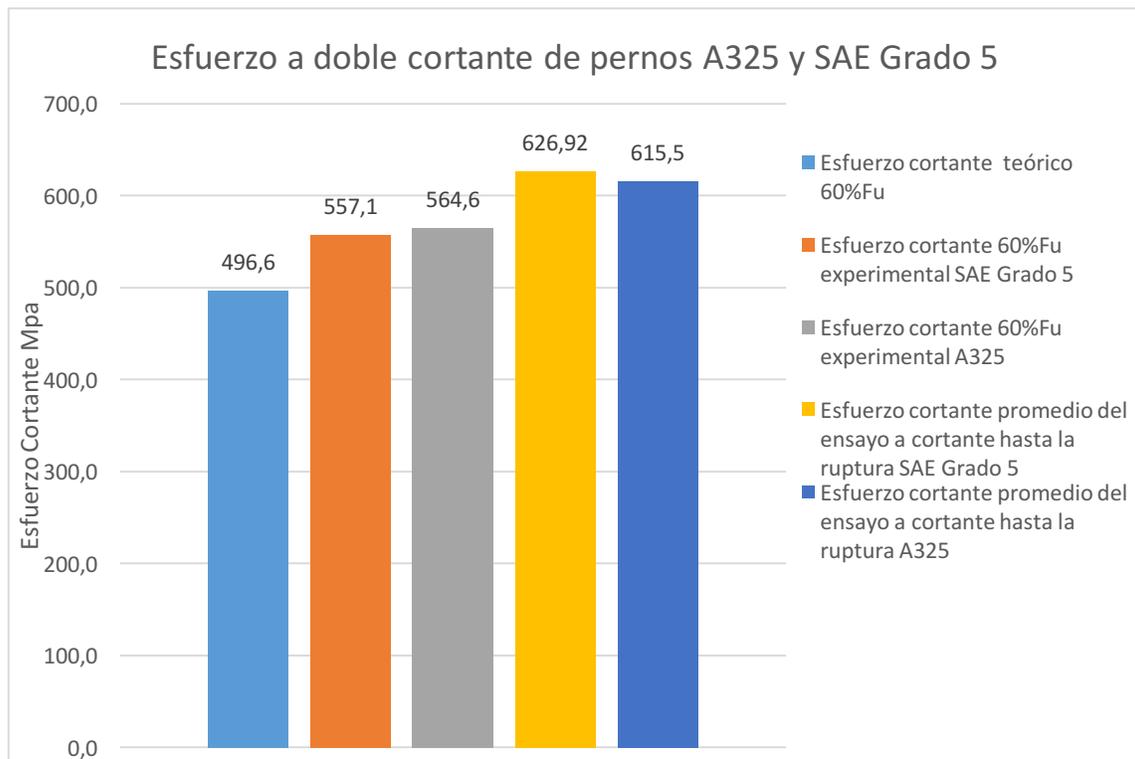
Fuente: Elaboración propia, 2020

En el gráfico 5 se puede observar que para los valores teóricos el esfuerzo cortante en los pernos A325 fue de 496,6 Mpa; para los experimentales fue de 564,6 Mpa y para el ensayo a doble cortante de 616,5 Mpa. Esto implica que los valores de los esfuerzos van en aumento al igual que en el perno SAE J429 grado 5, lo que denota que los valores experimentales de esfuerzos tienden a dar unos de mayor capacidad a los pernos y también demuestra que al igual que el perno grado 5, los valores teóricos están al lado de la seguridad con respecto a los datos experimentales.

De manera porcentual, la diferencia entre valores del esfuerzo teórico y el experimental, es de un 13,6% y entre el experimental y el obtenido por el ensayo a doble cortante es de un 9%, y se presenta una diferencia del 23,9% entre el teórico y el máximo experimental.

4.5.3.) Comparación de los esfuerzos cortantes teóricos y experimentales entre los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325

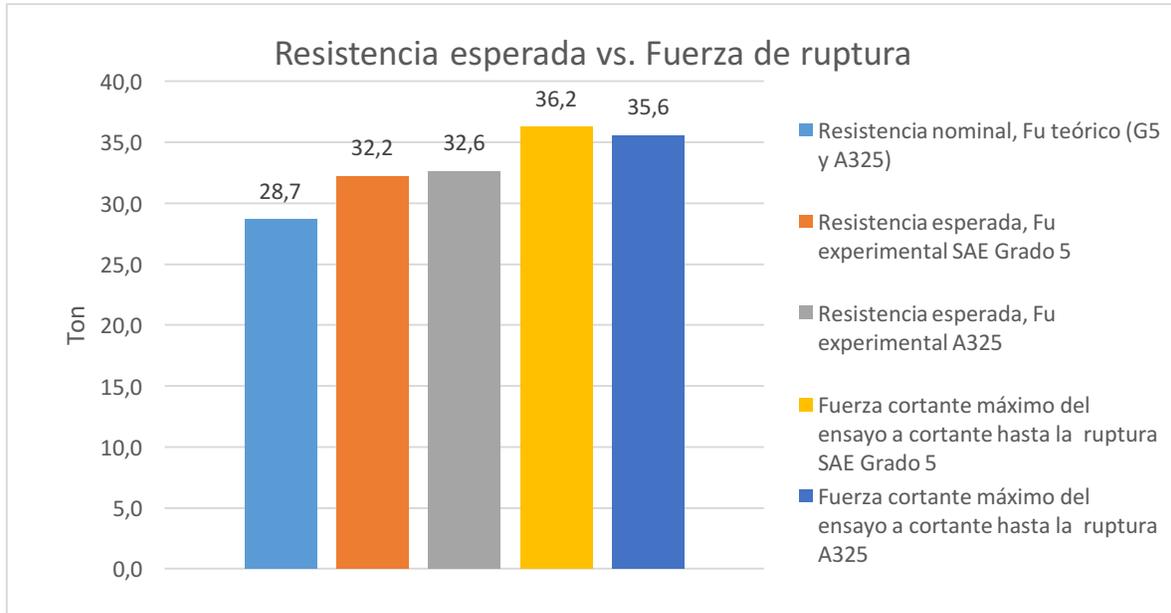
Gráfico 6. Gráfico comparativo de los esfuerzos a doble cortante de los pernos SAE grado 5 y el ASTM A325



Fuente: Elaboración propia, 2020

En el gráfico 6 se observan los valores de los esfuerzos a cortantes para ambos pernos en estudio. Los obtenidos por la metodología del AISC con datos experimentales demuestran gran similitud entre los pernos, que también se presenta con los esfuerzos a cortante experimentales obtenidos por el ensayo a doble cortante. Los resultados demuestran que los pernos tienden a tener capacidades muy similares a cortante.

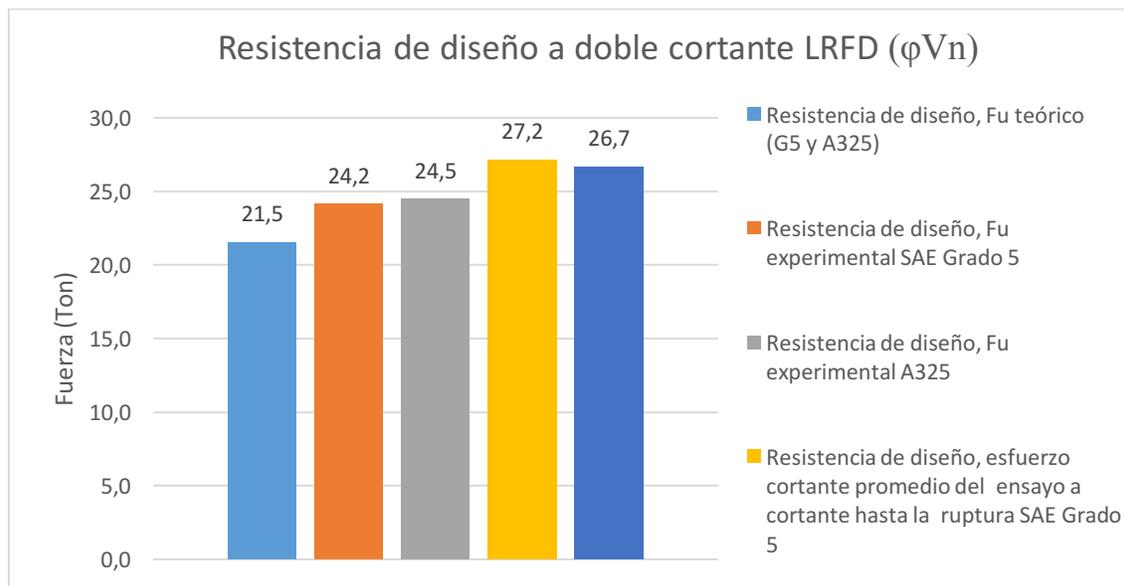
Gráfico 7. Gráfico resistencia esperada versus fuerza de ruptura en ensayos a doble cortante de los pernos SAE grado5 y A325



Fuente: Elaboración propia, 2020

En el gráfico 7 se pueden observar las magnitudes de las fuerzas máximas aplicadas para llevar a los pernos a la falla por ruptura, mediante varios modelos. En los casos donde se aplicó la teoría de resistencia nominal para pernos a cortante, la fuerza cortante nominal para ambos fue de 28,7 Ton. La resistencia esperada experimental fue de 32,2 Ton para el perno grado 5 y de 32,6 Ton para el A325. En los casos de los ensayos a doble cortante, las fuerzas que llevaron a la ruptura a los pernos fueron de 36,2 Ton para el grado 5 y 35,6 Ton para el A325 respectivamente. A continuación, se comparan los mismos valores aplicando el método de LRFD.

Gráfico 8. Gráfico de resistencia de diseño a doble cortante por LRFD



Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se muestra en el gráfico 8, el valor teórico de resistencia de diseño a doble cortante para ambos pernos es de 21,5 Ton. Al compararlo con la resistencia de diseño utilizando datos experimentales, las cuales fueron de 24,2 Ton para el grado 5 y de 24,5 Ton para el A325, presenta un incremento en su resistencia a fuerza cortante de 13,2% aproximadamente. Dado que se conoce la magnitud de la fuerza que llevó a la falla a los pernos en los ensayos a doble cortante (ver gráfico 7), se puede calcular el esfuerzo promedio de un elemento sometido a doble cortante (ver ecuación 2 y gráfico 6). Si con estos esfuerzos promedios a doble cortante se calcula la resistencia de diseño a cortante de los pernos ensayados, se obtendría que el perno SAE grado 5 tiene una resistencia de 27,2 Ton y el perno A325 una de 26,7. Al comparar las resistencias de diseño teóricas con las de diseños experimentales antes de la ruptura, las resistencias de diseño teóricas representan el 80% de resistencia a cortante final que podría alcanzar un perno sometido a cortante.

4.5.4.) Comparación entre los esfuerzos cortantes por ensayo a doble cortante, datos experimentales a tracción y modelado numérico de elemento finito mediante un análisis estático en ANSYS de los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325

En la siguiente sección se compararán los datos de esfuerzos cortantes obtenidos por un modelo MEF mediante un análisis estático, los obtenidos por datos experimentales a tracción y los esfuerzos cortantes promedios por ensayos a doble cortante (ver gráfico 6). Para efectuar las comparaciones se introdujo en las pruebas virtuales la misma magnitud y dirección de la fuerza que llevaron a la falla por ruptura a cada uno de los pernos en los ensayos a doble cortante real.

Los análisis numéricos de elemento finito presentan ciertas limitantes en sus modelados que pueden ocasionar ciertas incertidumbres. Los pernos se dibujaron con características geométricas diferentes a las reales como en la cabeza y la tuerca hexagonal y también en la sección roscada del vástago, debido a la demanda de recursos computacionales que requería para modelarlo con la misma geometría del perno real. Otro criterio para no dibujar la sección roscada fue que la esta no se encontraba en el plano de falla del ensayo a doble cortante real.

4.5.4.1.) Modelado numérico estático por elemento finito de conexión a doble cortante con perno SAE J429 grado 5 aplicando 36,2 Ton

Las ilustraciones 65 y 66 corresponden al modelo MEF mediante el programa ANSYS para el perno SAE J429 grado 5. Los resultados obtenidos en los puntos de mayor concentración de esfuerzos serán los que se analizarán y compararán empleando los conceptos teóricos. La fuerza aplicada en la prueba virtual fue la misma que llevó a la falla a un perno del mismo tipo con una fuerza aplicada de 355,12 KN (36,2 Ton).

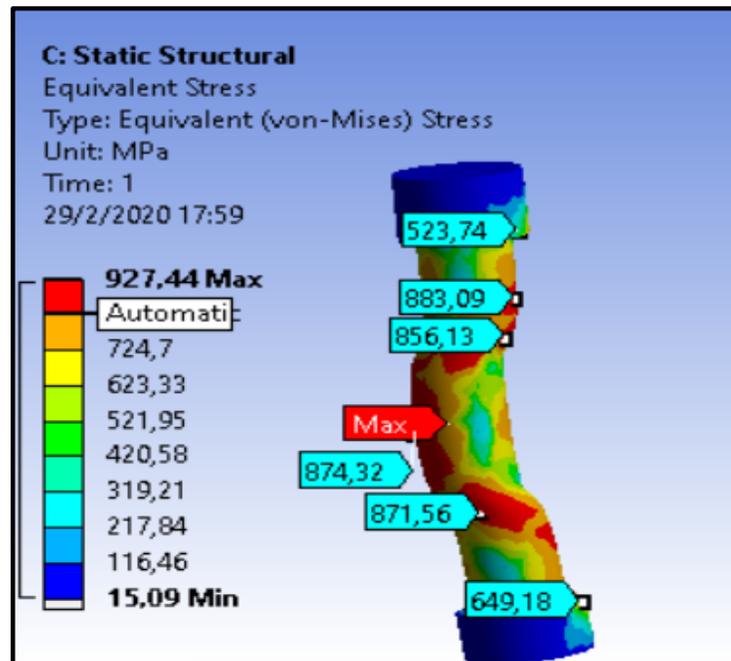


Ilustración 65. Esfuerzos principales por conexión a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando pernos grado 5

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en la ilustración 65, el esfuerzo principal equivalente por von Mises fue de 927,44 Mpa cuando se le aplicó una fuerza de 355,12 KN en dirección perpendicular a la longitud del perno SAE grado 5, este presentó los valores mayores de esfuerzos en las zonas de cizallamiento, los extremos del vástago, la cabeza, la tuerca y en la parte posterior, debido a la flexión consecuencia de la fuerza aplicada.

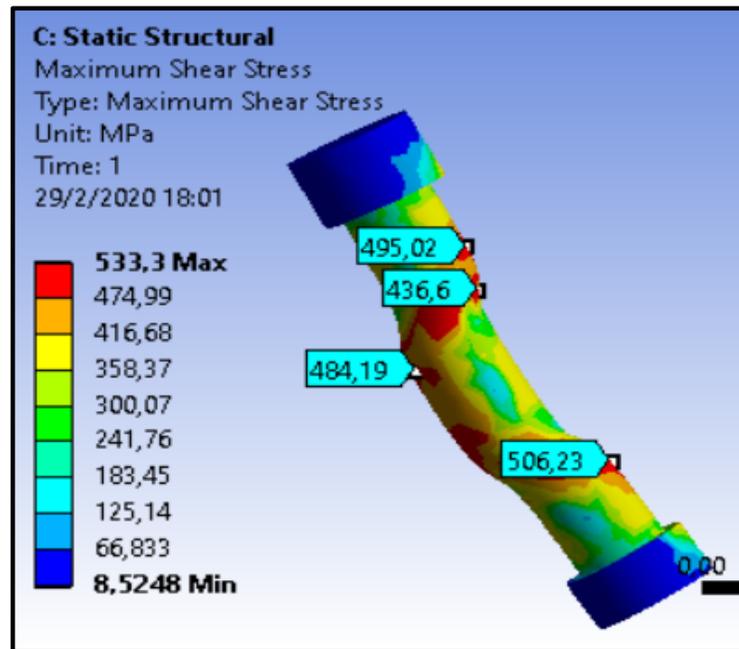
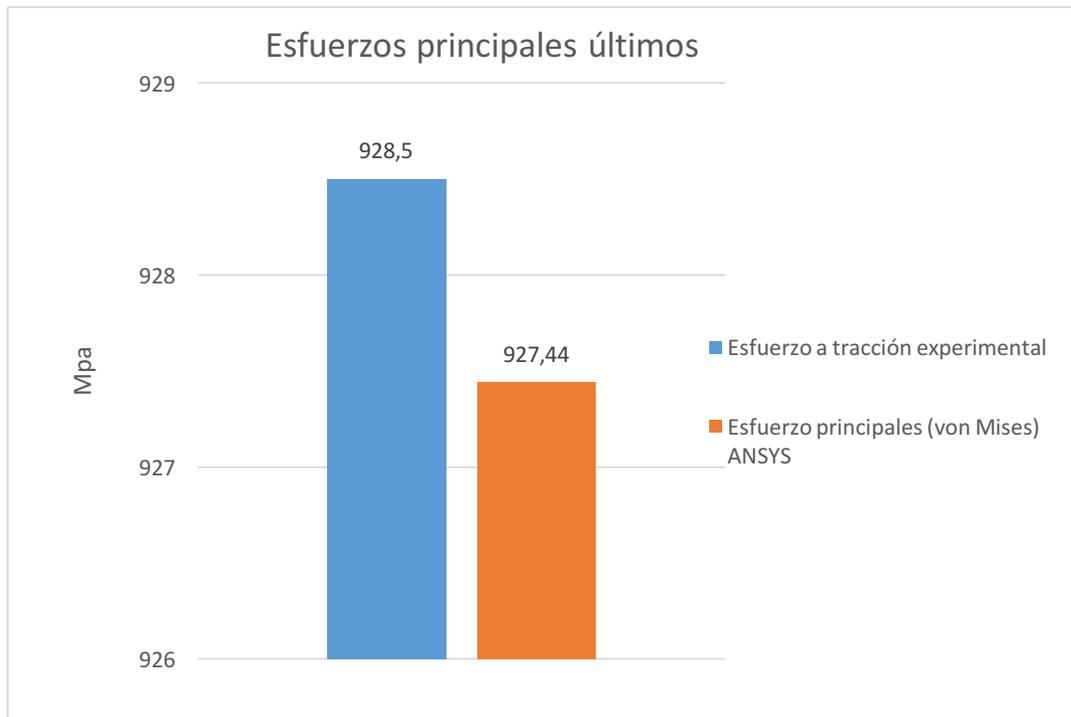


Ilustración 66. Esfuerzo a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando pernos grado 5

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en la ilustración 66, el perno presentó un esfuerzo máximo a cortante de 533,3 Mpa al aplicar una fuerza de 355,12 KN en dirección perpendicular a la longitud del perno, el cual obtuvo los valores máximos de esfuerzo cortante en las zonas de cizallamiento.

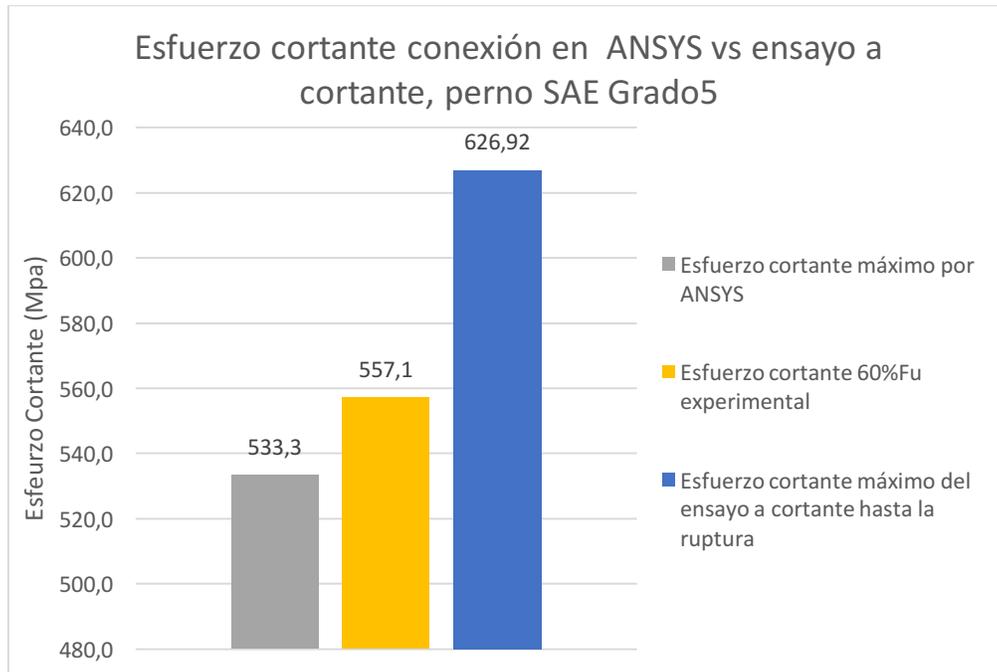
Gráfico 9. Esfuerzos principales por MEF de una conexión a doble cortante realizada en ANSYS vs los esfuerzos últimos por ensayo a tracción de perno SAE grado 5



Fuente: Elaboración propia, 2020

En el gráfico 9 se puede observar que los valores del esfuerzo último por un ensayo uniaxial y el esfuerzo principal equivalente por el criterio de falla de von-Mises, mediante el programa ANSYS, tienden a converger en sus resultados.

Gráfico 10. *Esfuerzos cortantes por ensayo a doble cortante, por FEM mediante ANSYS y por datos experimentales a tracción para el perno SAE grado 5*



Fuente: Elaboración propia, 2020

Los esfuerzos a cortantes por el modelo MEF y los esfuerzos a cortante con datos experimentales a tracción presentan una diferencia de 23,8 Mpa. Si se expresara esta diferencia como una fuerza, esta sería de 1376,1 kilogramos, lo cual establece que el FEM logró aproximaciones aceptables.

Al comparar los resultados de los esfuerzos del ensayo a doble cortante con los esfuerzos por FEM y los esfuerzos con datos experimentales a tracción se obtuvieron las siguientes diferencias:

- Entre los esfuerzos obtenidos por MEF y los obtenidos por el ensayo a doble cortante fueron de 93,62 Mpa, lo cual expresado en fuerza es de 5,4 Ton.
- Entre los obtenidos por medio de datos experimentales a tracción, 60%Fu, y los ensayos a doble cortante fueron de 69,82 Mpa lo que corresponde en fuerza a 4 Ton.

Al analizar las diferencias se puede decir que el método numérico de elemento finito utilizando el software ANSYS se apega a las metodologías teóricas para calcular las capacidades de los pernos; y los datos experimentales expresan la sobre resistencia que existe en los materiales.

4.5.4.2.) Modelado numérico estático por elemento finito de conexión a doble cortante con perno ASTM A325 aplicando 35,6 Ton

Las ilustraciones 66 y 67 corresponden al MEF mediante el programa ANSYS para el perno ASTM A325. Los resultados obtenidos en los puntos de mayor concentración de esfuerzos serán los que se analizarán y compararán empleando los conceptos teóricos. La fuerza aplicada en la prueba virtual fue la misma que llevó a la falla a un perno del mismo tipo, y corresponde a 349,2 KN (35,6 Ton).

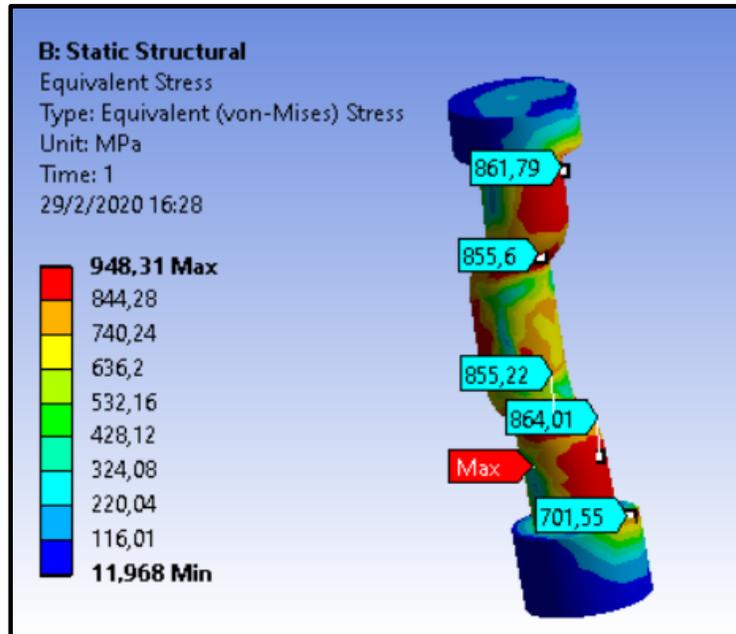


Ilustración 67. Esfuerzos principales por conexión a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando perno A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en la ilustración 67, el perno presentó un esfuerzo principal equivalente de von-Mises de 948,31 Mpa al aplicar una fuerza de 349,23 KN en la dirección perpendicular a la longitud del perno. Este obtuvo valores mayores en las zonas de cizallamiento, así como también en los extremos del vástago, la cabeza, la tuerca y en la parte posterior debido a la flexión, consecuencia de la fuerza aplicada.

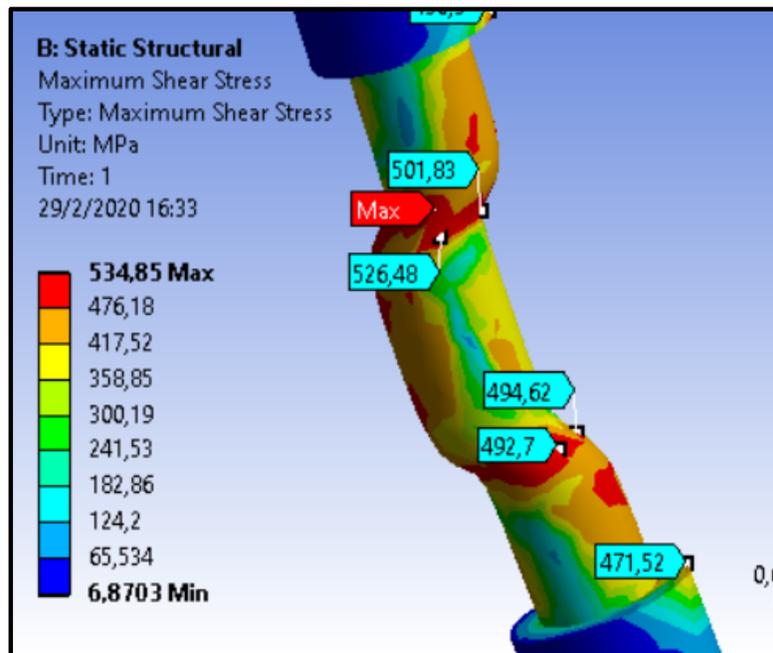
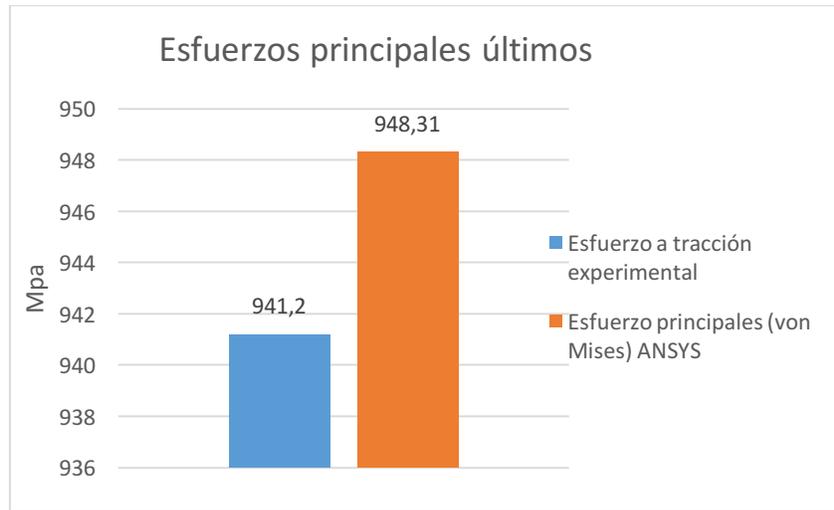


Ilustración 68. Esfuerzo a doble cortante virtual mediante el programa ANSYS, utilizando perno A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en la ilustración 68, el perno presentó un esfuerzo máximo a cortante de 534,84 Mpa al aplicarle una fuerza de 349,23 KN perpendicular a la longitud del perno. Este presentó valores máximos de esfuerzo cortante en las zonas de cizallamiento.

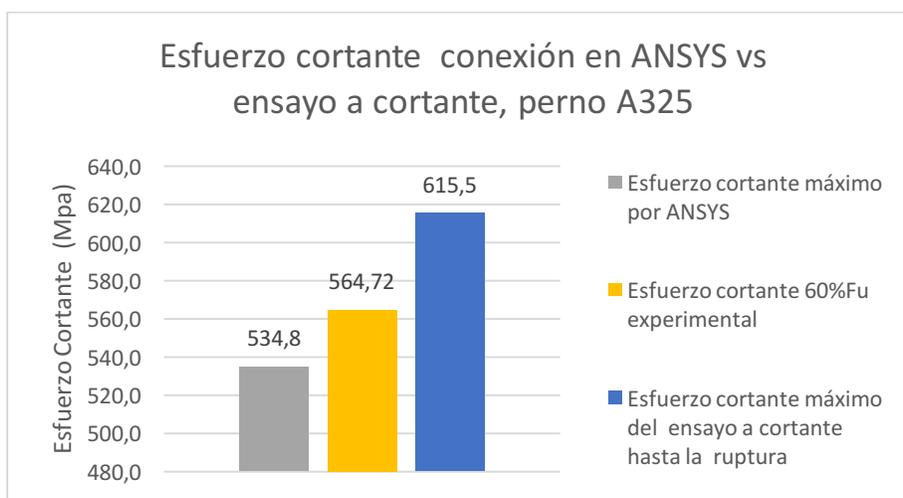
Gráfico 11. *Esfuerzos principales por MEF de una conexión a doble cortante realizada en ANSYS vs los esfuerzos últimos por ensayo a tracción de perno ASTM A325*



Fuente: Elaboración propia, 2020

En el gráfico 11 se exponen los valores de los esfuerzos últimos del ensayo a tracción y el esfuerzo principal equivalente por Von-Mises, mediante el programa ANSYS, donde los valores de los esfuerzos de los métodos utilizados tienden a ser muy aproximados.

Gráfico 12. *Esfuerzos cortantes por ensayo a doble cortante, por FEM mediante ANSYS y por datos experimentales a tracción para el perno ASTM A325*



Fuente: Elaboración propia, 2020

Se puede observar en el gráfico 12 que los esfuerzos a cortantes por el MEF y los de

los datos experimentales a tracción presentan una diferencia de 29,92 Mpa. Si se expresa esta diferencia como una fuerza, esta sería de 1730,05 kilogramos, con lo que se puede afirmar que el método MEF obtuvo proximidades aceptables.

Al comparar los resultados de los esfuerzos del ensayo a doble cortante con esfuerzos por FEM y los esfuerzos con datos experimentales a tracción se obtuvieron las siguientes diferencias:

- Entre los esfuerzos obtenidos por MEF y los del ensayo a doble cortante fueron de 80,7 Mpa, que expresados en fuerza corresponden a 4,6 Ton.
- Entre los obtenidos por medio de datos experimentales a tracción, 60% F_u , y los ensayos a doble cortante, fueron de 50,78 Mpa, los cuales corresponden en fuerza a 2,9 Ton.

Al analizar las diferencias se puede decir que el método numérico de elemento finito utilizando el software ANSYS se apega a las metodologías teóricas para calcular las capacidades de los pernos; y que los datos experimentales, evidencian la sobre resistencia de los materiales.

4.5.4.3.) Modelado MEF estático de conexión a doble cortante con los pernos ASTM A325 y SAE J429 grado 5 aplicando 35 Ton.

En esta sección se comparan los resultados de los esfuerzos principales por Von-Mises y cortantes, al aplicar la misma fuerza a los tipos de pernos en estudio. La fuerza por aplicar será la menor de los ensayos a doble cortante, que corresponde a 35 toneladas.

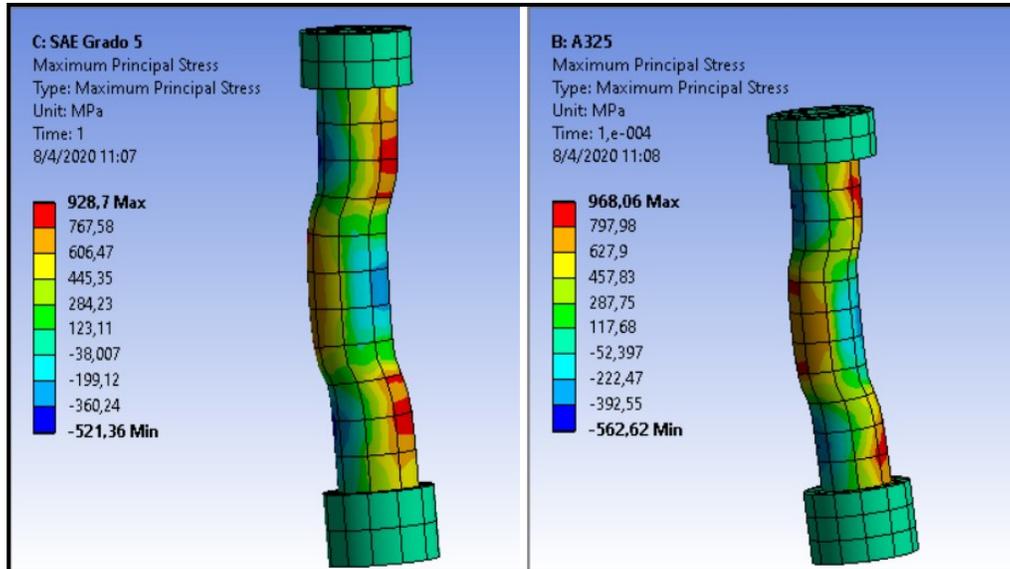


Ilustración 69. Esfuerzos principales al aplicar una fuerza de 35 Ton.

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en la ilustración 69, al aplicar la misma fuerza, los pernos presentaron esfuerzos principales con poca diferencia, donde el SAE grado 5 desarrolló un esfuerzo de 928 Mpa y el A325 uno de 968 Mpa.

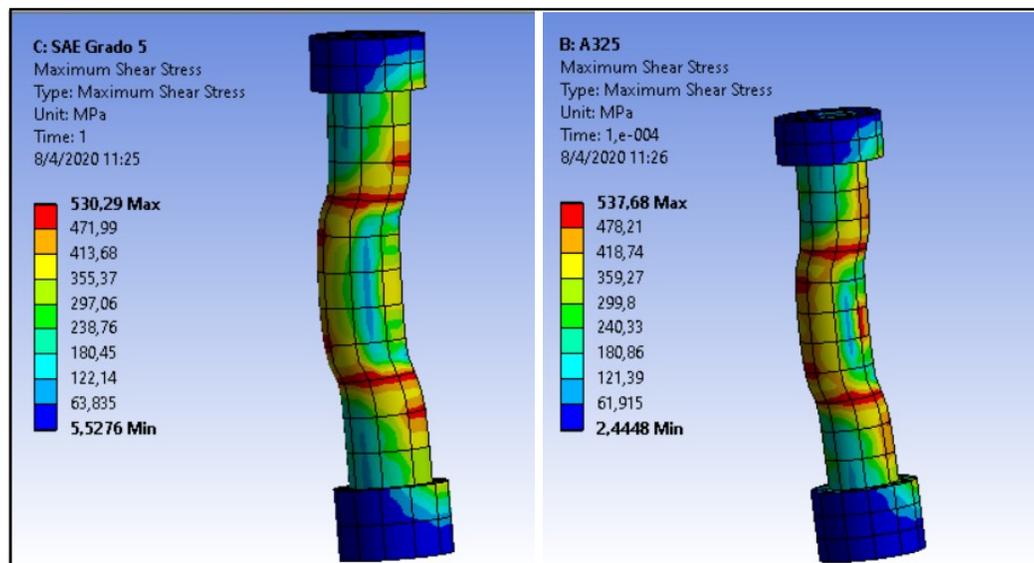


Ilustración 70. Esfuerzos cortantes máximos al aplicar una fuerza de 35 Ton a los pernos SAE grado 5 y A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa, la diferencia en los esfuerzos a doble cortante máximo desarrollados por los pernos es muy poca, y sus resistencias tienden a ser muy similares.

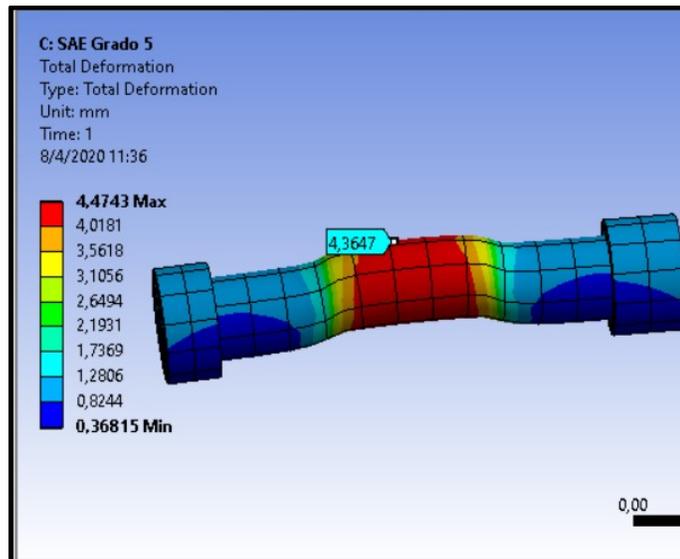


Ilustración 71. Deformación en perno SAE grado 5 al aplicar fuerza de 35 Ton

Fuente: Elaboración propia, 2020

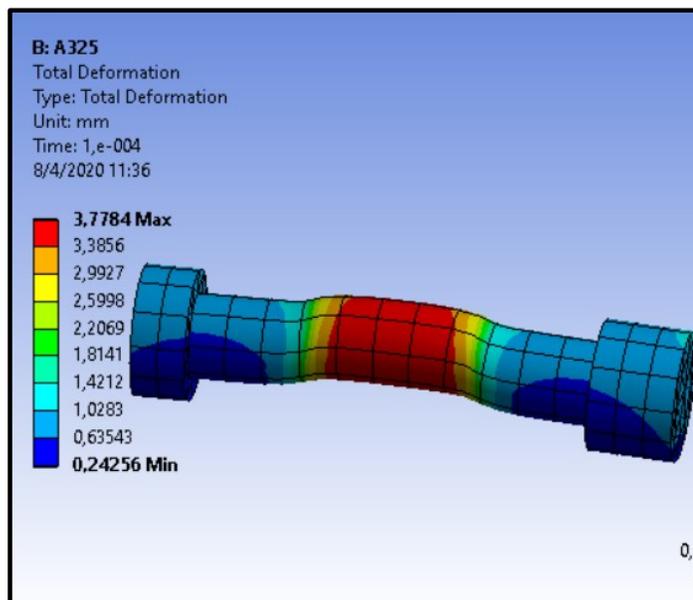


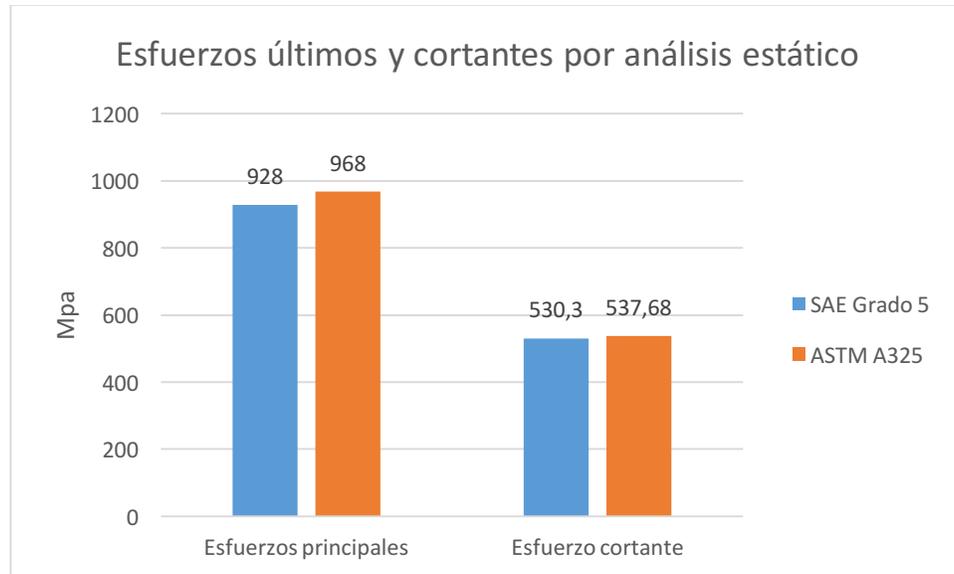
Ilustración 72. Deformación de perno A325 al aplicar fuerza de 35 Ton

Fuente: Elaboración propia, 2020

Al observar las ilustraciones 71 y 72 se puede notar que el perno SAE J429 grado 5

fue más dúctil que el perno ASTM A325. Estos presentaron deformaciones totales de 4,47 mm en el perno SAE grado 5 y de 3,7 mm en el perno A325.

Gráfico 13. *Esfuerzos principales y cortantes por MEF mediante un análisis estático de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar una fuerza de 35 Ton.*



Fuente: Elaboración propia, 2020

Al observar el gráfico se puede ver la similitud de la resistencia entre los pernos.

4.5.5.) Análisis comparativo de las deformaciones de la conexión a doble cortante entre la prueba virtual por un análisis estático y el ensayo a doble cortante

En este apartado se realizará un análisis de las comparaciones métricas y visuales entre las deformaciones de los modelos numéricos por elemento finito mediante el software ANSYS; y las deformaciones reales marcadas en los materiales de la conexión que se usó para los ensayos a doble cortante. La deformación se presenta cuando los materiales sobrepasan la interfase entre el rango elástico y el inelástico, llamada punto de fluencia, es decir, las áreas que expresen esfuerzos superiores al esfuerzo de fluencia expresarán

plastificación. El esfuerzo de fluencia experimental para el acero A36 fue 321,7 Mpa y el teórico de 248,3 Mpa. Al comparar los F_y se obtiene una sobre resistencia del 1,3 con respecto al valor teórico.

Las deformaciones virtuales por comparar serán las del rango plástico. Se realizará con las deformaciones reales marcadas en las láminas de acero estructural y los pernos en estudio. Los comportamientos establecidos para la conexión virtual fueron del tipo lineal y no lineal.

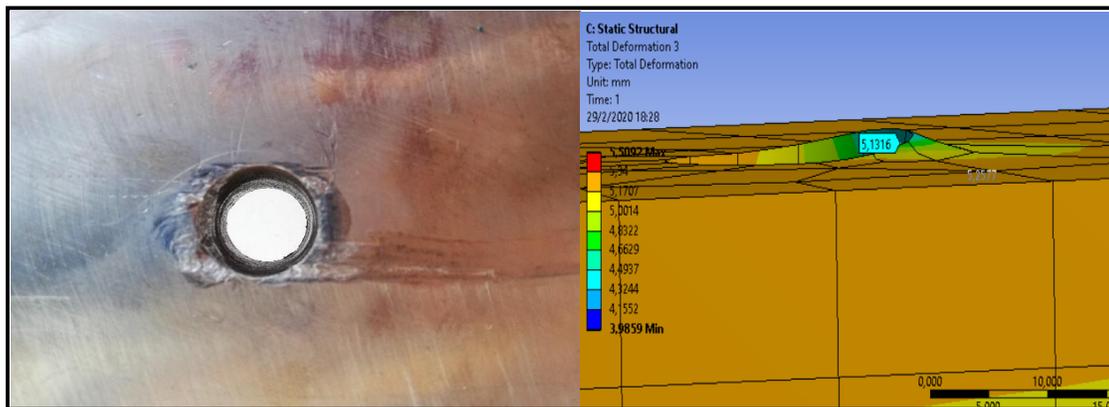


Ilustración 73. Deformación placa central mediante el programa ANSYS y de ensayo a doble cortante

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en las fotos de la ilustración 73, la placa de modelo virtual y la real de acero A36 presentaron, en las mismas áreas, las deformaciones plásticas. La deformación en la placa central de la conexión real no presentó la misma forma que la del modelado virtual, debido a que la real estaba entre dos placas que impedían la expansión de la deformación, lo que provocó que quedara prensada por el contacto que hizo el acero al deformarse, lo que demandó mucho trabajo en el momento de extraer la placa para realizar los análisis.

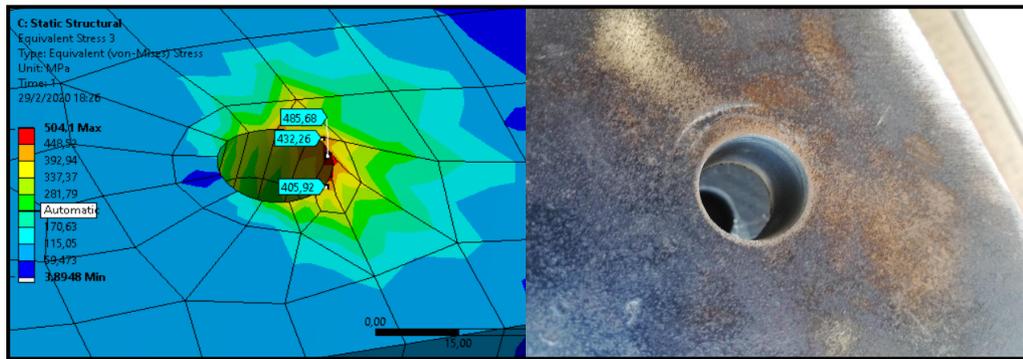


Ilustración 74. Deformación plástica en placas externa de la conexión

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en las imágenes de la ilustración 74, las deformaciones se presentaron alrededor de las perforaciones tanto de las placas exteriores de la conexión real como de la virtual. Estas fueron provocadas por la presión que ejercía el perno en ellas. Una evidencia de esto es que en la placa real la presión de la cabeza del perno fue tanta que quedo marcada en ella una figura circular correspondiente a una de las geometrías de los pernos.

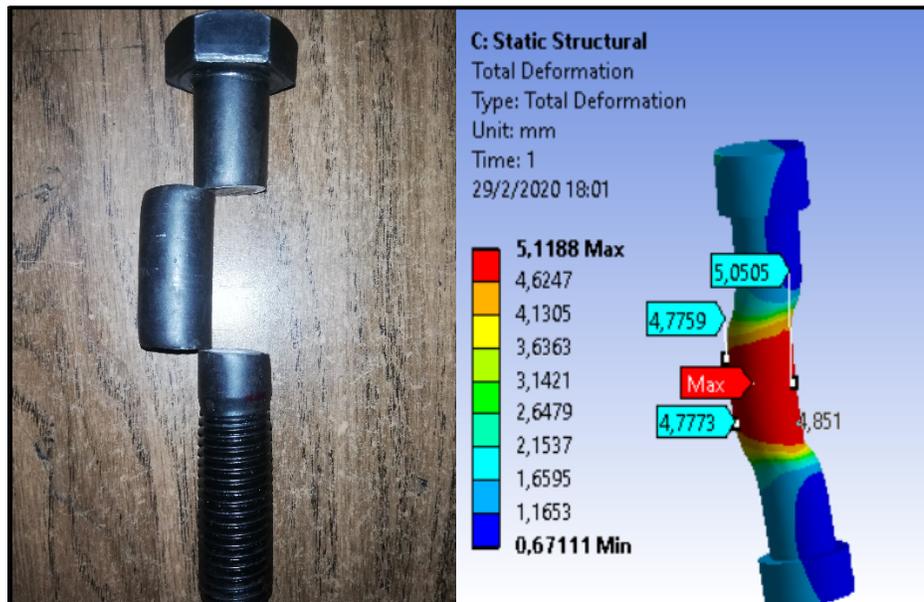


Ilustración 75. Pernos SAE J429 grado5 falla por doble cortante virtual y por ensayo a doble cortante

Fuente: Elaboración propia, 2020

En ilustración 75 se muestra en una de las imágenes el perno real SAE J429 grado 5 fallado a cortante. Este se dividió en tres partes con cortes casi rectos en su vástago. Las dimensiones de los segmentos fueron las siguientes: 25 mm de la base de la cabeza, la parte central de su vástago de 39,5 mm y el resto, más la sección roscada de 62 mm aproximadamente. Al sumar las secciones estas dieron 126,5 mm, la cual es la misma medida del perno antes de realizar el ensayo a doble cortante, lo que indica que no presentó un alargamiento medible con un calibrador convencional con una precisión de 0,05 mm. Por otra parte, en la prueba virtual el perno grado 5 presentó una deformación total máxima de 5,1 mm en la misma zona donde se cortó; y aunque no se dio la ruptura por el modelo numérico por elemento finito, si presentó similitudes en la dirección de su deformación.



Ilustración 76. Fotografía de la cara del plano de ruptura por cortante del perno SAE J429 grado 5

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 76 se puede observar un ligero corte penetrando en la cara del perno aproximadamente de 3,2 mm. Los datos del ensayo indican que el perno se deformó 10,41

mm antes de llegar a la ruptura; de los cuales 3,2 mm fueron a causa de este corte inicial por aplastamiento por la placa central.

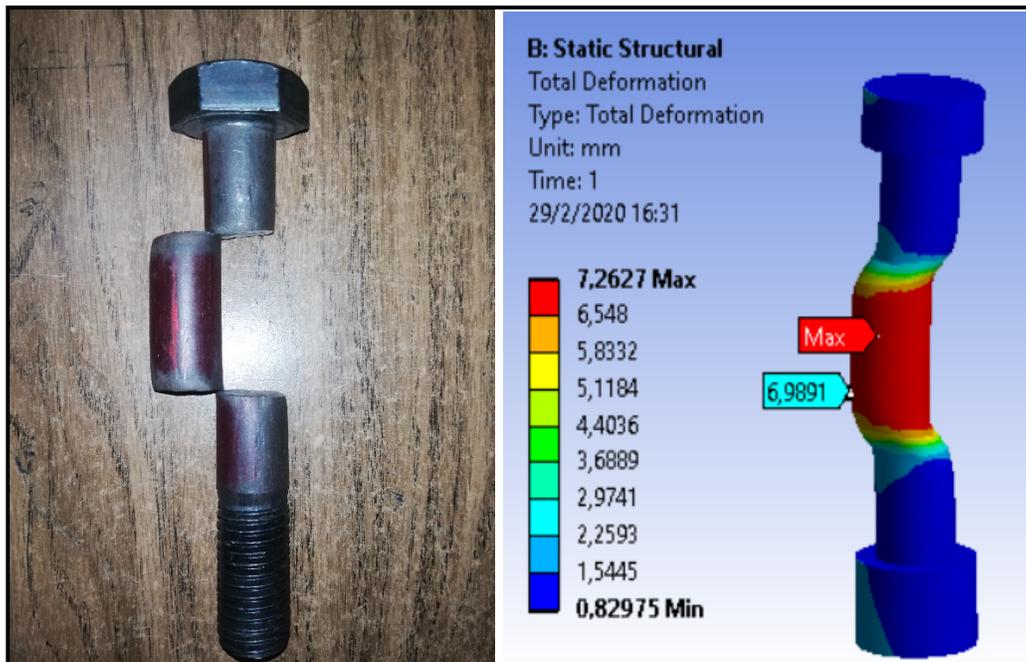


Ilustración 77. Perno ASTM A325. Falta por doble cortante virtual y por ensayo a doble cortante

Fuente: Elaboración propia, 2020

En ilustración 77 se muestra en una de sus imágenes el perno ASTM A325 cuando llegó a la falla por cortante. Se realizaron, en tres partes, cortes casi rectos en su vástago, a 24 mm de la base de la cabeza, la parte central de vástago quedó de aproximadamente de 39 mm y el resto, más la sección roscada, fue de 64 mm aproximadamente. Al sumar todos los segmentos el resultado fue de 127 mm; es decir la misma medida del perno antes de realizar el ensayo a doble cortante. Ello indica que no presentó un alargamiento. Por otra parte, en la prueba virtual, el perno A325 tuvo una deformación total máxima de 7,26 mm en la misma zona y con la misma dirección que el del ensayo a doble cortante, aunque no se pudo llevar a la falla por ruptura por el modelo numérico por elemento finito con un análisis estático.



Ilustración 78. Fotografía de la cara del plano de ruptura por cortante del perno ASTM A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 78 se puede observar un ligero corte penetrando en la cara del perno, aproximadamente de 3,1 mm. Los datos del ensayo indican que el perno se deformó 10,94 mm antes de llegar a la ruptura, de los cuales 3,1 mm fueron de este corte inicial por aplastamiento por la placa central.

4.5.6.) Análisis comparativo entre el modelado numérico por elemento finito mediante análisis estáticos y dinámicos y el ensayo a doble cortante de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325

En esta sección se presentarán los resultados de los esfuerzos últimos y cortantes de un análisis dinámico utilizando un comportamiento bilineal para los materiales, los de un análisis estático no lineal y los de ensayos a doble cortante para ambos pernos en estudio, con el fin de comparar y analizar sus valores de máximos esfuerzos, los puntos donde se aplican los máximos esfuerzos y los puntos de ruptura. Las fuerzas para las pruebas virtuales fueron las mismas que llevaron a la ruptura a los pernos, las cuales corresponden para el

perno SAE J429 grado 5 a 36,2 Ton y para el ASTM A325 a 35,6 Ton. (ver gráfico 7)

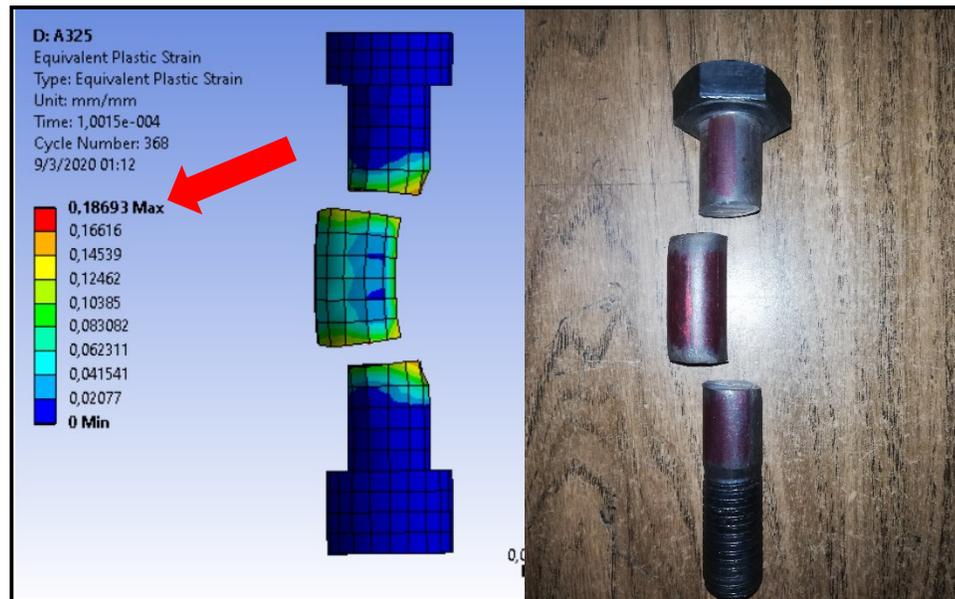


Ilustración 79. Ruptura por doble cortante virtual y real del perno ASTM A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 79 se puede observar la ruptura por una fuerza cortante virtual en el software ANSYS y la ruptura real por un ensayo a doble cortante. Si se observa la foto del perno ASTM A325, el corte es prácticamente recto con un ligero ángulo; lo mismo sucede en el modelo virtual que presenta también un ligero ángulo el corte, lo que denota que el modelo virtual y el ensayo a doble cortante muestran el mismo tipo de corte. Para lograr la ruptura virtual se utilizó el mismo desplazamiento que tuvo la conexión real, el cual fue de 10,94 milímetros y el parámetro de deformación unitaria máximo que debía desarrollar el perno en la prueba virtual para producir la falla por ruptura. Este fue obtenido por un ensayo a tracción a la probeta #6 antes de llegar a la ruptura, el cual dio como resultado 0,199 mm/mm. Es importante establecer que, en la ilustración virtual, su deformación unitaria máxima antes de la ruptura era de 0,18693 mm/mm, la cual es muy similar a la impuesta, por lo que se puede afirmar que el modelado numérico por elemento finito logró el

comportamiento esperado con los parámetros impuestos, simulando una ruptura virtual con el mismo desplazamiento del ensayo a doble cortante. A su vez, también se da una gran similitud entre las deformaciones unitarias desarrolladas por el desplazamiento nodal impuesto de 10,94 cm, el cual es igual al del ensayo a doble cortante, con las deformaciones unitarias no lineales de los ensayos a tracción.

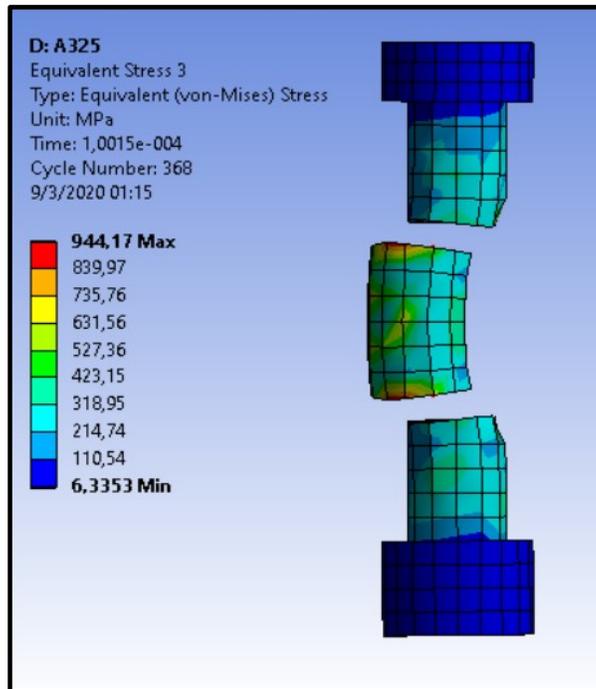


Ilustración 80. Esfuerzo último por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno A325

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 80 el perno ASTM A325 desarrolla un esfuerzo principal, equivalente por un análisis dinámico, de 944,17 Mpa con un desplazamiento de 10,94 mm. Si este se compara con el esfuerzo principal, equivalente por un análisis estático, de 948,3 Mpa, presente en la figura 67, se refleja que al caracterizar los materiales en el modelo numérico por elemento finito en ANSYS con un análisis estático y un comportamiento no lineal; y un análisis dinámico con un comportamiento bilineal, se logra obtener resultados muy similares.

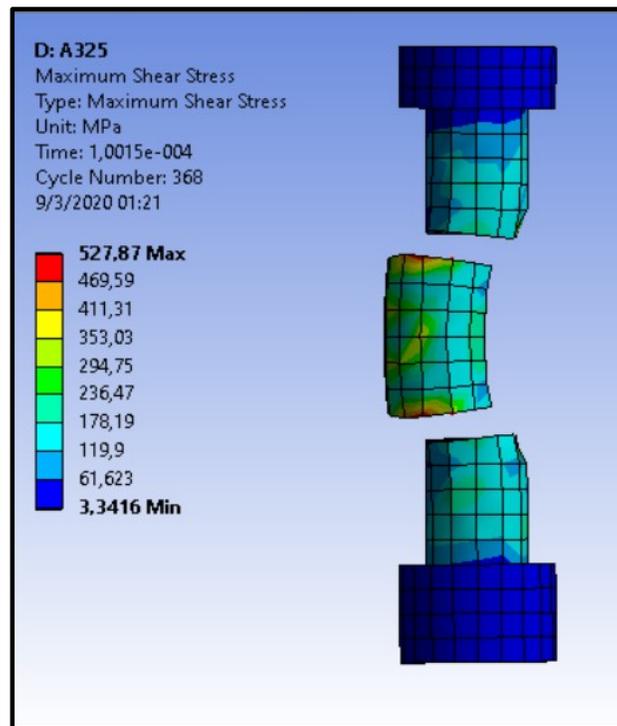


Ilustración 81. Esfuerzo cortante por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno A325

Fuente: elaboración propia, 2020

En la ilustración 81 el comportamiento bilineal fue el esperado con respecto al no lineal del modelo estático, cuyos resultados tienden a converger al expresar similitudes en sus datos, para el modelo dinámico el esfuerzo cortante fue de 527,87 Mpa y para el estático fue de 534 Mpa, (ver ilustración 68)

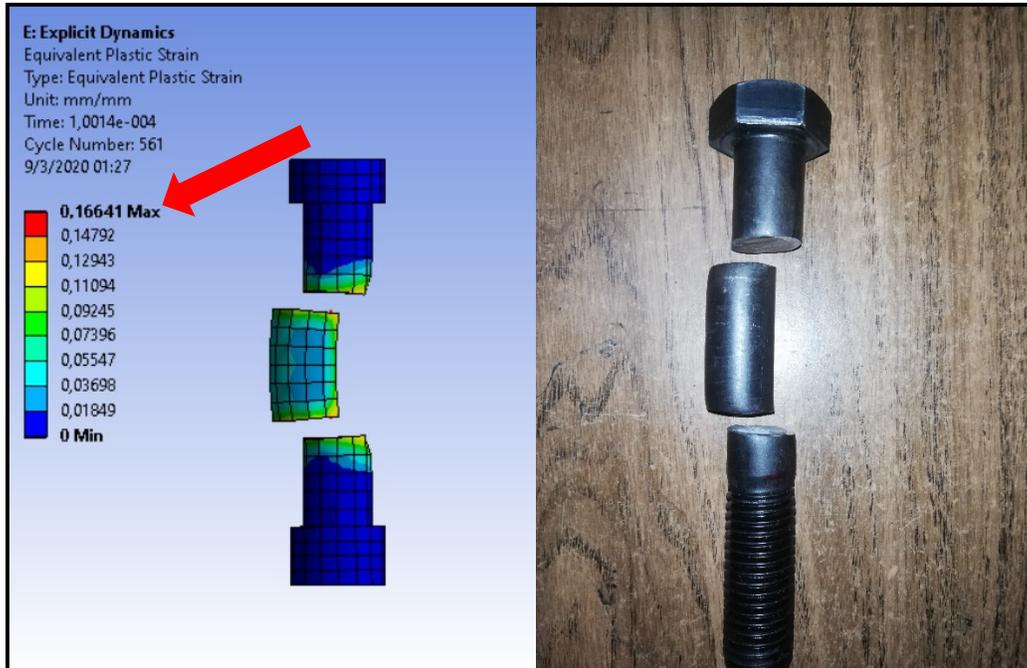


Ilustración 82. Ruptura por doble cortante virtual y real del perno SAE grado 5

Elaboración propia, 2020

En la ilustración 82 se aprecian dos fallas; una por un ensayo a doble cortante y otra por MEF mediante un análisis dinámico. Ambos casos presentan el mismo comportamiento de un corte casi recto con un ligero ángulo; la deformación unitaria virtual dinámica obtenida fue de 0,16641 mm/mm, y la unitaria máxima de 0,17 mm/mm, lo cual representa su comportamiento no lineal. De esta forma, tienden a ser muy similares en las deformaciones unitarias por el modelado virtual dinámico y el comportamiento no lineal, obtenidos por ensayos a tracción; pero también son semejantes al ensayo al doble cortante, ya que el desplazamiento nodal impuesto de 10,41 cm es el mismo que el del ensayo a doble cortante; por lo tanto, se logró provocar una ruptura virtual con el mismo desplazamiento que la ruptura en el ensayo a doble cortante.

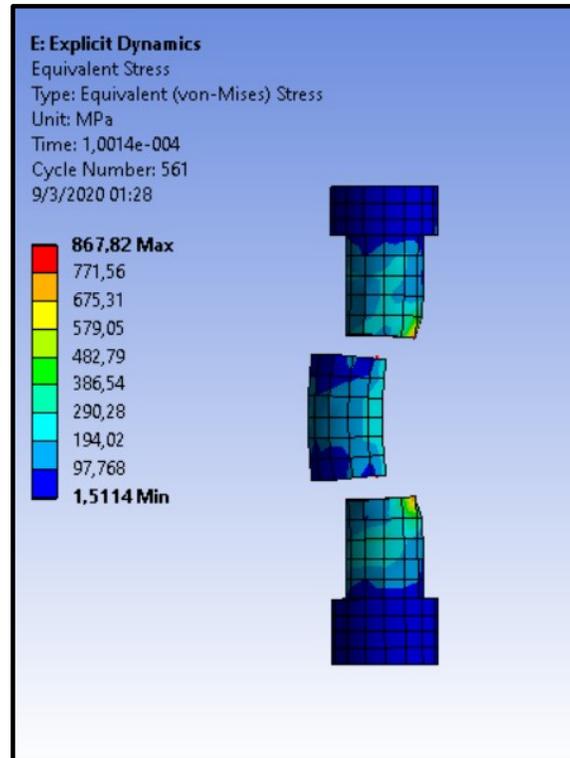


Ilustración 83. Esfuerzo último por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno SAE grado 5

Fuente: Elaboración propia, 2020

En la ilustración 83 se observa que el esfuerzo principal, equivalente por von Mises, alcanzado por el perno SAE J429 grado 5 en prueba virtual dinámica fue de 867,82 Mpa, lo cual expresa una diferencia del 6,8% al compararlo con el 927,44 Mpa, obtenido en la prueba virtual estática. Aunque la diferencia es muy poca, es importante comprender que el comportamiento bilineal está en función de los datos recopilados por el ensayo a tracción, y si el módulo tangencial no es bien calculado por falta de datos, es posible que afecte la comparación entre el bilineal y el no lineal.

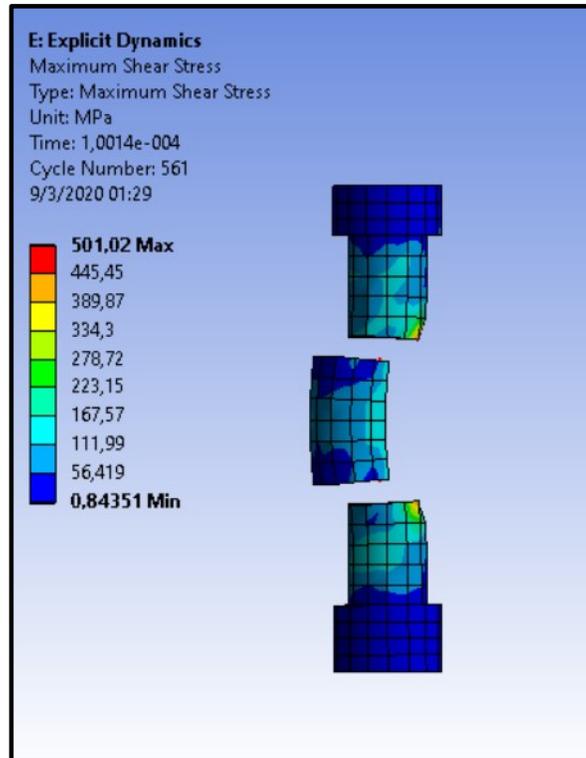
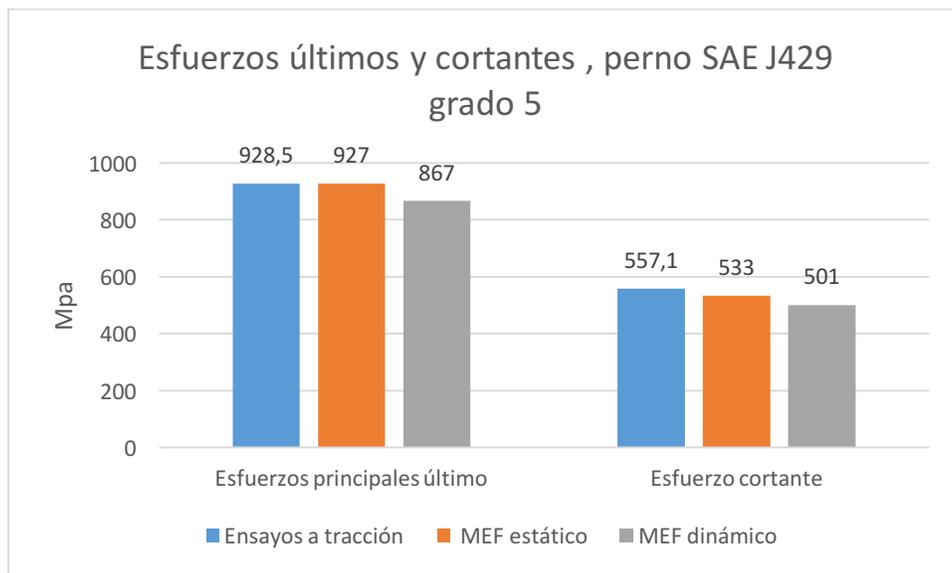


Ilustración 84. Esfuerzo cortante por modelo dinámico mediante el programa ANSYS, perno SAE grado 5

Fuente: Elaboración propia, 2020

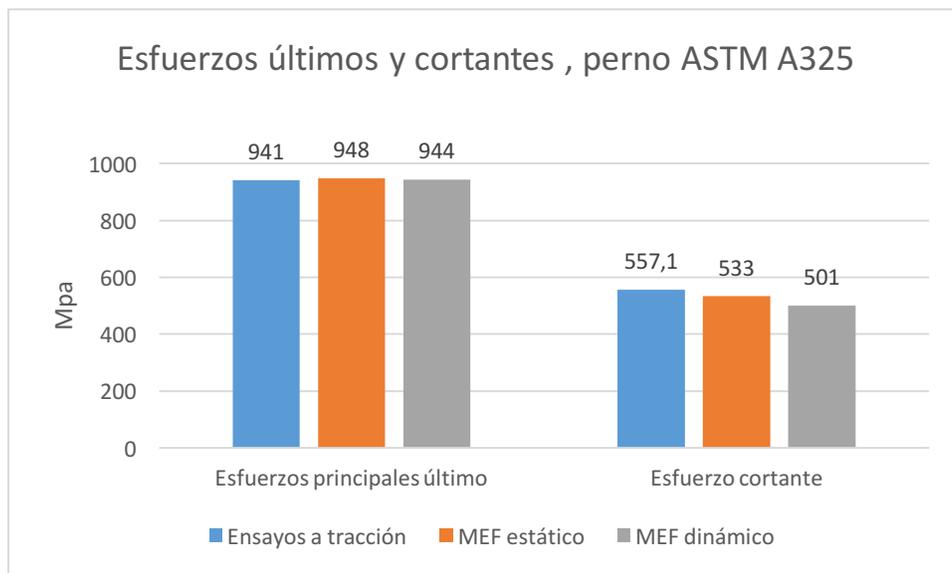
El valor máximo del esfuerzo cortante obtenido a través del modelo numérico por elemento finito dinámico fue de 501,02 Mpa, y el obtenido por el FEM estático fue de 533,3 Mpa (ver ilustración 66). Aunque los valores no tienden a converger, los resultados son muy satisfactorios para demostrar la capacidad del software ANSYS.

Gráfico 14. Comparativa de análisis MEF estático y dinámico con el perno SAE grado 5



Fuente: Elaboración propia, 2020

Gráfico 15. Comparativa de análisis MEF estático y dinámico con el perno ASTM A325



Fuente: Elaboración propia, 2020

Al comparar los resultados de los dos tipos de análisis realizados por MEF, se puede observar que generalmente el análisis estático presenta mejores aproximaciones que el modelo de análisis dinámico.

4.5.7.) Análisis comparativo por el MEF mediante un análisis dinámico de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325 al aplicar un mismo desplazamiento nodal a la conexión

En esta sección se analizarán los comportamientos de los pernos al aplicar un mismo desplazamiento nodal a una de las placas que forma la conexión. En la prueba virtual, el desplazamiento fue de 5 milímetros.

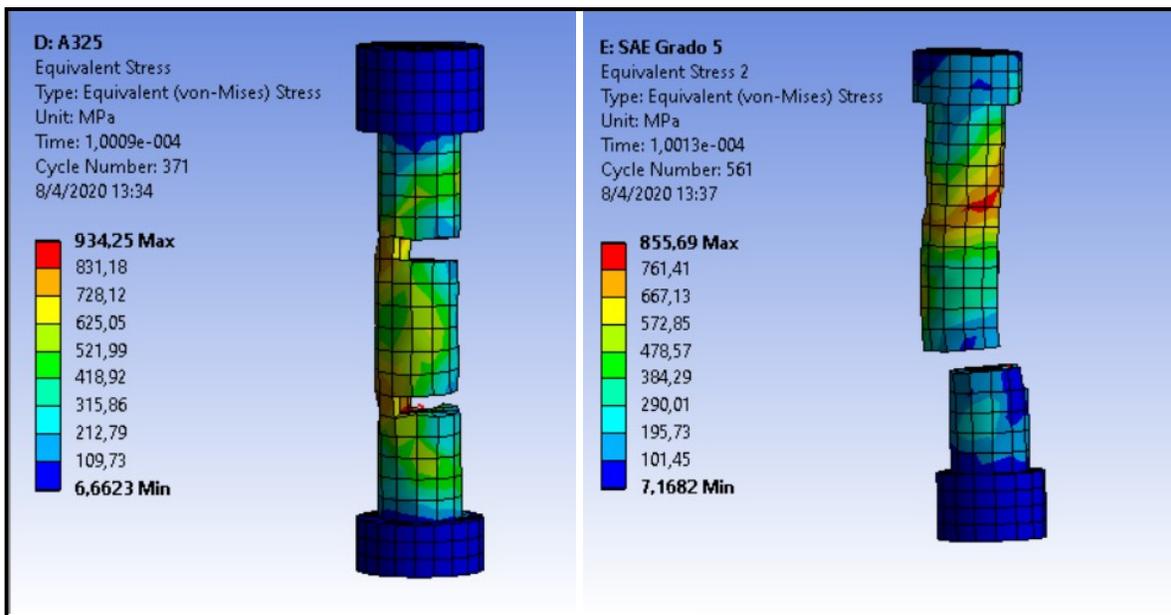


Ilustración 85. Esfuerzos principales, equivalentes por von-Mises, de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar un mismo desplazamiento de 5 mm

Fuente: Elaboración propia, 2020

Al aplicar un mismo desplazamiento nodal se obtiene que el perno A325 desarrolla un esfuerzo principal equivalente, por Von-Mises, de 934,25 Mpa y el perno SAE grado 5 uno de 855,69 Mpa.

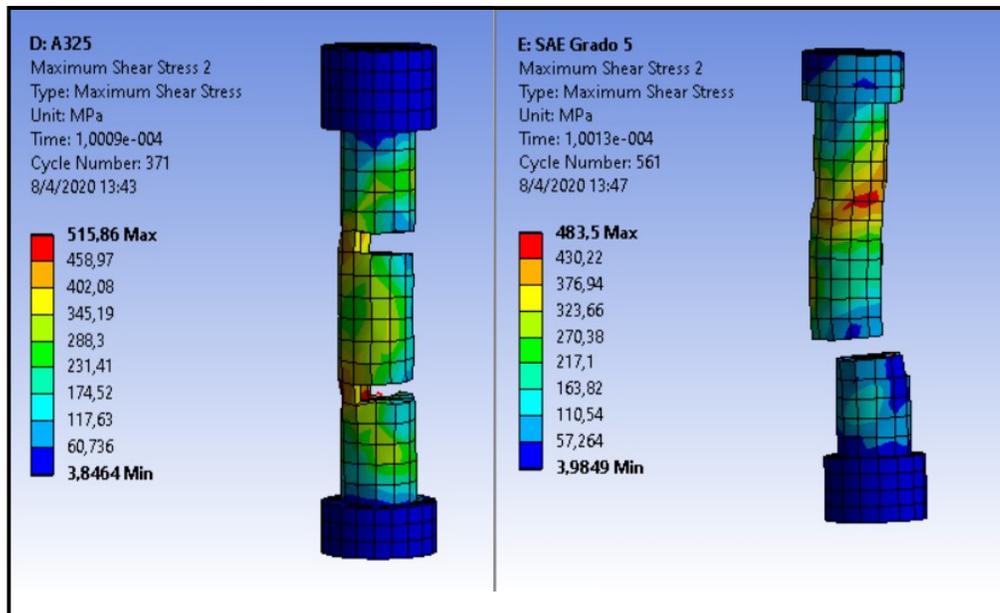


Ilustración 86. Esfuerzos cortantes máximos de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar un desplazamiento nodal de 5mm

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa, el perno A325 desarrolla un esfuerzo a doble cortante de 515,86 Mpa y el perno SAE grado 5 de 483,5 Mpa

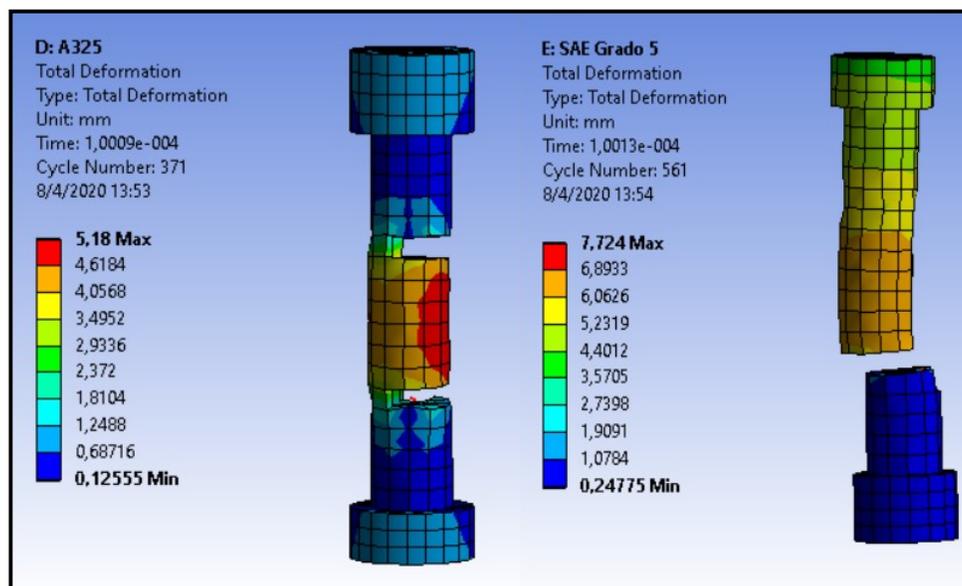
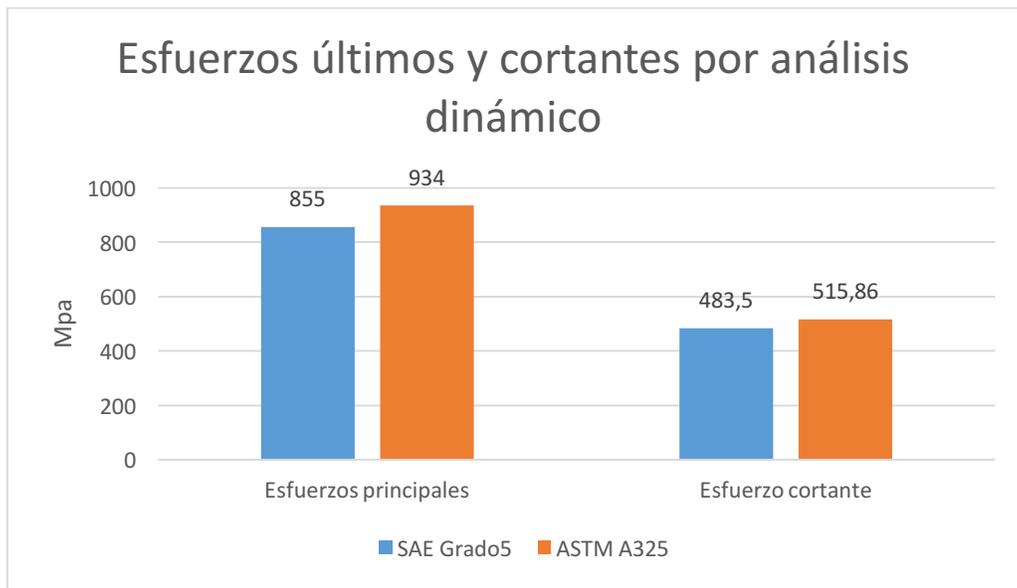


Ilustración 87. Deformaciones de los pernos SAE grado 5 y A325 al aplicar un desplazamiento nodal de 5mm a la conexión

Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa en la ilustración, al aplicar un desplazamiento nodal a una de las placas que formaban la conexión de la prueba virtual, se observa que el perno A325 llega a la falla con una deformación total de 5,18 mm y el perno SAE grado 5 lo hace con una deformación total de 7,72 mm.

Gráfico 16. *Esfuerzos principales por MEF mediante un análisis dinámico de los pernos SAE grado 5 y ASTM A325 al aplicar un desplazamiento nodal de 5 mm a la conexión*

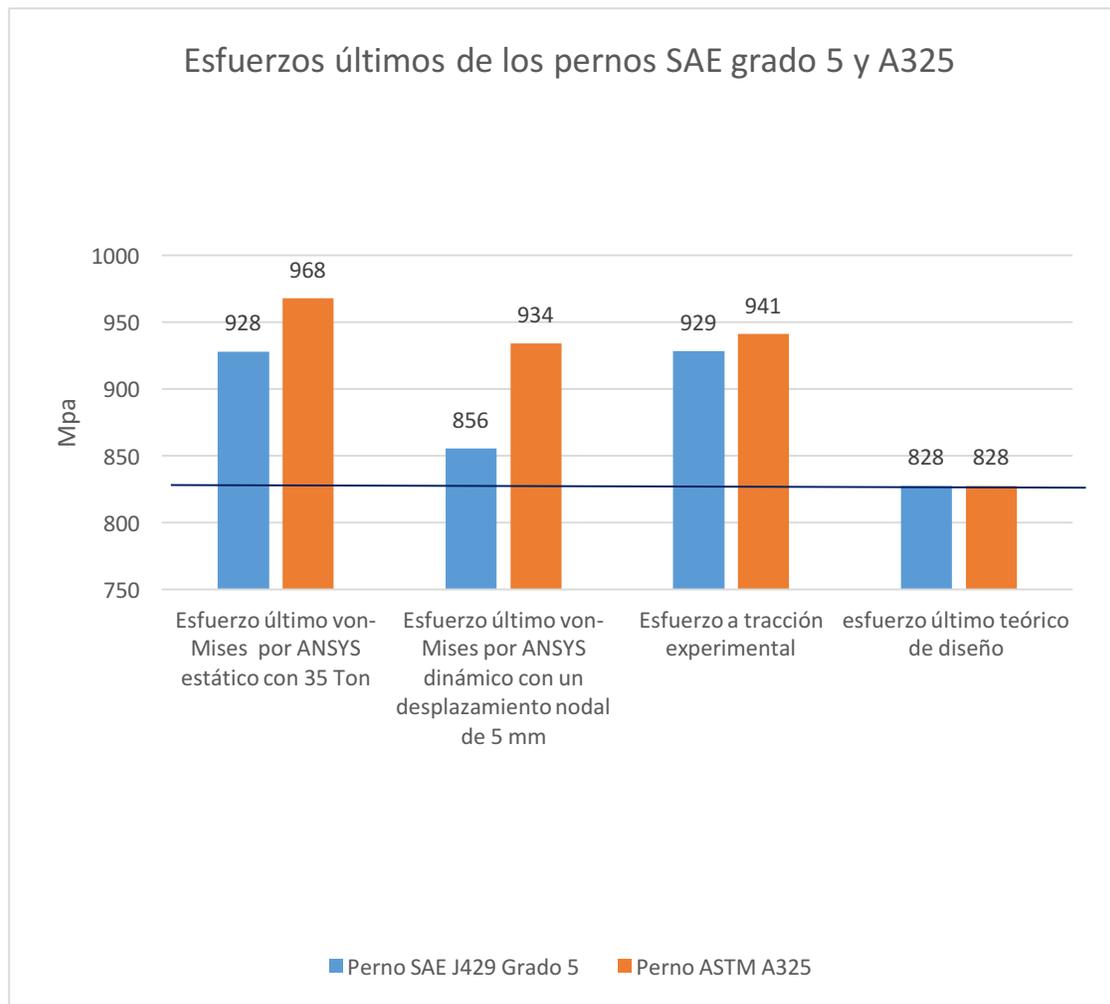


Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se observa, el perno SAE grado 5 desarrolla menores esfuerzos principales y cortantes antes de llegar a la falla por ruptura, en comparación con el perno A325.

4.6.) Análisis comparativos final de las diferentes metodologías realizadas a los pernos SAE J429 grado 5 y al ASTM A325

Gráfico 17. Gráfico final comparativos de los datos de esfuerzos últimos obtenidos para el SAE J429 grado y perno ASTM A325



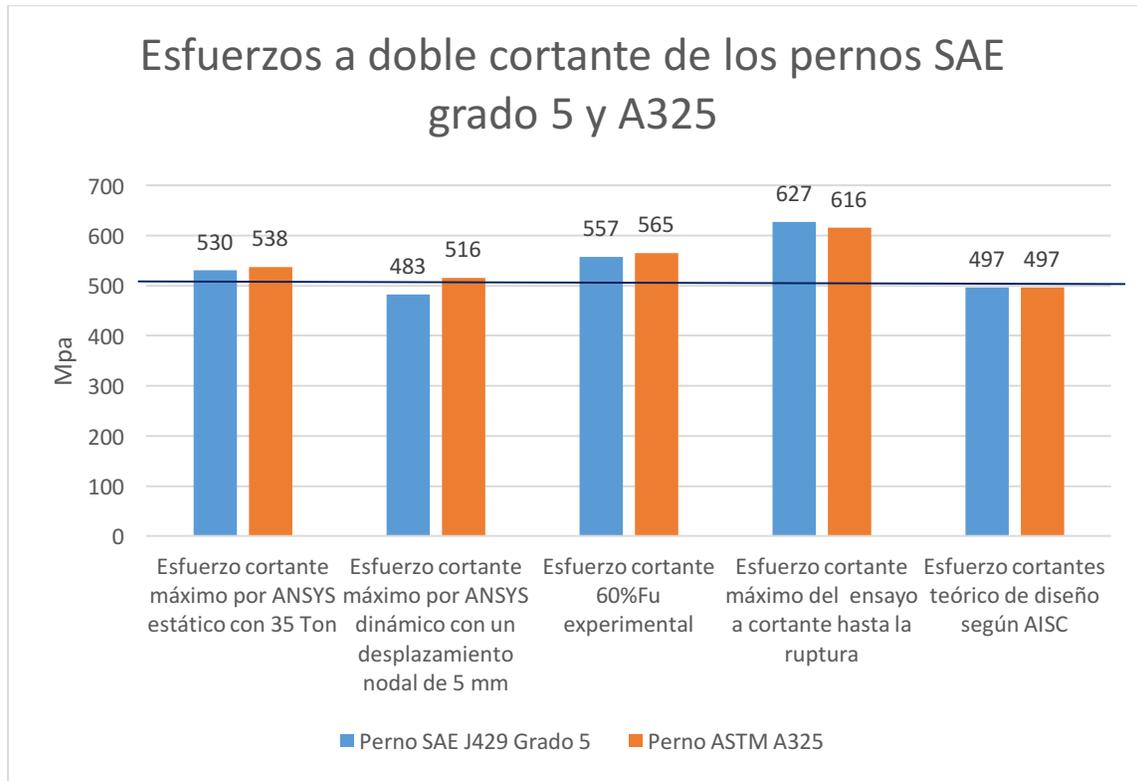
Fuente: Elaboración propia, 2020

El gráfico 17 expresa los valores de esfuerzos últimos obtenidos por las diferentes metodologías. Existe una similitud de los datos, a excepción del modelo dinámico. La línea roja representa el límite del Fu teórico.

Al observar los datos de los pernos SAE J429 grado 5 y los ASTM A325, según la metodología de obtención de datos se presenta lo siguiente:

- Los datos experimentales a tracción presentan gran similitud en los esfuerzos desarrollados por pernos.
- Los datos de esfuerzos principales equivalentes Von-Mises en los modelos estáticos de los pernos no presentan datos similares, con diferencias del 4,3%.
- Los datos de esfuerzos principales Von-Mises en los modelos dinámicos de los pernos presentan diferencias notorias; estas pueden ser producto del módulo tangencial escogido para el perno SAE J429 grado 5 pues la diferencia entre ellos es del 9,11%.
- En todos los métodos empleados, el perno A325 generalmente fue más resistente.
- Los datos experimentales expresan la sobre resistencia de los materiales.

Gráfico 18. Gráfico final comparativos de los datos de esfuerzos a doble cortante obtenidos para el SAE J429 grado 5 y perno ASTM A325



Fuente: Elaboración propia, 2020

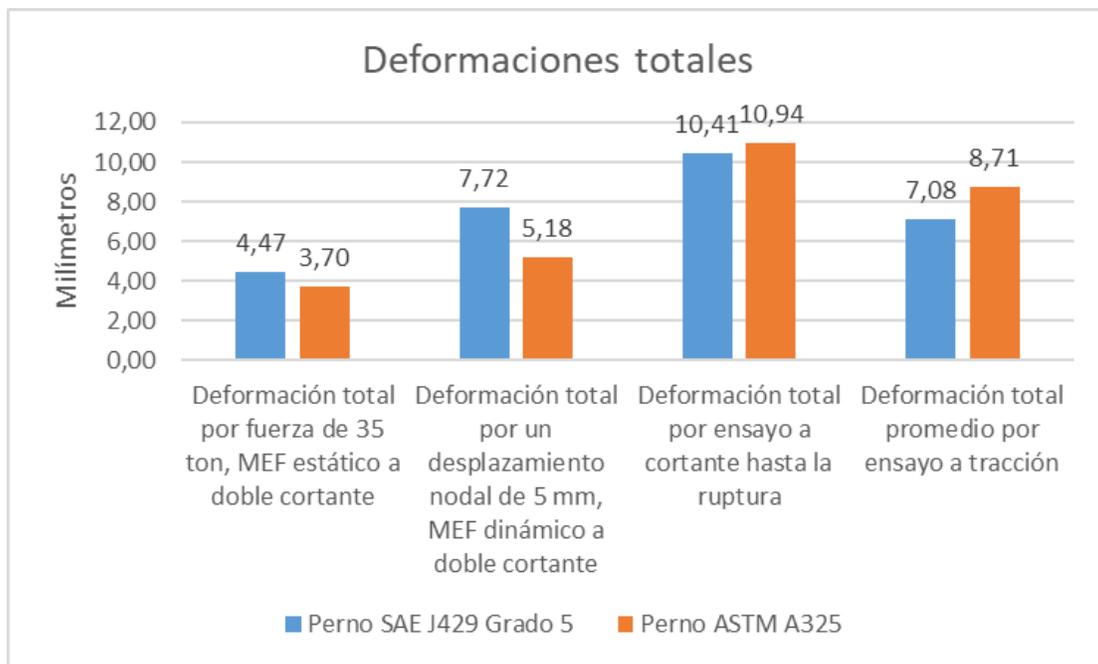
En el gráfico 18 se presentan todos los esfuerzos por doble cortante obtenidos por las diferentes metodologías utilizadas a lo largo de la presente investigación. La línea negra representa el límite del esfuerzo a cortante teórico.

Al evaluar los datos de los pernos SAE J429 grado 5 y del ASTM A325, según la metodología empleada se observa lo siguiente:

- Los datos obtenidos por MEF, son menores que los experimentales, lo cual es positivo ya que no sobreestima la capacidad del perno.
- En todos los métodos de análisis comparativos realizados, los pernos presentaron grandes similitudes en su capacidad a doble cortante, excepto en el análisis dinámico, con una diferencia del 6,6%.

- Los datos experimentales expresan la sobre resistencia de los materiales.
- Los datos de esfuerzo a doble cortante con datos experimentales reflejan los factores de reducción de la resistencia de los materiales.
- Las diferencias entre datos por métodos teóricos y experimentales máximos son notorias, con un valor último de 25,15%.

Gráfico 19. *Deformaciones totales de los pernos SAE grado 5 y A325 por todos los métodos empleados*



Fuente: Elaboración propia, 2020

Como se puede observar, en todos los modelos donde se realizó la prueba a doble cortante, el perno SAE J429 presentó mayores deformaciones totales en los modelos numéricos por elemento finito; pero no sucedió así para los ensayos a tracción y a doble cortante experimental, donde el perno A325 generalmente fue más dúctil.

Capítulo V

5.) Conclusiones

- Al ejecutar las pruebas a tracción, el número de muestras es un factor limitante para realizar análisis comparativos. Los valores teóricos de los esfuerzos de diseño de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325, son menores que los esfuerzos que ellos pueden desarrollar antes de llegar a la falla y el perno A325 fue más resistente que el SAE J429 grado 5. Ambos presentan grandes similitudes en sus deformaciones totales en el punto de esfuerzo último; no existe diferencia significativa en sus esfuerzos últimos, y la ductilidad entre ellos es muy similar.
- La veracidad de los datos por los ensayos a tracción no puede ser demostrada debido al poco número de muestras.
- La resistencia teórica a cortante de los pernos SAE J429 grado 5 y ASTM A325, utilizando la metodología del AISC, es menor a la que ellos pueden resistir. La resistencia esperada del acero estructural A36 permite reducir espesores o minimizar su plastificación.
- Los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325 presentan gran similitud en sus deformaciones totales al llegar a sus cortantes máximos en ensayos experimentales a doble cortante; generalmente el perno ASTM A325 tiende a tener mayor resistencia a doble cortante que el SAE J429 grado 5.
- Los modelos numéricos por elemento finito utilizando análisis estáticos brindan mejores aproximaciones que el modelo por análisis dinámico. Al caracterizar nuevos materiales con parámetros multilineales o bilineales, mediante el programa ANSYS,

estos presentan pocas diferencias; y el potencial de los MEF es evidente, lo cual brinda resultados con aproximados de gran potencial.

- En análisis por MEF, el perno SAE J429 grado 5 tiende a ser más dúctil a cortante y el A325 más resistente; pero no presentan diferencias significativas entre ellos.
- Los pernos SAE J429 grado 5 y el ASTM A325 son muy similares en sus resistencias a tracción y a cortante y presentan gran similitud en sus deformaciones.

5.1.) Recomendaciones

- Realizar una buena trazabilidad de los materiales en estudio.
- Realizar más ensayos a tracción para los materiales SAE J429 Grado 5, ASTM A325 y el A36.
- Al realizar el maquinado para las probetas, procurar que tengan buenos acabados para no producir micro fisuras y así obtener datos más veraces.
- Realizar más ensayos personalizados a doble cortante sin pretensión.
- Realizar ensayos a doble cortante con pernos pretensados.
- Realizar modelados virtuales estáticos y dinámicos a doble cortante con pernos pretensados.

Capítulo VI

6.) Bibliografía

AISC 360-16. (2016). Specification for Structural Steel Building. En:

<https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16-spec-and-commentary.pdf>

American Society for Testing and Material. (2003). AISC Steel Desing Guide 17, High Strength Bolts. En:

<http://keu92.org/uploads/Search%20engineering/High%20Strength%20Bolts.pdf>

American Society for Testing and Material. (2009). Normas ASTM F 606. En:

https://kupdf.net/download/astm-f-606-09_5aa745bbe2b6f50a73e21e73_pdf

American Society for Testing and Material. (2016). Norma ASTM E8/E8M. En:

https://kupdf.net/download/astm-e8-e8m-16a-m-standards_5a6849e7e2b6f58831c1f4dd_pdf

Anónimo. (2018). Anchor bolt and construcción fastener manufacturer. En:

<http://www.portlandbolt.com/technical/specifications/sae-j429/>.

Anónimo. (2018). Glasser & Associates, INC. En: <https://www.glaserbolt.com/materials-structural-bolts-in-ASTM-a325>.

Anónimo. (2017). Mecatrónica LATAM. En:

<https://www.mecatronicalatam.com/tutorial/es/medicion/vernier>.

Anónimo. (2018). Distribución T dos colas. En <https://studylib.es/doc/4680020/tabla-de-valores-cr%C3%ADticos-de-la-distribuci%C3%B3n-t-de-student>

ASTM. (2009). ASTM A325. En

https://www.academia.edu/27749285/Designation_A325_09_Standard_Specificatio_n_for_Structural_Bolts_Steel_Heat_Treated_120_105_ksi_Minimum_Tensile_Strength_1

ASTM. (2019) ASTM A36. En <https://www.astm.org/Standards/A36>

ANSYS.com (28 junio, 2017). Método de los elementos finitos para estudio de la fatiga en una placa entallada. En: <https://cosasdeingenierossite.wordpress.com/2017/06/28/ansys-metodo-de-los-elementos-finitos-introduccion-al-estudio-de-fatiga-en-un-placa-con-entalla/>.

Beer, Ferdinand P. / E. Russell Jhonston, J. (2010). Mecánica de Materiales . México.

Mcgraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.

Cámara mexicana de la construcción, NTC-Acero. (2014). En:

<http://www.smie.org.mx/layout/normas-tecnicas-complementarias/normas-tecnicas-complementarias-acero-abril-2014.pdf>

Consejo de Investigación sobre Conexiones Estructurales, Research council on structural connections . (30 de junio de 2004). En:

<https://www.boltcouncil.org/files/2004RCSCSpecification.pdf>

Córdova, José María. (2016) Herramienta didáctica para ensayos cuasi-estáticos de pequeños especímenes estructurales. En

<http://www.scielo.org.co/pdf/recig/v14n18/v14n18a09.pdf>

Díaz del Castillo, Rodríguez, Felipe.(2019). Perfiles estructurales. En:

http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m5/Perfiles_estructurales_2019-1.pdf

Ente Costarricense de Acreditación. (2018) Acreditación al Instituto Costarricense de

Aprendizaje. En https://www.eca.or.cr/component/sp_simpleportfolio/item/76-le-laboratorio-de-ensayo-de-materiales

Fastenal Engineering and Design Support. (2009). Structural Bolting En:

<https://www.fastenal.com/content/feds/pdf/Article%20-%20Structural%20Bolts.pdf>

Fastenal Engineering and Design Support. (2009). Bolted Joint Design. En

<https://www.fastenal.com/content/feds/pdf/2017/02/Bolted%20Joint%20Design%20rev%202017-02-21.pdf>

Garniet. (2013). Catálogo 2013. En: <http://www.garniet.com.mx/Catalogo2013.pdf>

Instituto Chileno del Acero. (2000). Manual de diseño para estructuras de acero. En

file:///c:/users/pc/downloads/instituto_chileno_del_acero_manual_de_di.pdf

Juárez, Gelacio (2015). Criterios de falla En:

http://materiales.azc.uam.mx/gjl/Clases/MA10_I/S15.pdf

McCormac, Jack C. y Stephen F. Csernak (2012). Diseño de Estructuras de Acero 5ª.

México, Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V

Mendoza, B. (2005). Modelación de proceso de manufactura: En

<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13631/1391%202006.pdf?sequence=1>.

Muir, Larry S.,P.E. (2015). AISC, steelwise. En: <https://www.aisc.org/globalassets/modern-steel/steelwise/2015/steelwise2.pdf>

Popov, E. P. (2000). Mecánica de materiales. México. Person Educación.

Portland Bolt. (2019). ASTM A325 Alternatives. En <https://www.a325bolts.com/alternatives/>.

SAE. (1999). Norma SAE J 429 Revised JAN 1999. En <http://integra.cimav.edu.mx/intranet/data/files/calidad/documentos/nadcap/SAE%20J429%20Mechanical%20and%20Material%20Requirements%20for%20Externally%20Threaded%20Fasteners.pdf>

Steel Comp. (2015). El Acero Hoy. En <https://www.gerdau.com/gerdaucorsa/es/productservices/products/Document%20Gallery/eleccion-tipo-de-acero.pdf>

Suárez Ibujés, Mario (2012). Estimaciones de intervalos de confianza para la media. En <https://www.monografias.com/trabajos91/estimacion-intervalos-confianza-t-student-empleando-excel-y-winstats/estimacion-intervalos-confianza-t-student-empleando-excel-y-winstats.shtml>

Universidad Austral de Chile. (2012). Cálculo de constantes elásticas en metales, aplicando un método no destructivo de ultrasonido, en probetas fabricadas a partir de fundición y probetas en verde elaboradas a partir de aleado mecánico. En: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/bmfcim672c/doc/bmfcim672c.pdf>

- Swanson, J. A. (2002). Effects of variable pretension on bolted connection behavior. Cincinnati. En <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/research-library/effects-of-variable-pretension-on-bolted-connection-behavior.pdf>
- Trujillo. (2008). Conexiones apernadas. En <http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/americanab/08-conexionesApernadas/8-3.html>.
- Valero, A. F. (2004). Aplicaciones de los elementos finitos.
- Valero, E. F. (2004). Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos.
- Walpole, Ronald. E. , R. H. (1999). Probabilidad y Estadística para Ingenieros, sexta edición. Mexico. Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- William T. Segui. (2013). Steel Desing (5 ed.). Estados Unidos de Norteamerica. Cengage Learning.

Anexo 1

Informe de resultados del laboratorio de ensayos de material del Instituto Nacional de Aprendizaje



INFORME DE RESULTADOS

Laboratorio de Ensayo de Materiales
(LEM - INA)



1. INFORMACION GENERAL

Fecha de recepción de muestras: 08 de Diciembre del 2019

Fecha análisis: 17 de Diciembre del 2019

Fecha de Elaboración de Informe: 20 de Diciembre del 2019

Solicitud: 79-2019

ID informe: LEM119-2019

Método: PGR12 Ensayo de Tensión de Materiales Metálicos¹

Solicitante: Esteban Herrera Martinez

Dirección del solicitante: Tuetal Sur. Alajuela. Costa Rica

Descripción de la muestra: Una muestra de placa de acero identificada como Muestra ASTM A36

Registro de las Observaciones: Bitácora BL-15-2019, págs. 47
Bitácora BE-16 págs. 89-90
HC - LEM119-2019

Condiciones ambientales promedio del laboratorio:

(22,25 ± 0,29)	° C	(53,3 ± 1,3)	% HR
----------------	-----	--------------	------

2. OBSERVACIONES

Método acreditado basado en la norma¹:

ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

Análisis realizado en Máquina Universal de Ensayos Zwick/Roell SP-1000

...UL...

ROBERTO MEJIA SOLIS (FIRMA) Firmado digitalmente por ROBERTO MEJIA SOLIS (FIRMA) Fecha: 2019.12.20 11:16:35 -06'00'	JAFETH SILES CALVO (FIRMA) Firmado digitalmente por JAFETH SILES CALVO (FIRMA) Fecha: 2019.12.20 11:17:08 -06'00'
Realizado por: <u>Ing. Roberto Mejía Solís</u>	Aprobado por Dirección Técnica o Calidad <u>Ing. Jafeth Siles Calvo</u>

NOTAS:

1. Los resultados de este informe son representativos sólo para la muestra ensayada.
2. La muestra es aportada y preparada por el cliente.
3. Los resultados se refieren al momento y condiciones durante el ensayo.
4. Se prohíbe la reproducción parcial o total del documento sin previa autorización del laboratorio.
5. La calibración de los equipos utilizados cuenta con trazabilidad al Sistema Internacional de Medidas (SI).
6. El presente documento no es válido sin las firmas y el sello del Laboratorio.
7. El Laboratorio de Ensayo no se hace responsable por la mala interpretación o el mal uso de la información contenida en este informe.
8. El laboratorio no se hace responsable de la afectación de la validez de los resultados que surja de la información suministrada por el cliente.



LABORATORIO
ENSAYO DE MATERIALES

3. CUADRO DE RESULTADOS

ID INFORME		LEM119-2019			
					
PGR 12 Ensayo de Tensión de Materiales Metálicos					
Dimensiones de la Probeta					
MUESTRA	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
ID CLIENTE	Muestra ASTM A36	---	---	---	---
Espesor (mm) ± Incertidumbre	25,70 ± 0,01	---	---	---	---
Ancho (mm) ± Incertidumbre	40,01 ± 0,01	---	---	---	---
L0 (mm) ± Incertidumbre	200,00 ± 0,01	---	---	---	---
Resultados Obtenidos					
MUESTRA	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
ID CLIENTE	Muestra ASTM A36	---	---	---	---
σ Fluencia 0,2% (MPa) ± Incertidumbre	337,81 ± 16,04	---	---	---	---
σ Max (MPa)* ± Incertidumbre	514,73 ± 19,41	---	---	---	---
% Elongación (mm/mm) ± Incertidumbre	26,85 ± 3,43	---	---	---	---
% Reducción de área (mm ² /mm ²) ± Incertidumbre	60,95 ± 3,55	---	---	---	---

4. SIMBOLOGIA

* : Todas las muestras contenidas en este informe son ensayadas con el mismo método, sin embargo las que poseen el indicador "*", son resultados que se encuentran fuera de alcance de acreditación. Ver alcance en www.eca.co.cr. (LE-122)

Lo: Longitud calibrada de la probeta σ : Esfuerzo ---: No Reporta

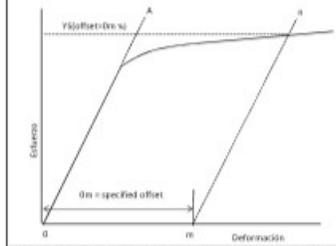


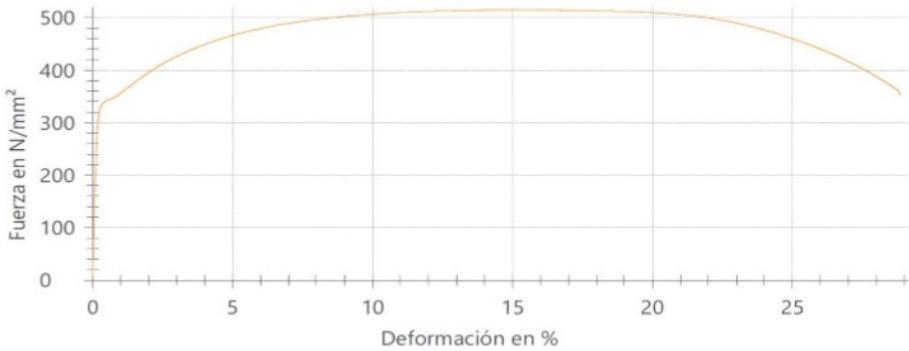
Figura 1. Método offset para la determinación del Esfuerzo de Fluencia. (Tomado de ASTM E8/E8M-11a, fig. 21).



Figura 2. Esquema de ubicación de las variables de medición. (Alcance de Ensayo P GR 12, LEM 119)

ID INFORME		LEM119-2019							
PGR 12 Ensayo de Tensión de Materiales Metálicos									
									
5. COMENTARIOS									
Tipo de muestra placa, según fig. 1. "Rectangular Tension test (plate type)", ASTM E8/E8M.									
Según método "Crosshead speed control method", la velocidades utilizadas para el ensayo son las siguientes:									
Velocidad para propiedades de fluencia: 3,375 mm/min									
Velocidad del ensayo: 11,25 mm/min									
El esfuerzo de fluencia se calcula mediante el "offset method, 0,2%" de la norma ASTM E8M. (ver figura 1 del apartado 4)									
El valor de la muestra reporta una incertidumbre con factor de cobertura $k=2$, que representa un nivel de confianza de aproximadamente 95%.									
EL porcentaje de elongación se reporta con base a la longitud inicial "L ₀ " indicado en las dimensiones de la probeta.									
Las dimensiones de las probetas son de carácter informativo.									

6. OPINIONES/ INTERPRETACIONES/ DECLARACION DE CONFORMIDAD									
El criterio de aceptación o rechazo de los resultados es responsabilidad del cliente.									

7. REFERENCIA									
ASTM E8/E8M-16a "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials"									
8. ANEXOS									
Se adjunta gráfico de Esfuerzo versus Deformación generado en el ensayo									
<div style="text-align: center;"> <p>Identificación de probeta</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Leyenda</th> <th>Nº</th> <th>Descripción</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>●</td> <td>1</td> <td>MUESTRA ASTM A36</td> </tr> </tbody> </table> </div> 				Leyenda	Nº	Descripción	●	1	MUESTRA ASTM A36
Leyenda	Nº	Descripción							
●	1	MUESTRA ASTM A36							



INFORME DE RESULTADOS

Laboratorio de Ensayo de Materiales
(LEM - INA)



1. INFORMACION GENERAL

Fecha de recepción de muestras: 06 de Diciembre del 2019
 Fecha análisis: 18 de Diciembre del 2019
 Fecha de Elaboración de Informe: 20 de Diciembre del 2019
 Solicitud: 79-2019
 ID informe: LEM120-2019
 Método: PGR12 Ensayo de Tensión de Materiales Metálicos¹
 Solicitante: Esteban Herrera Martínez
 Dirección del solicitante: Tuetal Sur, Alajuela, Costa Rica
 Descripción de la muestra: Tres muestras de pernos de acero SAE J429 Gr 5 y tres muestras de pernos de acero ASTM A325
 Registro de las Observaciones: Bitácora BL-15-2019, págs. 48
Bitácora BE-16 pág. 91-92
HC - LEM120-2019

Condiciones ambientales promedio del laboratorio:

(21,85 ± 0,29)

° C

(52,2 ± 1,3)

% HR

2. OBSERVACIONES

Método acreditado basado en la norma¹:

ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

Análisis realizado en Máquina Universal de Ensayos Zwick/Roell Z250

....UL....

NOTAS:

1. Los resultados de este informe son representativos sólo para la muestra ensayada.
2. La muestra es aportada y preparada por el cliente.
3. Los resultados se refieren al momento y condiciones durante el ensayo.
4. Se prohíbe la reproducción parcial o total del documento sin previa autorización del laboratorio.
5. La calibración de los equipos utilizados cuenta con trazabilidad al Sistema Internacional de Medidas (SI).
6. El presente documento no es válido sin las firmas y el sello del Laboratorio.
7. El Laboratorio de Ensayo no se hace responsable por la mala interpretación o el mal uso de la información contenida en este informe.
8. El laboratorio no se hace responsable de la afectación de la validez de los resultados que surja de la información suministrada por el cliente.

ROBERTO MEJIA SOLIS (FIRMA)	Firmado digitalmente por ROBERTO MEJIA SOLIS (FIRMA) Fecha: 2019.12.20 11:10:41 -06'00'	JAFETH SILES CALVO (FIRMA)	Firmado digitalmente por JAFETH SILES CALVO (FIRMA) Fecha: 2019.12.20 11:11:10 -06'00'
Realizado por: Ing. Roberto Mejía Solís		Aprobado por Dirección Técnica o Calidad Ing. Jafeth Siles Calvo	



3. CUADRO DE RESULTADOS

ID INFORME		LEM120-2019			
PGR 12 Ensayo de Tensión de Materiales Metálicos					
					
Dimensiones de la Probeta					
MUESTRA	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
ID CLIENTE	Perno SAE J429 Gr 5 (Perno 1)	Perno SAE J429 Gr 5 (Perno 2)	Perno SAE J429 Gr 5 (Perno 3)	Perno ASTM A325 (Perno 1)	Perno ASTM A325 (Perno 2)
Diámetro en la L0 (mm) ± Inceridumbre	12,53 ± 0,01	12,70 ± 0,01	12,68 ± 0,01	12,69 ± 0,01	12,65 ± 0,01
L0 (mm) ± Inceridumbre	50,00 ± 0,01	50,00 ± 0,01	50,00 ± 0,01	50,00 ± 0,01	50,00 ± 0,01
Resultados Obtenidos					
MUESTRA	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
ID CLIENTE	Perno SAE J429 Gr 5 (Perno 1)	Perno SAE J429 Gr 5 (Perno 2)	Perno SAE J429 Gr 5 (Perno 3)	Perno ASTM A325 (Perno 1)	Perno ASTM A325 (Perno 2)
σ Fluencia 0,2% (MPa) ± Inceridumbre	669,76 ± 31,65	828,94 ± 39,18	739,40 ± 34,94	909,43 ± 42,98	898,25 ± 42,45
σ Max (MPa) ± Inceridumbre	890,98 ± 33,34	930,94 ± 34,84	928,50 ± 34,75	976,73 ± 36,55	967,81 ± 36,22
% Elongación (mm/mm) ± Inceridumbre	15,35 ± 1,83	19,83 ± 2,36	17,01 ± 2,02	16,14 ± 1,92	19,32 ± 2,30
% Reducción de área (mm ² /mm ²) ± Inceridumbre	48,52 ± 2,83	59,72 ± 3,48	48,72 ± 2,84	63,18 ± 3,68	66,46 ± 3,87
Dimensiones de la Probeta					
MUESTRA	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10
ID CLIENTE	Perno ASTM A325 (Perno 3)	---	---	---	---
Diámetro en la L0 (mm) ± Inceridumbre	12,64 ± 0,01	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---
L0 (mm) ± Inceridumbre	50,00 ± 0,01	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---
Resultados Obtenidos					
MUESTRA	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10
ID CLIENTE	Perno ASTM A325 (Perno 3)	---	---	---	---
σ Fluencia 0,2% (MPa) ± Inceridumbre	868,60 ± 41,05	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---
σ Max (MPa) ± Inceridumbre	941,24 ± 35,22	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---
% Elongación (mm/mm) ± Inceridumbre	19,90 ± 2,37	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---
% Reducción de área (mm ² /mm ²) ± Inceridumbre	64,04 ± 3,73	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---	--- ± ---

5. COMENTARIOS

Tipo de muestra, Barra Redonda según fig. 8. "Standard Round Tensión Test Specimen (Specimen 1)", ASTM E8

Según método "Crosshead speed control method", la velocidades utilizadas para el ensayo son las siguientes:

Velocidad para propiedades de fluencia: 0,84 mm/min

Velocidad del ensayo: 2,8 mm/min

El esfuerzo de Fluencia se calcula mediante el "offset method, 0,2%" de la norma ASTM E8M. (ver figura 1 del apartado 4)

El valor de la muestra reporta una incertidumbre con factor de cobertura $k=2$, que representa un nivel de confianza de aproximadamente 95%.

El porcentaje de elongación se reporta con base a la longitud inicial "L0" indicado en las dimensiones de la probeta.

Las dimensiones de las probetas son de carácter informativo.

--

6. OPINIONES/ INTERPRETACIONES/ DECLARACION DE CONFORMIDAD

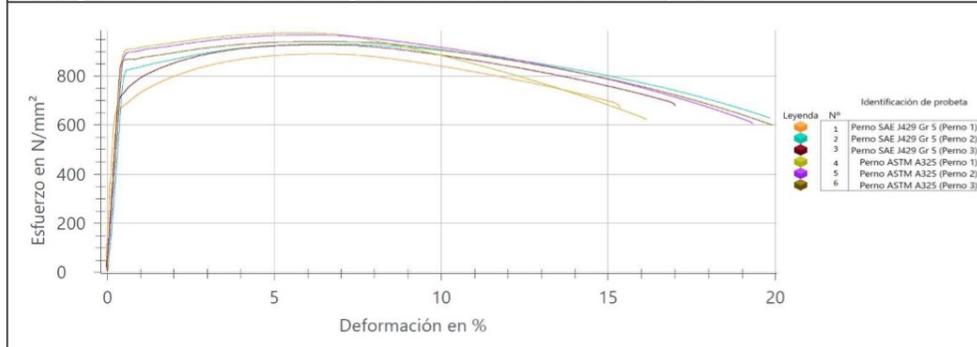
El criterio de aceptación o rechazo de los resultados es responsabilidad del cliente.

7. REFERENCIA

ASTM E8/E8M-16a "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials"

8. ANEXOS

Se anexa gráfica de esfuerzo versus deformación generada por el equipo para las muestras ensayadas



Centro de Desarrollo Tecnológico Metal Mecánica.
Ciudad Mario Echandi Barrio la Plywood, Alajuela, Costa Rica.

ASTM A325		SAE J429 Grado 5		Lamina de Acero A36	
Deformacion	Esfuerzo	Deformacion	Esfuerzo	Deformacion	Esfuerzo
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	4,61	0,00	4,70	0,00	5,08
0,00	10,91	0,00	8,83	0,03	36,94
0,00	17,07	-0,01	14,28	0,09	93,76
0,00	25,35	-0,01	21,36	0,17	165,61
0,00	38,15	-0,01	31,94	0,26	243,65
0,00	55,51	-0,01	48,78	0,45	316,82
0,00	79,29	0,00	73,70	0,55	327,41
0,01	110,76	0,01	109,18	0,69	335,09
0,02	150,44	0,03	153,11	0,77	337,00
0,03	200,55	0,04	203,45	0,86	339,79
0,05	257,45	0,05	258,57	1,06	342,34
0,06	317,98	0,07	317,35	1,26	344,05
0,08	381,21	0,08	379,66	2,04	357,33
0,09	445,69	0,10	444,14	3,30	382,22
0,11	510,66	0,11	510,07	4,44	403,00
0,12	575,93	0,13	577,23	5,59	420,52
0,14	641,14	0,15	644,65	6,71	434,85
0,14	654,27	0,15	657,97	7,80	446,79
0,14	667,38	0,16	671,06	8,91	457,37
0,15	680,53	0,17	683,64	10,08	466,80
0,15	693,80	0,18	695,73	11,31	475,24
0,15	707,01	0,19	707,20	12,59	482,60
0,17	773,48	0,27	739,43	13,93	489,03
0,19	837,23	0,30	748,90	15,32	494,44
0,30	868,79	0,37	766,24	16,75	499,10
0,42	868,00	0,44	782,06	18,21	502,94
0,61	879,62	0,63	813,85	19,73	506,17
0,95	893,53	0,70	827,00	21,27	508,72
1,28	907,73	0,92	846,50	22,86	510,79
1,62	919,99	1,23	872,77	24,48	512,36
1,97	929,44	1,55	893,43	26,14	513,49
2,33	935,88	1,90	908,92	27,83	514,28
2,70	939,67	2,26	919,62	29,55	514,61
3,09	941,00	2,65	925,95	31,29	514,60
3,48	941,23	3,06	928,40	34,87	513,76
4,32	929,36	3,97	920,42	38,53	511,31
5,20	899,83	4,94	888,26	42,26	505,28
6,13	860,53	5,93	845,15	46,03	489,50
7,13	810,73	6,94	792,97	49,83	461,69
8,24	742,09	8,07	721,78	53,66	420,90
9,45	647,63	8,50	678,45	57,54	360,91
9,83	612,69	0,00	0,00	57,69	353,35

Deformaciones totales en los ensayos a tracción

Anexo 2

Fotografías de los acabados de las probetas después del maquinado





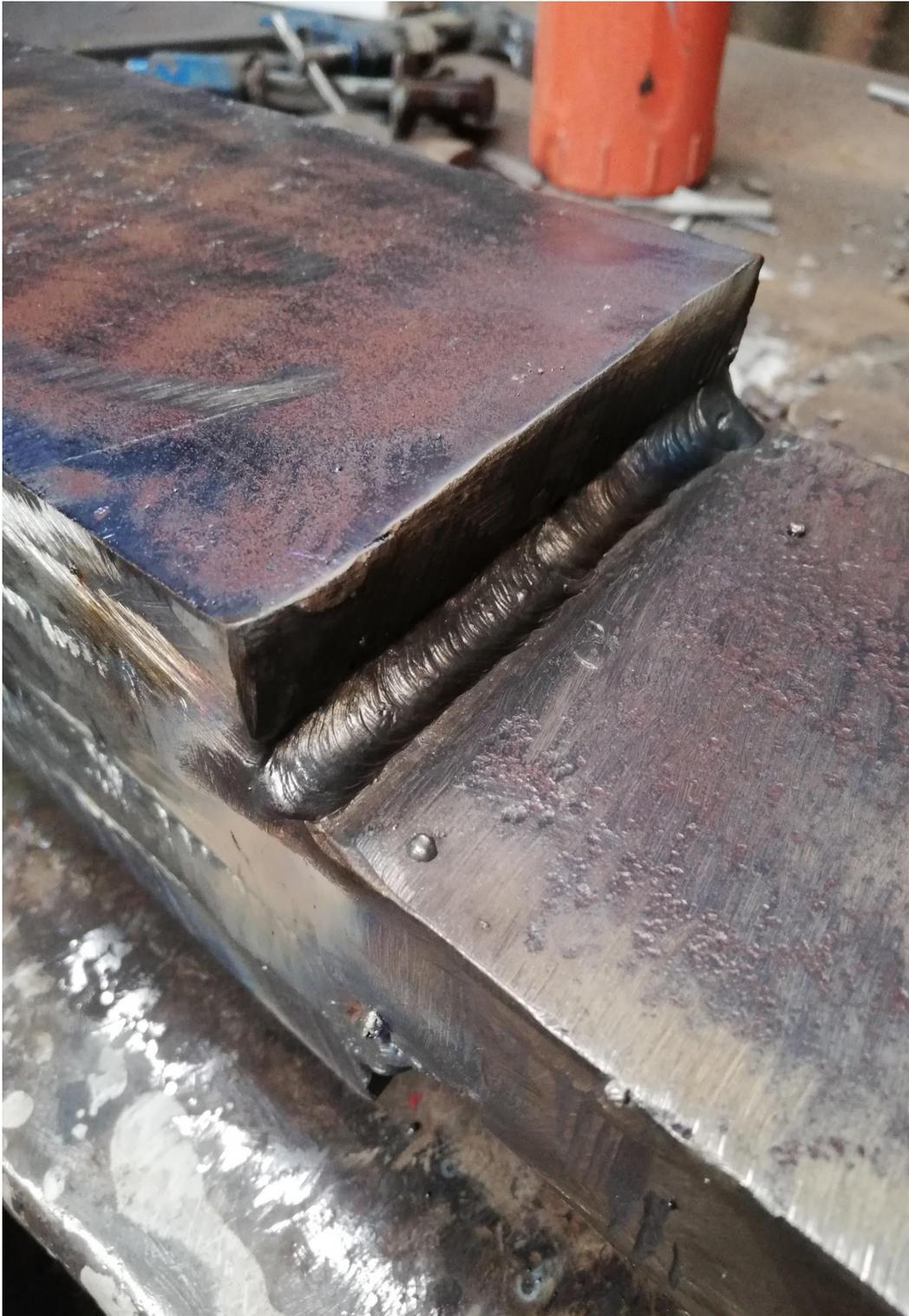




Anexo 3

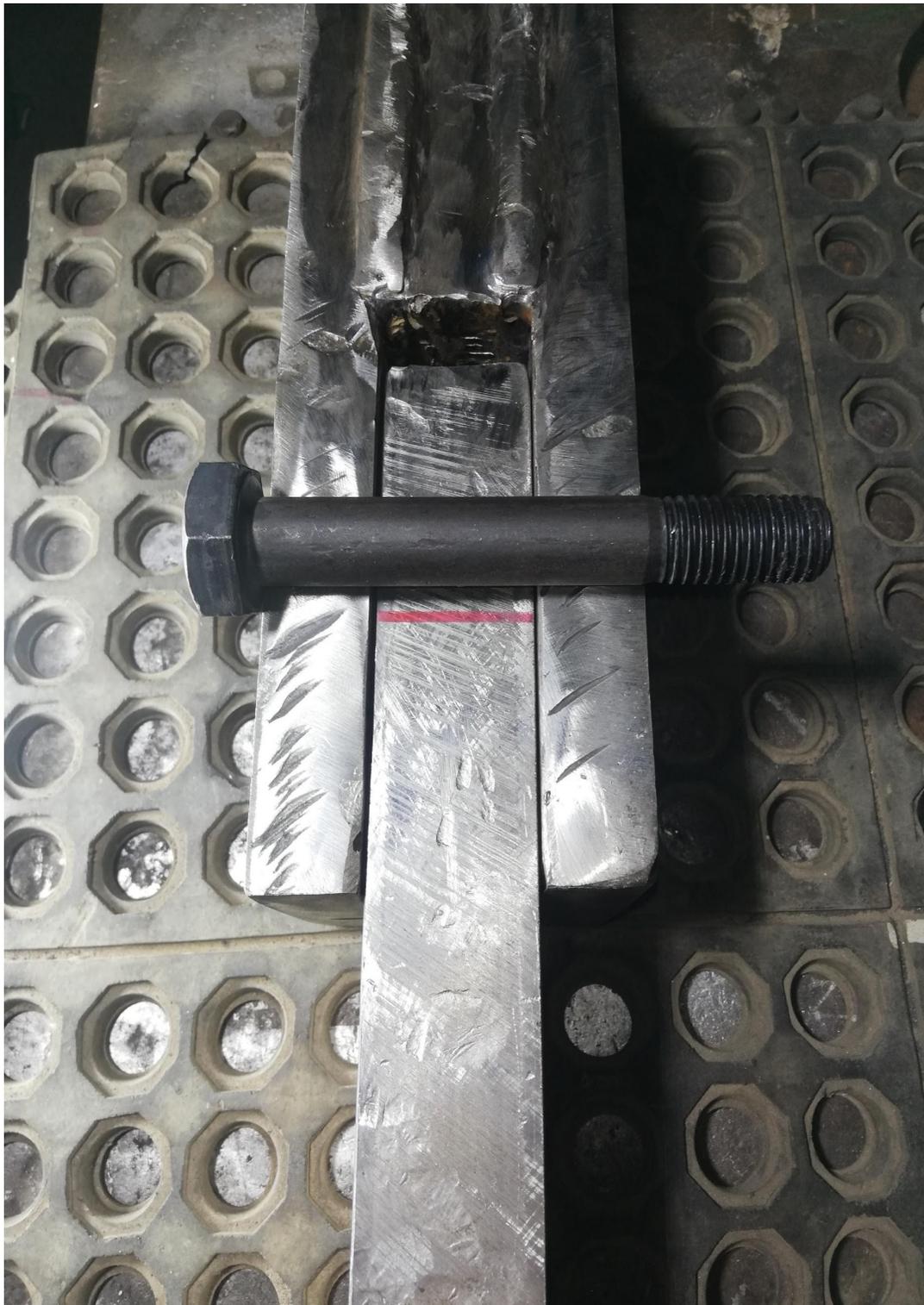
Material para la construcción de la conexión (láminas de acero presuntamente A36 en espesores de 25 mm y 38 mm)











Conexión con perno ASTM A325



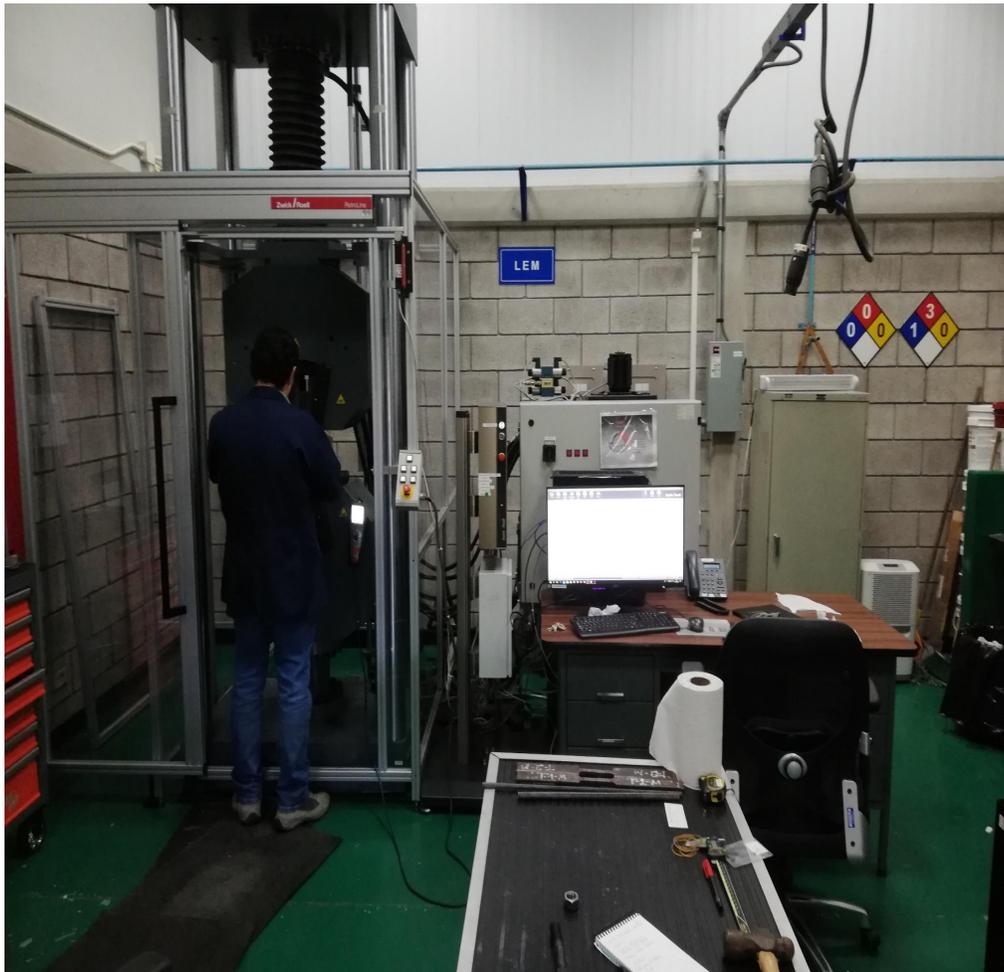
Conexión con perno SAE J429 Grado 5

Anexo 4

Ensayo a doble cortante



Conexión ya colocada en la maquina universal de ensayos con un material alrededor elastómero para protección de los participantes del ensayo



Laboratorio de ensayo de material del Instituto Nacional de Aprendizaje

Anexo 5

Costo y ficha técnica de los pernos



Universal de Tornillos y Herramientas SA

Cédula Jurídica: 3 101 277795

Avenida Uruca, diagonal a Facó-Honda

Teléfono: (506) 2243 - 7676

Email: cotizaciones@unitorni.com

Fecha: 27 abril, 2020

Hora: 11:35 a.m.

Proyecto:

Cliente: ESTEBAN HERRERA MARTINEZ

Identificación: 206130273

Dirección: Avenida Uruca, diagonal a Facó-Honda

Contacto: ESTEBAN HERRERA MARTINEZ

Teléfono: 60480397

E-mail: estebeban.herrera10@gmail.com

Sirva la presente para hacer llegar la oferta solicitada según su solicitud.

Es responsabilidad del cliente leer, aprobar y verificar los datos descritos en este documento.

Cotización: COT9189

Código	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio	Descuento	Total
0101568	TLLO HEX G5 RO 3/4 X 6 (P5C-124)	30,00	UND	¢1.506,46	% 10,00	¢45.962,09
0101283	TLLO HEX ESTRUC A325 RO S.T. GALV. 1 X 3 (ASTM-061)	37,00	UND	¢6.293,34	% 10,00	¢236.812,09
0101593	TLLO HEX G5 RO 1 X 3 (P5C-149)	100,00	UND	¢3.229,62	% 10,00	¢328.452,35



TORNILLERIA | Tornillos Hexagonales

TLLO HEX ESTRUCTURAL A325 TP1 RO



ASTM-003 - ASTM-050

TORNILLO HEX ESTRUC A325 TP1 RO



ESPECIFICACIONES TECNICAS						
Grado	Diámetro	Dureza		Carga	Corte	Material
		Min	Max			
A 325 TIPO 1	Todos	C25	C34	85,000 PSI	120,000 PSI	Acero medio carbono tratado termicamente

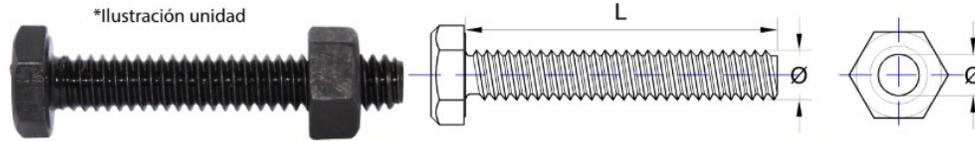
TORNILLO HEX ESTRUCTURAL A325 TP1 RO				
Ø \ Largo	1/2	5/8	3/4	7/8
1				
1 1/4		ASTM-013		
1 1/2	ASTM-003		ASTM-025	
2	ASTM-004	ASTM-015	ASTM-026	
2 1/2	ASTM-005	ASTM-016	ASTM-027	ASTM-049
3	ASTM-006	ASTM-017	ASTM-028	ASTM-050
3 1/2	ASTM-007	ASTM-018	ASTM-029	
4		ASTM-019	ASTM-030	
4 1/2				
5			ASTM-032	
	7/8"	1"	1.1/8"	1.1/4"



TORNILLERÍA
TORNILLOS HEXAGONALES
TLLLO HEX G5 RO



P5C-001 -- P5C-200



DESCRIPCIÓN
 Tornillo hexagonal grado 5 con tuerca incluida. Ideal para todo tipo de sujeción en dónde esté presente la vibración.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Ø	1/4"	5/16"	3/8"	7/16"	1/2"	9/16"	5/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/8"	1 1/4"	1 1/2"
1/2"	P5C-001	P5C-016											
3/4"	P5C-002	P5C-017	P5C-031	P5C-048									
1"	P5C-003	P5C-018	P5C-032	P5C-049	P5C-063	P5C-081	P5C-096	P5C-114					
1 1/4"	P5C-004	P5C-019	P5C-033	P5C-050	P5C-064	P5C-082	P5C-097			P5C-200			
1 1/2"	P5C-005	P5C-020	P5C-034	P5C-051	P5C-065	P5C-083	P5C-098	P5C-115	P5C-131	P5C-146A			
2"	P5C-006	P5C-021	P5C-035	P5C-052	P5C-066	P5C-084	P5C-099	P5C-116	P5C-132	P5C-147			
2 1/2"	P5C-007	P5C-022	P5C-036	P5C-053	P5C-067	P5C-085	P5C-100	P5C-117	P5C-133	P5C-148	P5C-161		
3"	P5C-008	P5C-023	P5C-037	P5C-054	P5C-068	P5C-086	P5C-101	P5C-118	P5C-134	P5C-149	P5C-162	P5C-174	P5C-187
3 1/2"	P5C-009	P5C-024	P5C-038	P5C-055	P5C-069	P5C-087	P5C-102	P5C-119	P5C-135	P5C-150	P5C-163	P5C-175	P5C-188
4"	P5C-010	P5C-025	P5C-039	P5C-056	P5C-070	P5C-088	P5C-103	P5C-120	P5C-136	P5C-151	P5C-164	P5C-176	P5C-189
4 1/2"	P5C-011	P5C-026	P5C-040	P5C-057	P5C-071	P5C-089	P5C-104	P5C-121	P5C-137	P5C-152	P5C-165	P5C-177	P5C-190
5"	P5C-012	P5C-027	P5C-041	P5C-058	P5C-072	P5C-090	P5C-105	P5C-122	P5C-138	P5C-153	P5C-166	P5C-178	P5C-191
5 1/2"	P5C-013	P5C-028	P5C-042	P5C-059	P5C-073	P5C-091	P5C-106	P5C-123	P5C-139	P5C-154		P5C-179	P5C-192
6"	P5C-014	P5C-029	P5C-043	P5C-060	P5C-074	P5C-092	P5C-107	P5C-124	P5C-140	P5C-154A	P5C-168	P5C-180	P5C-193
6 1/2"									P5C-140A			P5C-180A	P5C-194
7"	P5C-015		P5C-044	P5C-061	P5C-075	P5C-093	P5C-108	P5C-125	P5C-141	P5C-155	P5C-169	P5C-181	P5C-195
8"		P5C-045	P5C-062	P5C-076	P5C-093A	P5C-109	P5C-126	P5C-142	P5C-156	P5C-170	P5C-182	P5C-197	
9"		P5C-046		P5C-077	P5C-094	P5C-110	P5C-127	P5C-143	P5C-157	P5C-171	P5C-183	P5C-199	
10"			P5C-047		P5C-078	P5C-095	P5C-111	P5C-128	P5C-144	P5C-158	P5C-172		
11"					P5C-079		P5C-112	P5C-129	P5C-145	P5C-159	P5C-172A		
12"					P5C-080		P5C-113	P5C-130	P5C-146	P5C-160	P5C-172B		
HILOS (RO)	20	18	16	14	13	12	11	10	9	8	7	7	6
	7/16"	1/2"	9/16"	5/8"	3/4"	13/16"	15/16"	1.1/8"	1.5/16"	1.1/2"	1.5/8"	1.3/4"	2.3/16"

Grado	Diametro	Dureza		Carga	Corte
		Min	Max		
5	1/4" a 1"	C25	C34	85,000 PSI	120,000 PSI
	1" o mas	C19	C30	74,000 PSI	105,000 PSI

CARACTERÍSTICAS

MATERIAL		PUNTA	
GRADO		CABEZA	

