UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

Tema: "Estudio comparativo de los métodos de elementos finitos y fotoelástico en la determinación de esfuerzos para mejorar el diseño mecánico de piezas"

Trabajo de Investigación

Previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Diseño Mecánico

Autor: Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís

Director: Ing. Mg. Pablo Raúl Valle Velasco

Ambato - Ecuador

2013

AL CONSEJO DE POSGRADO DE LA UTA

El tribunal receptor de la defensa del trabajo de investigación con el tema: "Estudio comparativo de los métodos de elementos finitos y fotoelástico en la determinación de esfuerzos para mejorar el diseño mecánico de piezas", presentado por: Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís y conformado por: Ing. Mg. Edisson Viera Alulema, Ing. Mg. Manolo Córdova Suárez e Ing. Mg. Santiago Medina Robalino, Miembros del Tribunal, Ing. Mg. Pablo Raúl Valle Velasco, Director del trabajo de investigación y presidido por: Ing. Mg. Francisco Pazmiño Gavilanes Presidente del Tribunal; Ing. Mg. Juan Garcés Chávez Director del CEPOS – UTA, una vez escuchada la defensa oral el Tribunal aprueba y remite el trabajo de investigación para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Mg. Francisco Pazmiño Gavilanes
Presidente del Tribunal de Defensa

Ing. Mg. Juan Garcés Chávez
DIRECTOR CEPOS

Ing. Mg. Pablo Raúl Valle Velasco
Director de Trabajo de investigación

Ing. Mg. Edisson Viera Alulema
Miembro del Tribunal

Ing. Mg. Manolo Córdova Suárez
Miembro del Tribunal

Ing. Mg. Santiago Medina Robalino
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el trabajo de investigación con el tema "Estudio comparativo de los métodos de elementos finitos y fotoelástico en la determinación de esfuerzos para mejorar el diseño mecánico de piezas", nos corresponde exclusivamente al Ingeniero Gonzalo Eduardo López Villacís y al Ingeniero Mg. Pablo Raúl Valle Velasco Director del Trabajo de investigación; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Técnica de Ambato.

---------- ----------

Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís Ing. Mg. Pablo Raúl Valle Velasco

Autor Director de Tesis

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo de investigación o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de trabajo de investigación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de esta, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación lo dedico:

A Dios.

A la memoria de mi padre.

A mi madre.

A mis hermanas.

A todas las personas que siempre estuvieron apoyándome en los momentos más difíciles de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Quiero hacer llegar mis más sinceros agradecimientos a las autoridades de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, por haber brindado su apoyo a la ejecución de la Maestría en Diseño Mecánico.

ÍNDICE

PAGINAS PRELIMINARES

Al Consejo de Posgrado de la UTA ii

Autoría de la investigación.....iii

Derechos de autor iv

Dedicatoria..... v

Agradecimiento.....vi

Índice vii

Paginas preliminares vii

Índice de tablas.....xi

Índice de figuras.....xiii

Índice de ilustraciones xvii

Resumen xix

Summary .....**¡Error! Marcador no definido.**

1. El problema..... 1

1.1 Tema:..... 1

1.2 Planteamiento del problema 1

1.2.1 Contextualización..... 1

1.2.2 Análisis crítico 2

1.2.3 Prognosis 3

1.2.4 Formulación del problema..... 4

1.2.5 Preguntas directrices..... 4

1.2.6 Delimitación del problema..... 4

1.3 Justificación 5

1.4 Objetivos de la investigación 6

1.4.1 Objetivo general: 6

1.4.2 Objetivos específicos: 6
2. Marco teórico 7
2.1 Antecedentes investigativos 7
2.1.1 Antecedentes 7
2.1.2 Fundamento teórico 8
2.1.3 Términos básicos 40
2.2 Fundamentación legal 40
2.3 Categorías fundamentales 41
2.4 Hipótesis 41
2.5 Señalamiento de variables 41
2.5.1 Variable dependiente: 41
2.5.2 Variable independiente: 41
2.6 Fundamentación filosófica 42
3. Metodología 43
3.1. Enfoque 43
3.2. Modalidad básica de la investigación 43
3.2.1 De campo 43
3.2.2 Bibliográfico 43
3.2.3 Experimental 44
3.3 Nivel o tipo de investigación 44
3.3.1 Exploratoria 44
3.3.2 Descriptivo 44
3.3.3 Asociación de variables 44
3.4 Población y muestra 45
3.5 Operacionalización de las variables 47
3.5.1 Variable Independiente: 47
3.5.2 Variable dependiente: 48

3.6 Recolección de la información 49
3.6.1 Observación 49
3.7 Procesamiento y análisis 49
3.7.1 Plan de procesamiento 49
3.7.2 Plan de análisis e interpretación de resultados 49
4. Análisis e interpretación de resultados 51
4.1. Análisis de los resultados 51
4.1.1 Descripción del equipo 51
4.1.2 Componentes del equipo 52
4.1.3 Diseño del polariscopio 54
4.1.4 Preparación de las probetas 73
4.1.5 Elaboración de modelos 80
4.1.6 Experimentación 90
4.2 Interpretación de datos 100
4.2. Demostración de la Hipótesis 111
5. Conclusiones y recomendaciones 113
5.1 Conclusiones 113
5.2 Recomendaciones 114
6. Propuesta 116
6.1 Datos Informativos 116
6.2 Antecedentes de la propuesta 118
6.3 Justificación 118
6.4 Objetivos 118
6.4.1 Objetivo general 118
6.4.2 Objetivos específicos 119
6.5 Análisis de factibilidad 119
6.6 Fundamentación 119

6.7 Metodología, modelo operativo 122
6.7.1 Cálculo analítico del esfuerzo en un diente de engrane 122
6.7.2 Análisis por elementos finitos de un diente de engrane 123
6.7.3 Análisis fotoelástico de un diente de engrane 124
6.8 Administración 126
6.8.1 Costos directos 126
6.9 Previsión de la evaluación 130
Bibliografía 131
Anexo A 134
Tabla 1. Especificaciones de torsión de acuerdo con la naturaleza del perno. 134
Anexo B 135
Tabla 1. Propiedades del acero inoxidable aisi 304 135
Tabla 2. Propiedades del acero inoxidable aisi 304 (continuación) 136
Anexo C 137
Tabla 1. Ensayo de tensión de la resina poliester 137
Tabla 2. Ensayo de tensión del acrílico 138
Anexo D 139
Tabla 1. Probeta normalizada para ensayo de tensión 139
Anexo E 140
Norma astm d4093 – 95 (página 9) 140
Anexo F 141
Planos 141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores de retraso y el color correspondiente para la fuente de luz transmitida en el polariscopio. 18

Tabla 3.1. Valores de Z_α más utilizados, según el valor de α. 46

Tabla 4.1. Propiedades de la resina polimerizada no reforzada. 74

Tabla 4.2. Propiedades del acrílico de acuerdo al fabricante. 80

Tabla 4.3. Secuencia de colores producidos con luz blanca en campo oscuro. 92

Tabla 4.4. Datos tensión simple (Probeta 1). 94

Tabla 4.5. Datos tensión simple (Probeta 2). 95

Tabla 4.6. Datos tensión simple (Probeta 3). 96

Tabla 4.7. Datos tensión simple (Probeta 4). 96

Tabla 4.8. Datos compresión (Probeta 1). 97

Tabla 4.9. Datos flexión pura (Probeta 1). 98

Tabla 4.10. Datos flexión pura (Probeta 2). 99

Tabla 4.11. Estadísticos descriptivos de la constante fotoelástica. 100

Tabla 4.12. Resultados del ensayo con la probeta con orificio central a tensión. 105

Tabla 4.13. Porcentaje de error al comparar los métodos de elementos finitos y fotoelástico. 108

Tabla 4.14. Análisis estadístico de los esfuerzos determinados por la técnica fotoelástica para una carga de 20 Kgf (N = 1,06). 109

Tabla 4.15. Estadísticos descriptivos de los esfuerzos calculados por la técnica fotoelástica. 111

Tabla 6.1. Valores del factor de forma de Lewis *Y* (estos valores son para un ángulo normal de presión de 20 º, dientes de altura completa y paso diametral igual a la unidad, en el plano de rotación). 121

Tabla 6.2. Costos directos. 126

Tabla 6.3. Costos por mano de obra. 128

Tabla 6.4. Costos indirectos. 129

Tabla 6.5. Costos totales. 129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Onda electromagnética. De color rojo se representa el campo magnético y de azul el eléctrico. 15

Figura 2.2. Espectro electromagnético. 16

Figura 2.3. Onda electromagnética. De color rojo se representa el campo magnético y de azul el eléctrico. 20

Figura 2.4. Polarización electromagnética por absorción selectiva. 22

Figura 2.5. Polariscopio circular. 23

Figura 2.6. Elemento unidimensional. 31

Figura 2.7. Elementos bidimensionales. 31

Figura 2.8. Elemento cuadrilateral construido por 2 ó 4 triángulos. 32

Figura 2.9. Elementos tridimensionales. 32

Figura 2.10. Elementos Axisimétricos. 33

Figura 2.11. Elementos parabólicos. 33

Figura 2.12. Tipo de elemento para una estructura. 34

Figura 2.13. Elementos sólidos para una viga cuadrada. (a).Viga Original. (b) Idealización utilizando elementos tridimensionales. 35

Figura 2.14. Tamaño del elemento para una viga cuadrada hueca. (a). Viga original (b) Idealización en elementos finitos. 36

Figura 2.15. Tamaños de elementos para una placa con agujero central. (a). Placa original (b). Idealización utilizando diferentes tamaños. 36

Figura 2.16. Ubicación de los nodos en discontinuidades. (a) Discontinuidad en carga (cambio abrupto en la distribución de carga), (b) Discontinuidad en la geometría (cambio abrupto en la sección transversal

de una viga), (c) Discontinuidad en las propiedades del material (viga bimetálica), (d) Discontinuidad en el material (placa cargada con ruptura en la parte media) 37

Figura 2.17. Placa con agujero en el centro con simetría geométrica y en cargas. (a). Placa original (b). Placa simplificada. 38

Figura 2.18. Placa simplificada a una cuarta parte de su geometría. **Fuente:** The finite element method in engineering. Rao, Singiresu. 39

Figura 4.1. Componentes del polariscopio. (1) Fuente de luz, (2). Porta filtro (polarizador), (3) Marco de carga, (4) Porta filtro (analizador). 54

Figura 4.2. Fuente de luz (esquema). 55

Figura 4.3. Factor de seguridad de la carcasa. 56

Figura 4.4. Conexiones eléctricas para los tubos fluorescentes. 57

Figura 4.5. Porta filtro (esquema)..... 59

Figura 4.6. Factor de seguridad del porta filtro..... 59

Figura 4.7. Factor de seguridad de los pernos del portafiltro. 60

Figura 4.8. Marco de carga (esquema). 62

Figura 4.9. Dispositivo de enganche (esquema). 63

Figura 4.10. Factor de seguridad del dispositivo de enganche. 64

Figura 4.11. Factor del tornillo de potencia. 66

Figura 4.12. Factor de seguridad de la placa de carga. 66

Figura 4.13. Factor de seguridad de la viga. 68

Figura 4.14. Factor de seguridad de la columna. 69

Figura 4.15. Distribución de las probetas sobre la plancha. 81

Figura 4.16. Probeta de tensión simple. 82

Figura 4.17. Probeta de viga curva. 83

Figura 4.18. Probeta circular pequeña. 84

Figura 4.19. Probeta circular con orificio. 85

Figura 4.20. Probeta para flexión pura. 86

Figura 4.21. Probeta rectangular con orificio central y orificios de conexión. 87

Figura 4.22. Probeta rectangular con orificio central. 87

Figura 4.23. Probeta rectangular pequeña. 88

Figura 4.24. Probeta rectangular grande. 89

Figura 4.25. Probeta de diente de engrane. 89

Figura 4.26. Aplicación de la carga en una probeta con un orificio. 101

Figura 4.27. Aplicación de la carga en una probeta con un orificio. 102

Figura 4.28. Barra con un agujero sometida a tensión. 103

Figura 4.29. Esfuerzo principal uno en la probeta con orificio central (elementos finitos). 107

Figura 4.30. Esfuerzo principal dos en la probeta con orificio central (elementos finitos). 107

Figura 6.1. Engranaje para el análisis. 116

Figura 6.2. Probeta del diente de engrane. 117

Figura 6.3. Analogía entre un diente de engrane y una viga en voladizo. 120

Figura 6.4. Distribución de los esfuerzos en el diente de un engrane por elementos finitos. 124

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1. Efecto fotoelástico. 9

Ilustración 4.1. Fuente de luz. 56

Ilustración 4.2. Porta filtro. 61

Ilustración 4.3. Marco de carga. 72

Ilustración 4.4. Polariscopio de transmisión. 73

Ilustración 4.5. Probetas luego del ensayo de tensión. 74

Ilustración 4.6. Molde para la elaboración de láminas de resina poliéster. 75

Ilustración 4.7. Solventes y equipo para elaborar láminas de resina poliéster. 77

Ilustración 4.8. Preparación de la resina poliéster 79

Ilustración 4.9. Preparación de la resina poliéster 79

Ilustración 4.10. Probeta de tensión simple. 82

Ilustración 4.11. Probeta de viga curva. 83

Ilustración 4.12. Probeta circular pequeña. 84

Ilustración 4.13. Probeta circular con orifcio 85

Ilustración 4.14. Probeta para flexión pura. 86

Ilustración 4.15. Probeta rectangular con orificio central y orificios de conexión. 87

Ilustración 4.16. Probeta rectangular con orificio central. 88

Ilustración 4.17. Probeta rectangular pequeña 88

Ilustración 4.18. Probeta rectangular grande. 89

Ilustración 4.19. Probeta de diente de engrane..... 90

Ilustración 4.20. Dinamómetro (capacidad = 20 N). 92

Ilustración 4.21. Romana (capacidad = 50 Kgf). 92

Ilustración 4.22. Romana (capacidad = 50 Kgf). 93

Ilustración 4.23. Probeta de acrílico. 100

Ilustración 4.24. Franjas isocromáticas en una probeta con orificio. 104

Ilustración 4.25. Franjas isocromáticas en una probeta con orificio (ampliación). 104

Ilustración 6.1. Distribución de los esfuerzos en el diente de un engrane por fotoelasticidad. 125

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS Y FOTOELÁSTICO EN LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS PARA MEJORAR EL DISEÑO MECÁNICO DE PIEZAS

Autor: Ing. Gonzalo Eduardo López Villacís

Tutor: Ing. Mg. Pablo Raúl Valle Velasco

Fecha: 21 de agosto de 2012

RESUMEN

En este trabajo de tesis se emplean el método de elementos finitos y la técnica de la fotoelasticidad para el análisis de esfuerzos que se producen sobre ciertos modelos a los cuales se les aplican diferentes tipos de carga, como por ejemplo tensión, compresión y flexión.

Para poder realizar los ensayos de estas probetas primero se diseñó y construyó un polariscopio de transmisión, con el cual se obtuvieron los resultados del análisis fotoelástico.

Debido a que la confiabilidad de la técnica de la fotoelasticidad depende de la calibración del material que se esté usando, es decir de la constante fotoelástica, el análisis estadístico se enfocó a esta variable. Luego en base a la constante fotoelástica se determinaron los esfuerzos en un modelo, los cuales fueron comparados con los resultados del análisis por elementos finitos, determinándose el error entre los dos valores y demostrándose de esta manera la hipótesis.

Finalmente se analizó un caso práctico utilizando los dos métodos.

Descriptores: Fotoelasticidad, polariscopio, elementos finitos, polímeros, resina poliéster.

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO

POST GRADE STUDY CENTRE

MECHANIC DESIGN MASTER PROGRAM

COMPARATIVE STUDIES OF THE FINITE ELEMENT AND PHOTOELASTIC METHODS IN THE DETERMINATION OF THE STRESSES TO IMPROVE THE MECHANICAL DESIGN OF PARTS

Author: Engineer Gonzalo Eduardo López Villacís

Tutor: Engineer Mg. Pablo Raúl Valle Velasco

Date: August 21st, 2012

ABSTRACT

In this thesis used the finite element method and photoelasticity technique for the analysis of stresses produced on certain models to which they apply different loads, such as tension, compression, bending.

To perform these tests specimens are first design an built a transmission polariscope, which were obtained with the results of photoelastic analysis.

Because the reliability of photoelasticity technique depends on the calibration of the material being used, that means the photoelastic constant, statistical analysis was focused on that variable. Then based on the photoelastic constant stresses were determined, which were compared with the results from finite elements analysis, determining the error between the two values and thus proving the hypothesis.

Finally a practical case was analyzed using the methods.

Descriptors: Photoelasticity, polariscope, finite elements, polymers, polyester resin.

CAPÍTULO 1

1. EL PROBLEMA

1.1 TEMA:

“Estudio comparativo de los métodos de elementos finitos y fotoelástico en la determinación de esfuerzos para mejorar el diseño mecánico de piezas”

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 CONTEXTUALIZACIÓN

A nivel mundial, el advenimiento del procesamiento por computadora con su superior potencia de cálculo ha revolucionado el análisis de esfuerzos, haciendo que se extienda el uso de métodos numéricos. En particular, el análisis por elementos finitos (FEA), el cuál usa el método de los elementos finitos (FEM), se ha convertido en la herramienta dominante, eclipsando muchas técnicas tradicionales para el análisis de los esfuerzos. A pesar del avance del FEM, la fotoelasticidad, que es uno de los más viejos métodos para el análisis experimental de los esfuerzos, se ha restablecido con progresos recientes y nuevos usos.

Actualmente, en países desarrollados, las técnicas de análisis experimental de esfuerzos se aplican extensamente en el establecimiento de criterios de diseño, mejoramiento de la confiabilidad de un producto, control de calidad, o en la reducción del peso y el costo de los mismos. La necesidad de estas técnicas ha sido creada por los avances tecnológicos actuales, y por el mercado extremadamente competitivo. Estas presiones han forzado la búsqueda de herramientas y métodos que reduzcan los tiempos y costos de prueba, y que entreguen más datos experimentales.

Muchos de los avances realizados en la fotoelasticidad se presentan en el método de recubrimiento fotoelástico, el cual tiene nuevas ventajas por lo que es aplicado en la industria aeronáutica y aeroespacial, automoción, maquinaria agrícola, construcción de edificios, motores, recipientes de presión, construcción de barcos, herramientas, etc.

En el Ecuador se ha realizado muy poca investigación sobre el tema, en consecuencia las técnicas para el análisis experimental de esfuerzos prácticamente no se utilizan, con excepción de ciertas industrias, como la petrolera. Si bien podrían ser aplicadas desde su empleo básico, como lo es el control de calidad de productos hechos con polímeros que tengan características birrefringentes, en nuestro medio la técnica fotoelástica sería de gran ayuda en el diseño de elementos de máquinas de precisión, así también en la industria carrocera y en forma general en el diseño de estructuras.

En Tungurahua ha habido un gran auge en la industria carrocera, de inyección de plástico y matricera en las cuales, como se mencionó, se pueden utilizar técnicas experimentales con diferentes propósitos (medición de esfuerzos, reducción de peso, determinación de los factores de concentración de esfuerzo, etc.) para mejorar la calidad de sus productos.

1.2.2 ANÁLISIS CRÍTICO

En el diseño mecánico de un componente sometido a esfuerzos mecánicos dentro del rango elástico, es necesario conocer el campo de tensiones existente con el fin de conocer los puntos más solicitados.

En general existen varias formas de determinar el campo de tensiones, que son mediante:

a) La formulación teórica y analítica del problema.

Éste planteamiento que es el más antiguo ofrece un grado de aplicabilidad que es muy bajo, debido a que el problema elástico es

complicado y de difícil solución analítica, además las hipótesis que se hacen sobre las cargas y restricciones aplicadas suelen ser muy restrictivas.

b) Métodos numéricos.

En éste caso consta el método de los elementos finitos. Éstas técnicas han experimentado un gran auge en los últimos años, gracias al desarrollo de las computadoras, son de gran aplicación en las etapas de diseño previo y son capaces de resolver problemas que geométricamente son muy complicados, probando diversos materiales, etc. Sin embargo presentan el inconveniente de que el modelado correcto de las cargas y restricciones aplicadas es difícil, al contrario de lo que pueda parecer ésta etapa no es sencilla en lo absoluto y las simplificaciones asumidas pueden dar lugar a soluciones alejadas del verdadero comportamiento del componente.

c) Técnicas experimentales.

Destacan dentro de este planteamiento del problema las técnicas extensiométricas y las técnicas fotoelásticas. La gran ventaja de éstas técnicas es que el análisis de los componentes es el más aproximado a la realidad sin necesidad de modelado simplificado de la geometría, del material, de cargas o de restricciones, por tanto sus resultados son los que todo analista busca conocer al diseñar un componente. Su gran inconveniente, es la necesidad de un prototipo o modelo de componente construido con anterioridad.

También hay que destacar que en la práctica de la ingeniería es virtualmente imposible llegar a una solución analítica exacta del problema estudiado, por lo tanto el uso de métodos experimentales es evidente.

1.2.3 PROGNOSIS

Sin el presente estudio no se podrán establecer los parámetros necesarios para la correcta aplicación de la técnica de fotoelasticidad, no

se conocerán las diferencias entre los métodos de elementos finitos y el fotoelástico, así como sus ventajas y desventajas, por ende la industria de nuestro país será menos competitiva, en cuánto al diseño de componentes mecánicos más confiables y de menor costo, también en el desarrollo de nuevos productos que tengan calidad similar o superior a los extranjeros.

1.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Se puede mejorar el diseño de componentes mecánicos con el uso de la técnica de fotoelasticidad para verificar los resultados obtenidos con el método de elementos finitos, incrementando su confiabilidad?

1.2.5 PREGUNTAS DIRECTRICES

¿Cuál será el proceso adecuado para la aplicación de la técnica de fotoelasticidad en la determinación de esfuerzos?

¿Qué materiales tienen propiedades ópticas y que puedan ser utilizados para la determinación de esfuerzos?

¿Cuáles son los equipos necesarios para el análisis fotoelástico y cuáles son las características que deben reunir?

¿Cuál es el error que se comete en el método de elementos finitos comparado con la técnica fotoelástica?

1.2.6 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.6.1 DELIMITACIÓN DE CONTENIDO

El estudio a realizarse está enmarcado dentro del campo de Ingeniería Mecánica, concretamente dentro de las líneas de investigación de la maestría, que son materiales para ingeniería y diseño mecánico.

1.2.6.2 DELIMITACIÓN ESPACIAL

La investigación se realizará en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, ubicada en la ciudad de Ambato campus Huachi Chico.

1.2.6.3 DELIMITACIÓN TEMPORAL

La investigación se realizará desde agosto de 2012 hasta enero de 2013.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El actual desarrollo de los sistemas computacionales ha permitido la amplia aplicación de métodos numéricos para la solución de problemas complejos. Sin embargo para la puesta a punto de venta del producto casi siempre se requiere de las pruebas físicas que verifiquen los resultados del cálculo.

Así también, la determinación de la distribución de esfuerzos es un factor de suma importancia en el proceso del diseño mecánico, por lo que es necesario el estudio de una técnica de probada eficacia, como la fotoelasticidad.

La fotoelasticidad se ha convertido rápidamente en una técnica de gran aplicación en la industria, rebasando al resto de las técnicas en confiabilidad, alcance y factibilidad. Ningún otro método tiene la misma precisión visual y cobertura de los patrones de esfuerzo.

Otro aspecto que justifica el estudio es la factibilidad técnica y económica para la fabricación de equipos y probetas necesarios para realizar los ensayos. En general cuando una máquina es de construcción nacional tiene la ventaja de ser más económica, por ende más asequible por las empresas.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 OBJETIVO GENERAL:

Determinar la distribución de esfuerzos en modelos planos transparentes que representan algunos componentes mecánicos mediante el método fotoelástico para validar los resultados obtenidos por elementos finitos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Establecer el proceso apropiado para aplicar la técnica de fotoelasticidad en la determinación de esfuerzos.
- Determinar que materiales tienen propiedades birrefringentes y que puedan ser utilizados en los ensayos.
- Analizar las características de los equipos necesarios para el análisis fotoelástico.
- Evaluar el error cometido entre el método de elementos finitos y la técnica fotoelástica.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1.1 ANTECEDENTES

En otros países existen muchos trabajos relacionados con las técnicas fotoelásticas, de los cuales, muy pocos combinan la simulación numérica con las técnicas experimentales. Entre estos, se conocen los siguientes:

Juan Manuel Sandoval Pineda [17], en su Tesis de Maestría presentada en el Instituto Politécnico Nacional del Distrito Federal de México, bajo el tema: “Análisis de Esfuerzos en un Diente de Engrane Recto para Bomba Hidráulica Aplicando el Método del Elemento Finito”, realizada en 2004 presenta un estudio de esfuerzos que se producen sobre el modelo en un diente de engrane recto al cual se le aplican dos tipo de carga diferentes, el primer caso es la carga puntual aplicada en un instante sobre el diámetro de paso y el segundo caso de carga trata la carga uniformemente repartida a la cual es sometido el diente de un engrane recto, que ejerce la presión del fluido cuando el engrane se emplea como elemento de envío de aceite en una bomba hidráulica. Por último se realiza la validación de resultados obtenidos tanto por el método fotoelástico como por el método del elemento finito.

Jorge Rodríguez Valdez [15], en su Tesis de Maestría presentada en el Instituto Politécnico Nacional del Distrito Federal de México, bajo el tema: “Determinación de los Esfuerzos en Dientes de una Rueda Tipo Catarina por los Métodos Fotoelástico y del Elemento Finito”, realizada en 2006 presenta un estudio del campo de esfuerzos en los dientes de una rueda tipo Catarina después de la aplicación de una carga estática y se hace

una comparación entre ambos métodos con la finalidad de encontrar la diferencia en los resultados.

Luís Manuel Sánchez Morales [16], en su Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico presentada en la Universidad de San Carlos de Guatemala, bajo el tema: “Laboratorio de Fotoelasticidad para los Estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos”, realizada en 2006 presenta el diseño y construcción de un polariscopio de transmisión, así como el procedimiento para su utilización en ensayos fotoelásticos.

En el Ecuador, los trabajos que se pueden encontrar al respecto son los que se exponen a continuación:

Abarca Flores Lola Mercedes [1], en su Tesis previa a la obtención del título de Ingeniera Mecánica presentada en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), bajo el tema: “Estudio Experimental de Modelos Fotoelásticos en Dos y Tres Dimensiones”, realizada en 1995 presenta un análisis de probetas fabricadas con materiales fotoelásticos.

Renato Rafael Amores y Braulio Ramiro Osorio [2], en su Tesis previa a la obtención del título de Ingenieros en Electrónica y Control presentada en la Escuela Politécnica Nacional, bajo el tema: “Análisis Fotomecánico por Transmisión de la Luz Mediante la Técnica de Procesamiento Digital de Imágenes en MatLab”, realizada en 2010 presenta la implementación de un sistema que facilita las prácticas de laboratorio y proporciona a los usuarios un mejor criterio en el análisis fotomecánico.

2.1.2 FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1.2.1 FOTOMECÁNICA [14]

La fotomecánica describe la relación que existe entre la fotónica y la mecánica. La fotónica es la ciencia de la generación, control y detección de fotones siendo el fotón su unidad básica de medida. Su espectro de

trabajo se encuentra entre el visible e infrarrojo pero también se extienden a porciones de espectro que incluyen al ultravioleta. La mecánica es la ciencia que estudia materiales en movimiento sean sólidos o líquidos, y sus comportamientos y respuestas cuando son sometidos a cargas externas. La fotomecánica se refiere a la tecnología que usa a la fotónica para calcular medidas mecánicas. En otras palabras, la fotomecánica es la base para un gran número de técnicas usadas para la medición de variaciones de importantes cantidades físicas como son el desplazamiento, esfuerzos, densidad, etc.

2.1.2.2 FOTOELASTICIDAD

La fotoelasticidad es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones. Se basa en el uso de luz para dibujar figuras sobre piezas de materiales isótropos, transparentes y continuos, que están siendo sometidas a esfuerzos. Las figuras que se dibujan son semejantes a las mostradas al realizar un análisis de elementos finitos ya que se pueden observar contornos y colores. [3]

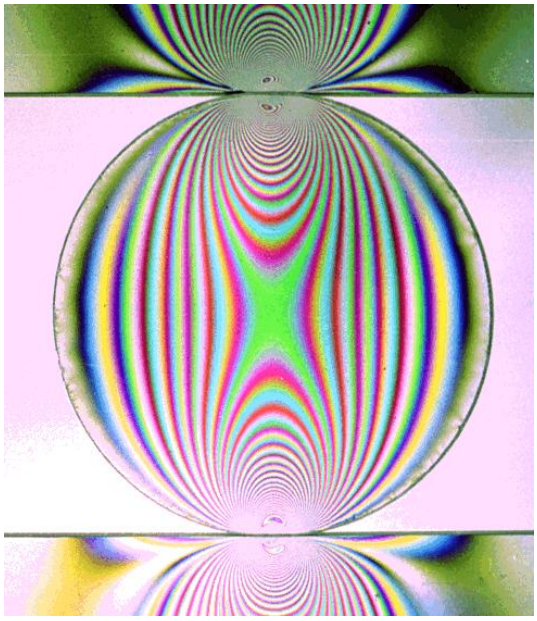


Ilustración 2.1. Efecto fotoelástico.

Fuente: Experimental Stress Analysis. Dally, James W. y Riley, W. F.

Esta técnica resulta particularmente útil para elementos que poseen una geometría complicada, condiciones de carga complejas o ambas situaciones. En tales casos, el análisis por los métodos analíticos resulta complicado e incluso casi imposible, motivo por el cual, se puede realizar el estudio por un método experimental.

El nombre de fotoelasticidad refleja la naturaleza de este método experimental: foto implica la utilización de rayos luminosos y técnicas ópticas, mientras que elasticidad denota el estudio de los esfuerzos y deformaciones en los cuerpos elásticos. [9]

La medición se logra al evaluar el cambio del índice de refracción de la pieza al someterse a una carga. En el caso de una pieza no trasparente, se cubre la pieza con una resina birrefringente. [3]

El análisis fotoelástico además es utilizado con cierta frecuencia, cuando se necesita información sobre los esfuerzos y las deformaciones en una zona extensa de un cuerpo. Proporciona una visión cuantitativa de las áreas sometidas a grandes esfuerzos, además de mostrar las regiones donde se presentan esfuerzos de magnitud baja en las que el material está mal aprovechado. [21]

a) Historia [6]

En el año de 1812, el físico David Brewster descubrió que si un cuerpo transparente es sometido a esfuerzos y es iluminado con luz polarizada, aparecen en él una serie de franjas de diversos colores cuya posición cambia si se modifica en intensidad o posición el sistema de cargas. Brewster comunicó este fenómeno a los ingenieros de su época pero su descubrimiento no fue aprovechado hasta el año de 1853 en que Newmann y Maxwell descubrieron separadamente la ley óptica de esfuerzos que es la base del estudio fotoelástico. Sin embargo, fue hasta el año de 1891 en que Carus Wilson publicó los resultados de sus investigaciones fotoelásticas en una viga simplemente apoyada cargada en un solo punto.

Más adelante, en 1901, Mesnager realizó nuevas aplicaciones, pero fue hasta el periodo entre 1920 y 1931 que los investigadores Coker y Filon, en la universidad de Londres, hicieron una serie de estudios que culminaron con la publicación de un tratado de fotoelasticidad, la que puede decirse que a partir de esas fechas se desarrolló rápida y vigorosamente con las experiencias inspiradas de Brucker, Weller, Frocht, Neuber, Goodier, Durelli, Hetenyi, Dally, Parks y otros investigadores notables. En su forma más simple, el fenómeno fotoelástico consiste en lo siguiente. Esto permitió a la fotoelasticidad convertirse rápidamente en una técnica viable para el análisis cualitativo de los esfuerzos. Se le encontró una gran aplicación en la industria, en dos dimensiones rebasó al resto de las técnicas en confiabilidad, alcance y factibilidad. Ningún otro método tenía la misma precisión visual y cobertura de los patrones de esfuerzo.

El desarrollo de polariscopios digitales usando los LED y los diodos laser permitió la supervisión continua de las estructuras y la fotoelasticidad dinámica. Los progresos en el proceso de imagen permiten que la información de los esfuerzos sea extraída automáticamente de su patrón. El desarrollo de la esterolitografia, que utiliza un método llamado rapid prototyping permite la generación de modelos tridimensionales exactos de un polímero líquido, lo cual permitió sustituir el método de vaciado tradicional.

b) Aplicaciones [15]

La fotoelasticidad ha tenido aplicaciones exitosas en varios campos de manufactura y construcción donde el análisis es empleado. Se destacan los usos en la industria automotriz, maquinaria agrícola, aviación, construcciones civiles, ingeniería, construcción naval, equipos de oficina, puentes, diseño de accesorios, herramientas, y muchas otras aplicaciones.

Los avances tecnológicos a nivel de computación y las técnicas del procesamiento digital de imágenes han hecho de la fotoelasticidad más eficiente y confiable para la solución de problemas de ingeniería.

Con la fotoelasticidad se puede realizar lo siguiente:

- Determinar esfuerzos en regiones extensas de una estructura, y particularmente para aquellos que tienen una geometría complicada, condiciones de cargas complicadas, o ambos.
- Identificar de forma instantánea las áreas críticas, regiones de sobre-esfuerzo o sub-esfuerzo.
- Medir picos de esfuerzos y concentración de esfuerzos alrededor de agujeros, muescas, y sitios potenciales de posibles fallos.
- Optimizar la distribución de esfuerzos en partes de material y estructuras para minimizar el peso y maximizar la confiabilidad.
- Realizar pruebas repetitivas bajo condiciones de carga variable, sin necesidad de desmontar o reemplazar el material. Es decir, determinar los esfuerzos durante pruebas dinámicas o estáticas.
- Hacer medidas de esfuerzos en el laboratorio en donde factores como la humedad o el tiempo no lo afecten.
- Identificar y medir esfuerzos residuales.
- Detectar el rendimiento, y observar la redistribución de los esfuerzos en el material que está siendo deformado.

c) Ventajas [6]

La fotoelasticidad usada para problemas en dos dimensiones tienen las siguientes ventajas:

- Provee valores confiables de la distribución de los esfuerzos en el modelo.

- Provee un valor bastante exacto del esfuerzo a lo largo del perímetro del modelo, donde las tensiones son generalmente las más altas.

- Provee valores de las direcciones de los esfuerzos principales (algunas veces llamadas trayectorias de esfuerzo).

- Es adaptable para investigaciones estáticas y dinámicas.

- Requiere una pequeña inversión en equipos y materiales para un estudio ordinario.

- Es medianamente simple para usar.

d) Desventajas [6]

Por otro lado, la fotoelasticidad tiene las siguientes desventajas:

- Requiere de un modelo similar a la parte real a ser fabricada (a menos que los recubrimientos fotoelásticos sean usados).

- Requiere de cálculos tediosos para separar los valores de los esfuerzos principales en un punto interior cualquiera.

- Puede requerir un equipamiento costoso para un análisis preciso de grandes componentes.

- Para un trabajo en tres dimensiones es una técnica muy tediosa y necesita bastante tiempo.

2.1.2.3 LUZ

a) Conceptualización

Se llama luz (del latín lux, lucis) a la parte de la radiación electromagnética que puede ser percibida por el ojo humano. En física, el término luz se usa en un sentido más amplio e incluye todo el campo de la radiación conocido como espectro electromagnético, mientras que la

expresión luz visible señala específicamente la radiación en el espectro visible.

La óptica es la rama de la física que estudia el comportamiento de la luz, sus características y sus manifestaciones.

El estudio de la luz revela una serie de características y efectos al interactuar con la materia, que permiten desarrollar algunas teorías sobre su naturaleza.

b) Naturaleza de la luz [11]

La luz presenta una naturaleza compleja: depende de cómo la observemos se manifestará como una onda o como una partícula. Estos dos estados no se excluyen, sino que son complementarios.

La luz tiene energía radiante y su naturaleza tiene un efecto dual, y obedece las leyes que pueden explicarse a partir de una corriente de partículas o paquetes de energía, los llamados fotones, o a partir de un tren de ondas transversales. El concepto de fotón se emplea para explicar las interacciones de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía, como ocurre con el efecto fotoeléctrico o la luminiscencia. El concepto de onda suele emplearse para explicar la propagación de la luz y algunos de los fenómenos de formación de imágenes.

c) Teoría ondulatoria [11]

En las ondas de luz, como en todas las ondas electromagnéticas, existen campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio, que fluctúan con rapidez. Como estos campos tienen, además de una magnitud, una dirección determinada, son cantidades vectoriales. Los campos eléctrico y magnético son perpendiculares entre sí y también perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.

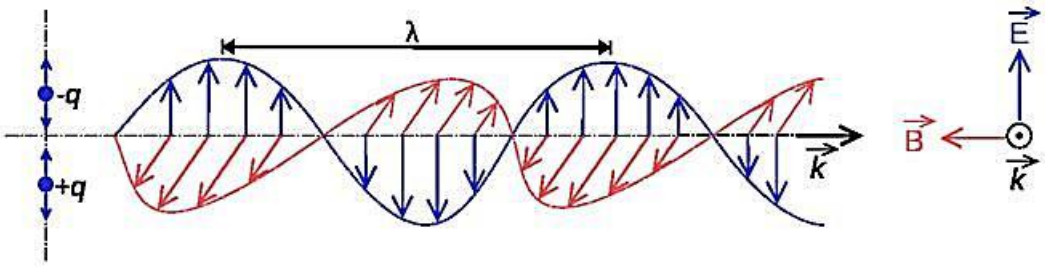


Figura 2.1. Onda electromagnética. De color rojo se representa el campo magnético y de azul el eléctrico.

Fuente: Física: la naturaleza de las cosas. Burke, J. R.

Para poder describir una onda electromagnética podemos utilizar los parámetros habituales de cualquier onda:

• Amplitud (A): Es la longitud máxima respecto a la posición de equilibrio que alcanza la onda en su desplazamiento.

• Periodo (T): Es el tiempo necesario para el paso de dos máximos o mínimos sucesivos por un punto fijo en el espacio.

• Frecuencia (ν): Número de oscilaciones del campo por unidad de tiempo. Es una cantidad inversa al periodo.

• Longitud de onda (λ): Es la distancia lineal entre dos puntos equivalentes de ondas sucesivas.

• Velocidad de propagación (V): Es la distancia que recorre la onda en una unidad de tiempo. En el caso de la velocidad de propagación de la luz en el vacío, se representa con la letra c.

La velocidad, la frecuencia, el periodo y la longitud de onda están relacionados por la siguiente ecuación:

$$c = \lambda \cdot \nu = \frac{\lambda}{T}$$

La onda luminosa más sencilla es una onda sinusoidal pura, llamada así porque una gráfica de la intensidad del campo eléctrico o magnético trazada en cualquier momento a lo largo de la dirección de propagación sería la gráfica de una función seno.

d) Refracción y Reflexión [11]

El número de oscilaciones o vibraciones por segundo en un punto de la onda luminosa se conoce como frecuencia. La longitud de onda es la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma ‘fase’, es decir, puntos que ocupan posiciones equivalentes en la onda. Por ejemplo, la longitud de onda es igual a la distancia que va de un máximo de la onda sinusoidal a otro, o de un mínimo a otro. En el espectro visible, las diferencias en longitud de onda se manifiestan como diferencias de color. El rango visible va desde 350 nanómetros (violeta) hasta 750 nanómetros (rojo), aproximadamente (un nanómetro, nm, es una milmillonésima de metro).



Color	Longitud de onda
violeta	~ 380-450 nm
azul	~ 450-495 nm
verde	~ 495-570 nm
amarillo	~ 570–590 nm
naranja	~ 590–620 nm
rojo	~ 620–750 nm

Figura 2.2. Espectro electromagnético.

Fuente: Fundamentos de la teoría de los colores. Küppers, H.

La luz blanca es una mezcla de todas las longitudes de onda visibles. No existen límites definidos entre las diferentes longitudes de onda, pero puede considerarse que la radiación ultravioleta va desde los 350 nm hasta los 10 nm. Los rayos infrarrojos, que incluyen la energía calorífica radiante, abarcan las longitudes de onda situadas aproximadamente entre 750 nm y 1 nm. La velocidad de una onda electromagnética es el producto de su frecuencia y su longitud de onda. En el vacío, la velocidad es la misma para todas las longitudes de onda.

La velocidad de la luz en las sustancias materiales es menor que en el vacío, y varía para las distintas longitudes de onda; este efecto se denomina dispersión. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de una longitud de onda determinada en una sustancia se conoce como índice de refracción de la sustancia para dicha longitud de onda.

El índice de refracción del aire es 1,00029 y apenas varía con la longitud de onda. En la mayoría de las aplicaciones resulta suficientemente preciso considerar que es igual a 1. La óptica geométrica se ocupa de la aplicación de las leyes de reflexión y refracción de la luz al diseño de lentes y otros componentes de instrumentos ópticos.

La luz blanca al pasar por una tira uniforme cargada a tensión simple por un polariscopio se observa una serie de colores y mientras la carga se aumenta gradualmente estos cambian. Estas regiones de extinción de onda pueden reconocerse por medio del color y saber el retraso de esta. A continuación se dan algunos valores de estos retrasos en la tabla 2.1.

e) Polarización de la luz [18]

La polarización electromagnética es un fenómeno que puede producirse en las ondas electromagnéticas, como la luz, por el cual el campo eléctrico oscila sólo en un plano determinado, denominado plano de polarización. Este plano puede definirse por dos vectores, uno de ellos

paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular a esa misma dirección el cual indica la dirección del campo eléctrico.

En una onda electromagnética no polarizada, al igual que en cualquier otro tipo de onda transversal sin polarizar, el campo eléctrico oscila en todas las direcciones normales a la dirección de propagación de la onda. Las ondas longitudinales, como las ondas sonoras, no pueden ser polarizadas porque su oscilación se produce en la misma dirección que su propagación.

Tabla 2.1. Valores de retraso y el color correspondiente para la fuente de luz transmitida en el polariscopio.

Retraso (nm)	**Color transmitido**	**Retraso (nm)**	**Color transmitido**
0	Negro	843	Amarillo verde
40	Hierro gris	866	Verde amarillo
57	Lavanda gris	910	Amarillo claro
158	Gris azul	948	Anaranjado
218	Gris	998	Anaranjado rojo brillante
234	Verde blanco	1101	Violeta rojo oscuro
259	Fuera de blanco	1128	Azul violeta luminoso
267	Amarillo blanco	1151	Índigo
275	Amarillo paja pálido	1258	Verde azul
281	Amarillo pálido	1334	Verde mar
308	Amarillo luminoso	1376	Verde brillante
332	Amarillo brillante	1426	Verde amarillo
430	Amarillo castaño	1495	Color carne
505	Rojo anaranjado	1534	Rojo

536	Rojo	1621	Púrpura embotado
551	Rojo profundo	1652	Violeta gris
565	Púrpura	1682	Gris azul
575	Violeta	1711	Verde mar embotado
583	Índigo	1744	Azul verde
664	Azul cielo	1811	Verde luminoso
728	Verde azul	1927	Verde gris luminoso
747	Verde	2007	Blanco verde
826	Verde luminoso	2048	Rojo carne

Fuente: Photoelastic stress analysis. Kuske-Roberston. A Wiley.

f) Obtención de luz polarizada plana [20]

El método usual para producir luz polarizada cuenta básicamente de tres etapas: a) producción de luz no polarizada, b) dividirla en 2 componentes polarizadas y c) eliminar una de sus componentes. El elemento que divide el haz y separa una de ellas se conoce como polarizador.

Para la creación de luz polarizada plana los mecanismos más utilizados son:

Por reflexión: Cuando se incide luz no polarizada a cierto ángulo con respecto a la normal sobre una superficie no metálica, se provoca que una parte del haz sufra refracción y la otra reflexión, la parte del rayo que fue reflectada quedará parcial o totalmente polarizado. El único ángulo donde se presenta la total polarización es el conocido como ángulo de Brewster o ángulo de polarización (ecuación 2.1).

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a} \qquad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

θ_p: ángulo de polarización.

n_b: índice de refracción del medio inicial del rayo.

n_a: índice de refracción del medio final del rayo.

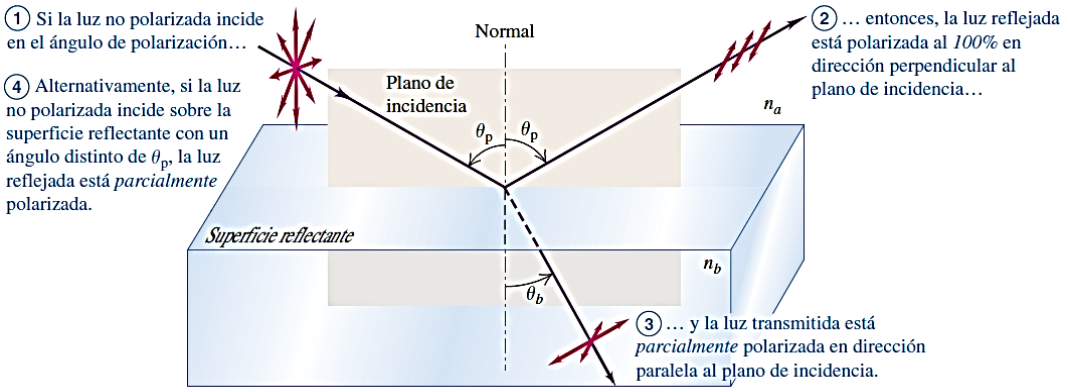


Figura 2.3. Onda electromagnética. De color rojo se representa el campo magnético y de azul el eléctrico.

Fuente: Física universitaria Vol. 2. Sears, F. W. Pág. 1139.

Por cristales naturales: En ciertos cristales como el espato de Islandia (carbonato de calcio) se presenta esta condición de polarización.

Por filtro dicroico: Conocido también como filtro polaroid es una forma económica de obtener luz polarizada plana. Inventado por Edwin Land su fabricación empieza con la obtención de una larga hoja transparente que sea químicamente activa (por lo regular es alcohol polivinílico). Esta hoja es calentada y estirada a una longitud deseada produciendo cierta alineación en sus moléculas polímeras. Por último la hoja se sumerge en yodo provocando que los átomos del yodo se orienten en largas hileras emulando a las de su anfitrión.

Con el filtro terminado se procede a enviar luz sobre él y, a consecuencia de la conductividad del yodo, la componente paralela a las moléculas es absorbida mientras que la perpendicular atraviesa a través de ellas consiguiendo así la polarización de la luz.

g) Obtención de luz polarizada circular [20]

La forma de obtener este tipo de luz es mediante el envío de luz polarizada plana a través de unas placas conocidas como retardadores de 90°, que por las características que la constituyen, provocan que la situación de polarización plana se convierta en circular.

El retardador de 90° o placa de cuarto de onda es un dispositivo que transforma la luz linealmente polarizada en circularmente polarizada y viceversa. Puede emplearse una placa de calcita aunque regularmente se utilizan hojas de cuarzo, mica u hojas birrefringentes de plástico polímero.

La función del retardador es la de dividir el haz incidente en 2 componentes linealmente polarizadas y retardar un de ellas un cuarto de ciclo, de tal forma que, el patrón seccional del haz emergente es un conjunto de 2 movimientos armónicos simples que se encuentran en ejes perpendiculares y que están desfasados 90° uno del otro.

Cabe mencionar que el patrón del haz combinado en la mayor parte de los casos toma una forma de elipse. Esta se convierte en círculo si se rota la placa de tal modo que sus ejes queden en las direcciones de vibración con respecto al haz incidente a +45 y -45, en esta condición las componentes presentan igual magnitud.

2.1.2.4 POLARISCOPIO [6]

El polariscopio es un instrumento óptico, que en su operación utiliza las propiedades de la luz polarizada. En el análisis experimental de esfuerzos, frecuentemente, se utilizan dos tipos de polariscopios, el plano y el circular. Los nombres provienen del tipo de luz polarizada que utilizan para su operación.

En la práctica, la luz polarizada plana se produce con un elemento conocido como polarizador plano o lineal. La producción de luz polarizada circular o más general la luz polarizada elípticamente requiere el uso de un polarizador junto con un elemento conocido como placa de ¼ de onda.

a) Polarizadores planos

Cuando una onda de luz choca con un plano polarizado, este elemento óptico divide a la onda en dos componentes mutuamente perpendiculares, como se muestra en la figura 2.4. La componente paralela al eje de polarización se transmite mientras que la componente perpendicular se absorbe.

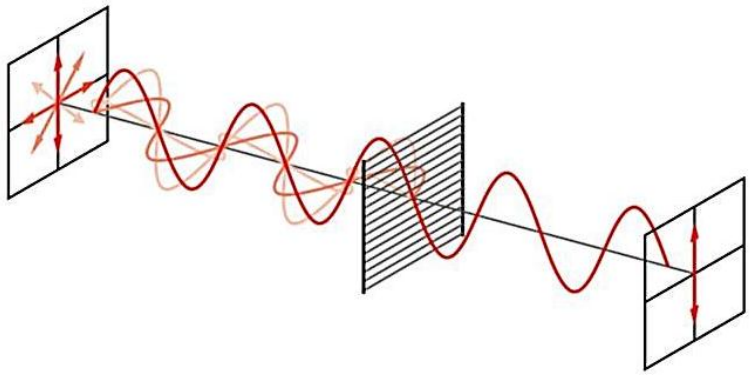


Figura 2.4. Polarización electromagnética por absorción selectiva.

Fuente: Experimental Stress Analysis. Dally, James W. y Riley, W. F.

Los filtros polaroid casi siempre son utilizados para producir luz polarizada en polariscopios, tienen la ventaja de proporcionar un amplio campo de luz polarizada relativamente a bajo costo.

b) Placas de ¼ de onda

Una placa de onda es un material óptico que tiene la capacidad de dividir un vector luz en dos componentes ortogonales y transmitirlas con diferentes velocidades. A ésta se le conoce como material doble refringente o birrefringente. La transmisión de luz a lo largo del eje 1 se realiza a una velocidad c_1 y a lo largo de eje 2 a una velocidad c_2. Debido a que c_1 es más grande que c_2, el eje 1 se conoce como eje rápido y al eje 2 se le conoce como eje lento.

c) Polariscopio circular [12]

Cuando se adhieren dentro del polariscopio plano dos placas de cuarto de onda entre polarizador (P) y modelo (M) y entre modelo y analizador (A), se obtendrá un dispositivo conocido como polariscopio circular. La primer placa de cuarto de onda (λ/4) se coloca de forma tal que sus 2 ejes de polarización perpendiculares entre sí, formen con el eje de polarización del polarizador un ángulo de 45°. La siguiente placa se coloca con los ejes cruzados respecto a los de la primera.

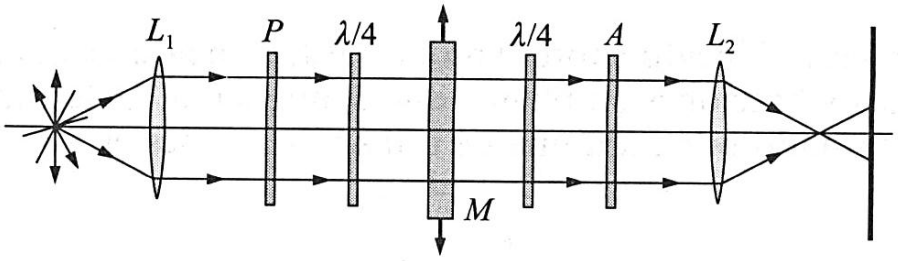


Figura 2.5. Polariscopio circular.

Fuente: Fotoelasticidad. Ortiz Berrocal, L.

2.1.2.5 PROPIEDADES DEL MATERIAL UTILIZADO PARA LA FOTOELASTICIDAD BIDIMENSIONAL

Uno de los factores más importantes del método fotoelástico, es la selección de un material apropiado para el modelo a analizar. Desafortunadamente, un material ideal no existe, por lo que se debe de elegir de una lista de polímeros disponibles al que mejor se ajuste a las necesidades de la prueba.

La siguiente lista nos muestra las propiedades que un material fotoelástico tiene que poseer.

El material debe:

1. Ser transparente con respecto a la luz empleada en el polariscopio.

2. Presentar sensibilidad con respecto a los esfuerzos y a las deformaciones.

3. Poseer características de linealidad con respecto a las propiedades de esfuerzo-deformación y a las del orden de franja.

4. Poseer isotropía y homogeneidad ópticas.

5. No exhibir comportamiento viscoelástico.

6. Tener un alto módulo de elasticidad.

7. Poderse maquinar por los métodos convencionales..

8. Ser libre de esfuerzos residuales.

9. Estar disponible a un precio razonable.

2.1.2.6 MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN LA FOTOELASTICIDAD BIDIMENSIONAL [6]

a) Homalite 100

El homalite 100 es una resina poliéster la cual se vacía entre dos placas de vidrio para construir hojas muy largas. El material posee las características de estar libre de esfuerzos residuales, la superficie de las hojas son de buena calidad óptica y puede maquinarse con el router.

El valor de franja del material puede considerarse para tiempos que sobrepasen los 10 minutos como una constante, con la aclaración que no se puede llegar a altos niveles de orden de franja sin que el modelo sufra fractura. Por otro lado, debido a que la absorción de humedad que tiene es muy lenta, las consecuencias por el envejecimiento que pueda presentar por varios días aún en condiciones de prueba muy húmedas, no generarán daño significativo. Por último se debe mencionar que este material posee un bajo índice de sensibilidad.

b) Policarbonato

Es un polímero duro y dúctil el cual fluye antes de la fractura. Es elaborado por medio de extrusión y está disponible en grandes hojas que poseen buenas características superficiales, lamentablemente la extrusión produce en las hojas una situación de birrefringencia residual. Para eliminar la problemática anterior se recomienda realizar un templado de tiempo extendido.

Este material presenta también entre sus propiedades, un alto índice de sensibilidad, un grado bajo de deslizamiento a temperatura ambiente y es relativamente libre de efectos de envejecimiento.

c) Resinas epóxicas.

Las resinas epóxicas son producto de la condensación de epiclorohidrin y un fenol polihídrico. Estas resinas se caracterizan como materiales frágiles, y son más fáciles de maquinar que el poliéster y los policarbonatos. Muchos de los epóxicos son menos sensibles que los policarbonatos, pero poseen mejor sensibilidad óptica que el Homalite 100.

Este material presenta deslizamiento, aproximadamente de la misma cantidad que un Homalite 100 o policarbonato. Aunque es susceptible a efectos del envejecimiento, la velocidad de difusión de agua dentro de la resina es suficientemente alta que permite una saturación en más o menos 2 meses.

d) Goma de uretano.

Es un material que puede vaciarse entre placas de vidrio para producir una placa de color ámbar con superficies de calidad óptica. Su sensibilidad de deformación es tan baja que pueden despreciarse los efectos del envejecimiento.

Para finalizar se mencionará que este material presenta muy poco deslizamiento óptico o mecánico y que puede ser maquinado también con el router.

2.1.2.7 LEY ÓPTICA DE LOS ESFUERZOS [1]

Se sabe que cuando la luz pasa de un medio a otro de diferente densidad, su velocidad cambia. La razón entre estas dos velocidades se llama índice de refracción:

$$n = \frac{velocidad\ en\ el\ primer\ medio}{velocidad\ en\ el\ segundo\ medio}$$

Brewster estableció que en materiales birrefringentes al estar sometidos a esfuerzos: “El cambio relativo en el índice de refracción es proporcional a la diferencia de los esfuerzos principales”:

$$k(\sigma_1 - \sigma_2) = (n_1 - n_2) = v\left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right) \qquad \text{Ec. (2.1)}$$

Dónde:

K: es una constante de proporcionalidad, cuyo valor depende del material.

σ_1 y σ_2: esfuerzos principales en los dos planos.

v: velocidad de la luz fuera del medio birrefringente.

v_1 y v_2: velocidades de transmisión en el medio birrefringente en los dos planos.

El tiempo necesario para atravesar el medio birrefringente depende del espesor y la retardación relativa entre los dos rayos de luz es δ.

$$t_1 = \frac{b}{v_1} \quad \text{y} \quad t_2 = \frac{b}{v_2}$$

$$\delta = t_1 - t_2 = b\left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right) \qquad \text{Ec. (2.2)}$$

Reemplazando en la ley de Brewster:

$$k(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{v.\delta}{b} \qquad \text{Ec. (2.3)}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{v.\delta}{b.k}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{C.N}{b} \qquad \text{Ec. (2.4)}$$

Dónde:

C: constante fotoelástica del material.

N: orden de franja (adimensional).

b: espesor del material.

2.1.2.8 CALIBRACIÓN DEL MATERIAL [1]

Los materiales en general y específicamente los plásticos fotoelásticos presentan alguna variación en las propiedades mecánicas y ópticas entre un lote y otro, y en grado menor de pieza a pieza, dentro de un mismo lote. Es necesario por esto obtener datos precisos en los modelos fotoelásticos a estudiarse, realizar primero una calibración del material y obtener la constante fotoelástica. El modelo de calibración deberá tener las mismas características del modelo a estudiar, esto es: debe ser del mismo material (hoja o mezcla) y con los mismos procesos en la elaboración del modelo.

La calibración de material fotoelástico no es difícil pero si lleva tiempo, la precisión con la que se determina la constante fotoelástica del material

depende del orden de franja que se observe en el polariscopio. Por tanto, es importante realizar la calibración cuidadosamente, es decir un modelo dimensionalmente preciso, con carga conocida, libre de fricción y otros efectos parásitos, que pueden alterar los resultados.

El parámetro obtenido con la calibración es la constante fotoelástica de material *C*, la cual es una medida de la sensibilidad birrefringente del material. De la relación entre esfuerzos mecánicos y principios ópticos ó ley óptica de las tensiones:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2.\tau_{máx} = \frac{C.N}{b}$$

De la ecuación anterior es evidente que cuando se conoce el espesor del modelo, la diferencia entre los esfuerzos principales ó el esfuerzo cortante máximo, solo es necesario determinar el orden de franja para obtener la constante C, en cualquier material fotoelástico.

$$C = \frac{b(\sigma_1 - \sigma_2)}{N} = \frac{2b.\tau_{máx}}{N} \qquad \text{Ec. (2.5)}$$

En esto se fundamenta todo el proceso de calibración para materiales fotoelásticos.

Hay diferentes formas de modelos y varios arreglos de cargas que pueden usarse para la determinación del coeficiente óptico de tensión, de una lámina de material fotoelástico.

En general para la selección de la forma de un modelo y el tipo de carga a aplicarse se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Debe conocerse la magnitud de la carga aplicada.
- Es preferible tener un estado de tensión uniaxial, así la relación de calibración se reduce a:

$$C = \frac{b(\sigma_1 - \sigma_2)}{N} = \frac{b.\sigma}{N}$$

- El modelo debe ser simple con lo cual se reduce costos de maquinado.
- Un arreglo simple para la aplicación de la carga, libre de fricción.
- Borrar los efectos de borde para medir el orden de franja con más exactitud.

2.1.2.9 EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

a) Generalidades [5]

El método del elemento finito ha llegado a ser una herramienta poderosa en la solución numérica en un amplio número de problemas de ingeniería. Las aplicaciones van desde el análisis de esfuerzos y deformaciones en automóviles, aeronaves, edificios y estructuras de puentes hasta el análisis en los campos de flujo de calor, de fluidos, magnético, filtraciones, etc.

Con los avances en la tecnología de las computadoras y de los sistemas CAD, pueden modelarse problemas complejos con relativa facilidad. En una computadora pueden probarse varias configuraciones alternas con diversas configuraciones alternas antes de construir el prototipo. Todo esto sugiere que se debe modernizar empleando estos desarrollos para entender la teoría básica, las técnicas de modelado y los aspectos computacionales del método del elemento finito.

En este método de análisis, una región compleja continua se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Un proceso de ensamble de estos elementos, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones da los desplazamientos nodales. A partir de esto se encuentran las deformaciones unitarias. Empleando las relaciones

constitutivas se evalúan los esfuerzos y con las teorías de falla se determinan las condiciones de falla.

b) Discretización del dominio [13]

En la mayoría de los problemas de ingeniería, se requiere hallar los valores de un campo variable, tales como desplazamientos, esfuerzos, temperatura, presión y velocidad, como una función de las coordenadas espaciales (x, y, z). Asimismo, en el caso de los problemas de estado transitorio, el campo variable tiene que ser hallado en función tanto de coordenadas (x, y, z) como del tiempo.

El primer paso del análisis del elemento finito comprende la discretización del dominio en pequeños subdominios denominados elementos finitos.

Una variedad de procedimientos pueden ser utilizados para modelar un dominio mediante el uso de elementos finitos. Diferentes métodos de división del dominio involucran distintos tiempos de procesamiento computacional que guían frecuentemente a diversas aproximaciones para la solución de los problemas físicos.

c) Formas básicas de los elementos

Las formas, tamaños, números y configuraciones de los elementos tienen que ser escogidos cuidadosamente, ya que deben de ser lo más semejantes al cuerpo analizado, para no incrementar el tiempo computacional de la solución. La mayoría de las selecciones del tipo de elemento es dictaminada por la geometría del cuerpo y por el número de coordenadas independientes necesarias para describir el sistema.

Si la geometría, propiedades del material y el campo variable del problema pueden se descritas en términos de una sola coordenada espacial, se pueden utilizar elementos lineales o unidimensionales como el mostrado en la figura 2.6 (a). La distribución de temperatura en una barra, la presión distribuida en una tubería y la deformación de una barra

por carga axial son ejemplos que pueden ser modelados mediante el uso de estos elementos.

Cabe mencionar que aunque estos elementos poseen una sección transversal, ellos pueden ser analizados como un elemento lineal (figura 2.6 (b)). Para un análisis simple, a los elementos unidimensionales se les colocan 2 nodos, uno en cada extremo, con el correspondiente valor de campo variable escogido como incógnita.

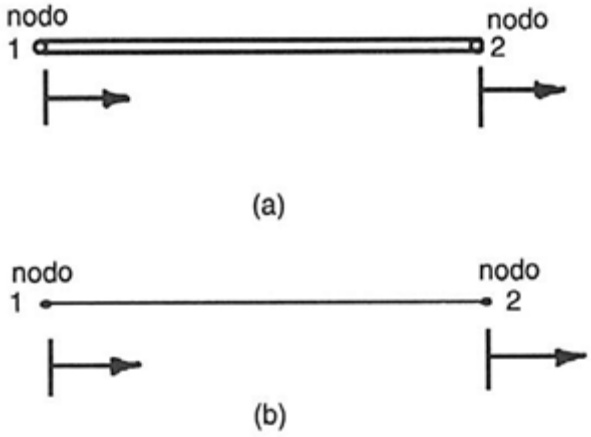


Figura 2.6. Elemento unidimensional.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

Cuando la configuración y otros detalles del problema puedan ser descritos en términos de 2 coordenadas espaciales independientes, se pueden usar los elementos mostrados en la figura 2.7.

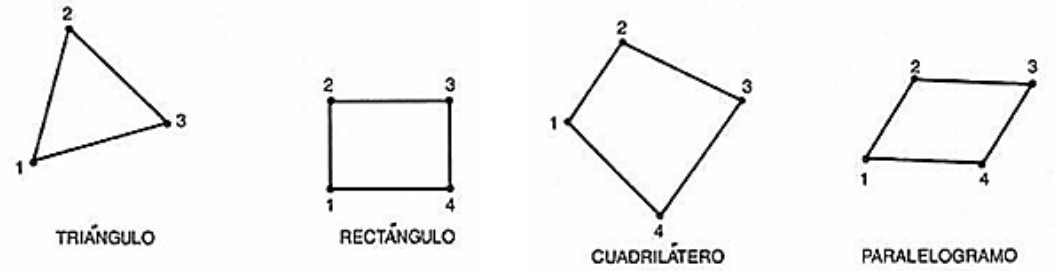


Figura 2.7. Elementos bidimensionales.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

El elemento básico utilizado para el análisis bidimensional es el elemento triangular. Mediante la unión de 2 ó 4 elementos triangulares se puede construir el elemento cuadrilateral (ó sus otras derivaciones el rectángulo y el paralelogramo), como se aprecia en la figura 2.8.

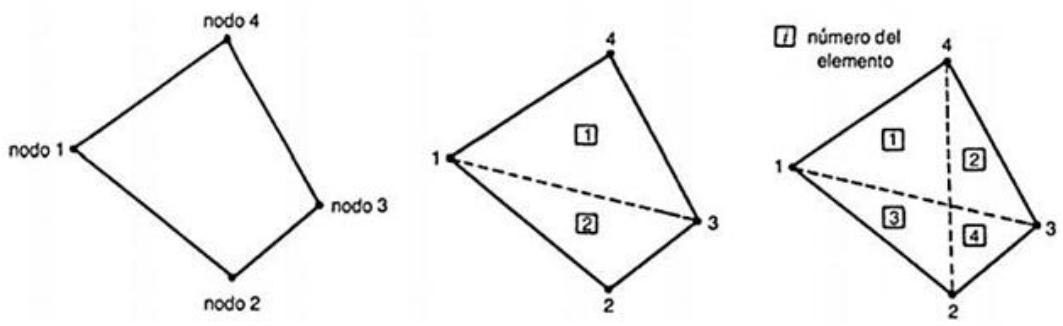


Figura 2.8. Elemento cuadrilateral construido por 2 ó 4 triángulos.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

Sí la geometría, propiedades del material y otros parámetros del cuerpo pueden ser descritos en tres coordenadas espaciales independientes, la región puede modelarse mediante el uso de elementos tridimensionales como los que se muestran en la figura 2.9. Cabe decir que el elemento básico tridimensional es el tetraedro.

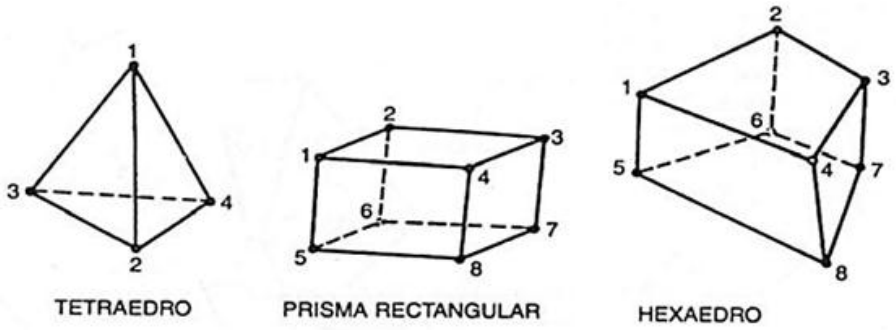


Figura 2.9. Elementos tridimensionales.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

Algunos problemas, que son tridimensionales, pueden ser descritos en una ó dos coordenadas independientes. Tales problemas pueden ser

analizados mediante el uso de elementos axisimétricos, como los que se presentan en la figura 2.10.

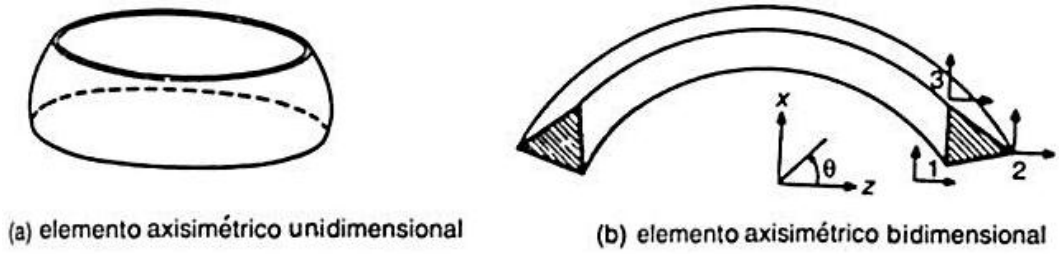


Figura 2.10. Elementos Axisimétricos.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

Para los problemas de discretización que poseen curvas en su geometría, los elementos parabólicos son una solución. Los elementos típicos de esta clase son los que se observan en la figura 2.11.

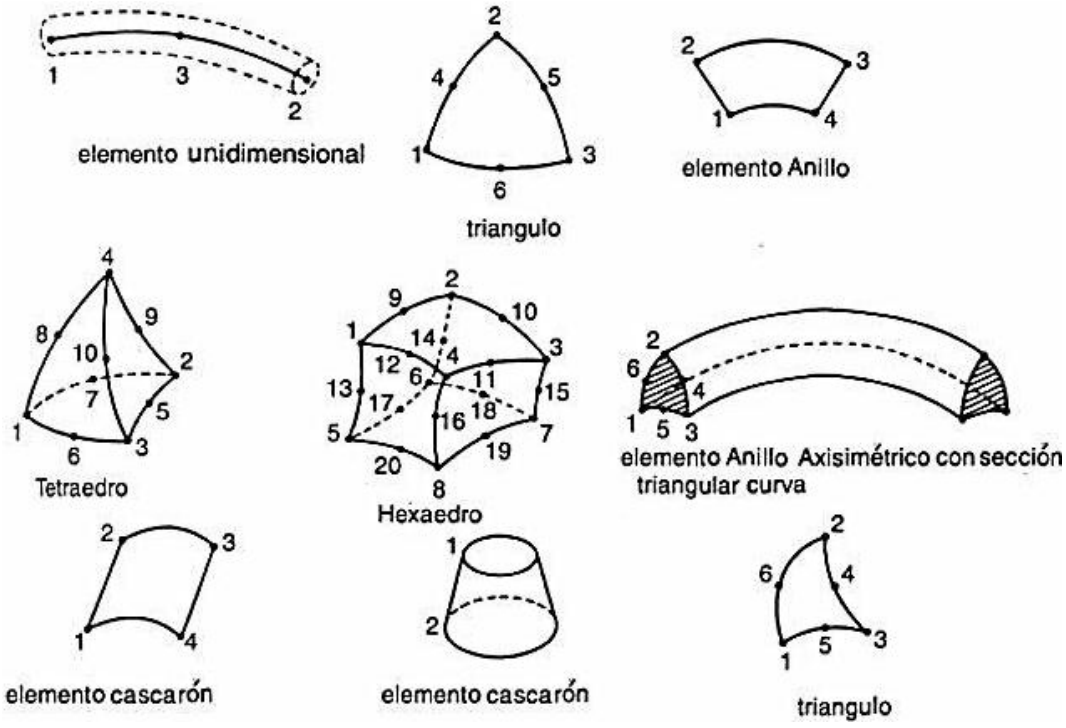


Figura 2.11. Elementos parabólicos.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

Cabe mencionar que la modelación de estos últimos elementos fue posible mediante laadición de nodos a la mitad de sus lados.

d) Proceso de discretización

Las múltiples consideraciones para realizar el proceso de discretización están expuestas a continuación:

Tipo de elemento

Frecuentemente el tipo de elemento para ser utilizado será, evidentemente, de acuerdo con el problema físico en cuestión. Por ejemplo, si el problema involucra el análisis de una estructura bajo ciertas condiciones de carga como la de la figura 2.12 (a), el tipo de elemento para modelar la situación es obviamente el elemento línea o barra como se observa en la figura 2.12 (b).

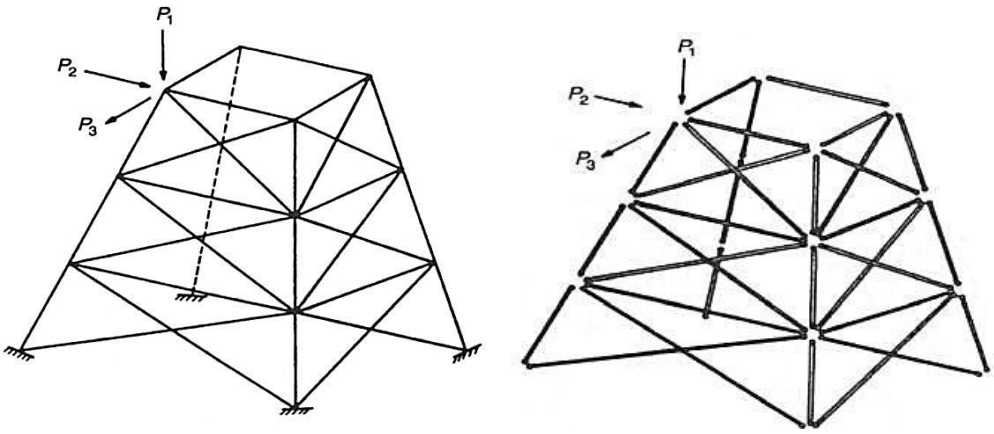


Figura 2.12. Tipo de elemento para una estructura.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

De manera similar, en el caso del análisis de esfuerzos en una viga como la que se presenta en la figura 2.13 (a), la modelación puede ser hecha mediante el uso de elementos tridimensionales sólidos como los que se ven en la imagen 2.13 (b).

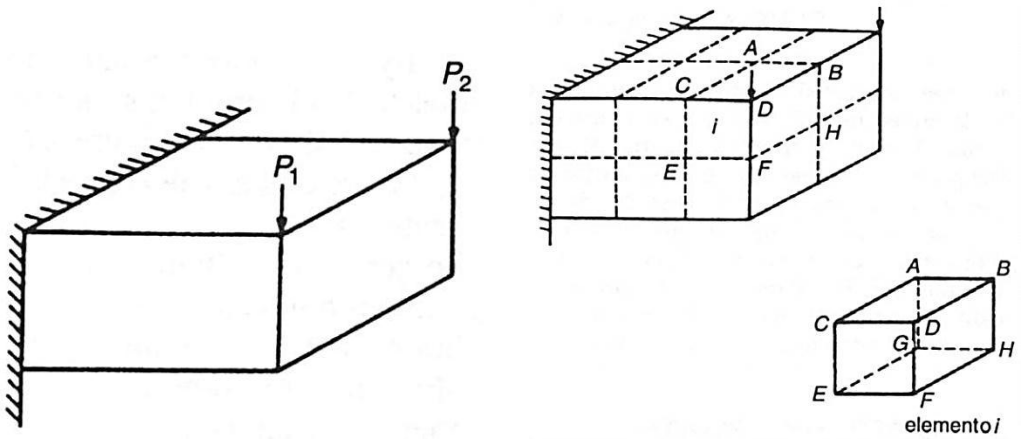


Figura 2.13. Elementos sólidos para una viga cuadrada. (a).Viga Original. (b) Idealización utilizando elementos tridimensionales.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

De cualquier forma, en algunos casos, el tipo de elemento para ser empleado en el modelado, puede no ser evidente, por lo que se debe escoger en base al juicio o a la experiencia de la persona que realiza el estudio.

Tamaño del elemento

El tamaño de los elementos afecta directamente el resultado de la solución y por lo tanto tiene que ser escogido con cuidado. Sí el tamaño de los elementos es pequeño, la solución final se espera que resulte más exacta. De cualquier forma, se tiene que recordar que el uso de elementos muy pequeños también implica más tiempo computacional.

Para el caso del análisis de esfuerzos de una viga cuadrada hueca, como la que se ilustra en la figura 2.14 (a), el tamaño de todos los elementos puede ser aproximadamente del mismo tamaño (figura 2.14 (b)). Pudiendo ser en este caso elementos tipo cascarón.

Algunas veces, se pueden utilizar elementos de diferentes tamaños en el mismo cuerpo. Un ejemplo de esta situación es el presentado en la figura 2.15 (a), donde se realiza un análisis de esfuerzos en una placa a tensión

con un agujero en el centro, para su modelado, se pueden usar elementos de distintos tamaños como los empleados en la figura 2.15 (b).

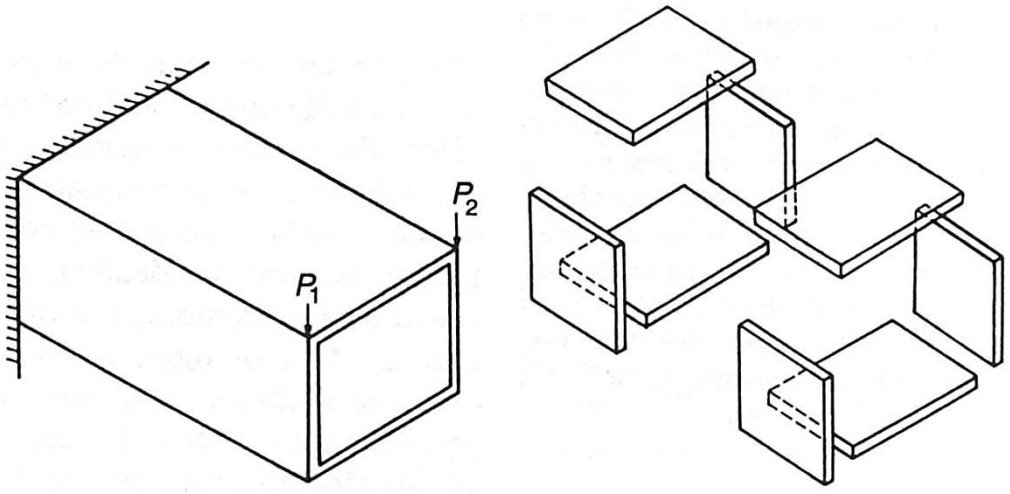


Figura 2.14. Tamaño del elemento para una viga cuadrada hueca. (a). Viga original (b) Idealización en elementos finitos.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

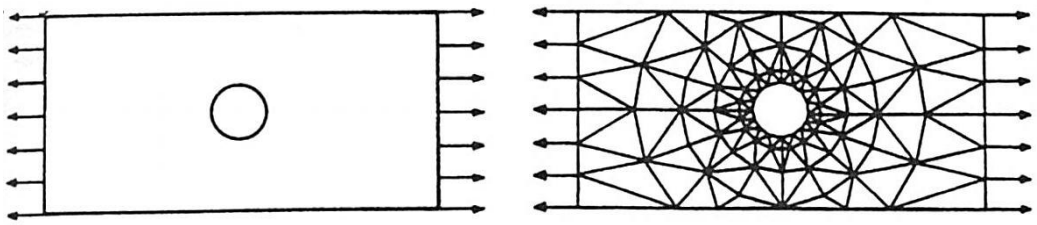


Figura 2.15. Tamaños de elementos para una placa con agujero central. (a). Placa original (b). Idealización utilizando diferentes tamaños.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

Cabe mencionar que el tamaño de los elementos puede ser más pequeño cercano al agujero que en los lugares más alejados a este, debido a que en esa zona es esperado que se encuentre la concentración de los esfuerzos.

En general, en las regiones donde se espere un excesivo cambio del campo variable se debe utilizar una malla más fina.

Ubicación de los nodos

SÍ los cuerpos no presentan cambios abruptos en su geometría, propiedades del material y condiciones externas (como cargas, temperaturas, etc.), estos pueden ser divididos en igual número de partes y por lo tanto el espacio entre nodos puede ser uniforme. De otra manera, si existen algunas discontinuidades en el problema, los nodos tienen que ser introducidos obviamente, en esas discontinuidades. Esto último se ejemplifica en la figura 2.16.

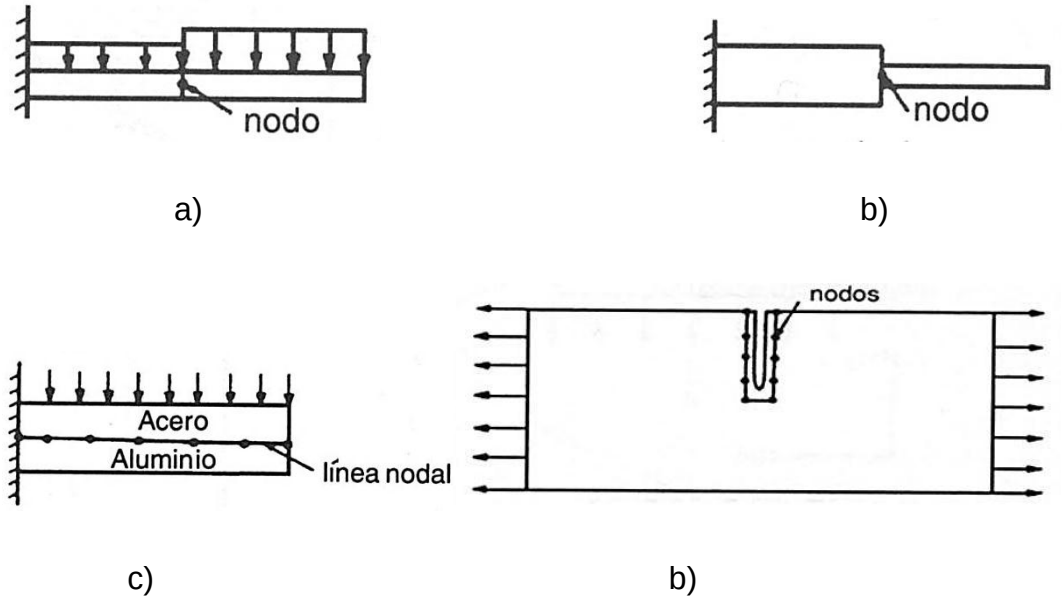


Figura 2.16. Ubicación de los nodos en discontinuidades. (a) Discontinuidad en carga (cambio abrupto en la distribución de carga), (b) Discontinuidad en la geometría (cambio abrupto en la sección transversal de una viga), (c) Discontinuidad en las propiedades del material (viga bimetálica), (d) Discontinuidad en el material (placa cargada con ruptura en la parte media)

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

Número de elementos

El número de elementos que son seleccionados para la modelación depende de la exactitud deseada, del tamaño de los elementos y del

número de grados de libertad involucrados. Por otro lado, se sabe que un incremento en el número de elementos generalmente significa resultados más precisos; pero cabe mencionar que, para cualquier problema en estudio, se llegará a una cierta cantidad de elementos que aunque sean aumentados en número, ya no podrán mejorar la exactitud del problema.

Simplificaciones por la configuración física del cuerpo y de la carga

Sí la configuración física del cuerpo es simétrica al igual que las condiciones de carga, se puede considerar únicamente una parte del cuerpo para el modelado en elemento finito. En la figura 2.17 se ejemplifica lo anterior, donde solamente la mitad de la placa con agujero es considerada para el análisis, debido a que presenta simetría tanto en su geometría como en las cargas que se le aplican.

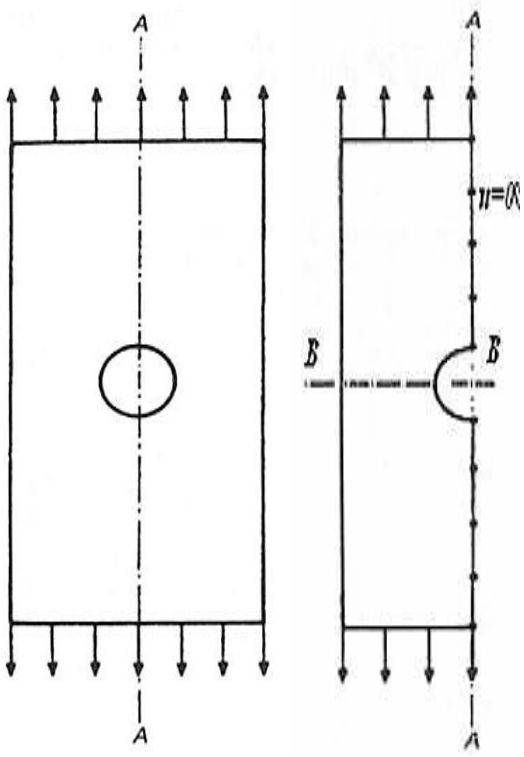


Figura 2.17. Placa con agujero en el centro con simetría geométrica y en cargas. (a). Placa original (b). Placa simplificada.

Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

A consecuencia de que a lo largo de la línea *A-A* no hay desplazamiento horizontal de los nodos correspondientes, la condición que u = 0 debe de ser colocada mientras se obtiene la solución y dichos nodos solo tienen movimiento vertical. Cabe decir, que el ejemplo mostrado en la figura 2.17, se puede considerar hasta un cuarto de la placa para el análisis debido a su geometría (figura 2.18). En este caso los nodos sobre el corte *B-B*, no tendrán movimiento vertical v = 0 y solo se considera su desplazamiento horizontal.

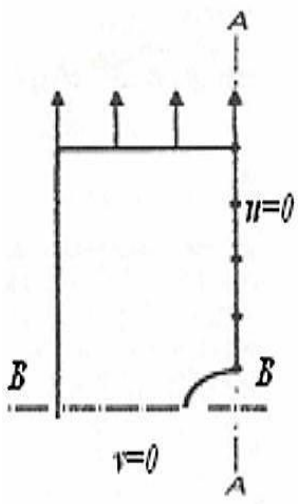


Figura 2.18. Placa simplificada a una cuarta parte de su geometría.
Fuente: The finite element method in engineering. Rao, Singiresu.

2.1.2.10 ETAPAS BÁSICAS EN EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO [5]

El análisis por elementos finitos implica tres etapas de actividad: preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento. El preprocesamiento es la preparación de datos, como las coordenadas nodales, la conectividad, las condiciones frontera y la información sobre cargas y material.

La etapa de procesamiento esta relacionada con la solución de ecuaciones que resultan de la evaluación de las variables nodales.

Cantidades como los gradientes o los esfuerzos pueden evaluarse en esta etapa.

La fase de posprocesamiento es donde se presentan los resultados. En general, en esta etapa se calculan y se muestran la configuración deformada, las formas modales, la distribución de la temperatura y/o esfuerzos. Un análisis completo por elemento finito es una interacción lógica de las tres etapas.

La preparación de los datos y su procesamiento necesitan de un esfuerzo considerable si todos los datos van a ser manejados manualmente, debido a lo tedioso del manejo de los datos y la posibilidad de incurrir en errores al incrementar el número de elementos.

2.1.3 Términos básicos

Refractar: Hacer que cambie de dirección un rayo de luz u otra radiación electromagnética al pasar oblicuamente de un medio a otro de diferente velocidad de propagación.

Birrefringencia: Desdoblamiento de un rayo luminoso cuando se propaga en un medio cuyas propiedades dependen de la dirección de aquel.

Anisotropía: Cualidad de un medio, generalmente cristalino, en el que alguna propiedad física depende de la dirección de un agente.

2.2 FUNDAMENTACIÓN LEGAL

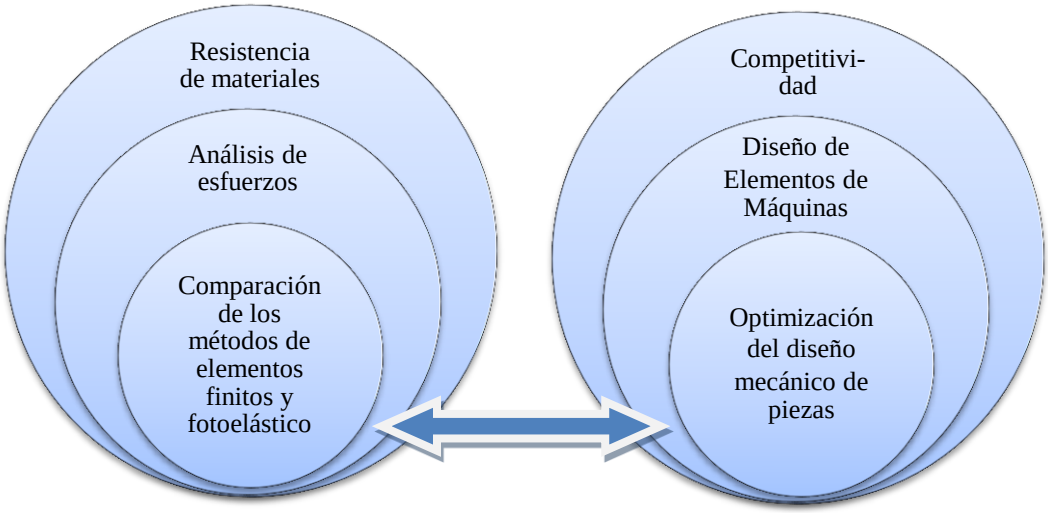
La presente investigación estará fundamentada en las siguientes normas:

- ASTM D4093-95R01E01 Test Method for Photoelastic Measurements of Birefringence and Residual Strains in Transparent or Translucent Plastic Materials.

- ASTM C0978-04 Test Method for Photoelastic Determination of Residual Stress in a Transparent Glass Matrix Using a Polarizing Microscope and Optical Retardation Compensation Procedures.

- ASTM C1279-00E01 Test Method for Non-Destructive Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed, Heat-Strengthened, and Fully Tempered Flat Glass.

2.3 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES



Variable Independiente Variable Dependiente

2.4 HIPÓTESIS

El uso combinado de la técnica experimental de la fotoelasticidad y el método de elementos finitos permitirá obtener valores más precisos de los esfuerzos en elementos mecánicos.

2.5 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES

2.5.1 VARIABLE DEPENDIENTE:

Estudio comparativo de los métodos de elementos finitos y fotoelástico en la determinación de esfuerzos.

2.5.2 VARIABLE INDEPENDIENTE:

Optimización del diseño mecánico de piezas.

2.6 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA

La presente investigación se fundamentará en el paradigma crítico propositivo, ya que las características de este paradigma permitirán ser flexibles en cuanto a consideraciones de diseño y métodos de elaboración que a la presente investigación compete.

Además permitirá una correcta interpretación, compresión y explicación de las variables involucradas en esta investigación para considerar las cualidades más no las cantidades que en el desarrollo de dicha investigación se podrán encontrar y producir durante el transcurso investigativo del tema.

Mediante el paradigma propuesto se podrá plantear alternativas de solución al presente problema en desarrollo, siempre enfocándose a un desarrollo de fácil comprobación y proporcionando una correcta comprensión.

Es propicio para la participación de los actores sociales, lo que permitirá que estos se vean beneficiados con los resultados de dicha investigación, por tal motivo de la presencia de actores sociales nace la obligación de que la investigación este sometida a cambios de ser necesario.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE

Este proyecto va a presentar datos cuantitativos y cualitativos ya que se utilizarán variables continuas para lo cual se medirá parámetros indispensables para comparar los métodos de elementos finitos y fotoelástico, para establecer la manera de cómo obtener componentes mecánicos de mejor calidad.

Básicamente estos parámetros serán los esfuerzos en probetas con diversas configuraciones, sometidas a diferentes estados de carga. En el caso de la técnica fotoelástica estas probetas deben fabricadas ser de materiales birrefringentes, mientras que para el método de elementos finitos serán modelos virtuales que representan a estas probetas.

3.2. MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1 DE CAMPO

La investigación de campo es indispensable debido a que en los laboratorios y empresas de nuestro medio el equipamiento requerido no es comúnmente utilizado, por lo tanto, se debe diseñar y construir el banco de pruebas y las probetas para realizar los ensayos.

3.2.2 BIBLIOGRÁFICO

El presente estudio será de modalidad bibliográfico ya que se obtendrá información en libros, folletos e Internet, indispensable para realizar un buen trabajo. De esta forma se podrá identificar el procedimiento adecuado para realizar los ensayos, conceptualizar algunos aspectos importantes, determinar los tipos de equipos y materiales utilizados, etc.

3.2.3 EXPERIMENTAL

La investigación experimental se podría decir que es la más importante, ya que el equipo de fotoelasticidad forma parte de un moderno laboratorio de resistencia de materiales, con el cual se podrá analizar las distribuciones de esfuerzos sobre las distintas probetas.

Así también, para tener éxito en la aplicación del método de elementos finitos es necesario del uso experto de las computadoras, así como de técnicas numéricas y de programación eficientes.

3.3 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.3.1 EXPLORATORIA

En este proyecto se pretende analizar técnicas que están revolucionando el diseño mecánico a nivel mundial, debido a las nuevas aplicaciones y procedimientos, pero que por su costo son poco utilizadas a nivel industrial en el Ecuador, por ende es significativo determinar la forma de reducir costos. La técnica fotoelástica puede ser utilizada de muchas maneras, como en el caso de control de calidad, mientras que el método de elementos finitos generalmente se lo utiliza en el diseño previo.

3.3.2 DESCRIPTIVO

Así mismo como el estudio es en su mayor parte de laboratorio, se debe describir el procedimiento correcto para realizar los ensayos para la obtención de resultados confiables, los cálculos necesarios para interpretar la distribución de colores que indican los esfuerzos en una probeta, la relación que existe entre estos valores y los esfuerzos obtenidos por el método de elementos finitos, y el error que se comete en este último.

3.3.3 ASOCIACIÓN DE VARIABLES

En este proyecto fue importante asociar las variables, ya que de esta manera se pudo determinar si en realidad la implementación del estudio

del comportamiento mecánico de los polímeros motivo de estudio en realidad contribuye en la determinación de la posibilidad de utilización de los mismos como elementos de máquinas.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

La técnica fotoelástica se puede aplicar para analizar los esfuerzos producidos en la mayoría de los componentes mecánicos existentes en la actualidad, como por ejemplo los siguientes:

- Elementos a tensión.
- Viga simplemente apoyada.
- Viga en voladizo.
- Diente de un engrane.
- Gancho de grúa.
- Costuras de soldadura.
- Elementos con concentradores de esfuerzo.

Sin embargo, a diferencia de otros tipos de ensayos, para la aplicación de la técnica fotoelástica se debe calibrar el material, es decir que se determina la constante fotoelástica del material, en base de la cual se calculan los esfuerzos en componentes de geometría más compleja.

Por lo tanto la población es cada plancha de material de la cual se cortan las probetas, considerando que la variación de las propiedades del material es mínima en la misma plancha.

El tamaño de la muestra se determina utilizando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z_{\propto}{}^{2} . p_0 . q_0}{d^2} \qquad \text{Ec. (3.1)}$$

Dónde:

- El nivel de confianza (1-α), seguridad o probabilidad con la que el método dará una respuesta correcta, los niveles de confianza para los intervalos de confianza son del 95% al 99%. El nivel de confianza prefijado da lugar a un coeficiente (Z_α) que está en función de α (tabla 3.1).

- La precisión que se desea para el estudio o error máximo *d*.

Tabla 3.1. Valores de Z_α más utilizados, según el valor de α.

α	0,10	**0,05**	0,01	0,001
Z_α	1,645	**1,960**	2,576	3,291

Aplicando la ecuación 3.1 y considerando un error del 5 % se obtiene:

$$n = \frac{(1{,}96)^2 . (0{,}95) . (0{,}05)}{(0.05)^2}$$

$$n = 72{,}99$$

Lo que significa que se deben determinar al menos 73 valores de la constante fotoelástica, y los resultados obtenidos en los ensayos que se realicen a futuro tendrán una probabilidad del 95 %, de que el 95 % de los mismos tengan las características obtenidas en este estudio y con un error máximo del 5 %.

3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.5.1 VARIABLE INDEPENDIENTE:

Estudio comparativo de los métodos de elementos finitos y fotoelástico en la determinación de esfuerzos.

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ITEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Un haz luminoso en ciertos materiales da lugar a la vez a dos haces refractados.	Propiedades ópticas del material.	Factor de franja del material fotoelástico.	¿Qué materiales son adecuados para un ensayo fotoelástico?	Ensayos de laboratorio. Hoja de toma de datos.
Los medios que poseen esta propiedad se llaman birrefringentes.	Propiedades ópticas del material.	Orden de franja de isocromáticas.	¿Cuál es la relación entre los colores y los esfuerzos.	Ensayos de laboratorio. Hoja de toma de datos.
Esfuerzo es la resistencia interna que ofrece un área unitaria de un material para una carga aplicada.	Propiedades mecánicas del material.	Valor del esfuerzo.	¿Cuál es el esfuerzo en un punto de la probeta?	Ensayos de laboratorio. Hoja de toma de datos. Simulación virtual.

3.5.2 VARIABLE DEPENDIENTE:

Optimización del diseño mecánico de piezas.

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADOR	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
El error absoluto es la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero. El error relativo es el cociente entre el error absoluto y el valor de la medida; es un número adimensional y se suele expresar en tanto por ciento. Una medida es tanto más precisa cuanto menor sea su error relativo.	Parámetro físico y matemático.	Error.	¿Qué error se comete entre la técnica fotoelástica y el método de elementos finitos?	Fórmulas para el cálculo. Tabla de resultados.

3.6 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para el desarrollo del presente trabajo investigativo se realizarán estudios de tipo bibliográfico y experimental. Las técnicas de investigación serán observación directa utilizando un cuaderno de notas con una metodología estructurada, recolección de información de libros e internet.

3.6.1 OBSERVACIÓN

Para lo cual se toma notas de todo lo que se considera necesario en un cuaderno, para describir los hechos de significación especial, que ayuda a registrar incidentes hasta tener una base informativa suficiente; se utiliza un cuaderno de notas para describir todo lo observado, además se anota fechas, cantidades y expresiones que se escuchan.

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

3.7.1 PLAN DE PROCESAMIENTO

En el procesamiento de la información se planificó lo siguiente:

- Revisión bibliográfica acerca de los equipos y materiales fotoelásticos para realizar los ensayos.
- Determinación del factor y el orden de franja de los materiales fotoelásticos más significativos.
- Fabricación de las probetas. Determinación de los esfuerzos en la probeta.
- Modelación virtual de las probetas. Análisis de los esfuerzos por el método de elementos finitos.

3.7.2 PLAN DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el análisis e interpretación de resultados se planificó lo siguiente:

- Establecer las diferencias entre los métodos de elementos finitos y el fotoelástico.

- Calcular el error cometido en el método de elementos finitos, considerando los diferentes tipos de análisis.

- Relacionar los resultados con las diferentes partes de la investigación, especialmente con los objetivos y la hipótesis.

- Comprobación de hipótesis. Establecimiento de conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

La Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica no cuenta con un laboratorio de fotoelasticidad, la cual fue una más de las razones para realizar éste proyecto con la finalidad de implementar uno de los equipos, en vista de lo cual fue necesario diseñar y construir un polariscopio para realizar los ensayos indispensables para el estudio.

El polariscopio es un equipo didáctico para realizar pruebas en modelos bidimensionales, el mismo que fue diseñado, procurando tomar todas las ventajas de los modelos de polariscopios comerciales y eliminar las desventajas, en base a varias consideraciones entre las cuales están:

- Observar fácilmente la imagen del modelo de prueba y obtener fotografías nítidas por medio de una cámara fotográfica que disponga de teleobjetivo.

- El equipo es de fácil manipulación y funcionamiento, debido a que dispone de controles simplificados y de precisión con lo que se tiene un mínimo de errores en los resultados.

- La fuente de luz permite realizar análisis fotoelásticos con resultados satisfactorios y una mejor observación de franjas, al utilizar luz monocromática y luz blanca.

- La configuración geométrica ofrece la capacidad para realizar ensayos en diferentes tipos de probetas y someterlas a diferentes valores de carga y tipos de esfuerzo.

- La disposición y ubicación de los filtros polarizadores corresponden a un polariscopio de transmisión, sus dimensiones permiten libertad de movimiento en las demostraciones prácticas.

- La principal desventaja del equipo es que algunos de los componentes son frágiles, por lo que se debe tener cuidado al transportar y manipular el mismo.

- El montaje de modelos para diferentes solicitaciones de carga, es posible realizarlo por medio de un sistema de pruebas con sus respectivos acoples y accesorios.

4.1.2 COMPONENTES DEL EQUIPO

El polariscopio es un instrumento con diferentes componentes y cada uno de estos sirve para una función específica para lograr el funcionamiento correcto del mismo, estos componentes forman un todo de un sistema (figura 4.1). El polariscopio básicamente consta de los siguientes componentes:

a) Fuente de luz

La fuente de luz permite obtener opcionalmente imágenes de tensión en color, si se trabaja con luz blanca, o bien una representación en blanco y negro si se trabaja con luz monocromática.

Para generar luz blanca se dispone de cuatro tubos fluorescentes de 30 cm y 10 W (FL-10W), mientras que para generar luz monocromática se dispone de una lámpara de vapor de sodio de 220 V y 70 W (E27-70W-2000K) que puede generar 6600 lúmenes. Por tal motivo se utilizan dos cables de alimentación con dos interruptores independientes para las conexiones eléctricas de 120 V y 220 V respectivamente.

La caja metálica que contiene los tubos fluorescentes y la lámpara de vapor de sodio está pintada de blanco para reflejar la luz, así también con la ayuda de un vidrio esmerilado de 3 mm la luz se difumina de mejor manera.

b) Porta filtro

Este dispositivo, como su nombre lo indica, soporta los filtros polarizadores de doble efecto (polarización lineal y polarización circular) de 30 cm de diámetro protegidos con placas circulares de vidrio transparente de 2 mm. Los porta filtros están construidos de acero estructural ASTM A36 y pintados de negro.

Los filtros están colocados sobre tres guías de aluminio de tal manera que puedan girar libremente para orientarlos de diferente manera de acuerdo a lo que se requiera para realizar los ensayos, esto se lo realiza mediante una escala angular pegada sobre la placa porta filtro.

Como ya se mencionó se necesitan dos filtros polarizadores para el polariscopio, uno de ellos polariza la luz que sale de la fuente, y otro que se llama analizador ya que sirve para revelar la distribución de colores sobre la probeta analizada.

c) Marco de carga

Este componente está diseñado de tal forma que se puede someter a las probetas a tensión, compresión y flexión, con lo que se producen diferentes tipos de esfuerzos. Para esto se necesitan diversos accesorios y aditamentos.

Para realizar los ensayos, primero se fija la probeta y por medio de un husillo y una palanca se aplica la carga en forma manual. Las tensiones que se producen en el modelo se ven como zonas más claras que hacen visible la distribución de las tensiones. Para determinar la diferencia de las tensiones principales se analiza el orden de las líneas isocromáticas oscuras.

El marco de carga está hecho de acero inoxidable debido a diversas razones, como: los desplazamientos deben ser mínimos para que no afecten los resultados de los ensayos, los valores de carga a los que va estar sometido, la manipulación afectaría su integridad si éste se construyera con un material que requiera pintura.

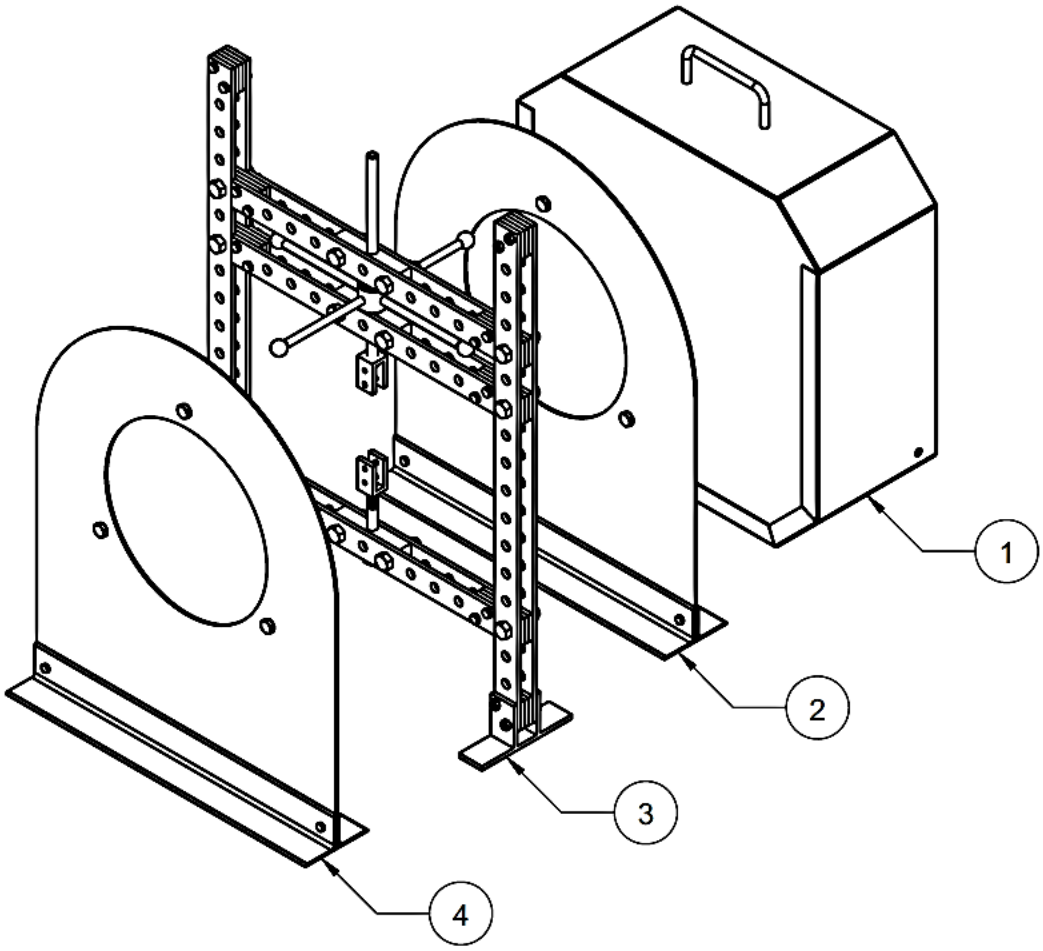


Figura 4.1. Componentes del polariscopio. (1) Fuente de luz, (2). Porta filtro (polarizador), (3) Marco de carga, (4) Porta filtro (analizador).

Fuente: Autor.

4.1.3 DISEÑO DEL POLARISCOPIO

A continuación se detalla el diseño de cada uno de los componentes del polariscopio, las normas y los parámetros que se tomaron en consideración.

a) Fuente de luz

Este componente consta de las siguientes partes:

- Carcasa.
- Vidrio esmerilado.
- 4 tubos fluorescentes.
- 1 lámpara de vapor de sodio.

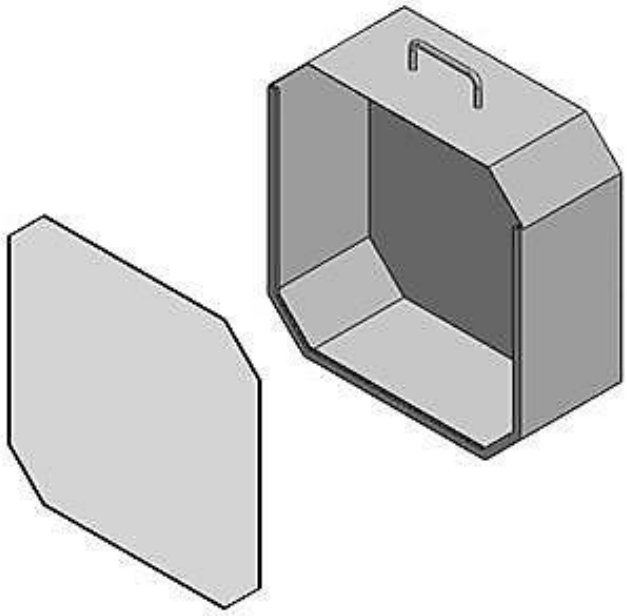


Figura 4.2. Fuente de luz (esquema).

Fuente: Autor.

La carcasa es de acero ASTM A36 y está dimensionada para poder alojar los tubos fluorescentes y la lámpara de vapor de sodio con sus respectivos accesorios y conexiones eléctricas, además se considera las posibles ubicaciones de las probetas.

Debido a que la carcasa no soporta una carga específica se asume un espesor de 2 mm y se determina el factor de seguridad asumiendo que una persona de 80 Kg se apoya sobre ella.

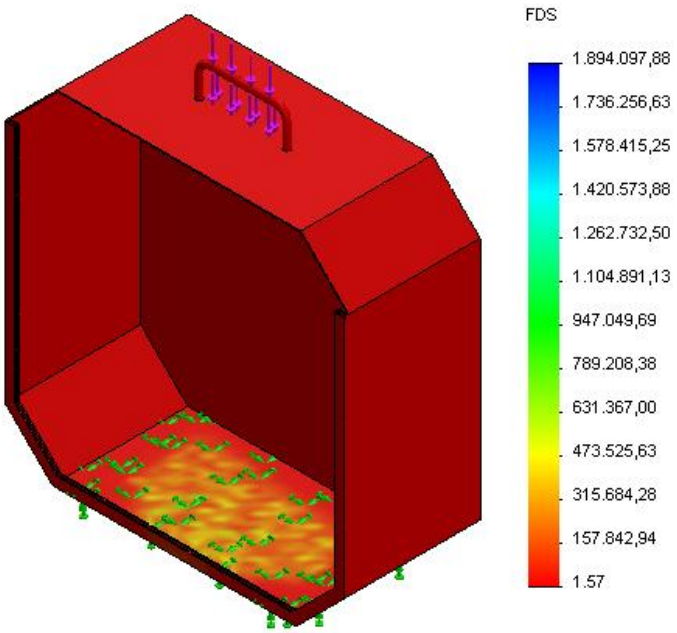


Figura 4.3. Factor de seguridad de la carcasa.

Fuente: Autor.



Ilustración 4.1. Fuente de luz.

Fuente: Autor.

Las conexiones eléctricas para los tubos fluorescentes se realizaron según se muestra el esquema de la figura 4.5, mientras que para la lámpara de vapor de sodio según el esquema de la figura 4.6.

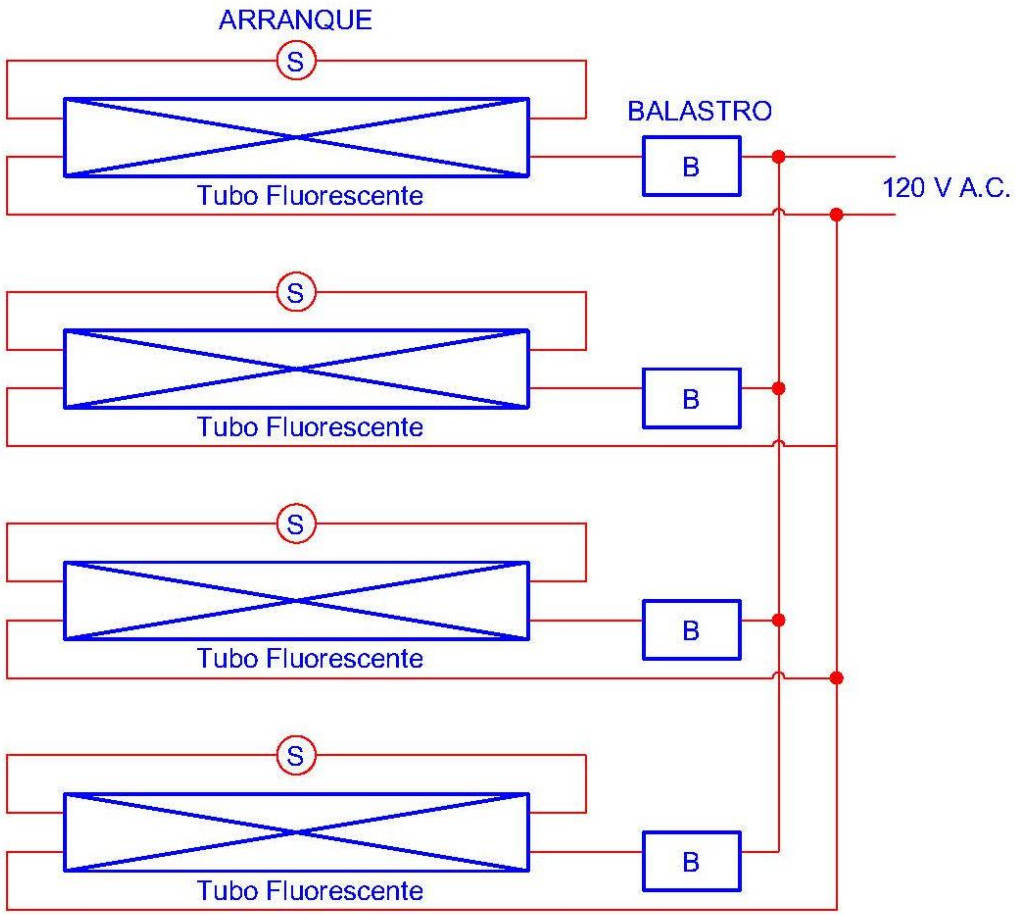


Figura 4.4. Conexiones eléctricas para los tubos fluorescentes.

Fuente: Autor.

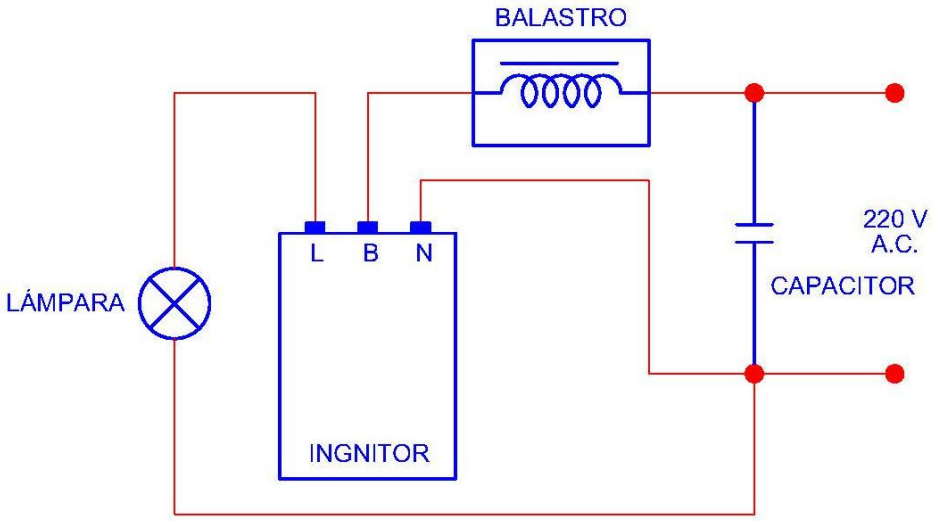


Figura 4.5. Conexiones eléctricas para la lámpara de vapor de sodio.

Fuente: Autor.

b) Porta filtro

En este caso se tienen las siguientes partes:

- Placa porta filtro.
- 2 ángulos de soporte.
- 2 pernos M6x20.
- 2 tuercas M6.
- 3 guías de aluminio.
- 3 pernos M10x35.
- 3 tuercas M10.
- 2 vidrios de protección.
- 1 filtro polarizador.
- Cinta adhesiva.

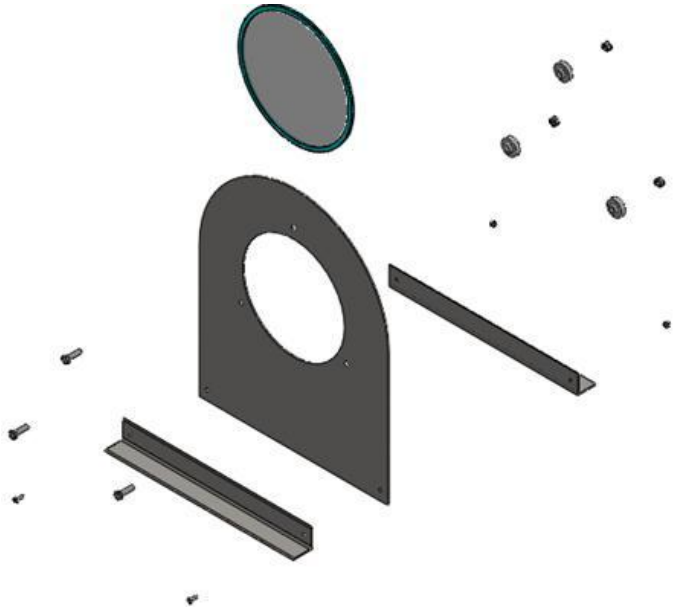


Figura 4.5. Porta filtro (esquema).

Fuente: Autor.

Los pernos sirven únicamente de conexión, sin embargo son de acero inoxidable para evitar la oxidación, y de forma similar a la fuente de luz el porta filtro se analiza con la misma consideración.

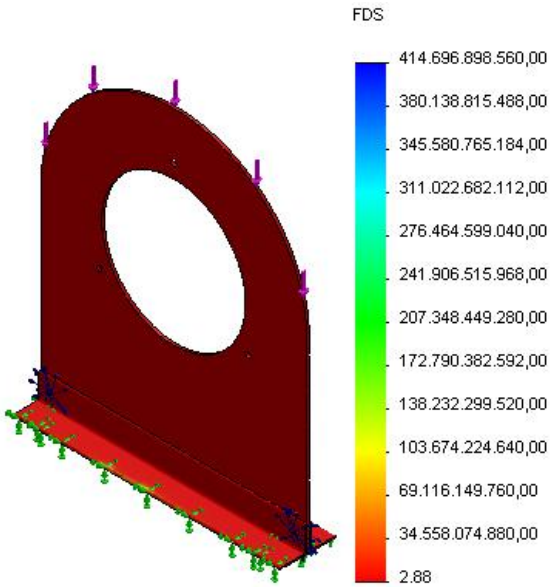


Figura 4.6. Factor de seguridad del porta filtro.

Fuente: Autor.

Para chequear la resistencia de los pernos se utiliza la tabla del Anexo A, en la que el torque adecuado para los pernos es de 5 lb.pie, es decir de 60 lb.pulg (SAE 1 ó 2).

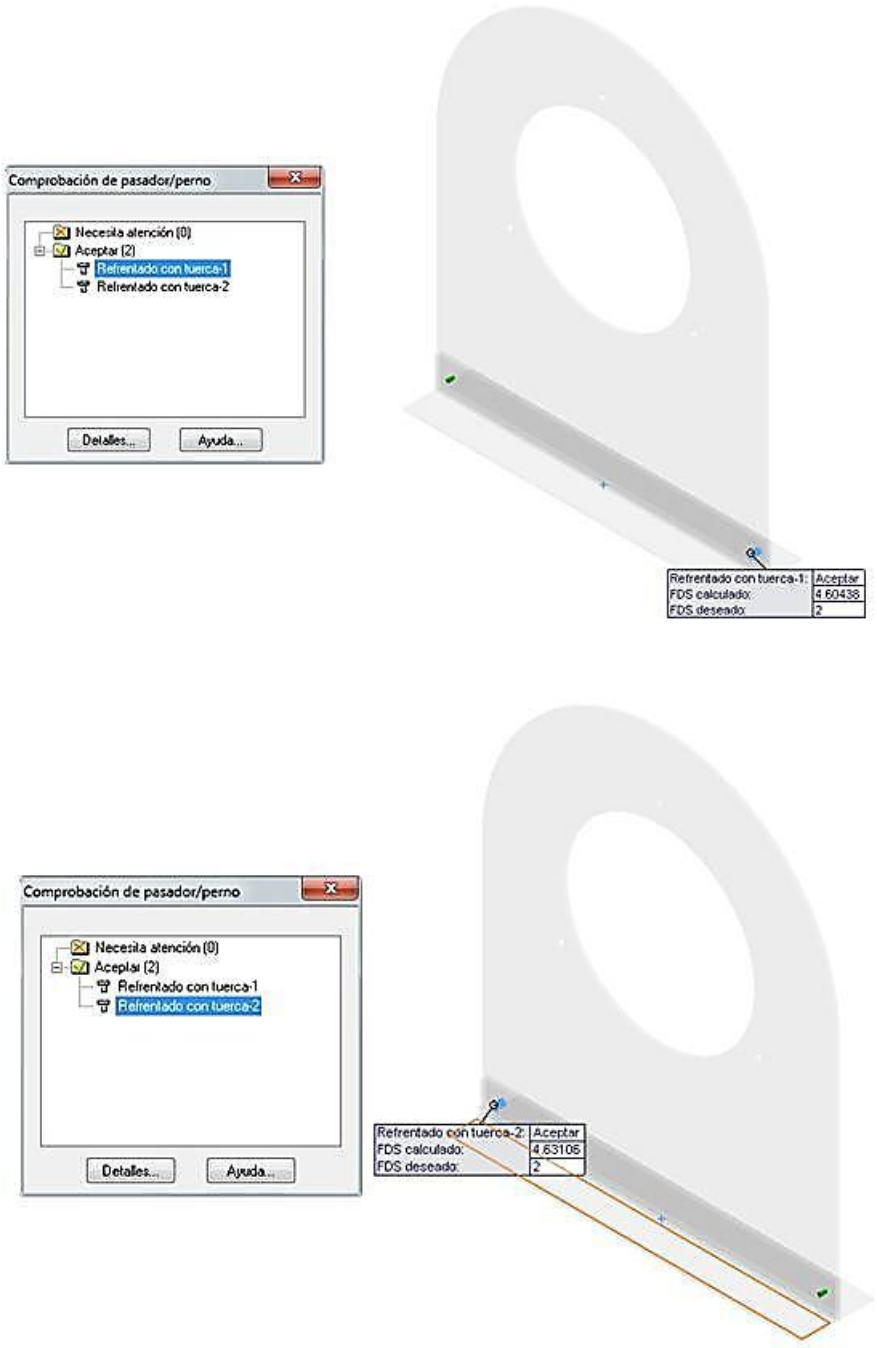


Figura 4.7. Factor de seguridad de los pernos del portafiltro.

Fuente: Autor.

Como se aprecia en la figura 4.8 el factor de seguridad en ambos pernos es de 4,6.



Ilustración 4.2. Porta filtro.

Fuente: Autor.

c) Marco de carga

Las partes de este componente se detallan en los planos. El marco de carga (figura 4.9) está diseñado en forma estática y no se considera fatiga, debido a que la carga se aplica manualmente. Se supone que una persona puede ejercer una fuerza crítica de 55 lb (24,94 Kgf) con su brazo, además se toma en cuenta una longitud de palanca del marco de carga de 10 cm, entonces el torque generado es:

$$T = F.r$$

$$T = (24{,}94\ \text{Kgf})(10\ \text{cm})$$

$$T = (244{,}66\ \text{N})(0{,}1\ \text{m})$$

$$T = 24{,}46\ \text{N}$$

De la ecuación del torque aplicado en un perno se obtiene la fuerza de pretensión.

$$T = 0{,}2.Fi.d$$

$$T = 0{,}2.Fi\left(\frac{1}{2}\text{pulg}\right)$$

$$24{,}46\ \text{N} = 0{,}2.Fi(0{,}0127\ \text{m})$$

$$Fi = 9629{,}92\ \text{N} = 981{,}64\ \text{Kgf}$$

Por lo tanto se toma una carga máxima que se puede aplicar con el marco de 1000 Kgf (9810 N).

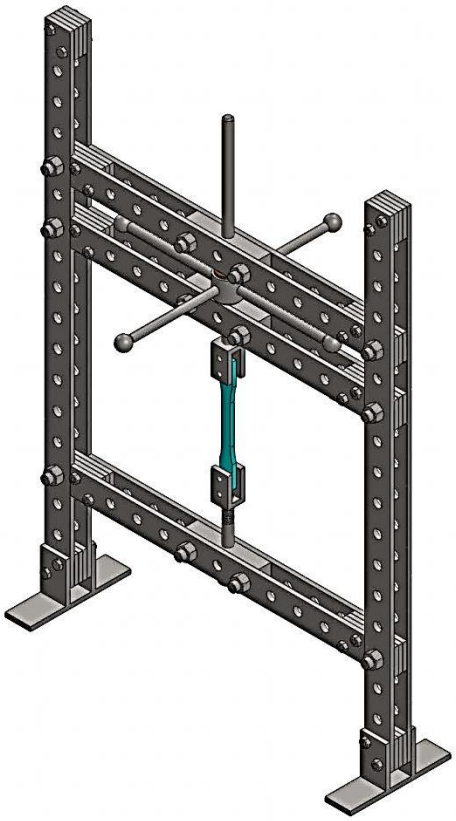


Figura 4.8. Marco de carga (esquema).

Fuente: Autor.

El perfil estructural del que está construido la mayor parte del marco de carga es pletina de 1 1/2 pulg x 1/4 pulg de acero inoxidable, que tiene un límite de fluencia de 276 MPa ó N/mm^2 (Tabla del Anexo B). Todas las partes del marco de carga se diseñan en forma analítica y utilizando el método de elementos finitos.

El dispositivo de enganche (figura 4.10) sujeta a la probeta por medio de dos pernos de 1/4 pulg, está conformado por tres pletinas de 1 1/2 pulg x 1/4 pulg y tiene forma de U con un ancho de 25 mm, por lo tanto el área transversal es:

$$A = 2\left[\left(\frac{1}{4}\ \text{pulg}\right)(25\ \text{mm}) - \left(\frac{1}{4}\ \text{pulg}\right)\left(\frac{1}{4}\ \text{pulg}\right)\right]$$

$$A = 2[(0{,}00635\ \text{m})(0{,}025\ \text{m}) - (0.00635\ \text{m})(0.00635\ \text{m})]$$

$$A = 2{,}369\ \text{x}\ 10^{-4}\ \text{m}^2$$

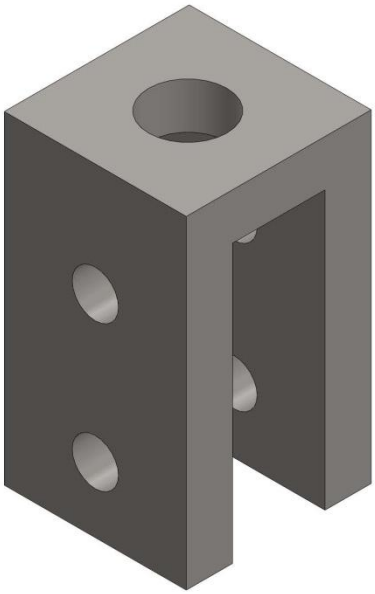


Figura 4.9. Dispositivo de enganche (esquema).

Fuente: Autor.

Entonces el esfuerzo es:

$$\sigma_x = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_x = \frac{9810\ \text{N}}{2{,}369\ \text{x}\ 10^{-4}\ \text{m}^2} = 41{,}41\ \text{x}\ 10^6\ \text{Pa}$$

$$\sigma_x = 41{,}41\ \text{MPa}$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{Sy}{\sigma_x}$$

$$n = \frac{276\ \text{MPa}}{41{,}41\ \text{MPa}}$$

$$n = 6{,}66$$

Para el análisis mediante software se considera la sujeción como soporte elástico para evitar la concentración de esfuerzos en la arista y no cometer errores.

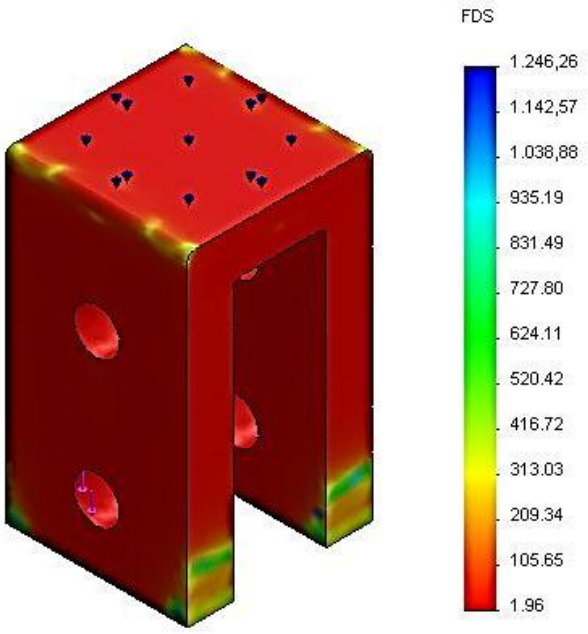


Figura 4.10. Factor de seguridad del dispositivo de enganche.

Fuente: Autor.

De acuerdo a estos resultados, obtenido en forma analítica y por elementos finitos, el dispositivo de enganche cumple su función de forma apropiada.

Luego se tiene el tornillo de potencia que tiene un diámetro nominal de 1/2 pulg y una longitud de 30 cm, por ende para el cálculo del factor de seguridad se utiliza la resistencia a la prueba.

$$S_p = 0{,}85.S_y$$

$$S_p = 0{,}85(276\ \text{MPa})$$

$$S_p = 234{,}6\ \text{MPa}$$

El área y el esfuerzo en el tornillo de potencia se determinan a continuación:

$$A = \frac{\pi.d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi.(0{,}5\ \text{pulg})^2}{4} = \frac{\pi.(0{,}0127\ m)^2}{4}$$

$$A = 1{,}27\ \text{x}\ 10^{-4}\ \text{m}^2$$

$$\sigma_x = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_x = \frac{9810\ \text{N}}{1{,}27\ \text{x}\ 10^{-4}\ \text{m}^2} = 77{,}24\ \text{x}\ 10^6\ \text{P} = 77{,}24\ \text{MPa}$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{Sp}{\sigma_x}$$

$$n = \frac{234{,}6\ \text{MPa}}{77{,}24\ \text{MPa}}$$

$$n = 3{,}04$$

Debido a que esta parte está sometida a tensión simple, el resultado por medio de software es exactamente el mismo.

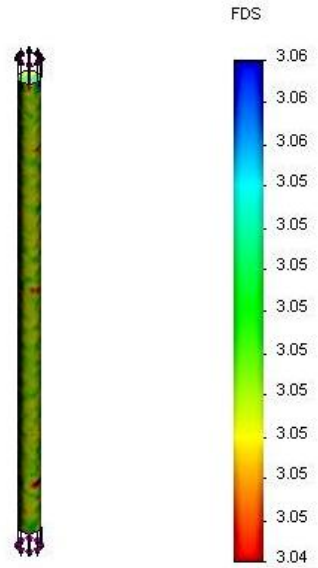


Figura 4.11. Factor del tornillo de potencia.

Fuente: Autor.

En cuanto a la placa de carga el factor de seguridad se muestra en la siguiente figura:

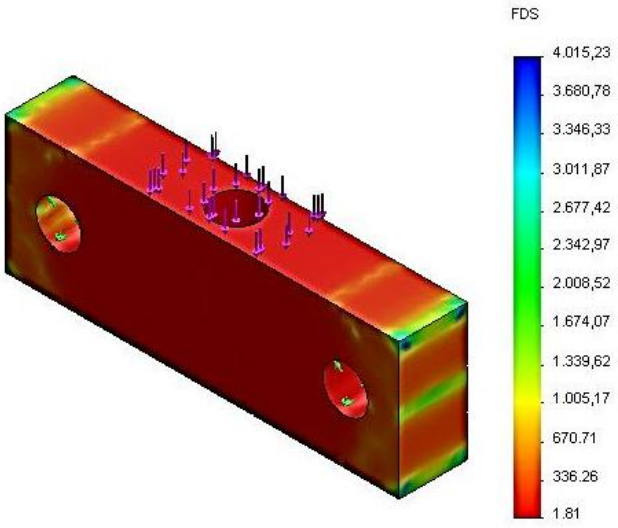


Figura 4.12. Factor de seguridad de la placa de carga.

Fuente: Autor.

Analíticamente, la placa de carga, se considera como una viga simplemente apoyada y el esfuerzo es:

$$\sigma_x = \frac{M.c}{I}$$

$$M = \frac{P.L}{4}$$

$$M = \frac{(9810\ \text{N})(0{,}08\ \text{m})}{4}$$

$$M = 196{,}2\ \text{N.m}$$

$$I = \frac{b.h^3}{12}$$

$$I = \frac{(0{,}75\ \text{pulg} - 0{,}5\ \text{pulg})(1{,}5\ \text{pulg})^3}{12}$$

$$I = \frac{(0{,}00635\ \text{m})(0{,}038\ \text{m})^3}{12}$$

$$I = 2{,}9\ \text{x}\ 10^{-8}\ \text{m}^4$$

$$\sigma_x = \frac{(196{,}2\ \text{N.m})(0{,}019\ \text{m})}{2{,}9\ \text{x}\ 10^{-8}\ \text{m}^4} = 128{,}54\ \text{x}\ 10^6\ \text{Pa}$$

$$\sigma_x = 128{,}54\ \text{MPa}$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{Sy}{\sigma_x}$$

$$n = \frac{276\ \text{MPa}}{128{,}54\ \text{MPa}}$$

$$n = 2{,}14$$

La placa de carga transmite la fuerza de 1000 Kgf a la viga mediante dos pernos de 1/2 pulg y como ésta se compone de dos pletinas, la fuerza de flexión para cada una es de 500 Kgf.

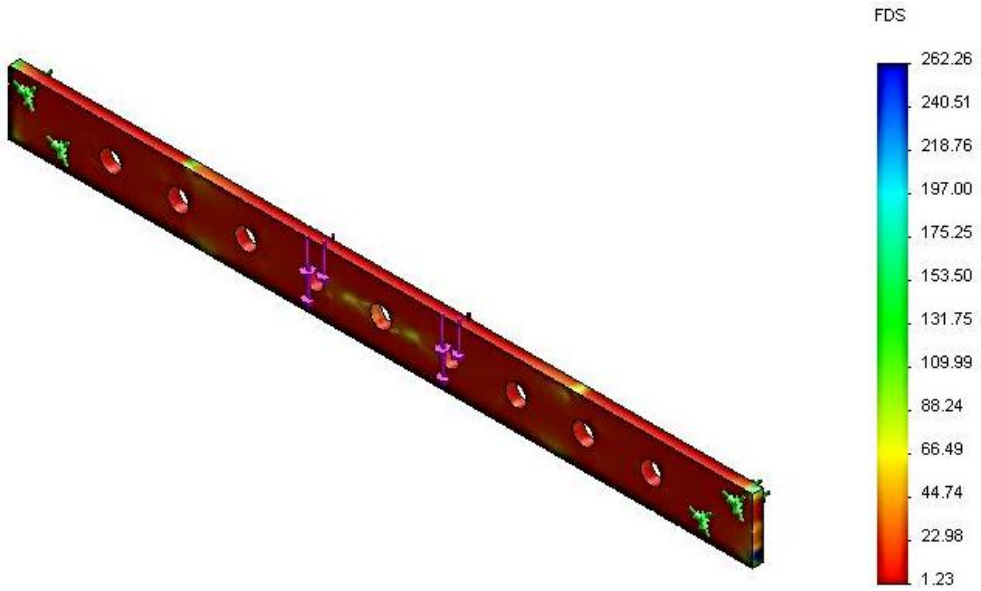


Figura 4.13. Factor de seguridad de la viga.

Fuente: Autor.

El esfuerzo en la viga es:

$$\sigma_x = \frac{M.c}{I}$$

$$M = P.a$$

$$M = (9810\ \text{N}/4)(0{,}15\ \text{m})$$

$$M = 367{,}875\ \text{N.m}$$

$$I = \frac{b.h^3}{12}$$

$$I = \frac{(0{,}25\ \text{pulg})(1{,}5\ \text{pulg})^3}{12}$$

$$I = \frac{(0{,}00635\ \text{m})(0{,}0381\ \text{m})^3}{12}$$

$$I = 2{,}93 \text{ x } 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\sigma_x = \frac{(367{,}875 \text{ N.m})(0{,}019 \text{ m})}{2{,}93 \text{ x } 10^{-8} \text{ m}^4} = 238{,}55 \text{ x } 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_x = 238{,}55 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{Sy}{\sigma_x}$$

$$n = \frac{276 \text{ MPa}}{238{,}55 \text{ MPa}}$$

$$n = 1{,}2$$

Así mismo las columnas se componen de dos pletinas y como las conexiones son articuladas la fuerza de tensión a la que están sometidas es de (9810 N)/4, por lo tanto:

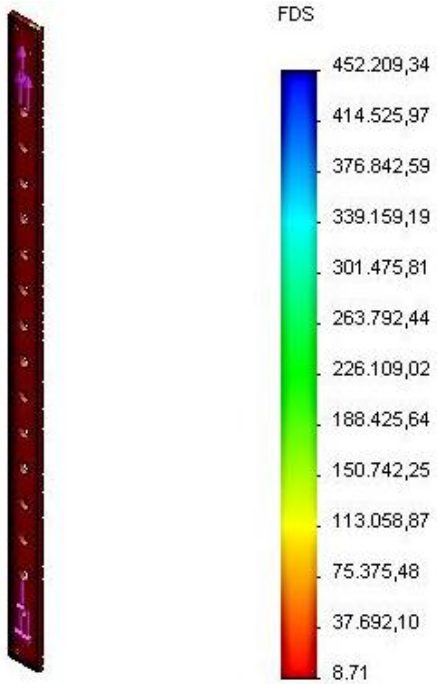


Figura 4.14. Factor de seguridad de la columna.

Fuente: Autor.

Entonces el esfuerzo es:

$$\sigma_x = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_x = \frac{9810\ \text{N}/4}{(1{,}5\ \text{pulg} - 0{,}5\ \text{pulg})(0{,}25\ \text{pulg})}$$

$$\sigma_x = \frac{9810\ \text{N}/4}{(0{,}0254\ \text{m})(0{,}00635\ \text{m})}$$

$$\sigma_x = 15{,}21\ \text{MPa}$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{Sy}{\sigma_x}$$

$$n = \frac{276\ \text{MPa}}{15{,}21\ \text{MPa}}$$

$$n = 18{,}15$$

Se puede observar entonces que todos los componentes tienen al menos un 20 % de margen de seguridad. Ahora para los pernos de conexión se requiere al menos un margen de seguridad de 2, estos están sometidos a corte puro ya que se tienen conexiones articuladas, entonces el esfuerzo tangencial en los pernos de 1/2 pulg es:

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A}$$

$$A = 2\left(\frac{\pi . d^2}{4}\right)$$

$$A = 2\left(\frac{\pi . (0{,}5\ \text{pulg})^2}{4}\right)$$

$$A = 2\left(\frac{\pi . (0{,}0127\ \text{m})^2}{4}\right)$$

$$A = 2{,}53 \text{ x } 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\tau_{xy} = \frac{9810 \text{ N}}{2{,}53 \text{ x } 10^{-4} \text{ m}^2} = 38{,}77 \text{ x } 10^{6} \text{ Pa}$$

$$\tau_{xy} = 38{,}77 \text{ MPa}$$

El esfuerzo equivalente de Von Mises es:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{{\sigma_x}^2 + {\tau_{xy}}^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0 + (38{,}77 \text{ Mpa})^2}$$

$$\sigma_{eq} = 38{,}77 \text{ Mpa}$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{Sy}{\sigma_{eq}}$$

$$n = \frac{276 \text{ Mpa}}{38{,}77 \text{ Mpa}}$$

$$n = 7{,}12$$

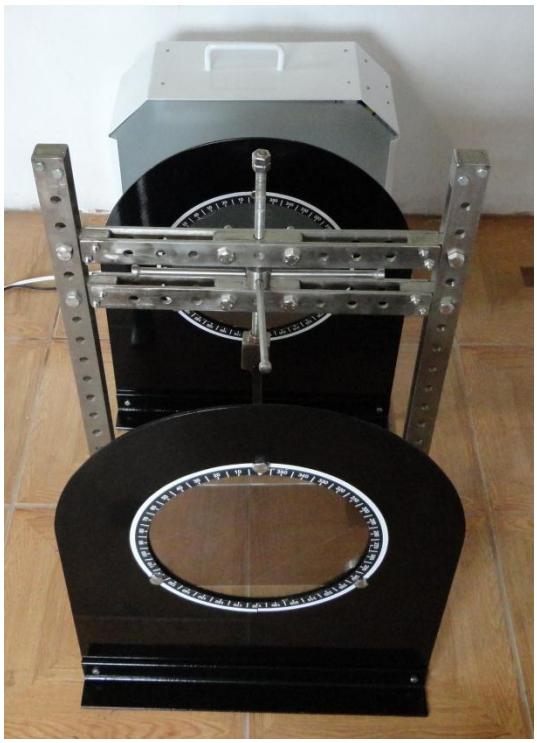
Este resultado es el mismo para los pernos de 1/4 pulg, ya que se utilizan dos pernos en cada conexión.

Las ilustraciones 4.4 a) y 4.4 b), muestran todos los componentes del polariscopio ubicados adecuadamente. Se puede utilizar este equipo a nivel del suelo o sobre una mesa, ya que las fotografías de las probetas se obtiene con una cámara con tripode o con algun otro tipo de soporte.

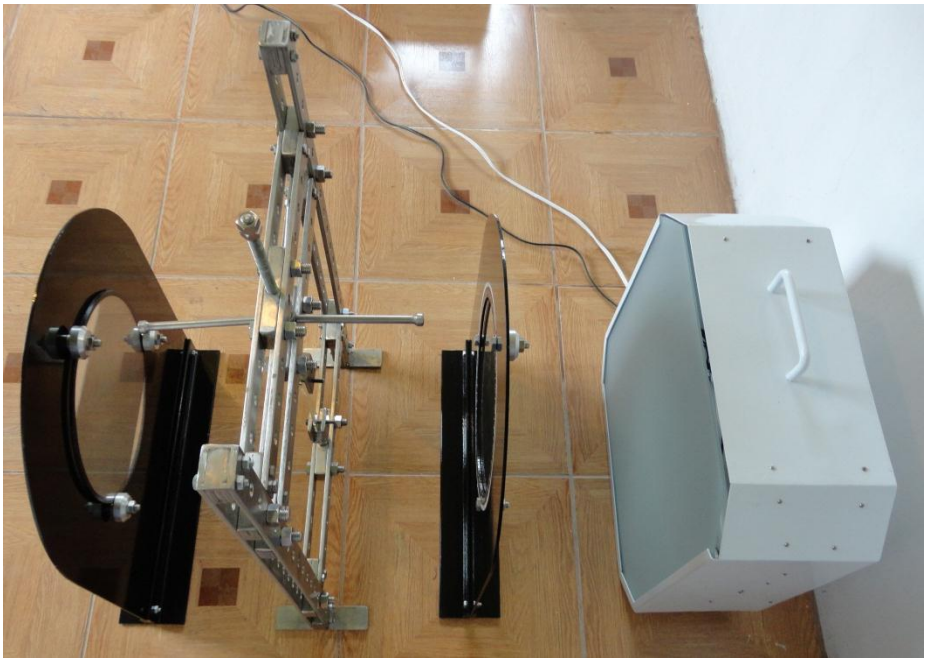


Ilustración 4.3. Marco de carga.

Fuente: Autor.



a)



b)

Ilustración 4.4. Polariscopio de transmisión.

Fuente: Autor.

4.1.4 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Los materiales para la fabricación de probetas, se consideraron de acuerdo a las recomendaciones en la bibliografía especializada, los principales como ya mencionaron son:

1. Homalite 100 (resina poliéster).
2. Policarbonato.
3. Acrílico (plexiglás).
4. Resinas epóxicas.

De estos materiales se seleccionó el acrílico y la resina poliéster debido principalmente a que se pueden obtener comercialmente en nuestro medio. El acrílico se consiguió en planchas de 3 y 6 mm de la marca Acrilux, mientras que la resina poliéster se adquirió en forma líquida del tipo ortoftálica (código RPA596E-1K).

a) Probetas de resina poliéster.

Las propiedades básicas de la resina poliéster se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.1. Propiedades de la resina polimerizada no reforzada.

Peso específico:	1,2 g/cm^3
Resistencia a la tracción (ISO 527):	55 MPa
Elongación a la rotura (ISO 527):	2,1 %
Resistencia a la flexión (ISO 178):	100 MPa
Módulo de flexión (ISO 178):	4000 MPa
Temperatura de deformación bajo carga (ISO 75A):	90 ºC
Contracción:	7 %

Fuente: Construcción de buques de pesca en poliéster reforzado con fibra de vidrio, Jorge Tejedor Del Valle.

Sin embargo para tener una precisión adecuada en los análisis por elementos finitos, que más adelante se detallan, se realizó un ensayo a tensión en el laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), cuyos resultados se muestra en la tabla 1 del Anexo C, que indica una resistencia última a la tracción de S_{ut} = 603,33 Kgf/cm^2.

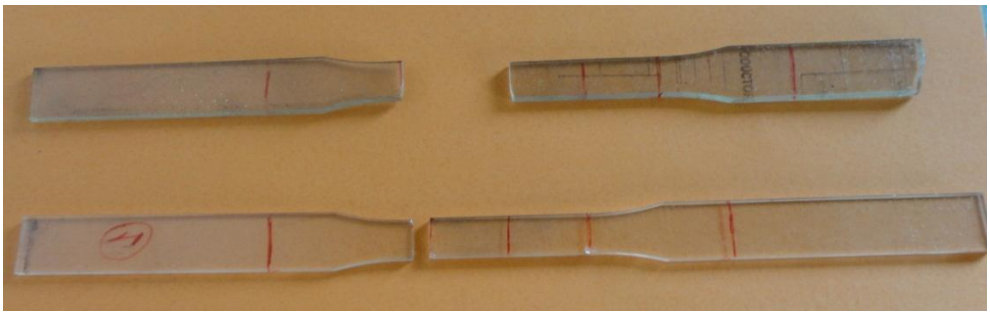


Ilustración 4.5. Probetas luego del ensayo de tensión.

Fuente: Autor.

La probeta para el ensayo a tensión se dimensionó de acuerdo a la norma ASTM D 638 para polímeros (Anexo D). En la ilustración 4.5 se muestran las probetas después de realizado el ensayo de tensión.

En este caso, para la fabricación de láminas, de 3 y 6 mm, de las cuales fueron cortadas las probetas, primero se elaboró un molde con la ayuda de un vidrio de 28 cm x 38 cm y cuatro tiras de madera adheridas al mismo, formando una caja (ilustración 4.6).



Ilustración 4.6. Molde para la elaboración de láminas de resina poliéster.

Fuente: Autor.

Para que se lleve a cabo la polimerización se deben mezclar con la resina poliéster los siguientes químicos:

Catalizador

Componente que se le agrega al poliéster para su gelificación e inicia la reacción, en una proporción variable usualmente del 2 %; el efecto producido dependerá de la temperatura ambiente.

Se presenta en estado líquido transparente aunque existe también en estado sólido; también se lo denomina Meck. Es más práctico su uso en

estado líquido ya que es más fácil de medir el porcentaje a agregar a la resina con goteros graduados o vasos medidores.

Acelerante

Componente que acelera el endurecimiento del material.

Se presenta en forma líquida, de color violeta, o en pasta, siendo más aconsejable el líquido.

La proporción a utilizar varía según el tipo de trabajo entre el 0,5 al 3% del volumen de la resina a utilizar; la temperatura ambiente modifica el tiempo de gelificado de la resina debiendo usarse menos acelerador en días calurosos.

Nunca debe mezclarse con el catalizador en estado puro, porque podría provocar reacciones químicas muy violentas no recomendables.

Su abuso varía el color de la resina. En general se usa el acelerador denominado de cobalto existiendo uno que varía menos el color de la resina denominado K.

Se mide su proporción con goteros o vasos de medida.

Monómero de estireno

Líquido diluyente, que forma parte de la composición de las resinas poliéster. Con él se puede lograr, agregándoselo a la resina, que ésta se torne menos viscosa. Recomendando hasta una proporción máxima del 10%.

También se lo usa cuando el poliéster, ya endurecido, pierde pegajosidad o estado de “taking”, entonces se lo pincela con monómero; esto vuelve pegajosa la resina endurecida facilitando la adherencia tanto de las siguientes capas de laminado como de reparaciones de la superficie de una pieza.



Ilustración 4.7. Solventes y equipo para elaborar láminas de resina poliéster.

Fuente: Autor.

Para la preparación de la mezcla a ser vertida en el molde se calculó inicialmente el volumen necesario para una lámina de 3 mm, tomando en cuenta la contracción de la resina durante la polimerización.

$$V = (1 + \%\ \text{contracción}).b.h.e$$

$$V = 1{,}07(38\ \text{cm})(28\ \text{cm})(3\ \text{mm})$$

$$V = 1{,}07(0{,}38\ \text{m})(0{,}28\ \text{m})(0{,}003\ \text{m})$$

$$V = 3{,}4154\ \text{x}\ 10^{-4}\ \text{m}^3 = 341{,}54\ \text{cm}^3$$

Los porcentajes que se recomiendan de cada reactivo se basan en el porcentaje de resina, por lo tanto:

$$0{,}1.x + 0{,}02.x + 0{,}005.x + x = 100\ \%$$

$$x = 88{,}89\ \%$$

Siendo *x* el porcentaje de resina poliéster, entonces el volumen en relación con los porcentajes de cada reactivo es el siguiente:

Resina poliéster:

$$V_1 = 0{,}8889(341{,}54\ \text{cm}^3)$$

$$V_1 = 303{,}59\ \text{cm}^3$$

Estireno:

$$V_2 = 0{,}1(303{,}59\ \text{cm}^3)$$

$$V_2 = 30{,}36\ \text{cm}^3$$

Catalizador (Meck):

$$V_3 = 0{,}02(303{,}59\ \text{cm}^3)$$

$$V_3 = 6{,}072\ \text{cm}^3$$

Acelerante:

$$V_4 = 0{,}005(303{,}59\ \text{cm}^3)$$

$$V_4 = 1{,}52\ \text{cm}^3$$

Por comprobación se tiene:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

$$V = 303{,}59\ \text{cm}^3 + 30{,}36\ \text{cm}^3 + 6{,}072\ \text{cm}^3 + 1{,}52\ \text{cm}^3$$

$$V = 341{,}54\ \text{cm}^3$$

La mezcla se la realiza en un recipiente suficientemente grande en el siguiente orden: resina poliéster, estireno, meck y acelerante, procurando revolver después de añadir cada reactivo. Se debe tener cuidado de no verter todo el volumen en un solo sitio, sobre todo con el acelerante. La mezcla debe ser homogénea.



Ilustración 4.8. Preparación de la resina poliéster.

Fuente: Autor.

Luego se vierte la mezcla en el molde como se muestra la ilustración 4.9.



Ilustración 4.9. Preparación de la resina poliéster.

Fuente: Autor.

Como ya se mencionó el secado depende de la temperatura ambiente, pero aproximadamente la lámina está completamente seca en dos días si se le mantiene bajo sombra para que no se trice.

b) Probetas de acrílico.

En cuanto al acrílico se tienen las siguientes propiedades:

Tabla 4.2. Propiedades del acrílico de acuerdo al fabricante.

Peso específico (ASTM D-792):	1,19 g/cm^3
Dureza (ASTM D-785):	100 Rockwell
Resistencia a la tracción (ASTM D-638):	700 Kgf/cm^2
Elongación a la rotura (ASTM D-638):	2 %
Resistencia a la flexión (ASTM D-790):	1020 Kgf/cm^2
Índice de refracción (ASTM D-542):	1,48 -1,5
Opacidad máxima (ASTM D-1003):	3 %
Temperatura de combustión:	500 ºC

Fuente: Fabricante (Acrilux).

De forma similar a la resina poliéster, el acrílico también es un material frágil, y se realizó un ensayo de tensión para determinar la resistencia última a la tensión S_{ut} = 226,29 Kgf/cm^2 (tabla 2 del Anexo C)

4.1.5 ELABORACIÓN DE MODELOS

Actualmente el proceso más recomendable es el de corte por láser, ya que permite una gran precisión en el dimensionamiento de las probetas, es un sumamente rápido y no hay limitaciones en cuanto a la geometría del modelo, a diferencia del mecanizado y de otros procesos que ya no se utilizan tanto como antes.

Para la conformación de las probetas, primero se elaboró un archivo de dibujo con algunos modelos comúnmente utilizados en un laboratorio de

fotoelasticidad y también de un caso específico como es el diente de un engrane. La disposición de los modelos para el corte se muestra en la siguiente figura:

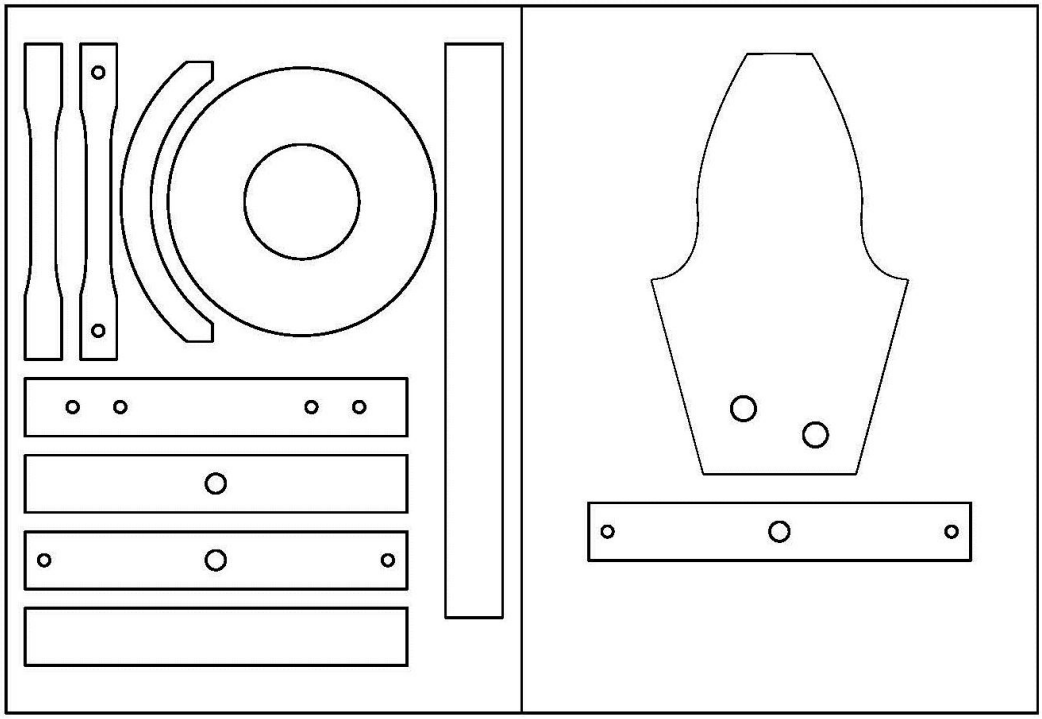


Figura 4.15. Distribución de las probetas sobre la plancha.

Fuente: Autor.

Estos modelos se cortaron por láser de las planchas de 3 y 6 mm de los dos materiales: acrílico y resina poliéster.

Aunque no todos los modelos se utilizaran para la demostración de la hipótesis, dentro de las probetas confeccionadas se tienen:

a) Probetas de calibración

Estas probetas se utilizan para ensayo a tensión, tanto el convencional para determinar las propiedades del material como el fotoelástico para la determinación de la constante fotoelástica.

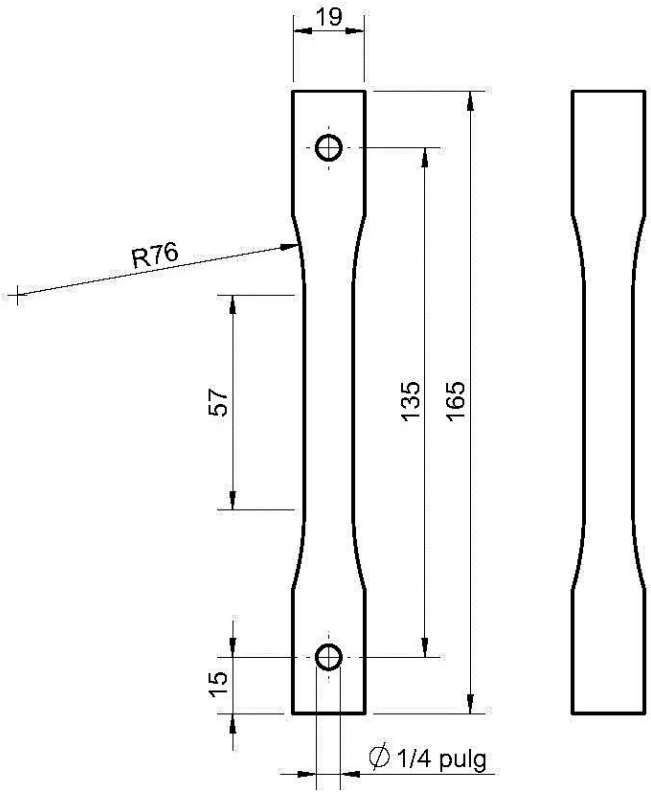


Figura 4.16. Probeta de tensión simple.

Fuente: Autor.



Ilustración 4.10. Probeta de tensión simple.

Fuente: Autor.

b) Probeta de viga curva

El caso de los esfuerzos producidos en una viga curva es ampliamente analizado en un laboratorio. La figura 4.2 muestra una viga en la que se aplica una carga en dirección vertical.

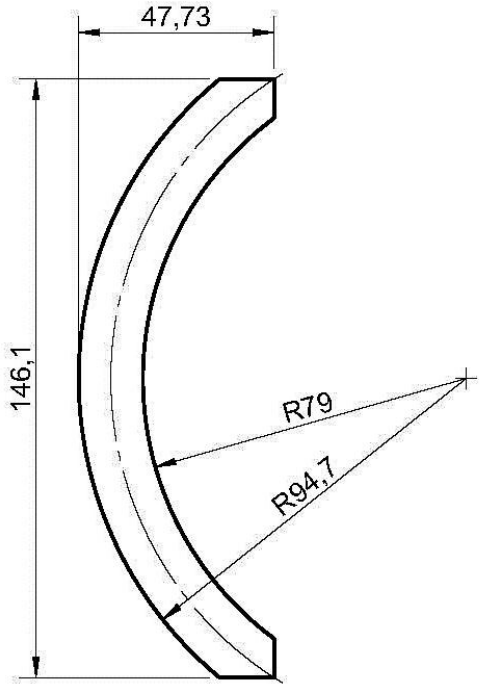


Figura 4.17. Probeta de viga curva.

Fuente: Autor.

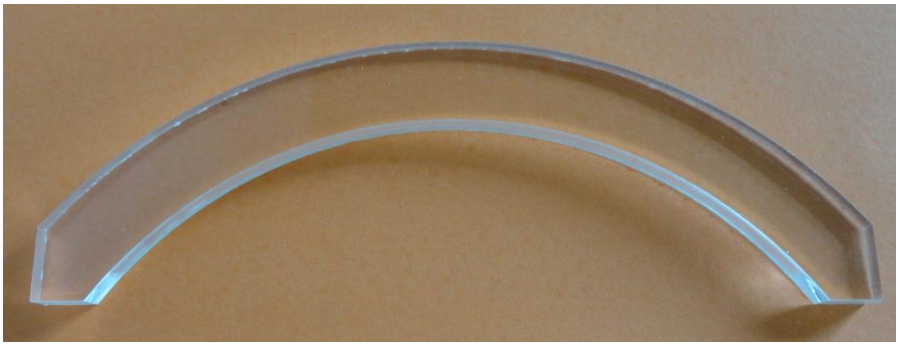


Ilustración 4.11. Probeta de viga curva.

Fuente: Autor.

c) Probeta circular pequeña

Esta probeta puede ser sometida a una carga de compresión. Según la bibliografía especializada el análisis de la distribución de esfuerzos es de particular importancia por ser bastante irregular.

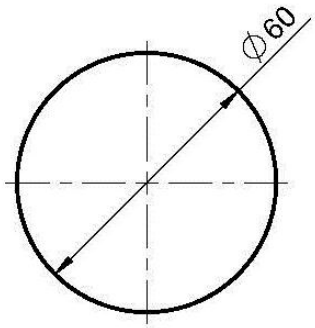


Figura 4.18. Probeta circular pequeña.

Fuente: Autor.



Ilustración 4.12. Probeta circular pequeña.

Fuente: Autor.

d) Probeta circular con orificio

Esta probeta, al igual que la anterior, puede ser sometida a compresión.

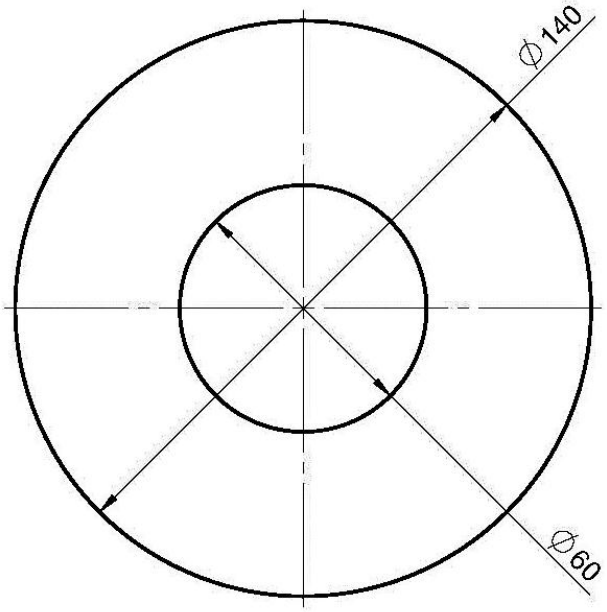


Figura 4.19. Probeta circular con orificio.

Fuente: Autor.

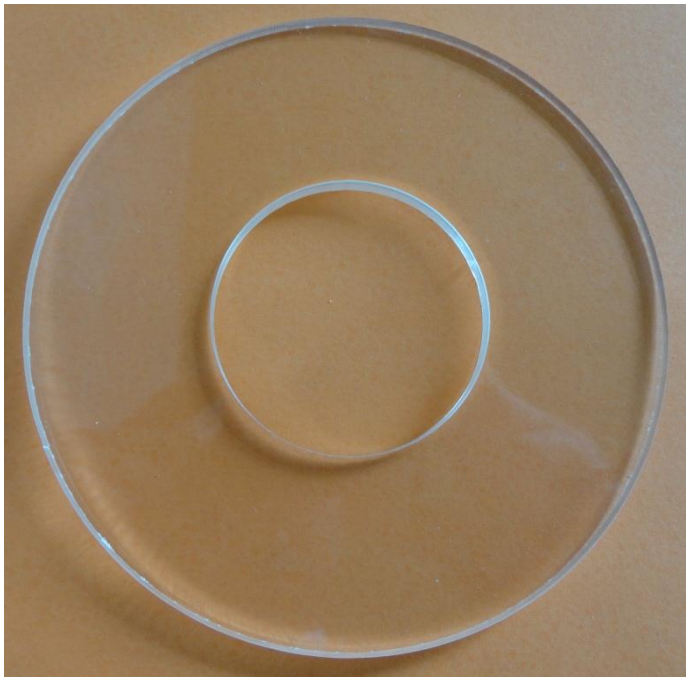


Ilustración 4.13. Probeta circular con orifcio.

Fuente: Autor.

e) Probeta para flexión pura

Esta probeta se puede sujetar de los extremos y aplicar la carga en los dos agujeros internos, de tal forma que la parte central queda sometida a un momento flector.

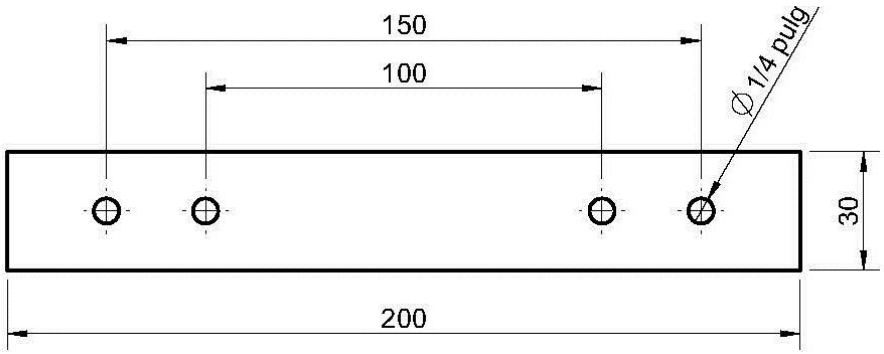


Figura 4.20. Probeta para flexión pura.

Fuente: Autor.



Ilustración 4.14. Probeta para flexión pura.

Fuente: Autor.

f) Probeta rectangular con orificio central y orificios de conexión

Esta probeta se somete a tensión y sirve para determinar el factor de concentración de tensiones.

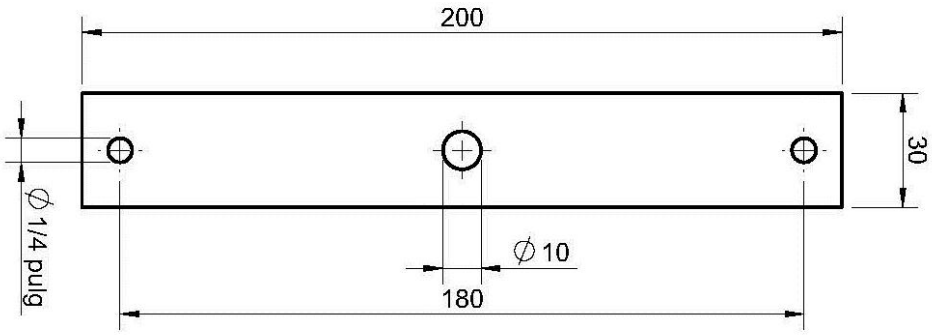


Figura 4.21. Probeta rectangular con orificio central y orificios de conexión.

Fuente: Autor.



Ilustración 4.15. Probeta rectangular con orificio central y orificios de conexión.

Fuente: Autor.

g) Probeta rectangular con orificio central

En este caso el orificio sirve para aplicar un carga en el centro para someter a flexión a la probeta.

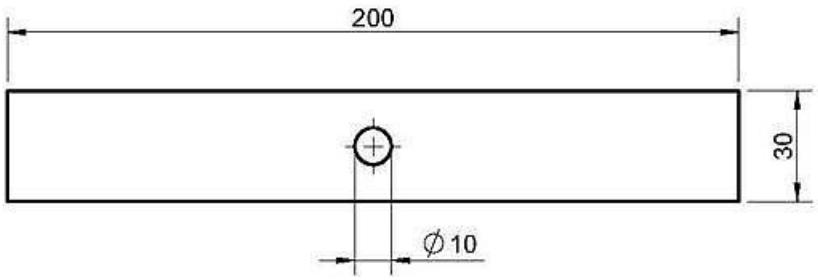


Figura 4.22. Probeta rectangular con orificio central.

Fuente: Autor.



Ilustración 4.16. Probeta rectangular con orificio central.

Fuente: Autor.

h) Probeta rectangular pequeña

La configuración de este modelo es adecuada para analizar la distribución de esfuerzos cuando se tiene flexión.

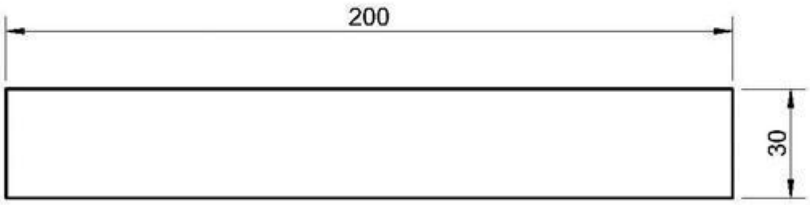


Figura 4.23. Probeta rectangular pequeña.

Fuente: Autor.



Ilustración 4.17. Probeta rectangular pequeña.

Fuente: Autor.

i) Probeta rectangular grande

Esta probeta se puede someter a flexión y aplicar varias cargas.

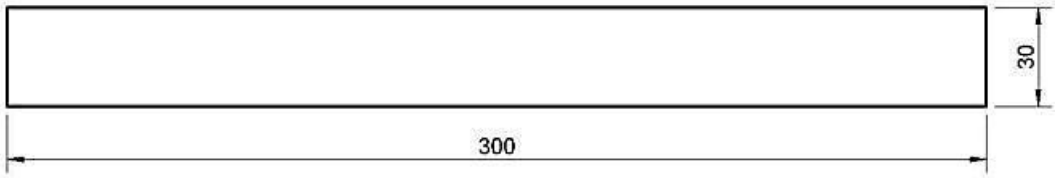


Figura 4.24. Probeta rectangular grande.

Fuente: Autor.

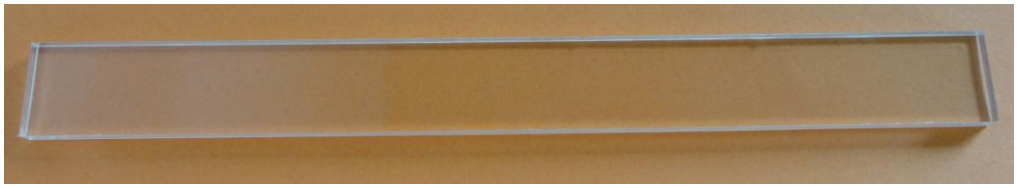


Ilustración 4.18. Probeta rectangular grande.

Fuente: Autor.

j) Probeta de diente de engrane

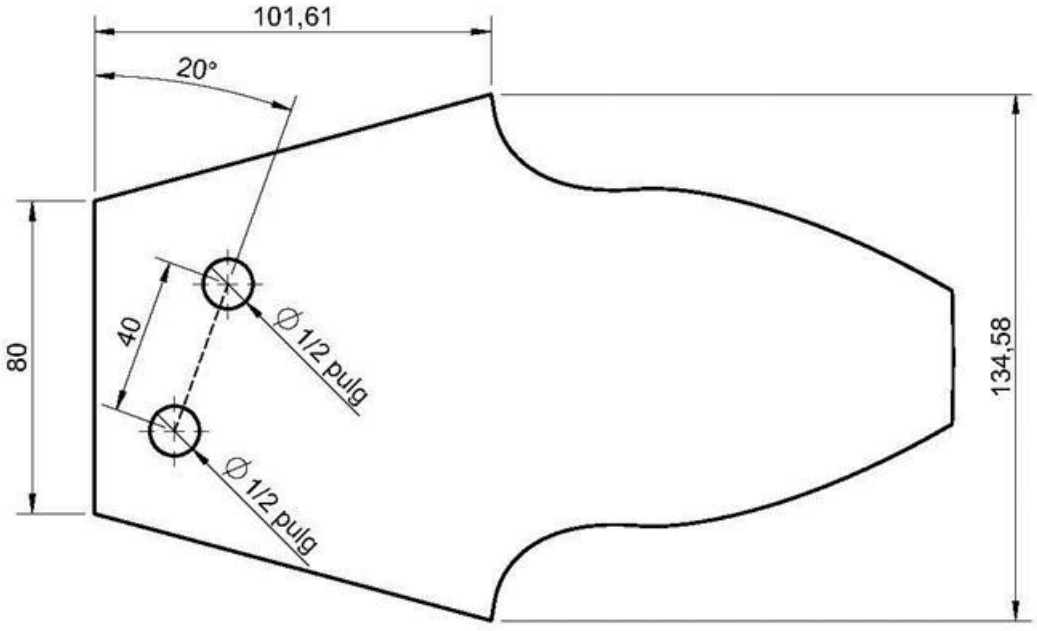


Figura 4.25. Probeta de diente de engrane.

Fuente: Autor.

La forma del perfil de un diente y la base del mismo son importantes para que un engrane funcione correctamente y estos a su vez afectan la distribución de los esfuerzos en el diente.



Ilustración 4.19. Probeta de diente de engrane.

Fuente: Autor.

Es indepensable que las probetas sean almacenadas sobre una superficie plana y no deben ser expuestas a temperaturas elevadas para evitar su deformación y deterioro.

4.1.6 EXPERIMENTACIÓN

4.1.6.1 CALIBRACIÓN DE LA PROBETA

Como ya se explicó en la sección 2.1.2.8, la finalidad que tiene la realización de la prueba de calibración es para conocer el valor de franja C. La probeta utilizada se sometió a un esfuerzo de tensión simple y presentaba un espesor de 3,6 mm (*b*) y un ancho de 13 mm (*a*). El esfuerzo axial inducido sobre el material a consecuencia de la carga se puede representar por la ecuación 2.4:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{C.N}{b}$$

Despejando la constante fotoelástica del material se tiene:

$$C = \frac{b(\sigma_1 - \sigma_2)}{N} \qquad \text{Ec. (4.1)}$$

Dónde:

b: espesor del material.

σ_1 y σ_2: esfuerzos principales en los dos planos.

N: orden de franja.

En el ensayo de tensión los esfuerzos principales son:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{a.b}$$

$$\sigma_2 = 0$$

Por lo tanto:

$$C = \frac{b\left(\frac{F}{a.b}\right)}{N}$$

$$C = \frac{F}{a.N} \qquad \text{Ec. (4.2)}$$

Para obtener el valor de la fuerza y el orden franja, se procede de la siguiente manera: se monta la probeta en el marco de carga sólo de un extremo y en el otro se engancha el dinamómetro para cargas pequeñas o la romana de bolsillo para cargas grandes.



Ilustración 4.20. Dinamómetro (capacidad = 20 N).

Fuente: Autor.

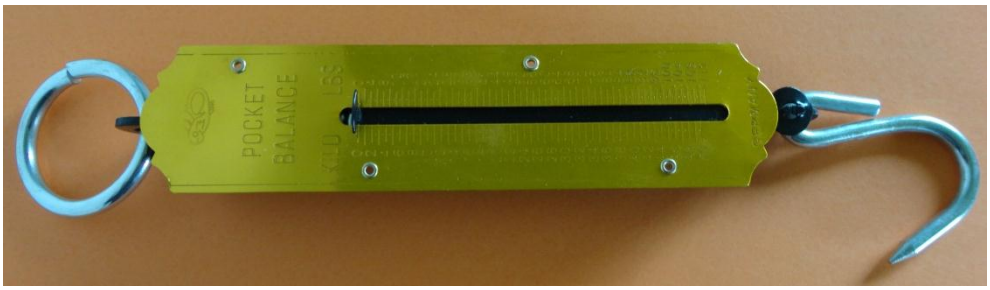


Ilustración 4.21. Romana (capacidad = 50 Kgf).

Fuente: Autor.

Luego se observa el color que va adquiriendo la probeta al ir aplicando la carga, se debe anotar la carga correspondiente al color. Los valores del orden de franja se muestran en la tabla 4.3, que es una traducción de la norma ASTM D 4093 – 95 (Anexo E).

Tabla 4.3. Secuencia de colores producidos con luz blanca en campo oscuro.

Color	Retraso,nm	Orden de franja
Negro	0	0
Gris	160	0.28
Blanco	260	0.45
Amarillo	350	0.60
Naranja	460	0.79
Rojo	520	0.90

1ª franja de paso	577	1.00
Azul	620	1.06
Azul-verde	700	1.20
Verde-amarillo	800	1.38
Naranja	940	1.62
Rojo	1050	1.81
2ª franja de paso	1150	2.0
Verde	1350	2.33
Verde-amarillo	1450	2.50
Rosa	1550	2.67
3ª franja de paso	1730	3.0
Verde	1800	3.10
Rosa	2100	3.60
4ª franja de paso	2300	4.00
Verde	2400	4.13

Fuente: Norma ASTM D 4093 – 95.

En la figura 4.22 se observa que cuando la carga aplicada en una probeta de resina poliéster es de 35 Kgf el color es azul intenso (*N* = 1,06).

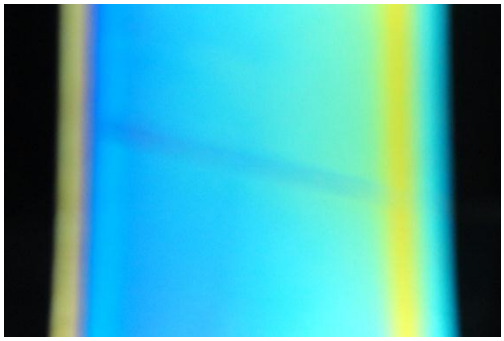


Ilustración 4.22. Romana (capacidad = 50 Kgf).

Fuente: Autor.

Sustituyendo los datos en la ecuación 4.2 se obtiene:

$$C = \frac{35\ \text{Kgf}}{(13\ \text{mm})(1{,}06)}$$

$$C = \frac{343{,}35\ \text{N}}{(0{,}013\ \text{m})(1{,}06\ \text{orden de franja})}$$

$$C = 24916{,}55\ \frac{\text{N}}{\text{m . orden de franja}}$$

En la tabla 4.4 se muestran los valores del orden de franja en función de la carga aplicada. Por facilidad y para evitar errores de percepción de los colores, estos datos se determinaron a partir de un video de los ensayos.

Tabla 4.4. Datos tensión simple (Probeta 1).

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	*C* (valor de franja) [N/(m.orden)]
8 (78,48)	Gris	0.28	21560,44
13 (127,53)	Blanco	0.45	21800,00
16 (156,96)	Amarillo	0.60	20123,08
20 (196,20)	Naranja	0.79	19104,19
24 (235,44)	Rojo	0.90	20123,08
26 (255,06)	Púrpura	1.00	19620,00
28 (274,68)	Azul	1.06	19933,24
34 (333,54)	Azul-verde	1.20	21380,77
39 (382,59)	Verde-amarillo	1.38	21326,09

46 (451,26)	Naranja	1.62	21427,35
50 (490,50)	Rojo	1.81	20845,73

Fuente: Autor.

Tabla 4.5. Datos tensión simple (Probeta 2).

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	*C* (valor de franja) [N/(m.orden)]
7,5 (73,58)	Gris	0.28	20212,91
12 (117,72)	Blanco	0.45	20123,08
16 (156,96)	Amarillo	0.60	20123,08
20 (196,20)	Naranja	0.79	19104,19
24 (235,44)	Rojo	0.90	20123,08
28 (274,68)	Púrpura	1.00	21129.23
30 (294.30)	Azul	1.06	21357,04
34 (333,54)	Azul-verde	1.20	21380,77
39 (382,59)	Verde-amarillo	1.38	21326,09
46 (451,26)	Naranja	1.62	21427,35
50 (490,50)	Rojo	1.81	20845,73

Fuente: Autor.

Tabla 4.6. Datos tensión simple (Probeta 3).

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	*C* (valor de franja) [N/(m.orden)]
8 (78,48)	Gris	0.28	21560,44
12 (117,72)	Blanco	0.45	20123,08
16 (156,96)	Amarillo	0.60	20123,08
22 (215,82)	Naranja	0.79	21014,61
24 (235,44)	Rojo	0.90	20123,08
27 (264,87)	Púrpura	1.00	20374,62
29 (284,49)	Azul	1.06	20374,14
34 (333,54)	Azul-verde	1.20	21380,77
39 (382,59)	Verde-amarillo	1.38	21326,09
46 (451,26)	Naranja	1.62	21427,35
50 (490,50)	Rojo	1.81	20845,73

Fuente: Autor.

Tabla 4.7. Datos tensión simple (Probeta 4).

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	*C* (valor de franja) [N/(m.orden)]
7,5 (73,58)	Gris	0.28	20212,91

12 (117,72)	Blanco	0.45	20123,08
16 (156,96)	Amarillo	0.60	20123,08
21 (206,01)	Naranja	0.79	20059,40
24 (235,44)	Rojo	0.90	20123,08
27 (264,87)	Púrpura	1.00	20374,62
28 (274,68)	Azul	1.06	19933,24
34 (333,54)	Azul-verde	1.20	21380,77
38 (372,78)	Verde-amarillo	1.38	20779,26
44 (431,64)	Naranja	1.62	20495,73
50 (490,50)	Rojo	1.81	20845,73

Fuente: Autor.

Tabla 4.8. Datos compresión (Probeta 1).

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	*C* (valor de franja) [N/(m.orden)]
14 (137,34)	Gris	0.28	20817,48
22 (215,82)	Blanco	0.45	20354,87
31 (304,11)	Amarillo	0.60	21511,40
40 (392,40)	Naranja	0.79	21081,00
45 (441,45)	Rojo	0.90	20817,48

50 (490,50)	Púrpura	1.00	20817,48

Fuente: Autor.

Tabla 4.9. Datos flexión pura (Probeta 1).

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	*C* (valor de franja) [N/(m.orden)]
6 (58,86)	Gris	0.28	21021,43
10 (98,10)	Blanco	0.45	21800,00
13 (127,53)	Amarillo	0.60	21255,00
17 (166,77)	Naranja	0.79	21110,13
19 (186,39)	Rojo	0.90	20710,00
22 (215,82)	Púrpura	1.00	21582,00
23 (225,06)	Azul	1.06	21285,85
26 (255,63)	Azul-verde	1.20	21255,00
30 (294,30)	Verde-amarillo	1.38	21326,09
35 (343,35)	Naranja	1.62	21194,44
40 (392,40)	Rojo	1.81	21679,56
44 (431,64	Púrpura	2,00	21582,00
50 (490,50)	Verde	2,33	21051,50

Fuente: Autor.

Tabla 4.10. Datos flexión pura (Probeta 2).

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	*C* (valor de franja) [N/(m.orden)]
6 (58,86)	Gris	0.28	21021,43
10 (98,10)	Blanco	0.45	21800,00
13 (127,53)	Amarillo	0.60	21255,00
16 (156,96)	Naranja	0.79	19868,35
19 (186,39)	Rojo	0.90	20710,00
22 (215,82)	Púrpura	1.00	21582,00
23 (225,06)	Azul	1.06	21285,85
26 (255,63)	Azul-verde	1.20	21255,00
30 (294,30)	Verde-amarillo	1.38	21326,09
34 (333,54)	Naranja	1.62	20588,89
40 (392,40)	Rojo	1.81	21679,56
44 (431,64	Púrpura	2,00	21582,00
50 (490,50)	Verde	2,33	21051,50

Fuente: Autor.

Las probetas de acrílico no presenta las características mencionadas por el fabricante, es decir el material no tiene la suficiente resistencia y sensibilidad óptica por lo que no se puede observar los diferentes órdenes de franja. En la figura 4.1 se observa una probeta sometida a tensión con

un orificio de concentración de esfuerzos con carga de 50 Kgf y sólo se aprecian los colores gris y blanco.



Ilustración 4.23. Probeta de acrílico.

Fuente: Autor.

4.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS

De acuerdo a los valores obtenidos de la constante fotoelástica se realiza un análisis estadístico descriptivo, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.11. Estadísticos descriptivos de la constante fotoelástica.

	n	**Mínimo**	**Máximo**	**Media**	**Desv. típ.**
Constante fotoelástica	76	19104,19	21800,00	20855,91	644,899
n (datos)	76				

Fuente: Autor.

Una vez que se tienen los datos de los ensayos de calibración del material, se procede a realizar un ensayo para la determinación de los esfuerzos. El modelo seleccionado es una probeta rectangular con un orificio en el centro que se somete a tensión (figura 4.26), que es un caso

típico de concentración de esfuerzos, por esta razón se examinará la sección A-A. Los resultados son comparados a los obtenidos por un análisis de elementos finitos y también en forma analítica.

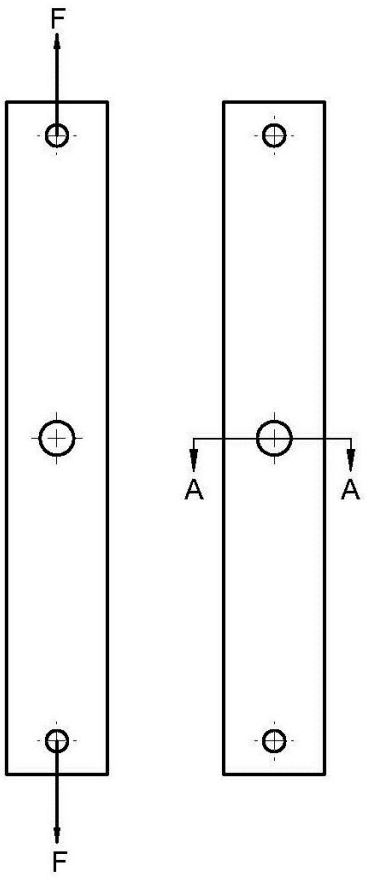


Figura 4.26. Aplicación de la carga en una probeta con un orificio.

Fuente: Autor.

Usualmente en los libros de diseño mecánico se encuentran gráficos como el de la figura 4.1, en donde se puede determinar el factor de concentración de esfuerzos. Para el problema en cuestión se utiliza el nomograma para el cálculo del esfuerzo máximo.

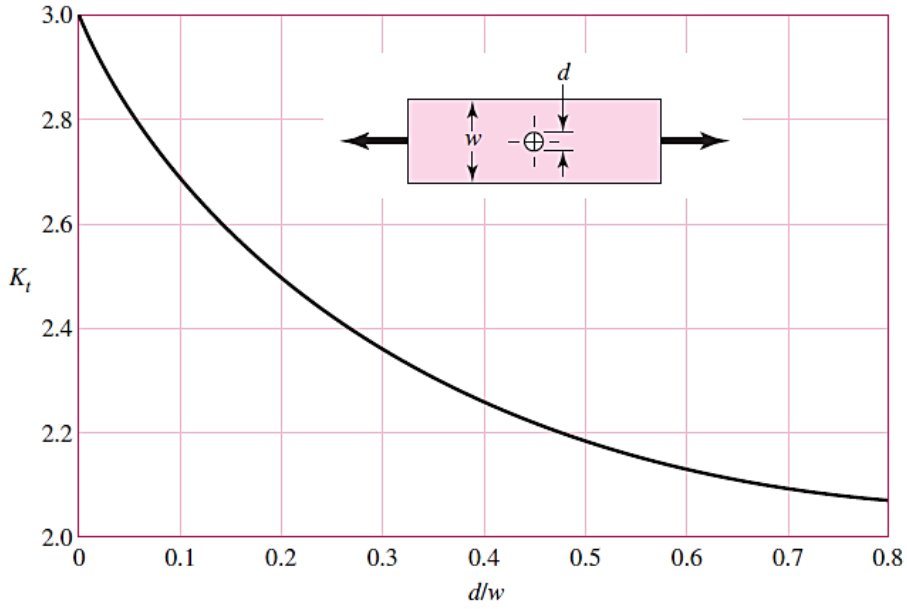


Figura 4.27. Aplicación de la carga en una probeta con un orificio.

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley. Octava Edición.

La probeta tiene un ancho de 30 mm (*w*), espesor de 6 mm (*t*) y el diámetro del agujero central es de 10 mm (*d*), entonces el esfuerzo σ_o es:

$$\sigma_o = \frac{F}{A}$$

$$\sigma_o = \frac{F}{(w-d)t}$$

$$\sigma_o = \frac{50\ \text{Kgf}}{(30\ \text{mm} - 10\ \text{mm})(6\ \text{mm})}$$

$$\sigma_o = \frac{490{,}5\ \text{N}}{(0{,}03\ \text{m} - 0{,}01\ \text{m})(0{,}006\ \text{m})}$$

$$\sigma_o = 4087500\ \text{Pa} = 4{,}088\ \text{MPa}$$

Para obtener el valor de K_t, se necesita la siguiente relación:

$$\frac{d}{w} = \frac{10\ \text{mm}}{30\ \text{mm}}$$

$$\frac{d}{w} = 0{,}333$$

Por lo tanto, el factor de concentración de esfuerzos es:

$$K_t = 2{,}33$$

El esfuerzo máximo será:

$$\sigma_{máx} = K_t . \sigma_o$$

$$\sigma_{máx} = (2{,}33).(4087500\ \text{Pa})$$

$$\sigma_{máx} = 9523875\ \text{Pa} = 9{,}52\ \text{MPa}$$

Hay que tomar en cuenta la forma en que se distribuye el esfuerzo en la probeta, como se muestra en la figura 4.28, el esfuerzo máximo se produce sobre la sección analizada sobre el borde del agujero.

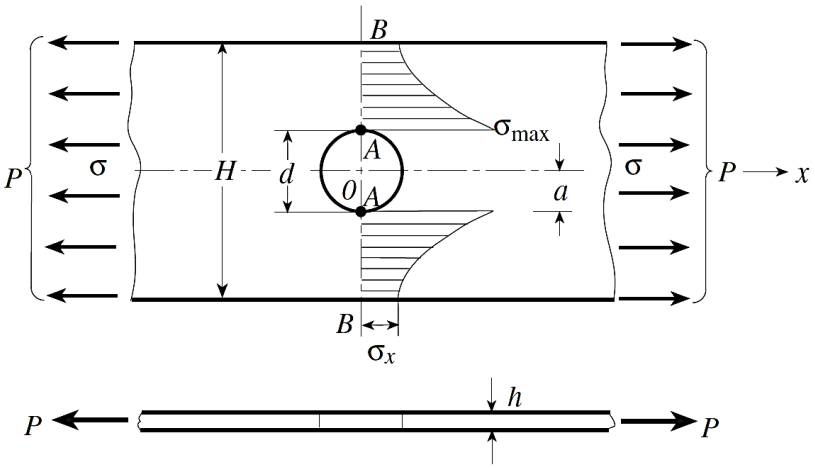


Figura 4.28. Barra con un agujero sometida a tensión.

Fuente: Stress Concentration Factors, Pilkey Walter. Tercera Edición.

La ilustración 4.1 muestra las franjas isocromáticas en la probeta de 6 mm de espesor, con luz blanca y con una carga de 50 Kgf.

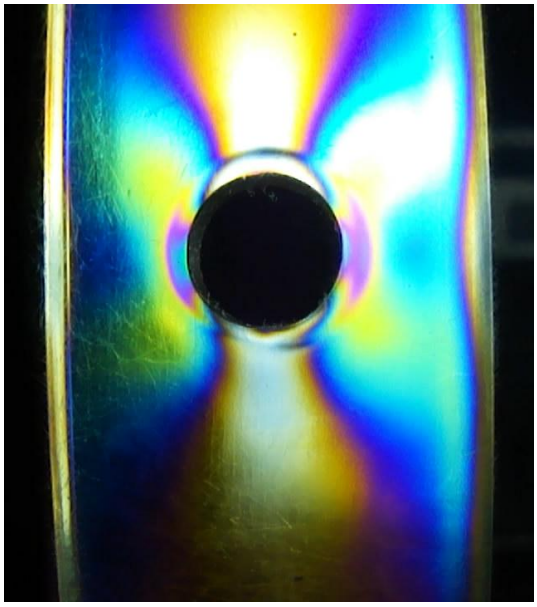


Ilustración 4.24. Franjas isocromáticas en una probeta con orificio.

Fuente: Autor.

La ilustración 4.1 muestra una ampliación del lado izquierdo, en donde se aprecia que empieza aparecer el color verde – amarillo sobre el borde del agujero por segunda vez, por lo que el orden de franja es 2,5.

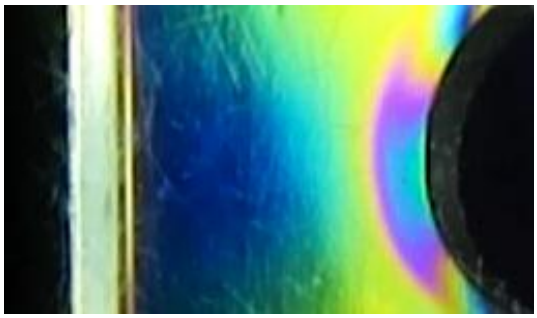


Ilustración 4.25. Franjas isocromáticas en una probeta con orificio (ampliación).

Fuente: Autor.

De la misma manera que en los ensayos anteriores de determinan la fuerza aplicada en la probeta y el orden de franja correspondiente, en el punto donde se produce el esfuerzo máximo. Entonces con la ecuación

2.4 y utilizando el valor promedio de la constante fotoelástica, la diferencia de los esfuerzos principales en este punto, para una carga de 50 Kgf, es:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{C.N}{b}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\left(20855{,}92\,\frac{\text{N}}{\text{m.orden de franja}}\right).\,(2{,}5\ \text{orden de franja})}{0{,}006\ \text{m}}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 8702466{,}67\ \text{Pa} = 8{,}7\ \text{MPa}$$

Los resultados para la diferencia de los esfuerzos principales para el resto de los valores de carga se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.12. Resultados del ensayo con la probeta con orificio central a tensión.

F (carga) [Kgf] [N]	Color -	*N* (orden de franja) [orden]	$\sigma_1 - \sigma_2$ [Pa]
6 (49,05)	Gris	0.28	973275,80
9 (88,29)	Blanco	0.45	1564193,25
11 (107,91)	Amarillo	0.60	2085591,00
15 (147,15)	Naranja	0.79	2746028,15
17 (166,77)	Rojo	0.90	3128386,50
18 (176,58)	Púrpura	1.00	3475985,00
20 (196,20)	Azul	1.06	3684544,10
22 (215,82)	Azul-verde	1.20	4171182,00
26 (255,06)	Verde-amarillo	1.38	4796859,30

30 (294,30)	Naranja	1.62	5631095,70
34 (333,54)	Rojo	1.81	6291532,85
38 (372,78)	Púrpura	2,00	6951970,00
44 (431,64)	Verde	2,33	8099045,05
50 (490,50)	Verde-amarillo	2,50	8689962,50

Fuente: Autor.

A continuación se realiza el análisis por elementos finitos para cuando la carga es de 50 Kgf. Se toma en cuenta la recomendación de que deben existir al menos dos elementos finitos a través del espesor del material para tener resultados confiables.

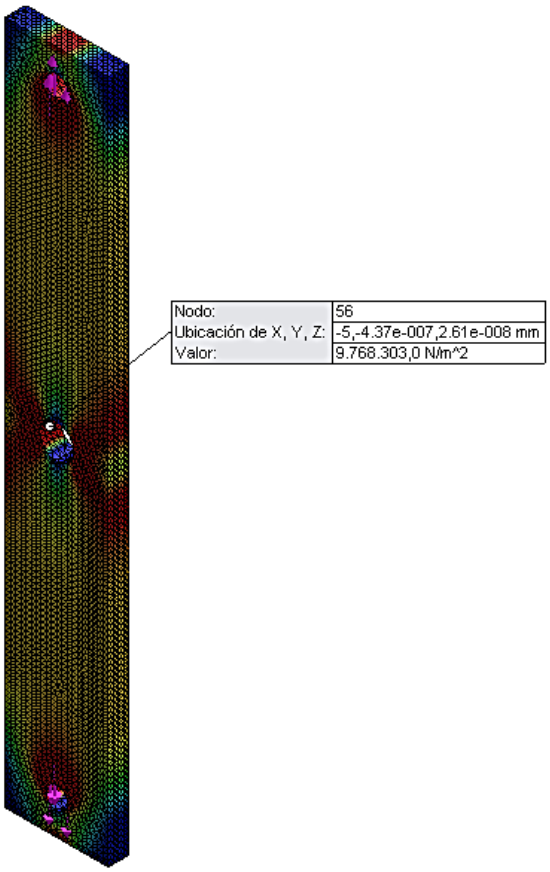


Figura 4.29. Esfuerzo principal uno en la probeta con orificio central (elementos finitos).

Fuente: Autor.

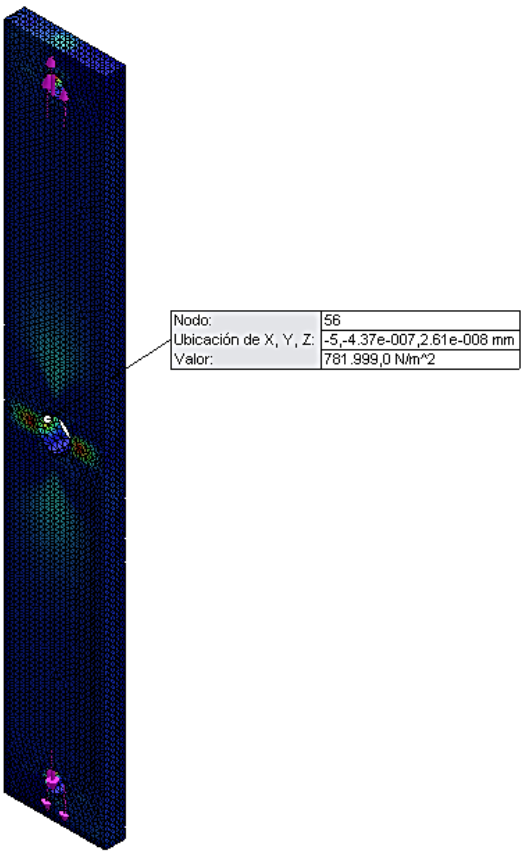


Figura 4.30. Esfuerzo principal dos en la probeta con orificio central (elementos finitos).

Fuente: Autor.

Como se observa:

$$\sigma_1 = 9768303 \text{ Pa}$$

$$\sigma_2 = 781999 \text{ Pa}$$

Por lo tanto:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 9768303 \text{ Pa} - 781999 \text{ Pa}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 8986304 \text{ Pa} = 8{,}99 \text{ MPa}$$

Lo que indica que no existe mucha diferencia con el valor obtenido por fotoelasticidad. Calculando el error se tiene:

$$\epsilon = \frac{8689962{,}50 - 8986304}{8689962{,}50} * 100\ \%$$

$$\epsilon = -3{,}41\ \%$$

En la tabla 4.1 se muestran los resultados para todos los valores de carga y el error calculado al comparar los dos métodos.

Tabla 4.13. Porcentaje de error al comparar los métodos de elementos finitos y fotoelástico.

F (carga) [Kgf] [N]	Fotoelasticidad $\sigma_1 - \sigma_2$ [Pa]	Elementos Finitos $\sigma_1 - \sigma_2$ [Pa]	Error %
6 (49,05)	973275,80	895675,60	7,97
9 (88,29)	1564193,25	1580460,10	-1,04
11 (107,91)	2085591,00	1943895,40	6,79
15 (147,15)	2746028,15	2687024,90	2,15
17 (166,77)	3128386,50	3007945,70	3,85
18 (176,58)	3475985,00	3315996,20	4,60
20 (196,20)	3684544,10	3588655,70	2,60
22 (215,82)	4171182,00	3910265,60	6,26

26 (255,06)	4796859,30	4666983,70	2,71
30 (294,30)	5631095,70	5396634,90	4,16
34 (333,54)	6291532,85	6073506,00	3,47
38 (372,78)	6951970,00	6675603,50	3,98
44 (431,64)	8099045,05	7898773,20	2,47
50 (490,50)	8689962,50	8986304,00	-3,41

Fuente: Autor.

Se observa que el porcentaje de error es muy pequeño, sin embargo estos valores son determinados a partir de la media de la constante fotoelástica y la demostración de la hipótesis depende del análisis estadístico, por tal motivo se aplica este análisis a uno de los valores de carga, por ejemplo para el color azul la carga es de 20 Kgf.

Tabla 4.14. Análisis estadístico de los esfuerzos determinados por la técnica fotoelástica para una carga de 20 Kgf (N = 1,06).

C [N/m]	$\sigma_1 - \sigma_2$ [Pa]	C [N/m]	$\sigma_1 - \sigma_2$ [Pa]	C [N/m]	$\sigma_1 - \sigma_2$ [Pa]
21560,44	3809010,99	20123,08	3555076,92	21255,00	3755050,00
21800,00	3851333,33	20374,62	3599515,38	21110,13	3729455,70
20123,08	3555076,92	20645,14	3647307,69	20710,00	3658766,67
19104,19	3375073,03	21380,77	3777269,23	21582,00	3812820,00
20123,08	3555076,92	21326,09	3767608,70	21285,85	3760500,00
19620,00	3466200,00	21427,35	3785498,58	21255,00	3755050,00

19933,24	3521538,46	20845,73	3682745,43	21326,09	3767608,70
21380,77	3777269,23	20212,91	3570947,80	21194,44	3744351,85
21326,09	3767608,70	20123,08	3555076,92	21679,56	3830055,25
21427,35	3785498,58	20123,08	3555076,92	21582,00	3812820,00
20845,73	3682745,43	20059,40	3543826,68	21051,50	3719098,71
20212,91	3570947,80	20123,08	3555076,92	21021,43	3713785,71
20123,08	3555076,92	20374,62	3599515,38	21800,00	3851333,33
20123,08	3555076,92	19933,24	3521538,46	21255,00	3755050,00
19104,19	3375073,03	21380,77	3777269,23	19868,35	3510075,95
20123,08	3555076,92	20779,26	3671003,34	20710,00	3658766,67
21129,23	3732830,77	20495,73	3620911,68	21582,00	3812820,00
21357,04	3773076,92	20845,73	3682745,43	21285,85	3760500,00
21380,77	3777269,23	20817,48	3677755,53	21255,00	3755050,00
21326,09	3767608,70	20354,87	3596027,63	21326,09	3767608,70
21427,35	3785498,58	21511,40	3800347,38	20588,89	3637370,37
20845,73	3682745,43	21081,00	3724309,40	21679,56	3830055,25
21560,44	3809010,99	20817,48	3677755,53	21582,00	3812820,00
20123,08	3555076,92	20817,48	3677755,53	21051,50	3719098,71
20123,08	3555076,92	21021,43	3713785,71		
21014,61	3712580,33	21800,00	3851333,33		

Fuente: Autor.

Así mismo con los valores obtenidos se determinan la media y la desviación estándar, que se muestran en la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Estadísticos descriptivos de los esfuerzos calculados por la técnica fotoelástica.

	n	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
$\boldsymbol{\sigma_1 - \sigma_2}$	76	3375073,03	3851333,33	3684545,4	113932,27
n (datos)	76				

Fuente: Autor.

4.2. DEMOSTRACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Para la demostración se toma la hipótesis nula y la hipótesis alternativa de la siguiente manera:

H_0: Los esfuerzos determinados por la técnica fotoelástica son iguales a los esfuerzos calculados por el método de elementos finitos.

H_A: Los esfuerzos obtenidos por fotoelasticidad son inferiores a los deducidos por el método de elementos finitos.

En forma matemática, para el caso estudiado:

H_0: μ = 3588655,70 Pa.

H_A: μ < 3588655,70 Pa.

Si la hipótesis nula es verdadera, entonces la determinación de los esfuerzos por medio de la técnica experimental de la fotoelasticidad es tan válida como por el método de elementos finitos, por lo tanto puede ser utilizada para verificar el diseño de componentes mecánicos por ejemplo cuando hay duda de la efectividad de otros métodos.

Por el contrario si se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa significará que los resultados del método fotoelástico se

subestiman, con lo que los factores de seguridad se incrementan señalando una falsa seguridad de uso del componente mecánico. Este es mucho más peligroso que cuando se sobrestima el resultado, en cuyo caso el componente mecánico estará sobredimensionado.

Se puede establecer que los valores de los esfuerzos varían se acuerdo a una distribución de probabilidad normal, entonces, se rechaza H_0 si:

$$X < \mu_0 - \frac{Z_{1-\alpha}.\sigma}{\sqrt{n}}$$

Para un nivel de significancia α de 0.05, la función de probabilidad normal para 1 - α = 0,95 es:

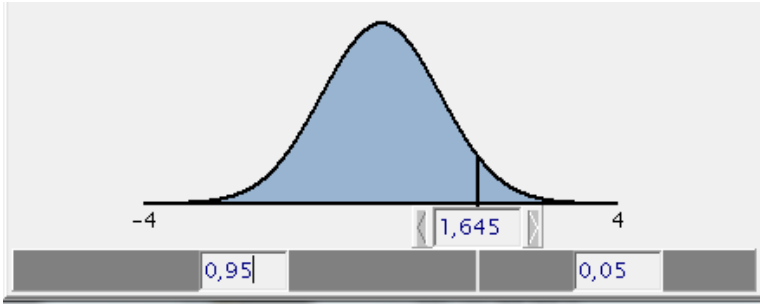


Figura 4.32. Distribución normal para 1 - α = 0,95.

Fuente: Autor.

Reemplazando los datos en la ecuación:

$$\mu_0 - \frac{Z_{1-\alpha}.\sigma}{\sqrt{n}} = 3588655{,}70\ \text{Pa} - \frac{(1{,}645)(113932{,}27\ \text{Pa})}{\sqrt{76}}$$

$$\mu_0 - \frac{Z_{1-\alpha}.\sigma}{\sqrt{n}} = 3567157{,}31\ \text{Pa}$$

Como *X* = 3588655,70 Pa > 3567157,31 Pa se acepta la hipótesis nula.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Una vez finalizados los ensayos y evaluados los resultados del presente trabajo, se pueden formular las siguientes conclusiones de la investigación:

- El acrílico y la resina poliéster fueron los materiales utilizados para este estudio, de los cuales el acrílico presenta una baja resolución óptica, lo cual puede deberse al proceso de fabricación, entonces los ensayos se realizaron con las probetas de resina poliéster. Por lo tanto, mientras menor sea el valor de la contante fotoelástica del material (*C*) mejor será la sensibilidad óptica.

- La resina poliéster, además de tener una buena sensibilidad óptica, posee gran resistencia a la tensión, por ende se puede aplicar un amplio rango de valores de carga presentando de esta manera una amplia secuencia de colores.

- Se estableció el proceso apropiado para aplicar la técnica de fotoelasticidad en la determinación de esfuerzos. Como en cualquier ensayo de laboratorio el procedimiento afecta directamente a los resultados.

- El error cometido entre el método de elementos finitos y la técnica fotoelástica es muy pequeño, inferior al 10 % en todos los casos, entonces pueden ser utilizados en forma conjunta para el diseño de componentes mecánicos.

- El equipo construido ofrece resultados confiables que permiten mejorar el diseño mecánico de piezas. Esto se demostró al realizar el análisis estadístico y comprobar la hipótesis.

- Las probetas de resina poliéster empleadas en los ensayos presentan bajo efecto de borde, debido al proceso de corte por láser.

- Al utilizar filtros polarizadores de doble efecto no se pueden determinar las líneas isóclinas, que sirven para encontrar las direcciones de los esfuerzos principales y en combinación con los resultados de las franjas isocromáticas poder evaluar sus magnitudes. Por tal motivo en la presente investigación se encontró el valor de la diferencia de los esfuerzos principales.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda fabricar las planchas de resina poliéster utilizando un molde en forma de caja con dos vidrios en lugar de uno, para que tengan un espesor uniforme y las superficies sean lisas.

- Los porcentajes para la elaboración de las planchas recomendables, en base al porcentaje de resina poliéster son: 10 % de estireno, 2 % de catalizador (meck) y 0,5 % de acelerante. Así mismo se debe evitar realizar el proceso de secado con la ayuda del sol, ya que la contracción de la resina será alta y puede provocar fisuras.

- Almacenar las probetas sobre una superficie plana y evitar la exposición de las mismas a temperaturas superiores a los 30 º C con el fin de impedir la deformación y deterioro de las mismas.

- El método fotoelástico puede ser utilizado en instituciones educativas como apoyo didáctico, por presentar de manera visual la distribución de los esfuerzos en un componente con carga mecánica.

- La aplicación de la carga debe ser lo más lenta posible para poder determinar correctamente los colores que se van presentando en la probeta.

- Aunque la luz del día no afecta la distribución de colores que se observa directamente, puede provocar un brillo ya sea en las fotografías o videos del ensayo evitando una identificación correcta de los colores, por lo puede ser necesario realizar los ensayos en un cuarto oscuro o a su vez utilizar un filtro para la cámara.

- En cuanto a los análisis por elementos finitos, se recomienda utilizar un tamaño de malla de tal manera que existan al menos dos elementos a través del espesor del material. Además, dependiendo del caso, se debe refinar la malla en los lugares que se requiera.

- También al utilizar el método de elementos finitos hay que considerar que existen concentraciones de esfuerzos en los lugares donde se apoya el componente. Por tal motivo, en lo posible se debe realizar el análisis con un mínimo de dos componentes, o de otra forma evitar usar empotramientos y equilibrar el modelo sólo con fuerzas.

CAPÍTULO VI

6. PROPUESTA

APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS Y FOTOELÁSTICO PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN UN DIENTE DE ENGRANE RECTO.

6.1 DATOS INFORMATIVOS

Ahora se utilizan los métodos estudiados para el análisis de un caso práctico como es la determinación de los esfuerzos en un diente de engrane recto.

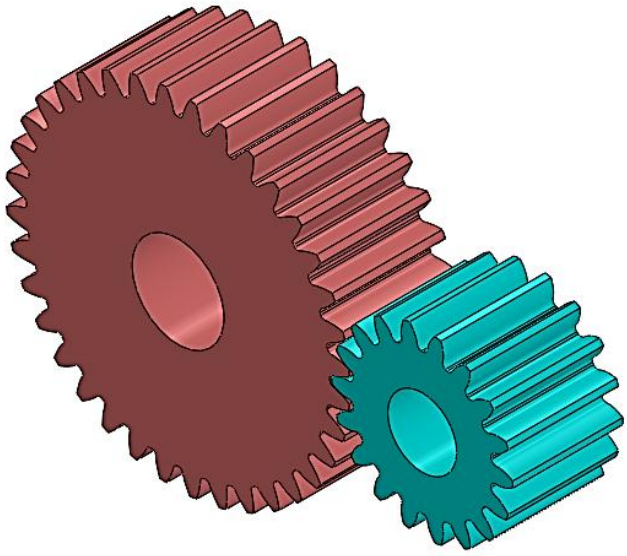


Figura 6.1. Engranaje para el análisis.

Fuente: Autor.

Se considera un engranaje de reducción (figura 6.1) compuesto por un piñón de 18 dientes (Z_1) y un engrane de 36 dientes (Z_2), es decir relación de 2:1, para un motor de 1000 rpm, los dientes son de altura completa

con un ángulo de presión de 20 º, módulo de 50 mm (paso diametral = 0,508 dte/pulg), el ancho de cara es de 60 cm (23,63 pulg) y la carga transmitida es de W_t = 6500 Kgf (2947,85 lb).

Como se sabe, se debe verificar la resistencia del piñón, que por lo general es el más pequeño. Para el análisis por elementos finitos se va a realizar la determinación de los esfuerzos tanto en la geometría del piñón completo como el modelo simplificado que se utilizará en la técnica fotoelástica, para chequear la diferencia.

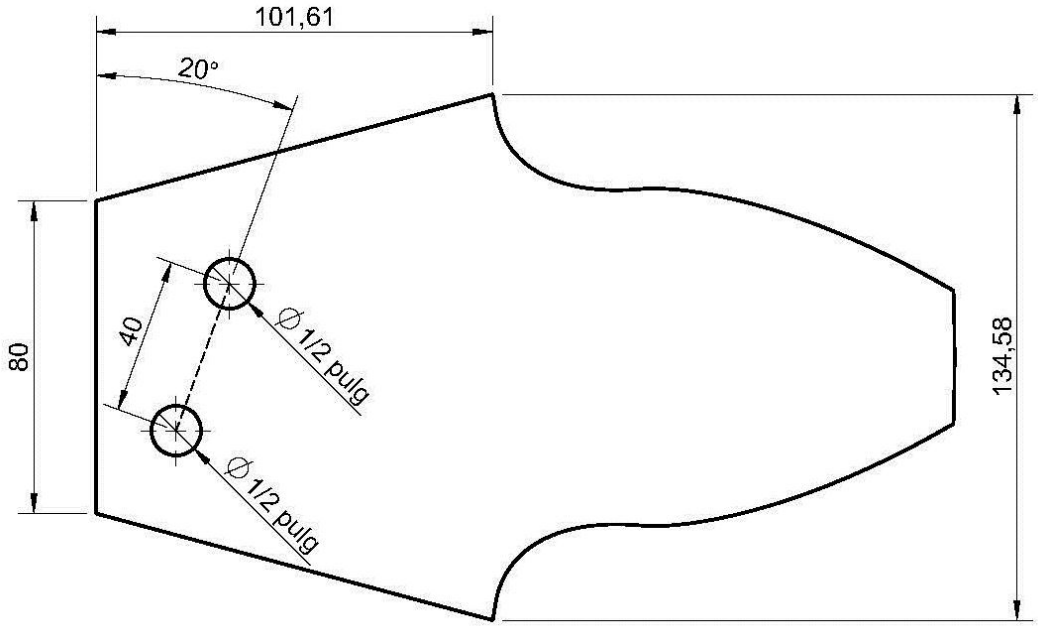


Figura 6.2. Probeta del diente de engrane.

Fuente: Autor.

Para el análisis por fotoelasticidad, se simplifica la geometría considerando que no afecte a los resultados, por lo tanto la probeta es cortada con espesor de 6 mm, por lo tanto por regla de tres la carga a aplicar es:

$$\frac{W_t}{F} = \frac{60 \text{ cm}}{6 \text{ mm}}$$

$$\frac{6500 \text{ Kgf}}{F} = \frac{600 \text{ mm}}{6 \text{ mm}}$$

$$F = 65 \text{ Kgf}$$

6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Como se mencionó en el capítulo dos, existen varios trabajos relacionados a este tema en el extranjero, pero a nivel local son casi nulos, lo cual se debe a que en nuestro país existen muy pocos equipos para realizar ensayos de fotoelasticidad.

Así mismo vale la pena mencionar que la tendencia actual es trabajar cada vez más con polímeros y que van apareciendo más tipos de estos materiales con mejores propiedades, lo que beneficia a la técnica de la fotoelasticidad, ya que la mayor parte de los polímeros tienen propiedades ópticas.

6.3 JUSTIFICACIÓN

Como se diseñó y construyó un polariscopio de transmisión para la realización del estudio y debido a que se demostró la hipótesis planteada, lo más lógico es el desarrollo de un problema práctico. De esta manera se tendrá una especie de guía para la aplicación de los métodos.

Así también se debe tomar en cuenta que un engrane es uno de los componentes mecánicos más utilizados, como parte de máquinas y mecanismos. Además los engranes son sobredimensionados cuando se usan las fórmulas analíticas.

6.4 OBJETIVOS

6.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar los esfuerzos producidos en un diente de engrane recto empleando los métodos de elementos finitos y fotoelástico.

6.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

✓ Determinar la distribución de colores en un diente de engrane por la técnica fotoelástica.

✓ Analizar el efecto de la flexión en un diente de engrane recto por el método de elementos finitos, considerando carga estática.

6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

El tema planteado es totalmente factible, ya que se sustenta en los resultados obtenidos en los capítulos anteriores. La probeta del diente de engrane está cortada de la misma plancha de resina poliéster que las otras, por ende se puede utilizar el valor de la constante fotoelástica del material obtenida del análisis estadístico.

6.6 FUNDAMENTACIÓN

6.6.1 ECUACIÓN DE FLEXIÓN DE LEWIS [19]

Wilfred Lewis introdujo una ecuación para estimar el esfuerzo de flexión en dientes de engranes en la que interviene la forma de los mismos.

Para deducir la ecuación de Lewis, se consulta la figura 6.2, donde se muestra un voladizo con dimensiones de su sección transversal *F* y *t*, longitud *l* y una carga W_t, uniformemente distribuida a lo largo del ancho de cara *F*. El módulo de sección *I*/*c* es $Ft^2/6$, por lo que el esfuerzo de flexión está dado por:

$$\sigma = \frac{M}{I/c} = \frac{6.W_t.l}{F.t^2} \qquad \text{(a)}$$

Con referencia a la figura 6.2 b, se supone que el esfuerzo máximo en un diente de engrane ocurre en el punto *a*. Mediante triángulos semejantes, se escribe:

$$\frac{t/2}{x} = \frac{l}{t/2} \quad \text{o} \quad x = \frac{t^2}{4l} \tag{b}$$

Reacomodando términos en la ecuación (a),

$$\sigma = \frac{6.W_t.l}{F.t^2} = \frac{W_t}{F}\frac{1}{t^2/6l} = \frac{W_t}{F}\frac{1}{t^2/4l}\frac{1}{6} \tag{b}$$

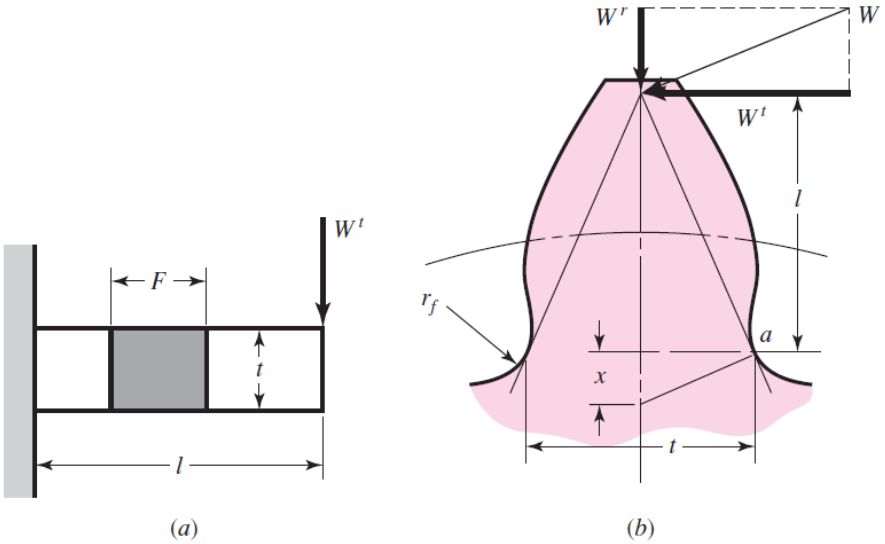


Figura 6.3. Analogía entre un diente de engrane y una viga en voladizo.

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley. Octava edición.

Si ahora se sustituye el valor de *x* de la ecuación (b) en la (c) y se multiplican el numerador y el denominador por el paso circular *p*, se obtiene:

$$\sigma = \frac{W_t.p}{F.\left(\frac{2}{3}\right).x.p} \tag{d}$$

Haciendo *y* = 2*x*/3*p*, se tiene que:

$$\sigma = \frac{W_t}{F.p.y} \qquad (6.1)$$

Tabla 6.1. Valores del factor de forma de Lewis *Y* (estos valores son para un ángulo normal de presión de 20 º, dientes de altura completa y paso diametral igual a la unidad, en el plano de rotación).

Number of Teeth	Y	Number of Teeth	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.447
21	0.328	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Rack	0.485

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica, Shigley. Octava edición.

Lo anterior completa el desarrollo de la ecuación original de Lewis. El factor *y* se conoce como factor de forma de Lewis y se obtiene por medio de una representación gráfica del diente o bien mediante cálculo digital.

Al aplicar dicha ecuación, la mayoría de los ingenieros emplean el paso diametral para determinar los esfuerzos. Esto se hace al sustituir tanto a $P = \pi/p$ como a $Y = \pi y$ en la ecuación. Esto da:

$$\sigma = \frac{W_t.P}{F.Y} \qquad (6.2)$$

Dónde:

$$Y = \frac{2.x.P}{3} \tag{6.3}$$

El empleo de esta ecuación para *Y* significa que sólo se considera la flexión del diente y que se ignora la compresión radial de la fuerza. Los valores de *Y* que se obtienen mediante dicha ecuación se tabulan en la tabla 6.1.

A la ecuación de Lewis, la norma para el diseño de engranes (AGMA) le añade un coeficiente que toma en cuenta el efecto dinámico, cuyo valor depende del proceso de fabricación del engrane. Para dientes cortados se determina con la siguiente ecuación:

$$K_v = \frac{1200 + V}{1200} \tag{6.4}$$

Entonces la ecuación de la AGMA es:

$$\sigma = \frac{K_v.W_t.P}{F.Y} \tag{6.5}$$

6.7 METODOLOGÍA, MODELO OPERATIVO

6.7.1 CÁLCULO ANALÍTICO DEL ESFUERZO EN UN DIENTE DE ENGRANE

El diámetro de paso es:

$$d = \frac{N}{P}$$

$$d = \frac{18 \text{ dte}}{0{,}508 \text{ dte/pulg}}$$

$$d = 35{,}43 \text{ pulg}$$

La velocidad en la línea de paso es:

$$V = \frac{\pi . d . n}{12}$$

$$V = \frac{\pi(35{,}43)(1000)}{12}$$

$$V = 9275{,}54 \frac{\text{pies}}{\text{min}}$$

El factor de velocidad es:

$$K_v = \frac{1200 + V}{1200}$$

$$K_v = \frac{1200 + 9275{,}54}{1200}$$

$$K_v = 8{,}73$$

El esfuerzo se puede determinar con la ecuación 6.5.

$$\sigma = \frac{K_v . W_t . P}{F . Y}$$

$$\sigma = \frac{8{,}73(2947{,}846\ \text{lb})(0{,}508\ \text{dte/pulg})}{(23{,}63\ \text{pulg})(0{,}309)}$$

$$\sigma = 1790{,}44\ \text{psi}$$

$$\sigma = 12{,}34\ \text{MPa}$$

6.7.2 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE UN DIENTE DE ENGRANE

Como se mencionó anteriormente, se recomienda utilizar un ensamblaje para el análisis. En este caso se modelan los pernos de 1/2 pulg que sujetan el diente de engrane al marco de carga.

En la figura 6.3 se aprecia la distribución de los esfuerzos y se determina que el esfuerzo máximo se produce en el punto donde aplica la carga.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 17{,}84 \text{ MPa}$$

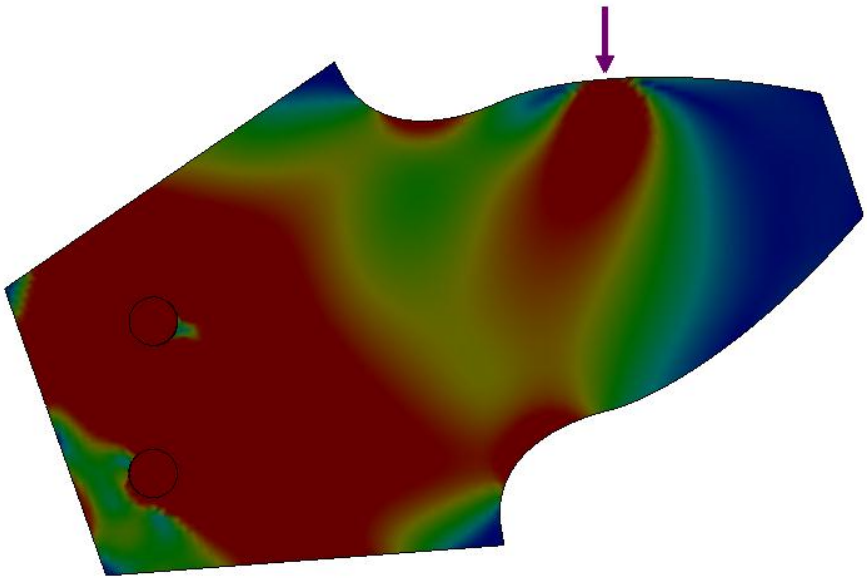


Figura 6.4. Distribución de los esfuerzos en el diente de un engrane por elementos finitos.

Fuente: Autor.

Con fines de comparación también se determina la diferencia de los esfuerzos principales en la base del diente en la parte superior.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 3{,}86 \text{ MPa}$$

6.7.3 ANÁLISIS FOTOELÁSTICO DE UN DIENTE DE ENGRANE

En la ilustración 6.1 se observa la distribución de los esfuerzos por la técnica fotoelástica. El orden de franja en el punto donde está aplicada es 4,13 (verde), por lo tanto:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{C.N}{b}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\left(20855{,}92 \dfrac{\text{N}}{\text{m.orden de franja}}\right).(4{,}13 \text{ orden de franja})}{0{,}006 \text{ m}}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 14355824{,}93 \text{ Pa}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 14{,}36\ \text{MPa}$$

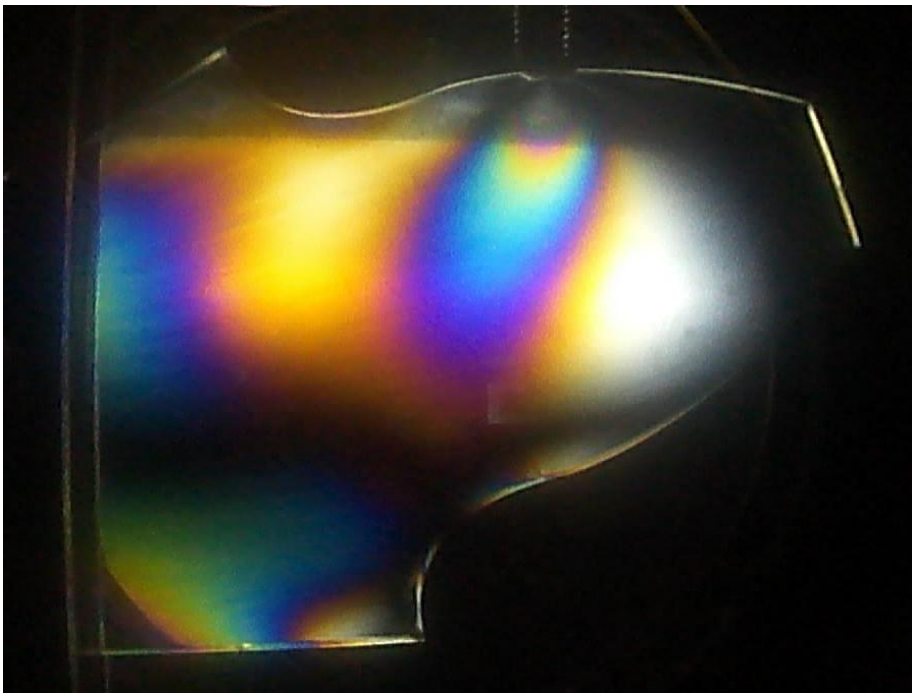


Ilustración 6.1. Distribución de los esfuerzos en el diente de un engrane por fotoelasticidad.

Fuente: Autor.

Mientras en la base del diente en la parte superior el orden de franja es 1,06 (azul).

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{C.N}{b}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\left(20855{,}92\ \frac{\text{N}}{\text{m.orden de franja}}\right).(1{,}06\ \text{orden de franja})}{0{,}006\ \text{m}}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 3684545{,}87\ \text{Pa}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 3{,}68\ \text{MPa}$$

Como se esperaba la diferencia entre los dos métodos es muy pequeña, con lo aclaración de que en la figura 6.3 el rango de visualización de los esfuerzos fue cambiado para apreciar los esfuerzos.

6.8 ADMINISTRACIÓN

En la parte administrativa se tiene que realizar un análisis de costo, tanto de la construcción de la máquina, realización de los ensayos, propuesta y en definitiva de toda la investigación.

6.8.1 COSTOS DIRECTOS

Los costos directos se detallan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Costos directos.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	TOTAL (USD)
1	Resina poliéster	3	litros	4,11	12,33
2	Estireno	2	litros	2,88	5,76
3	Cobalto	60	cm^3	0,0248	1,49
4	Peróxido (Meck)	60	cm^3	0,01	0,6
5	Envases plásticos	5	-	0,3	1,5
6	Lámina acrílica	1/3 de plancha de 1220x2440x3	mm	90	30
7	Lámina acrílica	1/3 de plancha de 1220x2440x3	mm	180	60
8	Varilla roscada 1/2 pulg. (galvanizado)	1	-	3,40	3,40
9	Perno de 1/2x4 pulg. (acero inoxidable)	1	-	2,55	2,55
10	Perno de 1/4x1 pulg. RF (acero inoxidable)	18	-	0,45	8,1
11	Perno de 1/2x2 pulg.	12	-	1,27	15,24

	(acero inoxidable)				
12	Tuerca 1/2 (acero inoxidable)	15	-	0,45	6,75
13	Tuerca 1/4 (acero inoxidable)	18	-	0,25	4,5
14	Rodelas de bronce	2	-	0,35	0,7
15	Dinamómetro de 20 N	1	-	12	12
16	Vidrios circulares	4	-	0,08	3,20
17	Vidrio esmerilado	1	-	8,04	8,04
18	Tubo fluorescente (10W)	4	-	1	4
19	Soporte para lámpara	8	-	0,33	3,43
20	Cable extensión	1	-	0,98	0,98
21	Transformador 1x20W	4	-	2,50	10
22	Arranque (20W)	4	-	0,36	1,43
23	Cable gemelo SPT	1,5	m	0,45	1,67
24	Interruptor (60 A/125 V)	1	-	1,7	1,7
25	Boquilla térmica	1	-	0,8	0,8
26	Enchufe tres patas	1	-	2,23	2,23
27	Balastro (70W)	1	-	13,44	13,44
28	Ignitor (70/400 W)	1	-	5,86	5,86
29	Foco tubular de sodio (70W)	1	-	8,24	8,24

30	Cable de alta temperatura #14.	1,5	m	1,44	2,16
31	Capacitor (20 VF)	1	-	3,74	3,74
32	Pletina de 1 1/2x1/4 (acero inoxidable)	9	m	18,43	165,87
33	Plancha (acero ASTM A36)	1/3 de plancha de 1220x2440x5	mm	60.49	20,16
34	Ángulo de 2x1/4	2	m	5,09	10,18
35	Plancha (acero ASTM A36)	1/2 de plancha de 1220x2440x2	mm	20.16	10,08
SUBTOTAL					442,13
IVA 12 %					53,06
TOTAL					**495,19**

Fuente: Autor.

Los costos por mano de obra se detallan a continuación.

Tabla 6.3. Costos por mano de obra.

CARGO	**HORAS TRABAJADAS**	**COSTO/HORA**	**TOTAL**
Maestro	17	3,64	61,88
Ayudante	100	1,82	182
TOTAL			**243,88**

Fuente: Autor.

Los costos relacionados con el material utilizado para los ensayos son:

Tabla 6.4. Costos indirectos.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	TOTAL (USD)
1	Corte por laser	35	cortes	2	70
2	Transporte	10	-	1,25	12,5
3	Ensayo de tracción de probetas	2	-	20	40
TOTAL					**122,5**

Fuente: Autor.

Por lo que los costos totales fueron los siguientes.

Tabla 6.5. Costos totales.

DETALLE	COSTO
Costos directos	495,19
Mano de obra	243,88
Costos indirectos	122,5
SUBTOTAL	861,57
Imprevistos	10%
TOTAL	947,73

Fuente: Autor.

6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN

A futuro se pueden realizar ensayos con engranes metálicos para determinar el comportamiento real durante el funcionamiento y de esta manera evaluar los análisis desarrollados en esta investigación.

Se recomienda elaborar trabajos relacionados con este tema, debido a que las ecuaciones que se muestran en los libros de diseño dependen de parámetros que son obtenidos en forma experimental y cada vez más se vuelven más complejas.

BIBLIOGRAFÍA

[1]. Abarca Flores, L. M. (1995). *Estudio Experimental de Modelos Fotoelásticos en Dos y Tres Dimensiones.* Riobamba.

[2]. Amores, R. R., & Osorio, B. R. (2010). *Análisis Fotomecánico por Transmisión de la Luz Mediante la Técnica de Procesamiento Digital de Imágenes en MatLab.* Quito.

[3]. Brewster, D. (1815). *Experiments on the depolarization of light as exhibited by various mineral, animal and vegetable bodies.* Phil. Tras.

[4]. Burke, J. R. (1999). *Física: la naturaleza de las cosas.* México D.F.: International Thomson Editores.

[5]. Chandrupatla, T. (1999). *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería* (Segunda ed.). Prentice Hall.

[6]. Dally, J. W., & Riley, W. F. (1991). *Experimental Stress Analysis* (Tercera Edición ed.). New York: McGraw-Hill.

[7]. Fuentelsaz, C. (2004). *Matronas Profesión* (Vol. 5 °). Barcelona.

[8]. Jones, F. D., Horton, H. L., RyffelL, H. H., & Oberg, E. (2000). *Machinery´s Handbook* (26th ed.). New York: Industrial Press Inc.

[9]. Juvinall, R. (s.f.). *Engineering considerations of stress, strain and strength.* Mc Graw Hill.

[10]. Küppers, H. (s.f.). *Fundamentos de la teoría de los colores.* Barcelona: Gustavo Gili S.A.

[11]. Kuske, A., & George, R. (1974). *Photoelastic Stress Análisis.* A Wiley Ltd. Great Britain.

[12]. Ortiz Berrocal, L. (s.f.). *Fotoelasticidad* (Tercera Edición ed.). McGraw-Hill.

[13]. Rao, S. (s.f.). *The finite element method in engineering* (Tercera ed.). Butterworth Heinemann.

[14]. Rastogi, P. K. (2000). *Topics in Applied Physics, Photomechanics.* Springer.

[15]. Rodríguez Valdez, J. (2006). *Determinación de los Esfuerzos en Dientes de una Rueda Tipo Catarina por los Métodos Fotoelástico y del Elemento Finito.* México.

[16]. Sánchez Morales, L. (2006). *Laboratorio de Fotoelasticidad para los Estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos.* Guatemala.

[17]. Sandoval Pineda, J. M. (2004). *Análisis de Esfuerzos en un Diente de Engrane Recto para Bomba Hidráulica Aplicando el Método del Elemento Finito.* México.

[18]. Sear, & Zemansky. (2009). *Física universitaria Vol. 2* (Decimosegunda Edición ed.). Addison-Wesley.

[19]. Shigley's, B. (2008). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (Eighth ed.). Madrid: McGraw−Hill Primis.

[20]. Shurcliff, W. A. (s.f.). *Luz polarizada* (Primera Edición ed.). México D.F.: Reverte.

[21]. Tuppeny, W. (s.f.). *Análisis experimental de tensiones* (Primera Edición ed.). Urmo.

ANEXOS

ANEXO A

TABLA 1. ESPECIFICACIONES DE TORSIÓN DE ACUERDO CON LA NATURALEZA DEL PERNO.

ESPECIFICACIONES DE TORSION DE ACUERDO CON LA DUREZA DEL TORNILLO

Este diagrama le ayudará a identificar los tornillos de acuerdo con su construcción, para poder aplicar en ellos la torsión adecuada en cada caso.

GRADO S. A. E.	1 o 2	5	6	8	
1/4 Diám.	5 Lbs.-pie	7 Lbs.-pie	10 Lbs.-pie	10.5 Lbs.-pie	11 Lbs.-pie
5/16 Diám.	9 Lbs.-pie	14 Lbs.-pie	19 Lbs.-pie	22 Lbs.-pie	24 Lbs.-pie
3/8 Diám.	15 Lbs.-pie	25 Lbs.-pie	34 Lbs.-pie	37 Lbs.-pie	40 Lbs.-pie
7/16 Diám.	24 Lbs.-pie	40 Lbs.-pie	55 Lbs.-pie	60 Lbs.-pie	65 Lbs.-pie
1/2 Diám.	37 Lbs.-pie	60 Lbs.-pie	85 Lbs.-pie	92 Lbs.-pie	97 Lbs.-pie
9/16 Diám.	53 Lbs.-pie	88 Lbs.-pie	120 Lbs.-pie	132 Lbs.-pie	141 Lbs.-pie
5/8 Diám.	74 Lbs.-pie	120 Lbs.-pie	167 Lbs.-pie	180 Lbs.-pie	192 Lbs.-pie
3/4 Diám.	120 Lbs.-pie	220 Lbs.-pie	280 Lbs.-pie	286 Lbs.-pie	316 Lbs.-pie
7/8 Diám.	190 Lbs.-pie	302 Lbs.-pie	440 Lbs.-pie	473 Lbs.-pie	503 Lbs.-pie
1 Diám.	282 Lbs.-pie	466 Lbs.-pie	660 Lbs.-pie	714 Lbs.-pie	771 Lbs.-pie

ANEXO B

TABLA 1. PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304

IBCA
IVAN BOHMAN C.A.

AISI 304
Acero Inoxidable - Tolerancia h9-h10

GENERALIDADES: Acero inoxidable austenítico al cromo-níquel de mediana resistencia. No magnéticos y no endurecen por tratamiento térmico. Al aplicarse trabajo en frío pueden lograr un ligero magnetismo y endurecimiento. Calidad especial para soldar, excelentes características de formado debido a su alta ductilidad y resistencia al impacto.

Se puede disponer del material 304-L, indicando la L, menor contenido de carbono (≤ 0.030 %), lo que mejora las características de soldabilidad y resistencia a la corrosión principalmente

ANALISIS TIPICO %

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
AISI 304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.03	8.00-10.50	18.00-20.00

EQUIVALENCIAS

AISI	304
SAE	30304
DIN	X5CrNi18 10
W.-Nr.	1.4301
ASTM	A240
BS	304 S 15

PROPIEDADES MECANICAS

Propiedades	
Esfuerzo de cedencia, N/mm^2	276
Resistencia a la Tensión, N/mm^2	586
Elongación, A5	60%
Reducción de área, Z	65-70%
Dureza	150 HB

APLICACIONES

Se utiliza principalmente para el procesamiento de alimentos y químicos . Entre las sustancias a las cuales resiste tenemos:

QUIMICOS	ALIMENTOS
Acido Oleico	Jugos de Fruta
Carbonato de Sodio	Leche
Alcohol Etílico y Metílico	Cerveza
Cloroformo	Miel
Agua marina	Mayonesa
Gasolina	Café
Acetona	Vinagre
Glicerina	Salsa de Tomate
Fuel-oil	Azúcar
DDT	Gelatina
Agua Potable	Cola

Nota: Con respecto a los ácidos, se deben tomar en cuenta las concentraciones de los mismos y sus temperaturas deacuerdo a las curvas de corrosión

Entre los usos que se pueden dar al acero inoxidable 304 tenemos: enfriadores, tanques de almacenamiento, recipientes para químicos, intercambiadores de calor, implementos para el manejo de alimentos, tintas, ejes para bombas, etc.

TRATAMIENTO TERMICO

Recocido: Deben ser recocidos a aproximadamente 1050-1070 °C, sosteniéndolos a esta temperatura durante un periodo corto, aproximadamente 1/2 hora y después enfriándolos rapidamente, de preferencia en agua. El enfriamiento en aire debe hacerse solamente en casos que se trate de un material muy delgado y no es para barras.

Temple: Los aceros inoxidables austeníticos no tienen la característica de templarse
Forja: 1200 °C

TABLA 2. PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE AISI 304 (CONTINUACIÓN)

IVAN BOHMAN C.A.

SOLDABILIDAD: Utilizar electrodos AWS E308L-17. No se requiere tratamiento térmico de alivio de tensiones, si no se especifica lo contrario. Recomendamos nuestros electrodos ESAB OK 61.30 o Elefante KST-308-L.

Si el acero inoxidable 304 se utiliza en el rango de temperatura de 420-820 °C, se puede presentar el fenómeno de corrosión intercristalina debido a la precipitación de carburos.

MEDIDAS EN STOCK

REDONDO

mm	PULGADAS	PESO APROX. kg/m
4.76	3/16	0.15
6.35	1/4	0.3
7.94	5/16	0.4
9.52	3/8	0.6
12.70	1/2	1.0
15.87	5/8	1.6
19.05	3/4	2.3
22.23	7/8	3.1
25.4	1	4.1
28.58	1 1/8	5.1
31.75	1 1/4	6.3
38.10	1 1/2	9.1
44.45	1 3/4	12.4
50.80	2	16.2
57.15	2 1/4	20.5
63.50	2 1/2	25.3
69.85	2 3/4	30.6
76.20	3	36.5
88.90	3 1/2	49.6
101.60	4	64.8
114.30	4 1/2	82.0
127.00	5	101.3
139.70	5 1/2	124.0
152.40	6	145.9

PLATINA

mm	APROX. PULGADAS	PESO APROX. kg/m
3.0x50.0	1/8x1 31/32	1.2
3.17x19.05	1/8x3/4	0.5
3.17x25.4	1/8x1	0.6
3.17x38.1	1/8x1 1/2	1.0
3.20x32.0	1/8x1 1/4	0.8
3.50x31.75	9/64x1 1/4	0.9
6.35x31.75	1/4x1 1/4	1.6
6.35x38.0	1/4x1 1/2	1.9
6.35x25.0	1/4x1	1.3
6.35x51.0	1/4x2	2.6
6.35x57.0	1/4x2 1/4	2.9
9.0x38.0	23/64x1 1/2	2.7
9.52x25.4	3/8x1	1.9
9.52x38.1	3/8x1 1/2	2.7
9.52x50.0	3/8x50.0	3.8
9.52x80.8	3/8x3 5/32	3.9
11.0x30.0	7/16x1 3/16	2.6
11.0x40.0	7/16x1 9/16	3.5
12.7x38.1	1/2x1 1/2	3.9
12.7x50.8	1/2x2	5.2

BARRA PERFORADA

mm	PESO APROX. kg/m
40x20	7.8
50x25	12.1
56x28	15.1
63x32	18.9
71x36	23.9
75x40	25.7
80x45	28.0
90x63	27.2
100x71	32.8

HEXAGONAL

PULGADAS	PESO APROX. Kg/m
1/2	1.0
5/8	1.6
3/4	2.3
7/8	3.2
1	4.2
1 1/4	6.5

ANEXO C

TABLA 1. ENSAYO DE TENSIÓN DE LA RESINA POLIESTER

espoch

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

E N S A Y O D E T R A C C I Ó N

MATERIAL: PLACA DE PLÁSTICO

TIPO DE MATERIAL: RECINA POLIESTER

SOLICITADO POR: ING. GONZALO LÓPEZ

TESIS: ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LOS MÉTODOS FOTOELÁSTICO Y DE ELEMENTOS FINITOS PARA MEJORAR EL DISEÑO MECÁNICO DE PIEZAS

FECHA DE ENSAYO: 10-dic-12

RESULTADOS DEL ENSAYO: **NORMA UTILIZADA** NTE INEN 2043:95

MUESTRA Nº	**2**
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	**REC. POL. Nº 1**
CARACTERISTICA	LISA
ESPESOR [mm]	3,4
ANCHO [mm]	13
SECCIÓN TRANSVERSAL [cm^2]	0,44
MODULO DE ELASTICIDAD [Kg/cm^2]	3,8,E+04
CARGA MAXIMA [Kg]	268
ESFUERZO MAXIMO [Kg/cm^2]	606,33

Riobamba, 10-dic-12

OBSERVACIONES:

Revisado por:

Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES

TABLA 2. ENSAYO DE TENSIÓN DEL ACRÍLICO

espoch

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECANICA
LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES

ENSAYO DE TRACCIÓN

MATERIAL: PLACA DE PLÁSTICO

TIPO DE MATERIAL: ACRILICO

SOLICITADO POR: ING. GONZALO LÓPEZ

TESIS: ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LOS MÉTODOS FOTOELÁSTICO Y DE ELEMENTOS FINITOS PARA MEJORAR EL DISEÑO MECÁNICO DE PIEZAS

FECHA DE ENSAYO: 10-dic-12

RESULTADOS DEL ENSAYO: **NORMA UTILIZADA:** NTE INEN 2043:95

MUESTRA N°	**1**
DESIGNACIÓN DEL MATERIAL	**ACRILICO N° 1**
CARACTERISTICA	LISA
ESPESOR [mm]	2,9
ANCHO [mm]	12,8
SECCION TRANSVERSAL [cm^2]	0,37
MODULO DE ELASTICIDAD [Kg/cm^2]	3,5,E+04
CARGA MAXIMA [Kg]	84
ESFUERZO MAXIMO [Kg/cm^2]	226,29

Riobamba, 10-dic-12

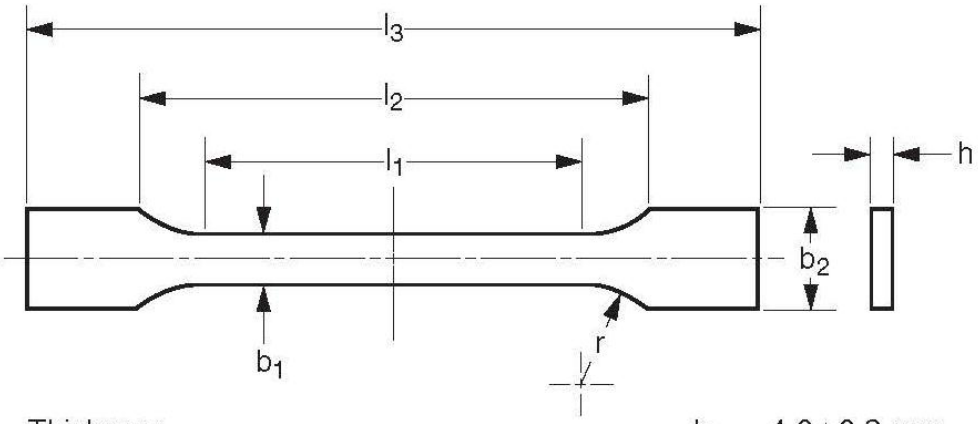
OBSERVACIONES:

Revisado por:

Ing. Anibal Viñán B. M.Sc.
PROFESOR RESPONSABLE, LABORATORIO
RESISTENCIA DE MATERIALES

ANEXO D

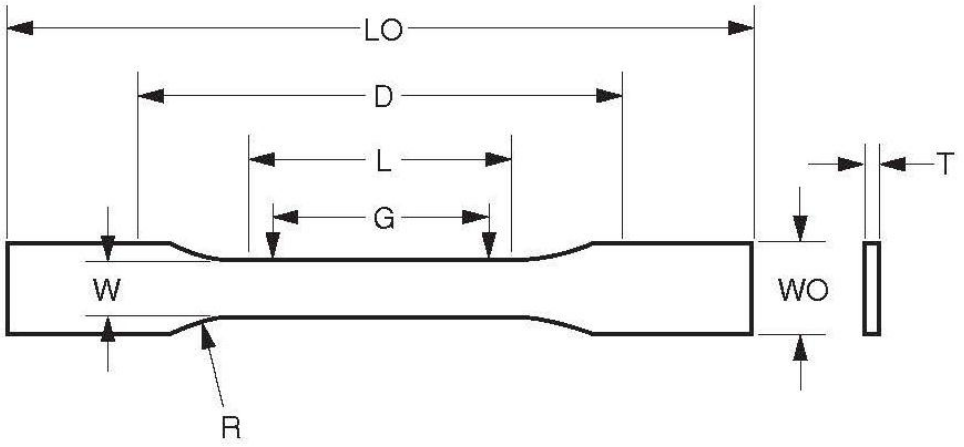
TABLA 1. PROBETA NORMALIZADA PARA ENSAYO DE TENSIÓN



Thickness	h	4.0±0.2 mm
Overall length	l_3	≥150 mm[1]
Length of narrow parallel-sided portion	l_1	80±2 mm
Distance between broad parallel-sided portion	l_2	104 to 113 mm
Width at ends	b_2	20.0±0.2 mm
Width of narrow portion	b_1	10.0±0.2 mm
Radius	r	20 to 25 mm

[1] For some materials, the length of the tabs may need to be extended to prevent breakage or slippage in the jaws of the testing machine.

Figure 11.3 ISO 3167 multipurpose test specimen.



Thickness	T	3.2±0.4 mm
Length over-all	LO	165 mm
Length of narrow section	L	57±0.5 mm
Gage length	G	50±0.25 mm
Distance between grips	D	115±5 mm
Width over-all	WO	19 mm (+6.4, 0)
Width of narrow section	W	13±0.5 mm
Radius of fillet	R	76 ±1 mm

Figure 11.4 ASTM D 638 type I specimen.

ANEXO E

NORMA ASTM D4093 – 95 (PÁGINA 9)

TABLE 1 Precision[A]

Material	Nominal Thickness, in.	Measured Retardation Mean, nm	S_r, nm	S_R, nm	I_r, nm	I_R, nm
Cellulose triacetate	0.0055[B]	60	5.8	8.3	16.3	23.6
PETG 6763 copolyester	0.040	353	8.6	31.5	24.3	89.1
Polypropylene	0.00135[C]	431	10.5	35.2	29.7	99.6
Polycarbonate	0.231	766	14.0	40.0	39.6	113
Cast epoxy	0.084	1091	11.5	33.6	32.5	95.1

[A] S_r is the within-laboratory standard deviation of the average (median/other function).
S_R is the between-laboratories standard deviation of the average (median/other function).
$I_r = 2.83\ S_r$.
$I_R = 2.83\ S_R$.
[B] Stack of five, total thickness 0.0275 in.
[C] Stack of five, total thickness 0.0675 in.

way of considering the approximate precision of this test method. The data in Table 1 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories.

12.2.1 Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 12.3-12.3.3 would then be valid for such data.

12.3 *Concept of I_r and I_R* —If S_r and S_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were averages from testing five specimens:

12.3.1 *Repeatability, I_r* —In comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, the two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material.

12.3.2 *Reproducibility, I_R* —In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment on different days, the two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material.

12.3.3 Any judgment in accordance with 12.3.1 and 12.3.2 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

12.4 *Bias*—Bias is systematic error which contributes to the difference between a test result and a true (or reference) value. There are no recognized standards on which to base an estimate of bias for this test method.

13. Keywords

13.1 birefringence; photoelastic measurements; photoelastic retardation; strain; strain-optical constant; transparent plastics

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

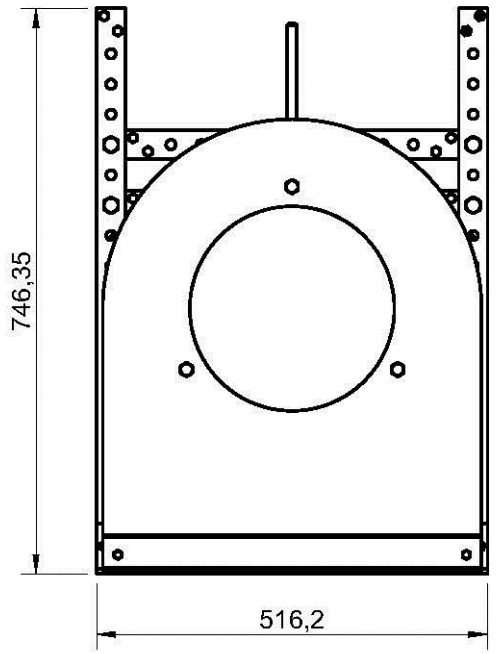
X1. SEQUENCE OF COLORS PRODUCED IN A DARK-FIELD WHITE-LIGHT POLARISCOPE

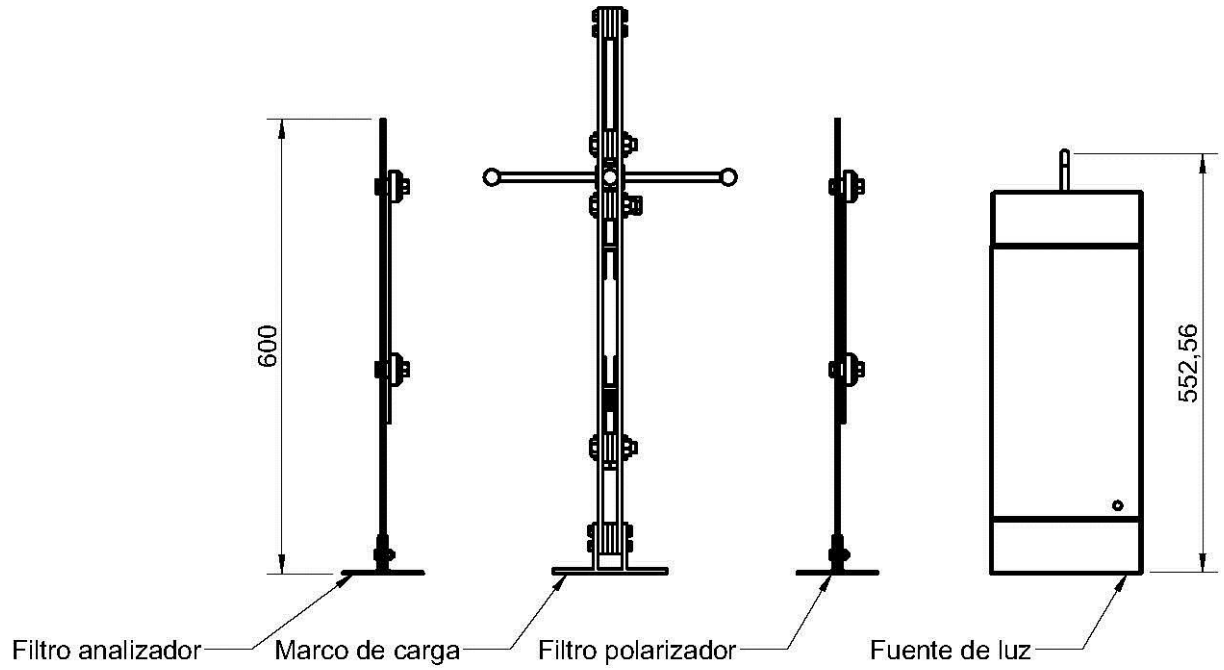
Color	Retardation, nm[A]	Fringe Order, δ/λ
Black	0	0
Gray	160	0.28
White	260	0.45
Yellow	350	0.60
Orange	460	0.79
Red	520	0.90
Tint of Passage 1[B]	577	1.00
Blue	620	1.06
Blue-green	700	1.20
Green-Yellow	800	1.38
Orange	940	1.62
Red	1050	1.81
Tint of Passage 2[B]	1150	2.00
Green	1350	2.33
Green-Yellow	1450	2.50
Pink	1550	2.67
Tint of Passage 3[B]	1730	3.00
Green	1800	3.10
Pink	2100	3.60
Tint of Passage 4[B]	2300	4.00
Green	2400	4.13

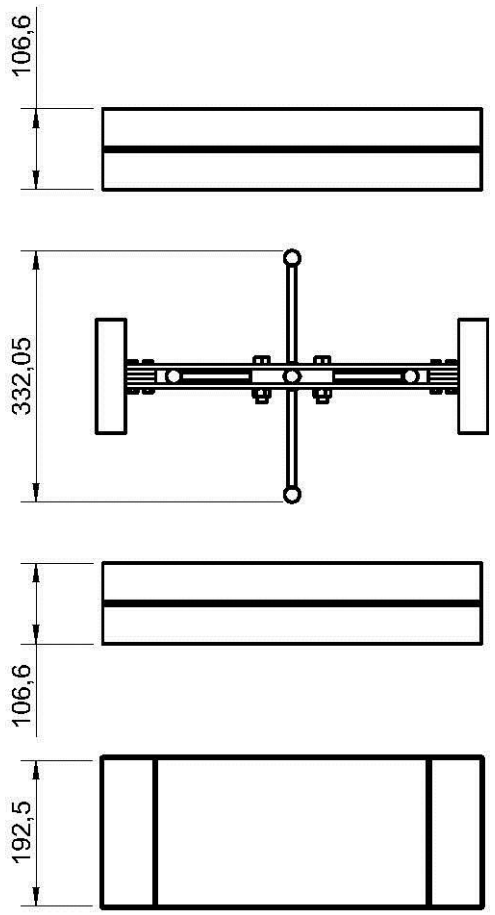
[A] The above sequence is typical for a colorless transparent material. A tinted plastic will change the appearance considerably but will not affect the sequence of the basic colors.
[B] The tint of passage is a sharp dividing zone occurring between red and blue in the first-order fringe, red and green in the second-order fringe, and pink and green in the third-, fourth-, and fifth-order fringes. Beyond five fringes, white-light analysis is not adequate.

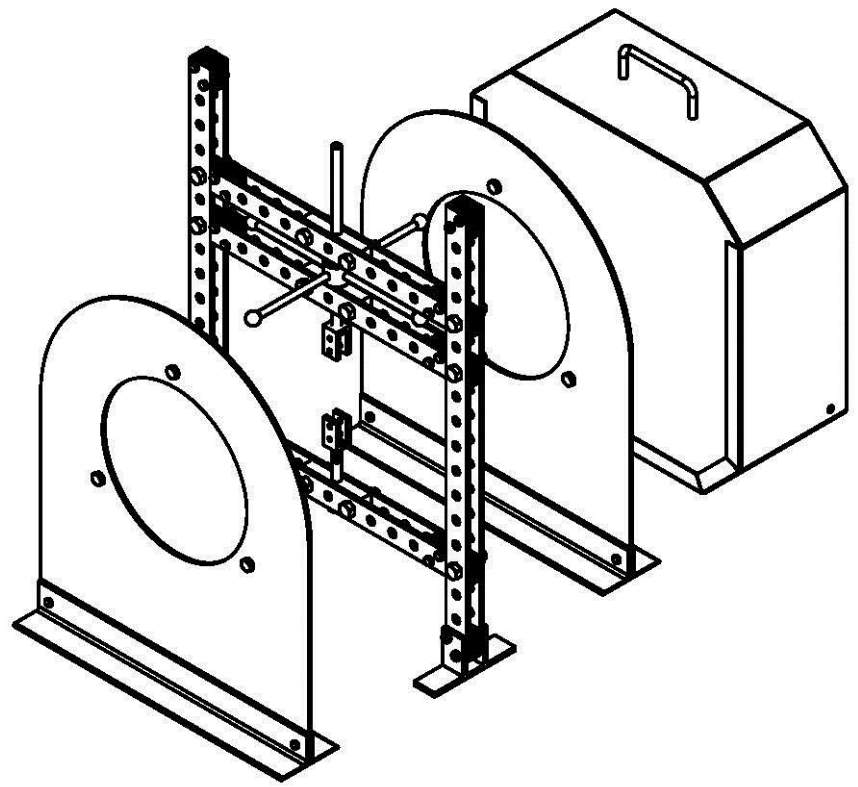
ANEXO F

PLANOS

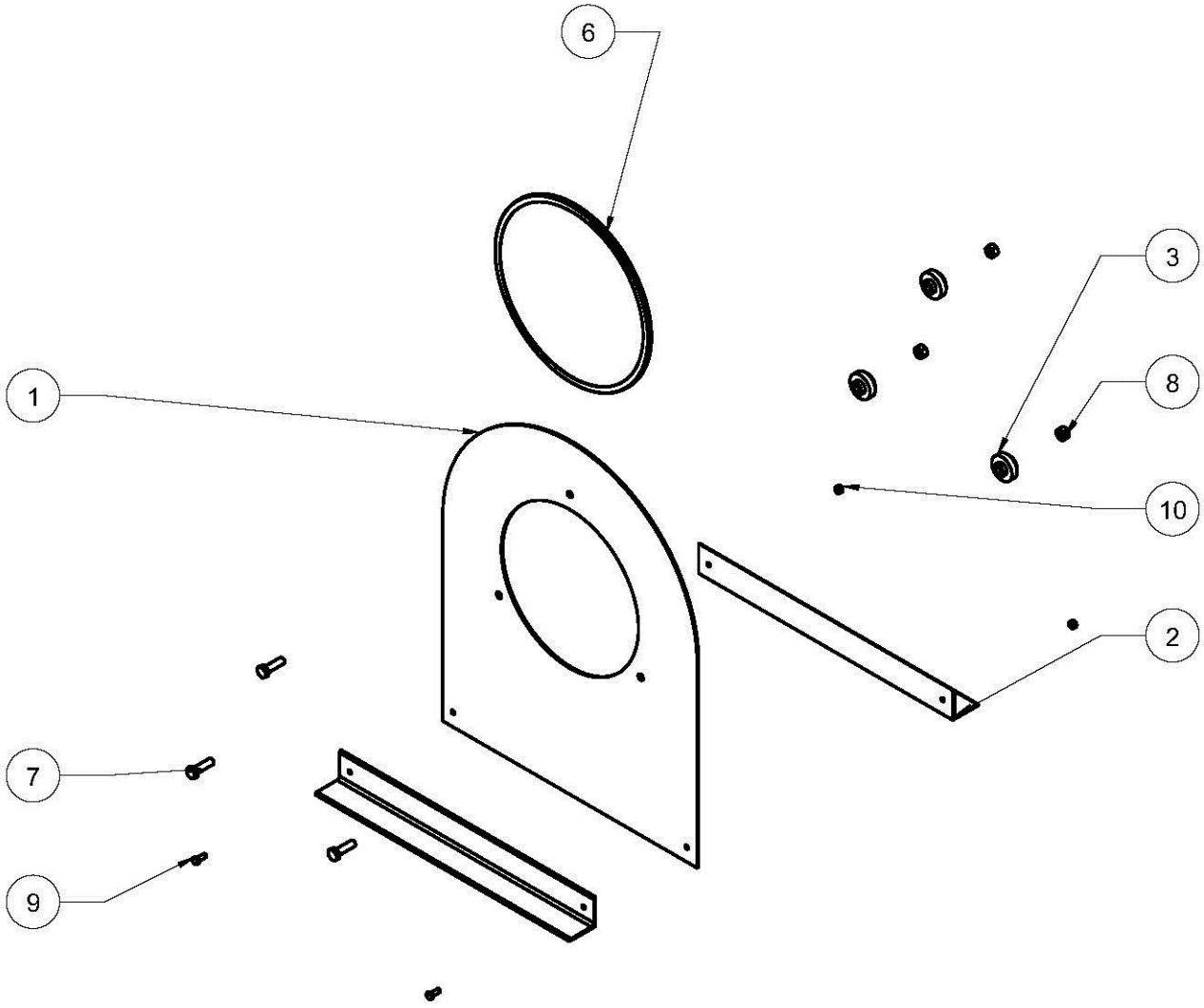








				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	36,61 Kg	Varios	
					Fecha	Nombre	
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.	Denominación: CONJUNTO — Escala: 1:10
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
				UTA Ing. Mecánica			Número del dibujo: 01 de 18
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				(Sustitución)



N° de piezas	Denominación	N° de norma/Dibujo	Material	N° de orden	N° del Modelo/semiproducto	Peso kg/pieza	Observaciones
2	Tuerca	M6	SAE 8	8	Paso: 1	-	Adquirido
3	Tuerca	M10	SAE 8	7	Paso: 1,5	-	Adquirido
2	Perno	M6x16	SAE 8	6	Paso: 1	-	Adquirido
3	Perno	M10x35	SAE 8	5	Paso: 1,5	-	Adquirido
1	Filtro	∅ 300	-	4	Polarizador - Analizador	-	Armado
3	Guía filtro	∅ 40x22	Aluminio	3	Eje	0,048	Torneado
2	Apoyo placa	2x2x1/4 pulg.	Ac. A36	2	Angulo	1,2	Adquirido
1	Placa portafiltro	1/8 pulg.	Ac. A36	1	Plancha	5,27	-

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

Tolerancia: ± 1

(Peso): 8,13 Kg

Materiales: Aluminio 6061, Acero ASTM A36, Vidrio

	Fecha	Nombre
Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.

UTA
Ingeniería Mecánica

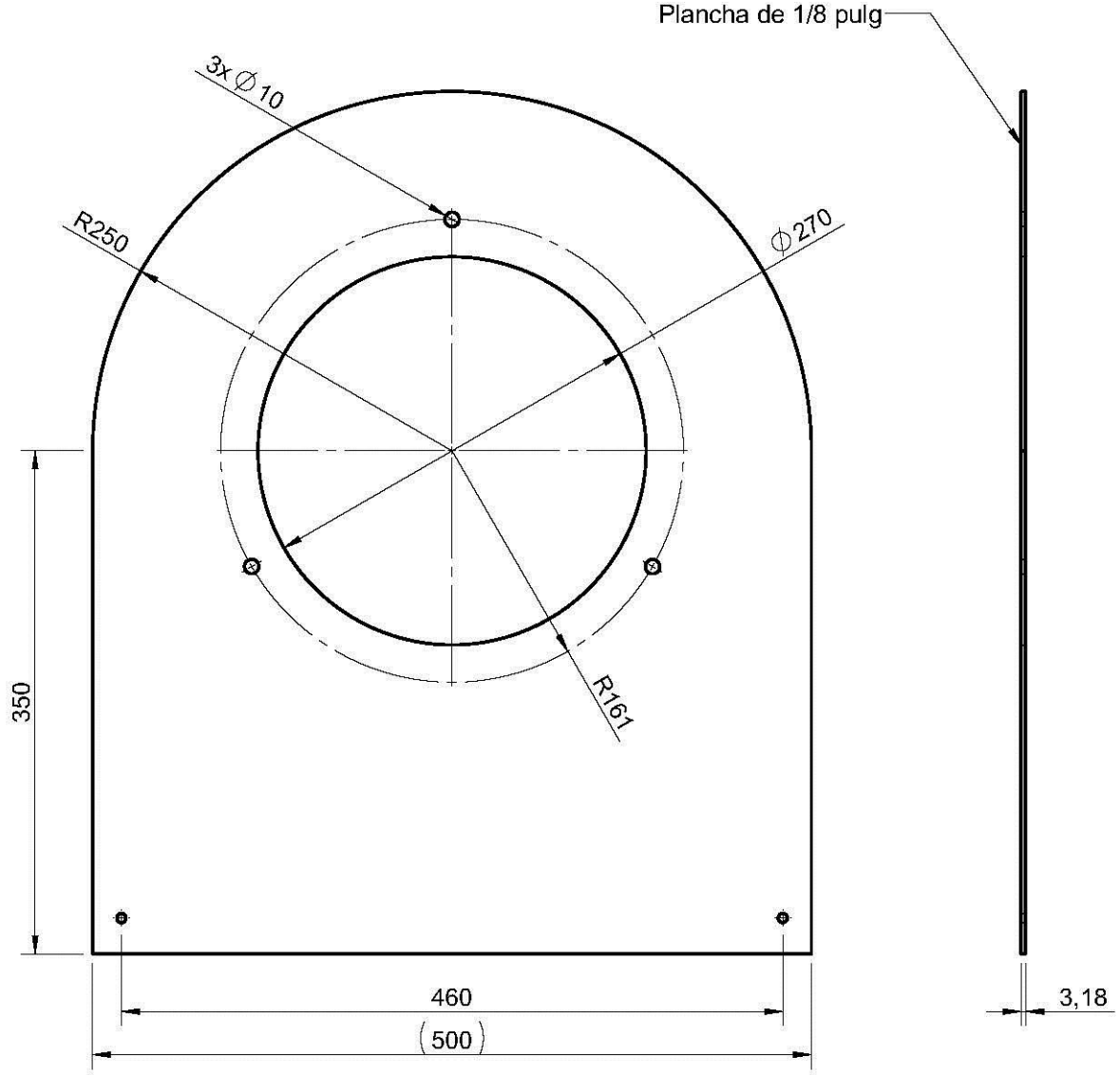
Denominación:

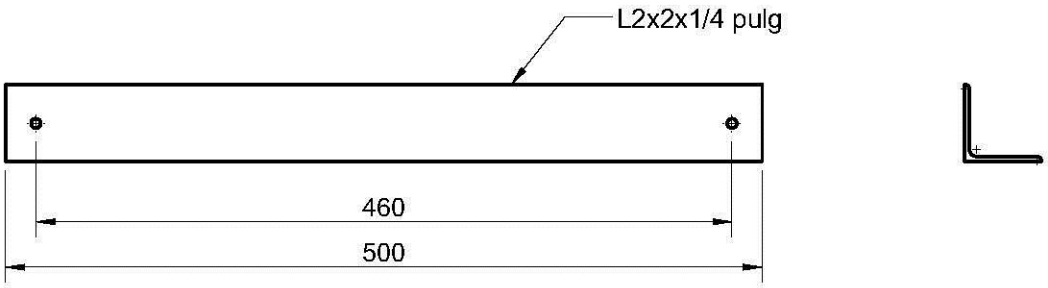
PORTAFILTRO

Escala: 1:10

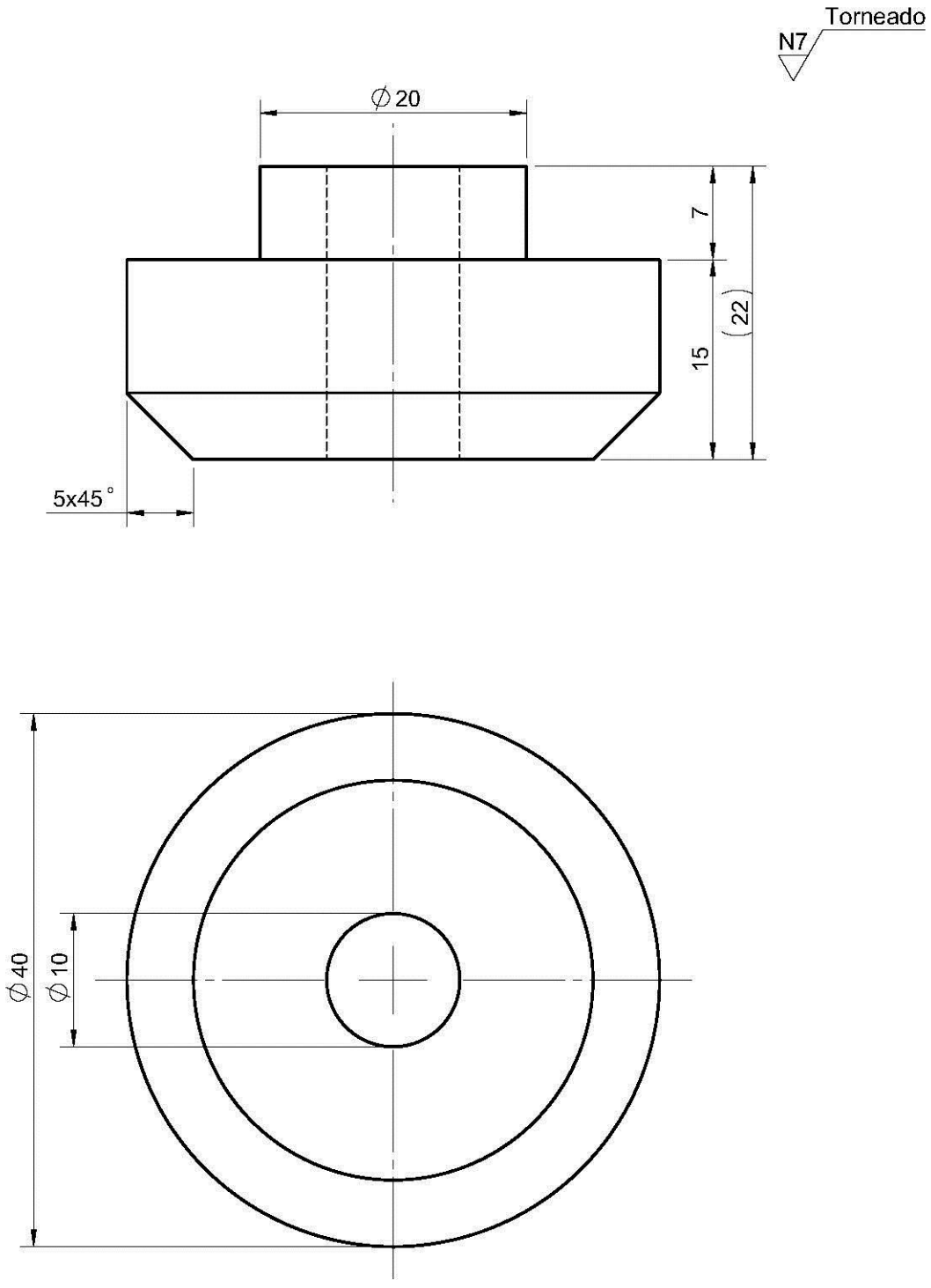
Número del dibujo: 02 de 18

(Sustitución)





				Tolerancia		(Peso)	Materiales:
				±0,1		-	Acero ASTM A36
					Fecha	Nombre	Denominación:
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.	PLACA Y APOYO
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.	Escala: 1:10
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
				UTA Ing. Mecánica			Número del dibujo: 03 de 18
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				(Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	0,048 Kg	Aluminio 6061
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

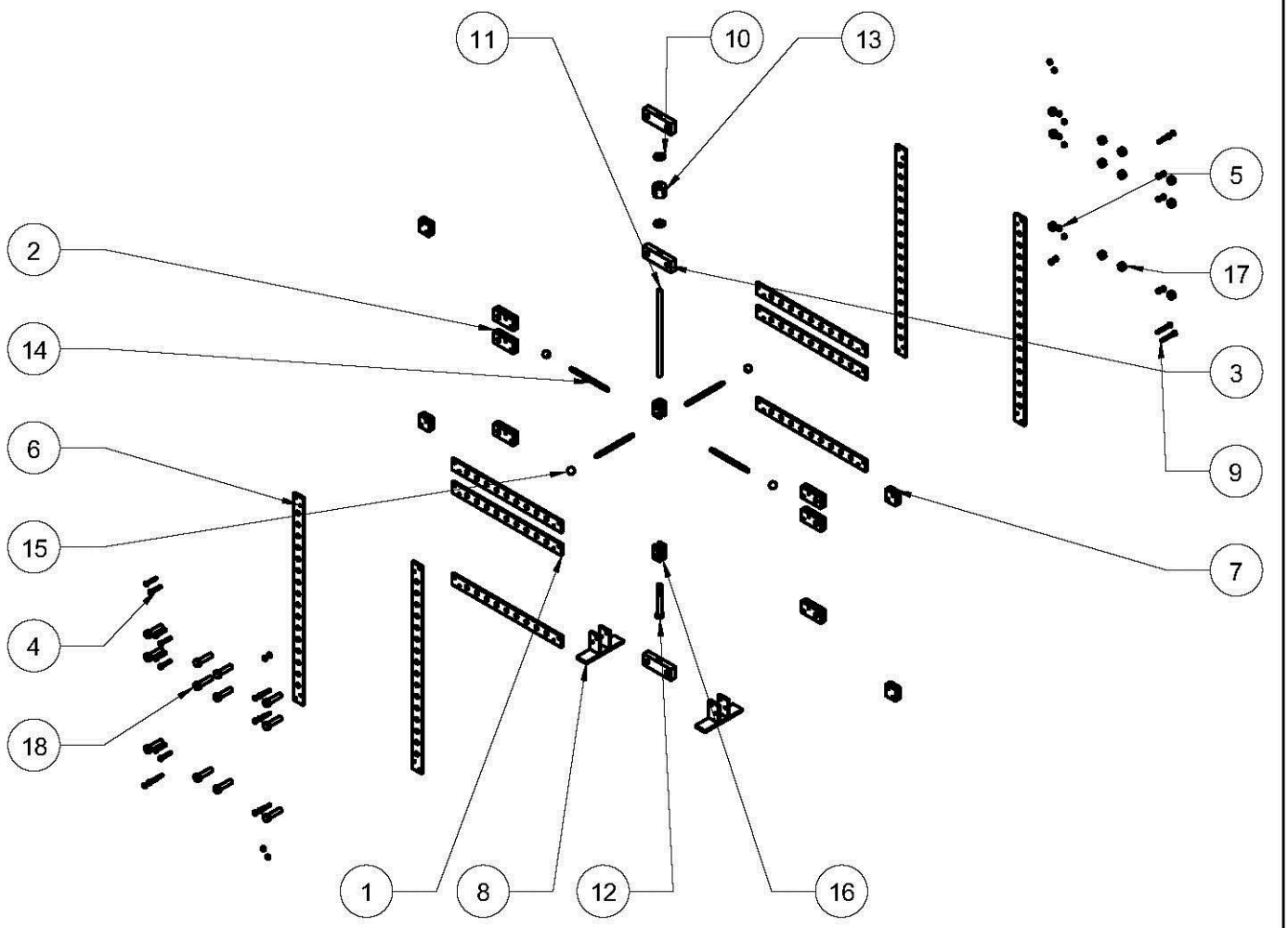
Denominación:

GUÍA FILTRO

Escala: 2:1

Número del dibujo: 04 de 18

(Sustitución)



N° de piezas	Denominación	N° de norma/Dibujo	Material	N° de orden	N° del Modelo/semiproducto	Peso kg/pieza	Observaciones
12	Perno	1/2x2 pulg.	Ac. SAE 8	18	13 hilos/pulg.	-	-
12	Tuerca	1/2 pulg.	Ac. SAE 8	17	13 hilos/pulg.	-	-
2	Dispositivo de enganche	1 1/2x1/4 pulg.	Ac. 304	16	Pletina	0.095	Soldado
4	Extremo palanca	∅ 20	Ac. 304	15	-	0,03	Mecanizado
4	Palanca	∅ 10	Ac. 304	14	Eje	0,089	Mecanizada
1	Tuerca	1/2 pulg.	Ac. SAE 8	13	13 hilos/pulg.	-	-
1	Perno	1/2x4 pulg.	Ac. SAE 8	12	13 hilos/pulg.	-	-
1	Tornillo de potencia	1/2 pulg	Ac. SAE 8	11	13 hilos/pulg.	-	Longitud = 30 cm
2	Arandela	-	Bronce	10	-	0,015	-
4	Perno	1/4x2 pulg.	Ac. SAE 8	9	28 hilos/pulg.	-	-
2	Apoyo	1 1/2x1/4 pulg.	Ac. 304	8	Pletina	0,51	Soldado
12	Enlace	1 1/2x1/4 pulg.	Ac. 304	7	Pletina	0,074	Taladrada
4	Columna	1 1/2x1/4 pulg.	Ac. 304	6	Pletina	1,28	Taladrada
20	Tuerca	1/4 pulg.	Ac. SAE 8	5	28 hilos/pulg.	-	-
16	Perno	1/4x1,5 pulg.	Ac. SAE 8	4	28 hilos/pulg.	-	-
3	Placa de carga	1 1/2x3/4 pulg.	Ac. 304	3	Barra rectangular	0,56	Mecanizada
18	Unión	1 1/2x1/4 pulg.	Ac. 304	2	Pletina	0,14	Taladrada
6	Viga	1 1/2x1/4 pulg.	Ac. 304	1	Pletina	0,79	Taladrada

Edición	Modificación	Fecha	Nombre

Tolerancia: ± 1

(Peso): 17,4 Kg

Materiales: Acero AISI 304, Acero SAE 8

	Fecha	Nombre
Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.

UTA
Ingeniería Mecánica

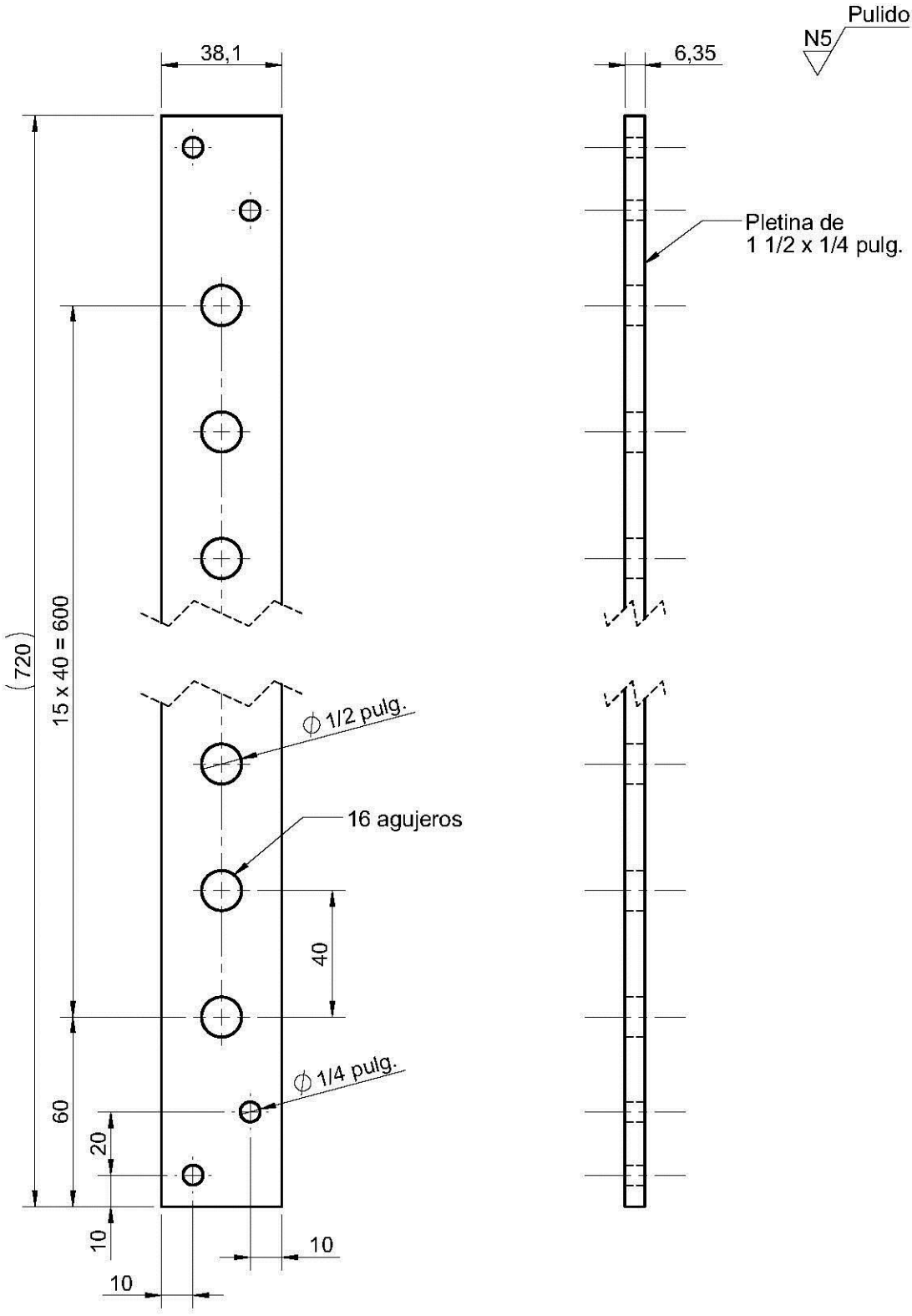
Denominación:

MARCO DE CARGA

Escala: 1:10

Número del dibujo: 05 de 18

(Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	1,28 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

Denominación:

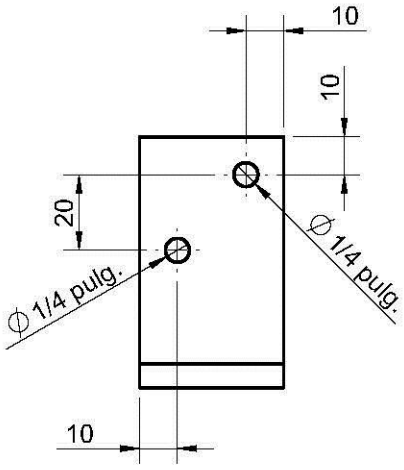
COLUMNA

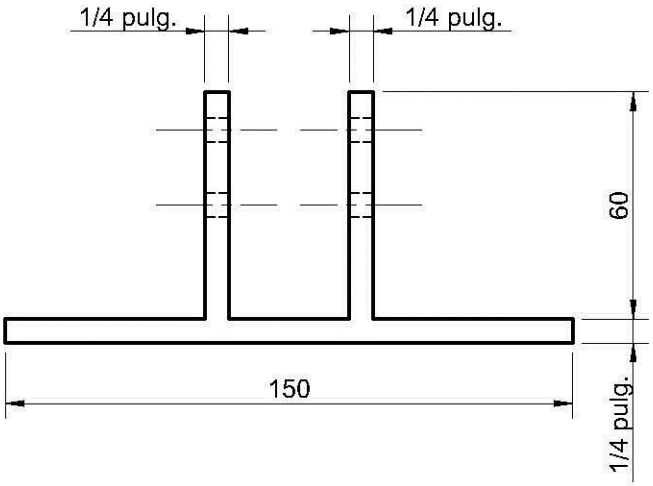
Escala: 1:2

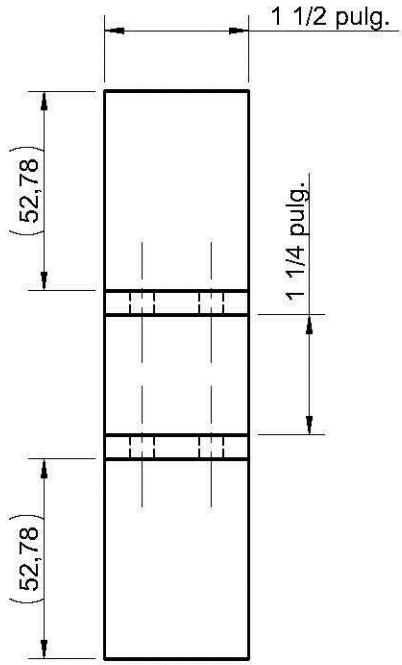
Número del dibujo: 06 de 18

(Sustitución)

Pulido
N5







				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	0,51 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

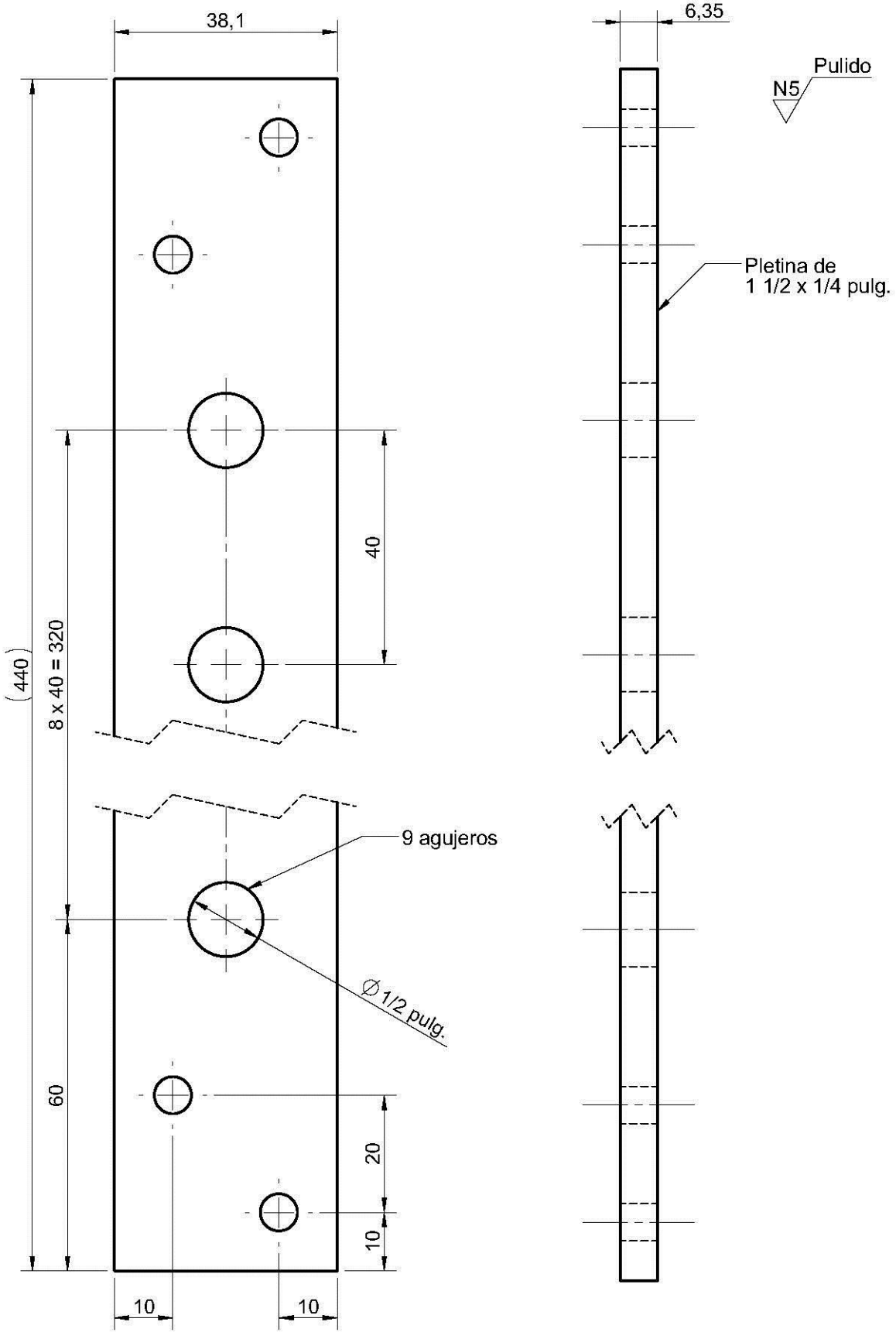
Denominación:

APOYO COLUMNA

Escala: 1:2

Número del dibujo: 07 de 18

(Sustitución)



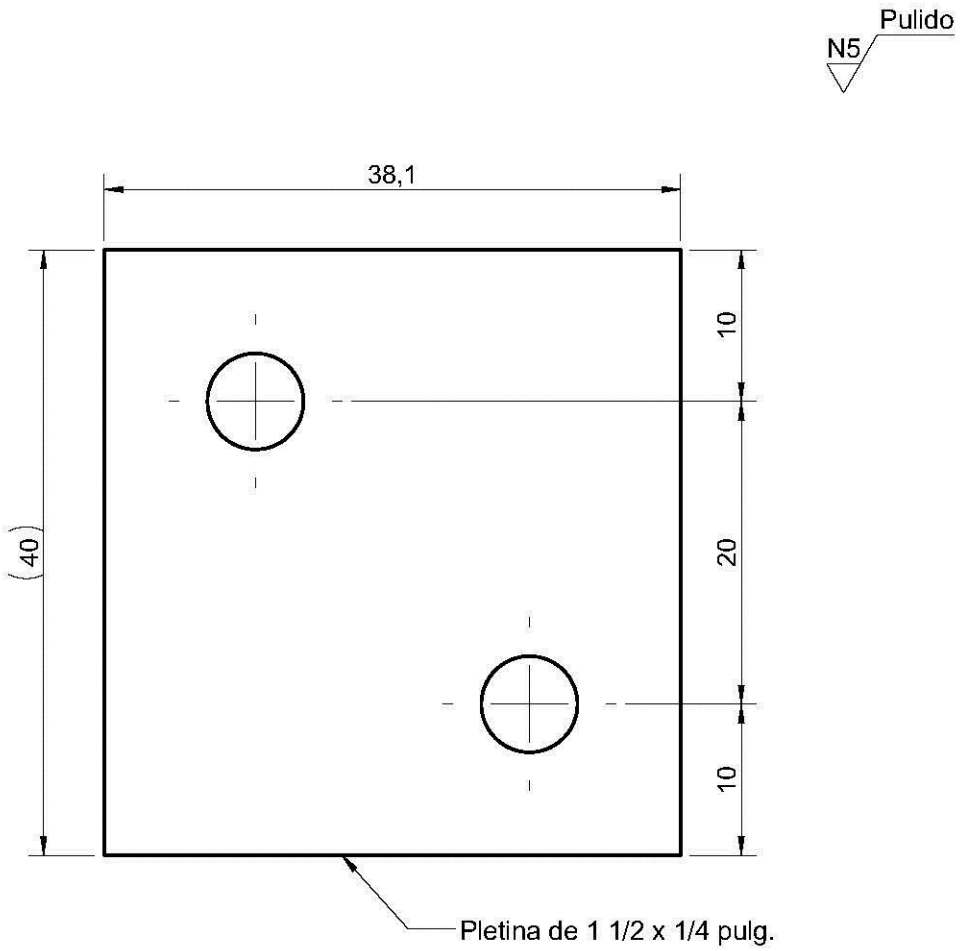
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	0,79 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				UTA Ing. Mecánica		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			

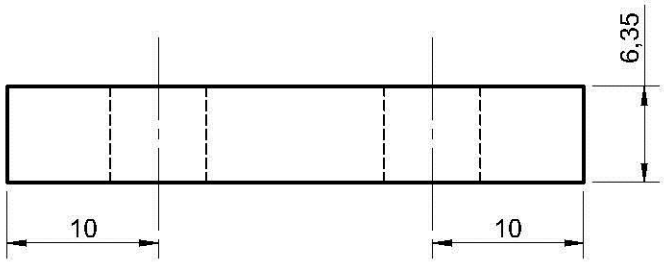
Denominación: VIGA

Escala: 1:1

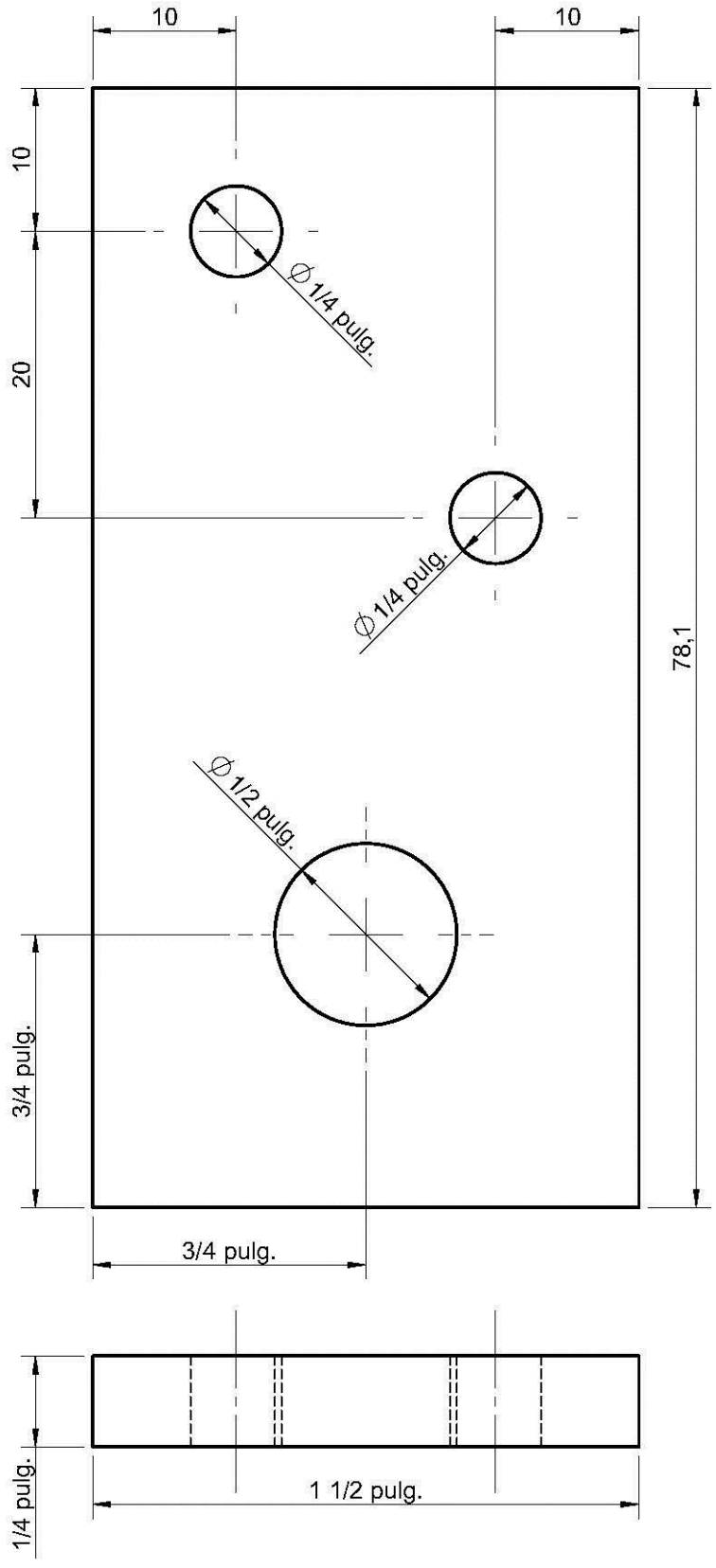
Número del dibujo: 08 de 18

(Sustitución)

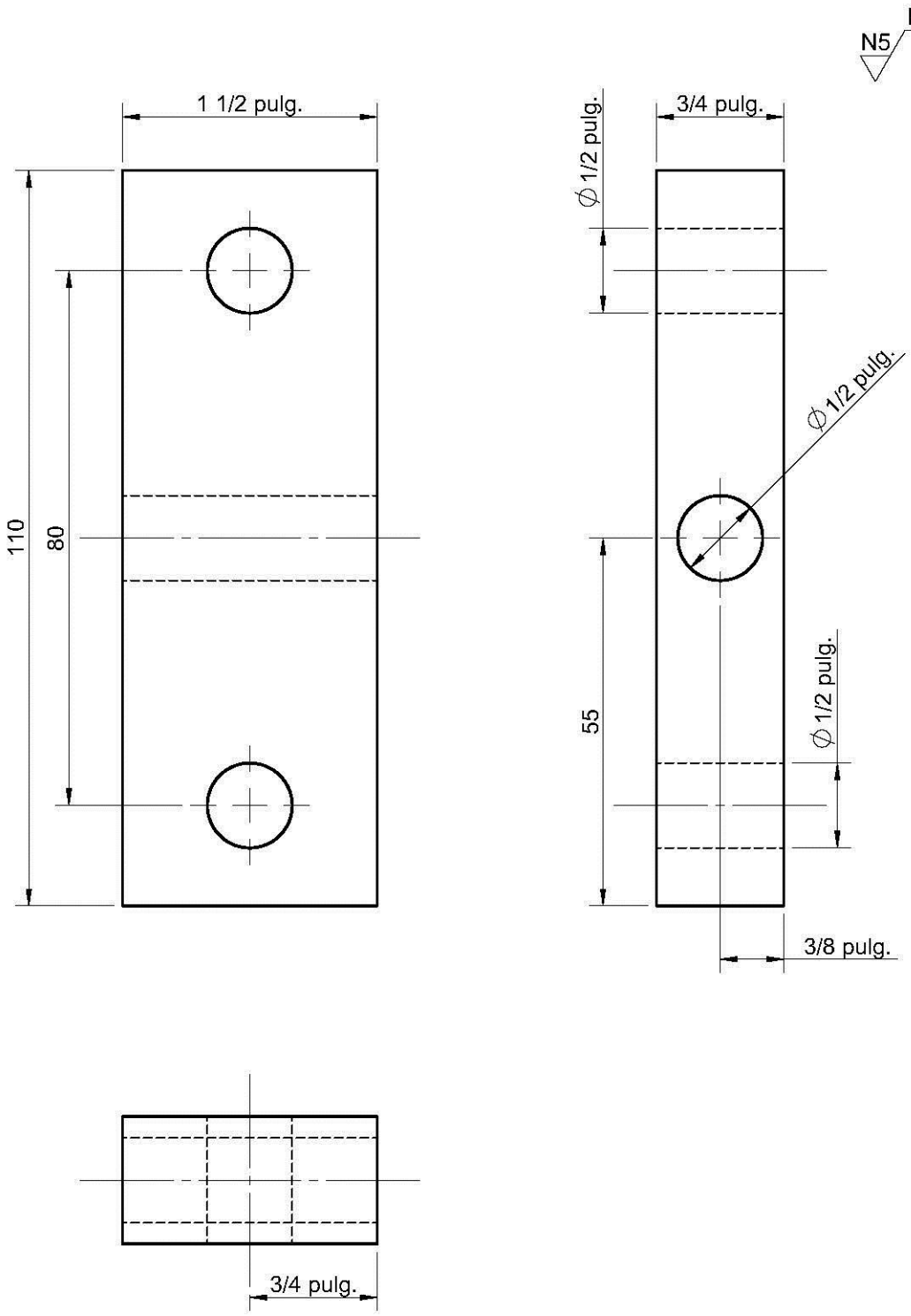




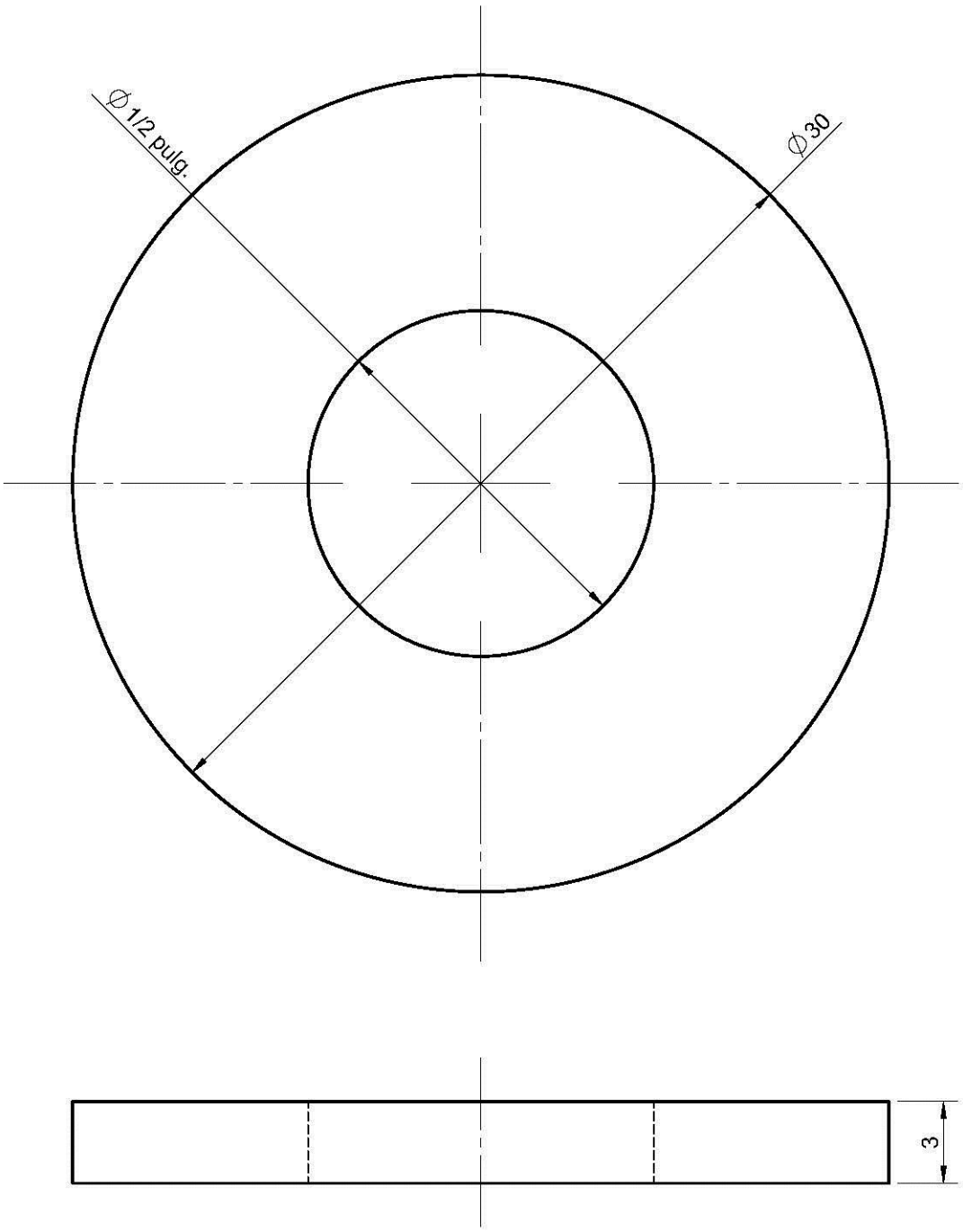
				Tolerancia		(Peso)	Materiales:
				±0,1		0,074 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre	Denominación:
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.	ENLACE
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.	Escala: 2:1
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
				UTA Ing. Mecánica			Número del dibujo: 09 de 18
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				(Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	0,14 Kg	Acero AISI 304	
					Fecha	Nombre	Denominación: UNIÓN — Escala: 2:1
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.	
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 10 de 18	(Sustitución)



				Tolerancia		(Peso)	Materiales:
				±0,1		0,54 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre	Denominación:
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.	PLACA DE CARGA
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.	Escala: 1:1
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica			Número del dibujo: 11 de 18 (Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	0,015 Kg	Bronce
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

Denominación: ARANDELA

Escala: 4:1

Número del dibujo: 12 de 18

(Sustitución)

1	2	3	4

A

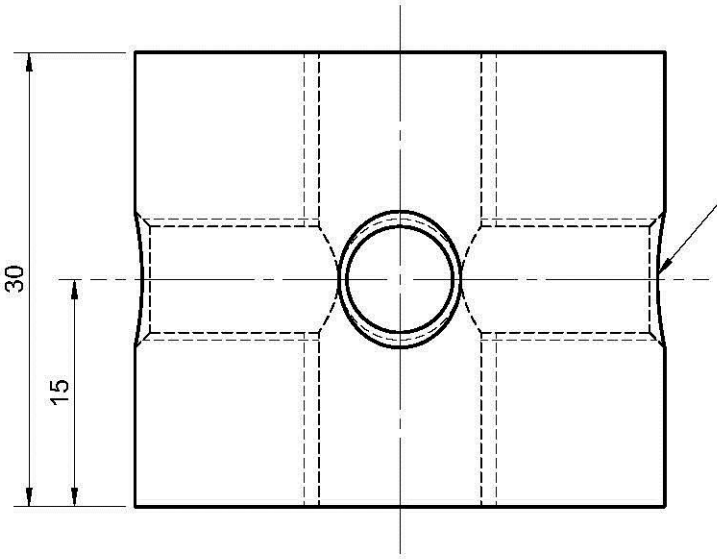
B

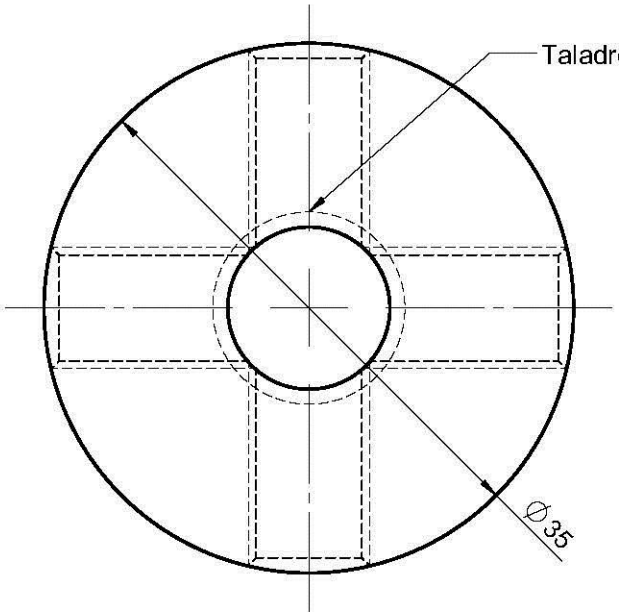
C

D

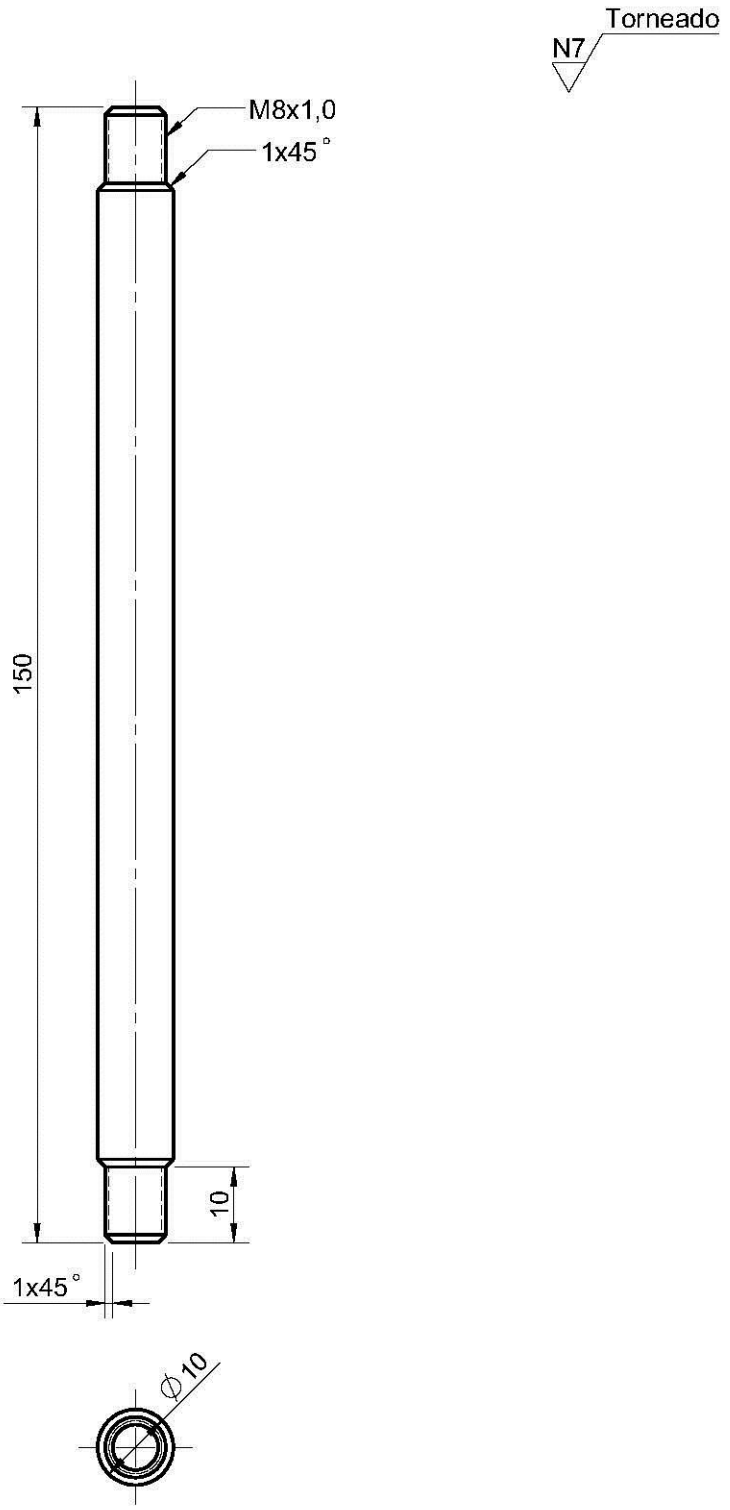
E

Torneado
N7





				Tolerancia		(Peso)	Materiales:
				±0,1		0,19 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre	Denominación:
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.	TUERCA
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.	Escala: 2:1
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
				UTA Ing. Mecánica			Número del dibujo: 13 de 18
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				(Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	0,089 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

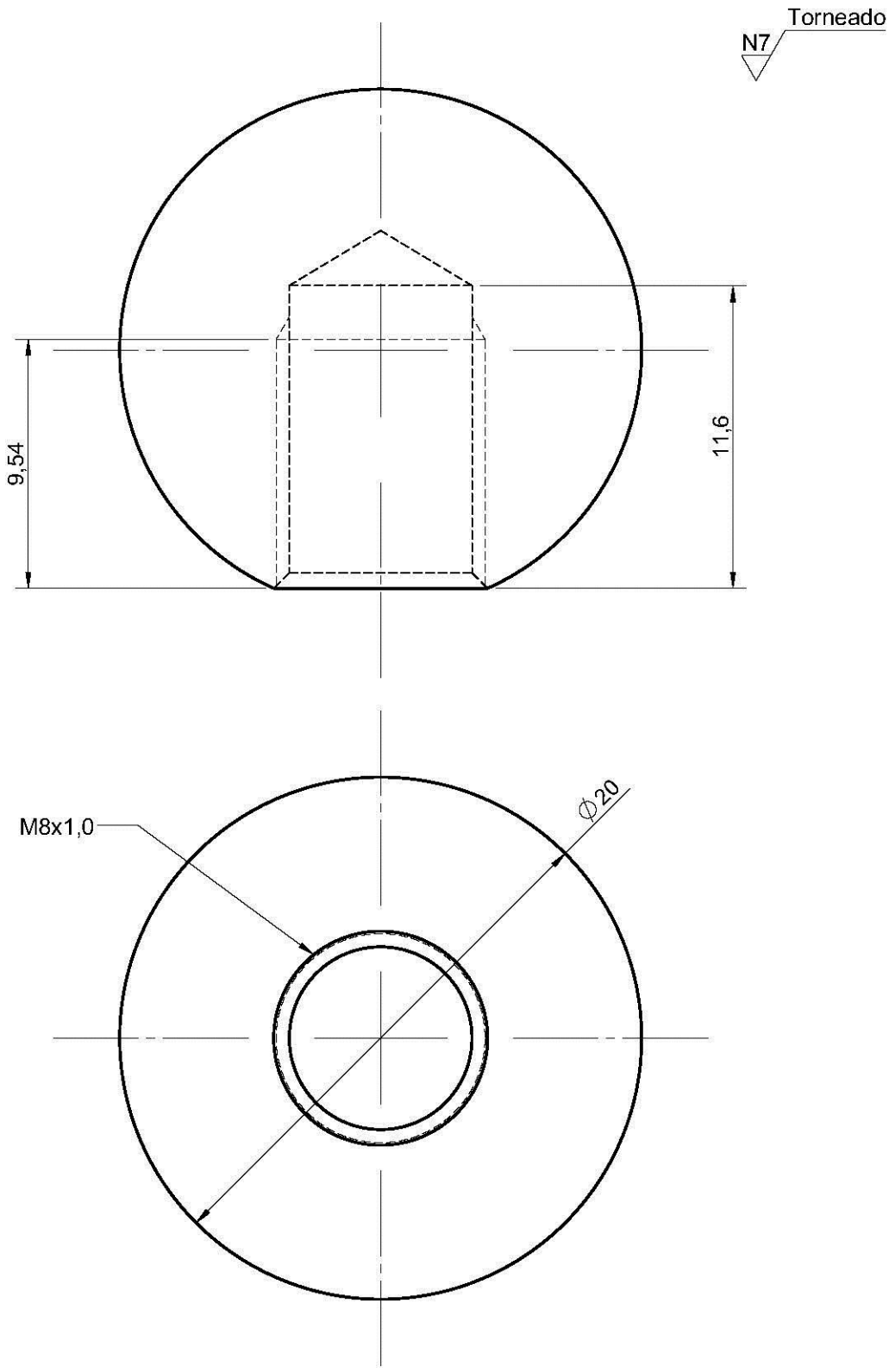
Denominación:

PALANCA

Escala: 1:1

Número del dibujo: 14 de 18

(Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	0,029 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

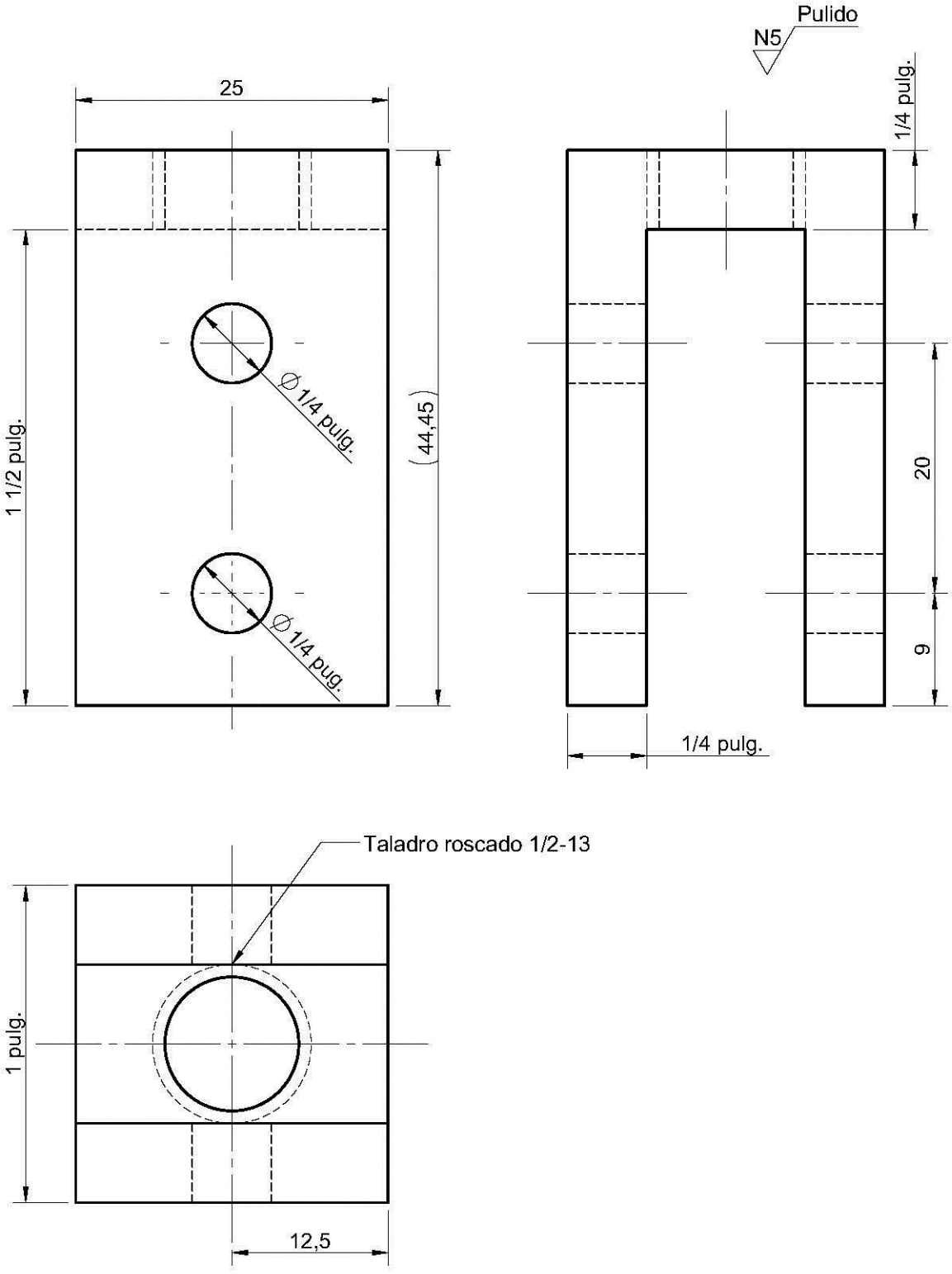
Denominación:

EXTREMO PALANCA

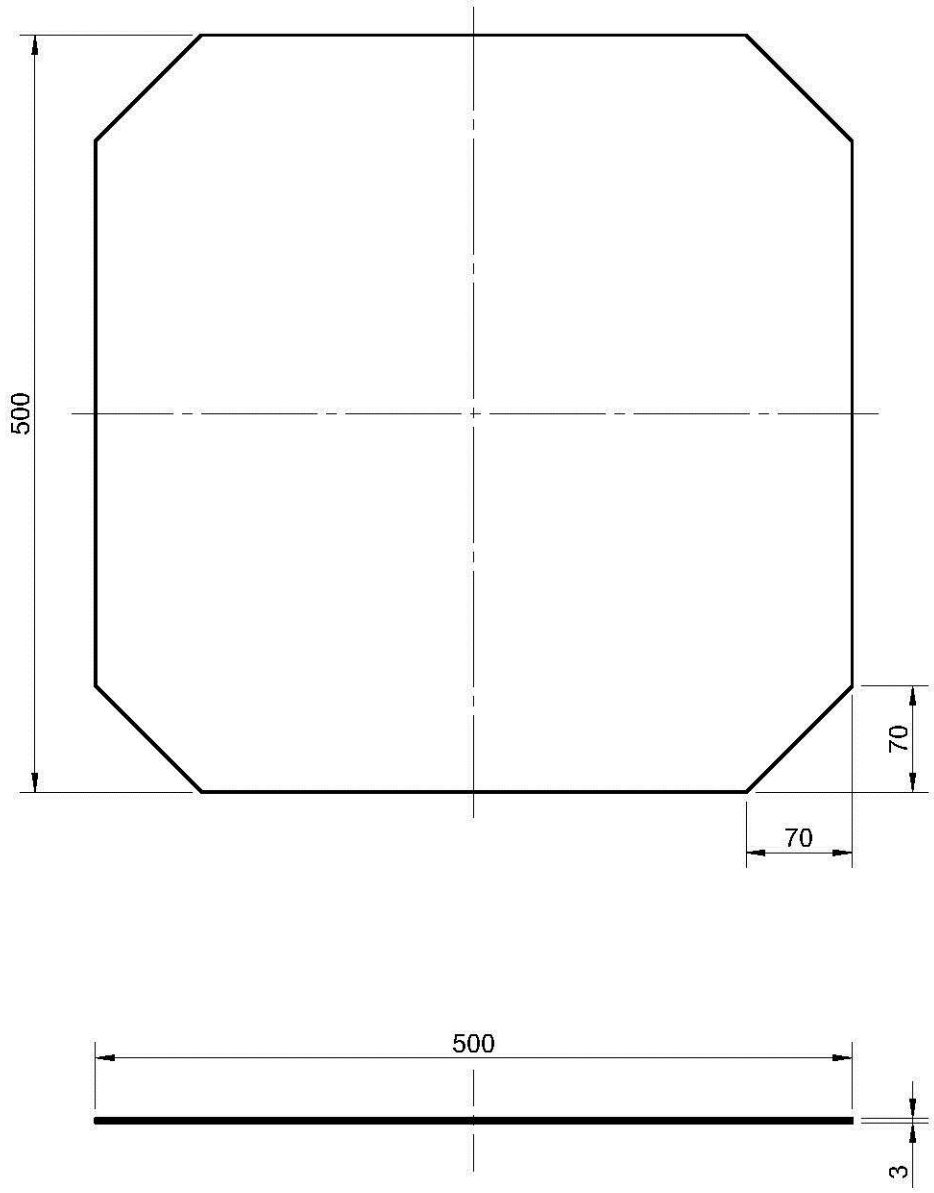
Escala: 4:1

Número del dibujo: 15 de 18

(Sustitución)



				Tolerancia		(Peso)	Materiales:
				±0,1		0,95 Kg	Acero AISI 304
					Fecha	Nombre	Denominación:
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.	DISPOSITIVO CARGA
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.	Escala: 2:1
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.	
				UTA Ing. Mecánica			Número del dibujo: 16 de 18
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				(Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	1,77 Kg	Vidrio
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

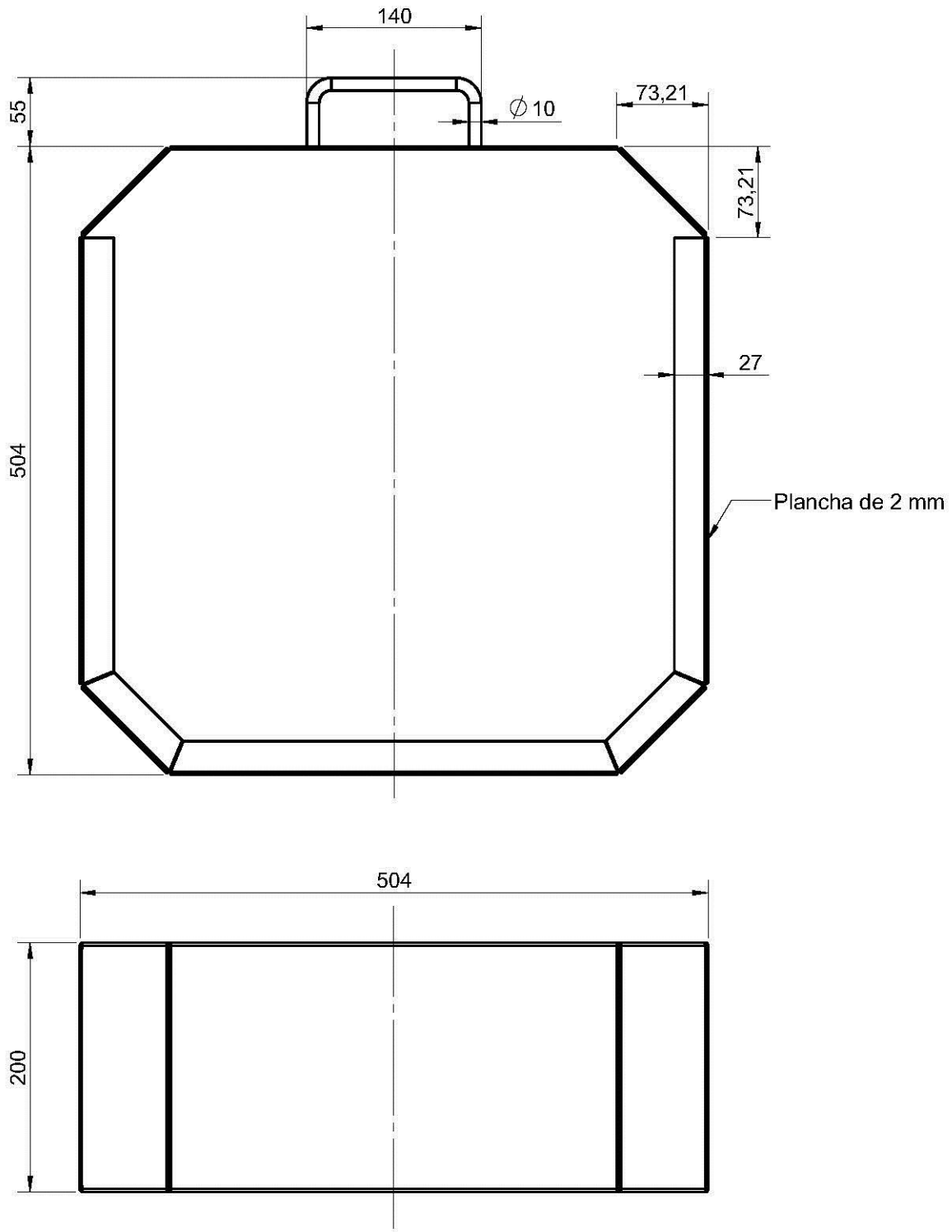
Denominación:

VIDRIO ESMERILADO

Escala: 1:5

Número del dibujo: 17 de 18

(Sustitución)



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:
				±0,1	1,27 Kg	Acero ASTM A36
					Fecha	Nombre
				Dibujó:	28/09/12	Ing. López G.
				Revisó:	28/09/12	Ing. Valle P.
				Aprobó:	28/09/12	Ing. Valle P.
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	UTA Ing. Mecánica		

Denominación:

CARCAZA

Escala: 1:5

Número del dibujo: 18 de 18

(Sustitución)