



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE UNA GRÚA AUXILIAR EN EL
TRANSPORTE DE PACIENTES CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

CON ESPECIALIDAD

EN

INGENIERÍA MECÁNICA

P R E S E N T A

ING. CARLOS EDUARDO LEGORRETA CORREA

DIRECTORES DE TESIS: DR. JUAN ALFONSO BELTRÁN FERNÁNDEZ

DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2017



ACLARACIÓN

La tesis que se presenta en este documento está basada en el Programa de Estímulos a la Innovación (PEI) titulado “Prototipo grúa portátil para transferencias de personas con discapacidad motriz” con número de solicitud 211054 realizado por el Dr. Juan Alfonso Beltrán Fernández.

Las opiniones y conclusiones vertidas en este trabajo de tesis no necesariamente representan la posición de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Aunque se ha puesto cuidado para mantener la exactitud de la información contenida en este trabajo de tesis, el autor no asume responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan resultar de su uso. El uso de designaciones particulares de países o territorios no implica ningún juicio por parte del autor, desde el punto de vista legal de los países o territorios y de sus autoridades e instituciones. La mención de los nombres de compañías o productos específicos (se hayan o no indicado como registrados) no implica ninguna intención de infringir los derechos de propiedad, ni deberían ser interpretados como una promoción o recomendación por parte del autor.

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados de pruebas numéricas y experimentales, utilizando el método de extensometría, fotoelasticidad e interferometría (Correlación Digital de Imágenes en 2D) efectuadas a una grúa auxiliar diseñada originalmente con la finalidad de facilitar el traslado de pacientes con problemas de movilidad dentro de hospitales. Las pruebas experimentales consistieron en simular el efecto de cargar completamente a una persona de hasta 200 kg (1962 N) de peso. Ésto sin considerar movimientos laterales en la horquilla en donde se engancha el arnés que precisamente realiza esta función. Se utilizaron discos de pesas de 15 y 20 kg, los cuales fueron colocados de manera gradual a fin de tener diferentes estados de carga, con aumentos progresivos de 20 kg hasta llegar a 200 kg. En cada punto (estado de carga) se registraron las deformaciones en los puntos críticos de varios de los elementos que componen a la grúa, usando para ello galgas extensométricas que previamente fueron instrumentadas en la grúa.

Para el caso de las pruebas numéricas se utilizó primeramente el programa CAD de SolidWorks® para realizar el modelado y ensamble de los componentes de la grúa auxiliar. Posteriormente con ayuda del programa CAE de ANSYS Workbench® se hicieron simulaciones en el modelo de la grúa considerando los pesos usados en las pruebas experimentales. Finalmente se presenta una comparación de los resultados obtenidos en todas las pruebas, numéricas y experimentales, mostrando e interpretando la variación. Adicionalmente se hacen comentarios sobre mejoras al diseño actual del prototipo de grúa auxiliar analizado.

ABSTRACT

In this document, results of numerical and experimental test are presented, using the method of extensometry, photoelasticity and interferometry (2D Digital Images Correlation) applied to an auxiliary crane originally designed to facilitate the transfer of patients with mobility problems inside hospitals. The experimental tests consisted in to simulate the effect of carrying a person with a weight up to 200 kg (1962 N), this without considering lateral movement in the fork where is engaged the hardness that precisely performs this function. Discs weights of 15 and 20 kg were used, which were placed gradually in order to have different load conditions, with progressive increases of 20 kg up to 200 kg at each point (load condition) deformations were recorded in the critical points of the various elements that shape the crane, using for this strain gauges that were previously implemented in the crane.

In the case of the numerical tests, the CAD software of SolidWorks® was firstly used for modeling and assembling the components of the auxiliary crane. Later, using the CAE software of ANSYS Workbench®, simulations on the model of the crane were made considering the weights used in the experimental tests. Finally, a comparison between the last results and their interpretation were shown. In addition, comments are made on improvements to the current design of the prototype of the auxiliary crane analyzed.

ÍNDICE

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xv
OBJETIVO GENERAL	xvi
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	xvi
JUSTIFICACIÓN	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1 DISCAPACIDAD MOTRIZ, SU CLASIFICACIÓN Y PADECIMIENTOS QUE LA OCASIONAN	2
1.2 DISCAPACIDAD MOTRIZ EN MÉXICO	3
1.3 DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA EL TRANSPORTE DE PACIENTES CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SU EVOLUCIÓN HASTA LA ACTUALIDAD	5
1.4 TIPOS DE GRÚAS AUXILIARES UTILIZADAS PARA EL TRANSPORTE DE PACIENTES CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD	15
1.5 TIPOS DE ARNESES PARA GRÚAS AUXILIARES UTILIZADOS PARA EL TRANSPORTE DE PACIENTES CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD	18
1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.7 METODOLOGÍA	21
1.8 SUMARIO	21

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTRUCTURAS: DIFERENCIA ENTRE MARCO Y ARMADURA	23
2.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL	23
2.2.1 TIPOS DE ESTRUCTURAS	24
2.2.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL	24
2.2.3 ANÁLISIS DE ARMADURAS ISOSTÁTICAS	25
2.2.3.1 MÉTODO DE LOS NODOS	25
2.2.4 ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS HIPERESTÁTICAS	25
2.2.4.1 MÉTODO MATRICIAL DE LAS RIGIDECES	25
2.2.5 DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ	26
2.3 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (MEF)	26
2.3.1 PASOS BÁSICOS PARA LA APLICACIÓN DEL MEF	27

2.3.2 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO PARA UN ELEMENTO TRIDIMENSIONAL ELÁSTICO. ASPECTOS GENERALES	28
2.3.3 ANÁLISIS DE ESFUERZOS CON ANSYS	33
2.4 DEFORMACIÓN, DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACIÓN UNITARIA	34
2.4.1 ESTRUCTURA CRISTALINA	35
2.4.2 DEFECTOS E IMPUREZAS	36
2.4.3 REDES CRISTALINAS METÁLICAS	37
2.5 ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36	38
2.6 MÉTODO EXPERIMENTAL DE EXTENSOMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE MICRO DEFORMACIONES	40
2.7 FOTOELASTICIDAD	48
2.8 INTERFEROMETRÍA	54
2.9 CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES	55
2.10 SUMARIO	58

CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS PIEZAS DE LA GRÚA AUXILIAR	60
3.2 PROCESO DE MODELADO Y SIMULACIÓN	61
3.3 PRUEBAS EXPERIMENTALES	75
3.3.1 MATERIALES Y HERRAMIENTAS PARA INSTRUMENTACIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	75
3.3.2 MATERIALES Y HERRAMIENTAS PARA INSTRUMENTACIÓN DE RESINA FOTOELÁSTICA	75
3.3.3 MATERIALES Y HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE INTERFEROMETRÍA	76
3.3.4 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS	76
3.4 PROCEDIMIENTO PARA APLICACIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS (MÉTODO DE EXTENSOMETRÍA)	76
3.5 PROCEDIMIENTO PARA APLICACIÓN DE RESINA FOTOELÁSTICA (MÉTODO DE FOTOELASTICIDAD)	87
3.6 PREPARACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE INTERFEROMETRÍA	99
3.7 SUMARIO	112

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE DEFORMACIONES UNITARIAS EN GALGAS EXTENSOMÉTRICAS Y ANSYS WORKBENCH®	114
4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE ESFUERZOS EN GALGAS EXTENSOMÉTRICAS Y ANSYS WORKBENCH®	116

4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE ESFUERZOS EN FOTOELASTICIDAD Y ANSYS WORKBENCH®	117
4.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE DEFORMACIONES EN CDI EN 2D Y ANSYS WORKBENCH®	118
4.5 RESULTADOS MÁXIMOS (CRÍTICOS) DE TODOS LOS MÉTODOS APLICADOS A LA GRÚA AUXILIAR	119
4.6 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	120
4.7 SUMARIO	122
CONCLUSIONES	122
PRODUCTIVIDAD	123
TRABAJOS FUTUROS	123
REFERENCIAS	124

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Este trabajo no hubiera sido posible realizarlo sin la preparación y los conocimientos que me proporcionó la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Zacatenco. Por lo mismo estoy profundamente agradecido y en permanente deuda con ella, así como con el Instituto Politécnico Nacional en general y con los profesores que tuve a bien conocer en particular, los cuales generaron en mí un verdadero cambio de mentalidad e ideología y que me ayudaron realmente a superarme y ser mejor persona.

Reiterando mi más sincero y puro amor a mis papás Eduardo Legorreta y Ma. Del Socorro Correa y a mis hermanas Lupita y Valeria. No tengo palabras para agradecer su invaluable apoyo moral, económico y de todo tipo que han brindado en mi vida. Este trabajo y demás logros venideros son por y para ustedes, simplemente son mi razón de ser y mi ejemplo de vida.

A mis tíos Miguel y Juana les agradezco muchísimo, entre otras cosas, porque me han recibido en su hogar y me han hecho sentir como en propia casa, haciendo menos complicado el estar alejado de mis padres.

A mis compañeros de estudio y amigos que conocí en la maestría. Primeramente les agradezco el que me hayan brindado su amistad y después, que me hayan permitido vivir junto con ellos en esta bonita etapa de nuestras vidas. Agradezco, además por su paciencia y comprensión en momentos personales difíciles, saben que les deseo lo mejor y que espero que los sueños y metas de los que hemos platicado se vuelvan realidad, pero que sobre todo, nos mantengamos en contacto para ayudarnos en lo que se pueda. ¡Mucho éxito!

A mis asesores de tesis, el Dr. Juan Alfonso Beltrán Fernández y el Dr. Luis Héctor Hernández Gómez, les agradezco bastante por sus consejos, regaños y sobre todo por la experiencia que me transmitieron a través de sus clases, de sus historias e incluso de sus chistes. Muchas gracias por ser parte fundamental en mi formación.

Al Ing. Gonzalo García Castilla, al Ing. Armando y a la empresa Acceso Sin Límites® por haber confiado en mí para llevar a cabo este proyecto y facilitarme el prototipo de grúa auxiliar para hacer las pruebas que en este trabajo describo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), ya que sin el apoyo económico que me otorgaron, me hubiera sido muy complicado el realizar esta maestría y en consecuencia, el trabajo que a continuación presento, ¡Muchas gracias!

Ésto va por ustedes, ¡No los defraudaré!

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

FIGURA 1.1 PREVALENCIA DE DISCAPACIDAD MOTRIZ POR ENTIDAD FEDERATIVA	4
FIGURA 1.2 GRABADO EGIPCIO QUE ILUSTRAS EL USO DE CARRUAJES EN LA GUERRA	6
FIGURA 1.3 PRIMER REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UNA SILLA DE RUEDAS QUE DATA DE APROXIMADAMENTE EL AÑO 525 A.C.	6
FIGURA 1.4 SILLA TIPO MESA/CAMILLA ENCONTRADA EN RESTOS ARQUEOLÓGICOS EN GRECIA	7
FIGURA 1.5 PRIMER SILLA DE RUEDAS DISEÑADA PARA EL TRANSPORTE DE PERSONAS DE LA QUE SE TIENE REGISTRO. EQUIPADA CON 4 RUEDAS PEQUEÑAS, REPOSAPIÉS E INCLUSO RESPALDO RECLINABLE	7
FIGURA 1.6 SILLA DE STEPHEN FARFLER DE ACCIONAMIENTO MANUAL	8
FIGURA 1.7 PRIMERA VERSIÓN DE LA SILLA BATH DE TRES RUEDAS	8
FIGURA 1.8 SILLA DE RUEDAS CON ASIENTO DE MIMBRE, ESPALDAR Y APOYAPIÉS AJUSTABLES	9
FIGURA 1.9 SILLA DE RUEDAS QUE INCORPORA RADIOS DE ALAMBRE Y AROS DE EMPUJE	9
FIGURA 1.10 SILLA DE EVEREST & JENNINGS	10
FIGURA 1.11 SILLA DE RUEDAS MOTORIZADA DE EVEREST & JENNINGS	11
FIGURA 1.12 HOY EN DÍA, LAS DISCIPLINAS DEPORTIVAS QUE SON PRACTICADAS POR PERSONAS EN SILLAS DE RUEDAS SON MUCHAS, SIENDO UNA DE LAS MÁS POPULARES EL BÁSQUETBOL	12
FIGURA 1.13 SILLA WHILL	13
FIGURA 1.14 EL AVANCE DEL ASIENTO DE LA SILLA WHILL FACILITA LA TRANSFERENCIA DEL PACIENTE	14
FIGURA 1.15 LAS RUEDAS DELANTERAS DE LA SILLA WHILL ESTÁN COMPUESTAS POR RUEDAS MÁS PEQUEÑAS QUE PERMITEN UN RANGO DE MANIOBRABILIDAD MUY GRANDE	14
FIGURA 1.16 LAS DIMENSIONES DE LA SILLA WHILL SON HASTA CIERTO PUNTO REDUCIDAS Y DEPENDEN DEL RESPALDO QUE SE ESCOJA	15
FIGURA 1.17 GRÚA HIDRÁULICA MANUAL, GRÚA CON MOTOR ELÉCTRICO Y GRÚA HIDRÁULICA AUTOMÁTICA	16
FIGURA 1.18 GRÚA HOSPITALARIA COMPACTA PARA ESPACIOS REDUCIDOS	17
FIGURA 1.19 GRÚA HOSPITALARIA COMPACTA PARA ESPACIOS REDUCIDOS Y HORQUILLA CURVA	17
FIGURA 1.20 GRÚA HOSPITALARIA COMPACTA PLEGABLE	18
FIGURA 1.21 GRÚA HOSPITALARIA DE TECHO	18
FIGURA 1.22 ARNÉS UNIVERSAL	19
FIGURA 1.23 ARNÉS PARA CAMBIO DE PAÑAL	19

FIGURA 1.24 ARNÉS PARA PIERNAS JUNTAS	19
FIGURA 1.25 ARNÉS TIPO FAST - FIT	20
FIGURA 1.26 ARNÉS APOYA CABEZA	20
FIGURA 1.27 ARNÉS ENVOLVENTE	20

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

FIGURA 2.1 EJEMPLO DE UNA ESTRUCTURA TIPO MARCO	23
FIGURA 2.2 EJEMPLO DE UNA ESTRUCTURA TIPO ARMADURA	23
FIGURA 2.3 ESTADO DE ESFUERZOS EN UN PUNTO DE UN CUERPO ELÁSTICO 3D	28
FIGURA 2.4 LA FRONTERA DE UN DOMINIO ELÁSTICO 3D	31
FIGURA 2.5 DIFERENTES TIPOS DE ELEMENTOS SÓLIDOS EN 3D	32
FIGURA 2.6 ELEMENTO SOLID 186 3D 20 NODOS	33
FIGURA 2.7 DIAGRAMA QUE REPRESENTA LA DEFORMACIÓN UNITARIA DE UNA BARRA	34
FIGURA 2.8 DIFERENCIA ENTRE UN CUERPO DEFORMADO Y UNO DESPLAZADO	35
FIGURA 2.9 CELDA UNITARIA DEL TIPO CUBICA SIMPLE (CS)	36
FIGURA 2.10 CELDA UNITARIA DEL TIPO CUBICA CENTRADA EN LAS CARAS (FCC)	37
FIGURA 2.11 CELDA UNITARIA DEL TIPO CUBICA CENTRADA EN EL CUERPO (BCC)	37
FIGURA 2.12 CELDA UNITARIA DEL TIPO HEXAGONAL COMPACTA (HC)	37
FIGURA 2.13 CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN TÍPICA DEL ACERO ESTRUCTURAL	39
FIGURA 2.14 PUENTE DE WHEATSTONE	40
FIGURA 2.15 DISPOSICIÓN DEL PUENTE DE WHEATSTONE	41
FIGURA 2.16 GALGA	44
FIGURA 2.17 TIPOLOGÍAS DE GALGAS	45
FIGURA 2.18 PUENTE DE WHEATSTONE	46
FIGURA 2.19 MONTAJE EN MEDIO PUENTE PARA TEMPERATURA	46
FIGURA 2.20 MEDIO PUENTE PARA TENSIÓN	47
FIGURA 2.21 PUENTE COMPLETO	47
FIGURA 2.22 MEDIDOR P3500	47
FIGURA 2.23 BIRREFRIGENCIA	48
FIGURA 2.24 LÍNEAS ISÓCLINAS	49
FIGURA 2.25 POLARISCOPIO POR REFLEXIÓN	50
FIGURA 2.26 ESFUERZOS UNIAXIALES Y BIAXIALES	51
FIGURA 2.27 POLARISCOPIO POR REFRACCIÓN	52
FIGURA 2.28 POLARIZADOR Y ANALIZADOR	52
FIGURA 2.29 MATERIAL NECESARIO PARA LA PREPARACIÓN DE HOJAS DE RESINA FOTOELÁSTICA	52
FIGURA 2.30 DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL INTERFERÓMETRO DE MICHELSON	54
FIGURA 2.31 PREPARACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS, USANDO	

CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES	56
FIGURA 2.32 EJEMPLO TÍPICO DE UN PATRÓN ALEATORIO SOBRE LA SUPERFICIE DE UN ESPÉCIMEN	56
FIGURA 2.33 IMAGEN DE REFERENCIA E IMAGEN DEFORMADA	57
FIGURA 2.34 COMPARACIÓN DEL SUBCONJUNTO ANTES Y DESPUÉS DE LA DEFORMACIÓN	58

CAPÍTULO 3. PRUEBAS NUMÉRICAS Y EXPERIMENTALES

FIGURA 3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS PARTES PRINCIPALES DE LA GRÚA AUXILIAR	60
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REALIZACIÓN DEL ANÁLISIS NUMÉRICO A LA GRÚA AUXILIAR	63
FIGURA 3.3 DETALLE DEL MALLADO EN LA ESTRUCTURA DE LA GRÚA AUXILIAR	66
FIGURA 3.4 UBICACIÓN DE LOS APOYOS FIJOS EN LA GRÚA AUXILIAR	68
FIGURA 3.5 UBICACIÓN DE LAS FUERZAS APLICADAS SOBRE LA ESTRUCTURA DE LA GRÚA AUXILIAR	68
FIGURA 3.6 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA GRÚA AUXILIAR ANTE UNA CARGA DE 200 KG (EVALUANDO DEFORMACIÓN TOTAL)	69
FIGURA 3.7 EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN TOTAL DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR DE LA GRÚA ANTE UNA CARGA DE 200 KG	69
FIGURA 3.8 EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR DE LA GRÚA ANTE UNA CARGA DE 200 KG	69
FIGURA 3.9 EVALUACIÓN DEL ESFUERZO EQUIVALENTE (DE VON MISES) DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR DE LA GRÚA CARGANDO 200 KG	70
FIGURA 3.10 EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN TOTAL DE LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA ANTE UNA CARGA DE 200 KG	70
FIGURA 3.11 EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA DE LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA ANTE UNA CARGA DE 200 KG	70
FIGURA 3.12 EVALUACIÓN DEL ESFUERZO EQUIVALENTE (DE VON MISES) DE LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA CARGANDO 200 KG	71
FIGURA 3.13 PUNTOS DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN TOTAL EN LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	71
FIGURA 3.14 PUNTOS DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN TOTAL EN LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	72
FIGURA 3.15 PUNTOS DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	72
FIGURA 3.16 PUNTOS DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	72
FIGURA 3.17 PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESFUERZO EQUIVALENTE EN LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	73
FIGURA 3.18 PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESFUERZO EQUIVALENTE EN LA ESTRUCTURA INFERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	73
FIGURA 3.19 PUNTOS DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN TOTAL EN LA ESTRUCTURA	

SUPERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	73
FIGURA 3.20 PUNTOS DE MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA ESTRUCTURA SUPERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	74
FIGURA 3.21 PUNTOS DE MEDICIÓN DE ESFUERZO EQUIVALENTE EN LA ESTRUCTURA SUPERIOR DE LA GRÚA AUXILIAR CARGANDO 200 KG	74
FIGURA 3.22 DELIMITACIÓN DE LAS ÁREAS O PUNTOS CRÍTICOS A ESTUDIAR EN LA GRÚA	77
FIGURA 3.23 APLICACIÓN DEL REMOVEDOR DE PINTURA SOBRE LAS ÁREAS EN DONDE POSTERIORMENTE SE PEGARON LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	77
FIGURA 3.24 ZONAS DE INTERÉS DEL MARCO, LIBRES DE PINTURA Y LISTAS PARA SER MARCADAS CON LOS EJES DE REFERENCIA PARA PEGAR LAS GALGAS	78
FIGURA 3.25 EJES DE REFERENCIA MARCADOS EN UNA DE LAS ÁREAS QUE FUE INSTRUMENTADA CON GALGA EXTENSOMÉTRICA	78
FIGURA 3.26 GALGA PEGADA Y ALINEADA CON LOS EJES DE REFERENCIA TRAZADOS	79
FIGURA 3.27 IMAGEN QUE MUESTRA EL PROCEDIMIENTO DE HACER PRESIÓN DIRECTAMENTE CON EL DEDO PULGAR SOBRE LA CINTA CELOFÁN QUE CUBRE LA GALGA RECIÉN PEGADA, A FIN DE AYUDAR EN LA ADHESIÓN DE LA MISMA CON LA SUPERFICIE	79
FIGURA 3.28 PAQUETE DE GALGAS APLICADAS A LA GRÚA DURANTE LAS PRUEBAS	79
FIGURA 3.29 RETIRO DE LA CINTA CELOFÁN DE UNA DE LAS GALGAS PEGADAS	80
FIGURA 3.30 ESTAÑADO DE LAS PUNTAS DE LOS ALAMBRES CONDUCTORES QUE POSTERIORMENTE SERÍAN SOLDADAS A LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	80
FIGURA 3.31 SOLDADO DE LOS ALAMBRES CONDUCTORES A UNA DE LAS GALGAS	81
FIGURA 3.32 PROCEDIMIENTO PARA COMPROBAR UN CORRECTO SOLDADO DE LOS ALAMBRES CONDUCTORES EN LA GALGA	81
FIGURA 3.33 IMÁGENES DE LA GRÚA COMPLETAMENTE INSTRUMENTADA CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS LISTAS PARA SER UTILIZADAS EN LAS PRUEBAS	81
FIGURA 3.34 PESAS UTILIZADAS PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS EN LA GRÚA	82
FIGURA 3.35 IMAGEN DE LA GRÚA CARGANDO 36 KG	82
FIGURA 3.36 MEDIDOR DE DEFORMACIONES (PUENTE DE WHEATSTONE) MODELO P3 MARCA VISHAY MICRO MEASUREMENTS®, UTILIZADO DURANTE LAS PRUEBAS REALIZADAS A LA GRÚA	82
FIGURA 3.37 PRUEBA DE LA GRÚA EN DONDE SE MUESTRA EL BRAZO TELESCÓPICO COMPLETAMENTE EXTENDIDO Y EN POSICIÓN MÁXIMA, UTILIZANDO A UNA PERSONA DE ALREDEDOR DE 120 KG	83
FIGURA 3.38 IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS EN DONDE FUERON PEGADAS GALGAS A FIN DE CONOCER LAS MICRO DEFORMACIONES EN ESAS ZONAS (ZONAS CRÍTICAS).	83
FIGURA 3.39 VASO UTILIZADO PARA PESAR LA CANTIDAD NECESARIA DE RESINA Y CATALIZADOR DE LA MEZCLA	89
FIGURA 3.40 RESINA FOTOELÁSTICA PL-1 MARCA VISHAY MICRO MEASUREMENTS®	89

FIGURA 3.41 CATALIZADOR PLH-1 MARCA VISHAY MICRO MEASUREMENTS®.	89
FIGURA 3.42 HOJA DE RESINA FOTOELÁSTICA OBTENIDA, PREVIA A SER RETIRADA DE LA PLANCHA Y SECCIONADA PARA SER USADA SOBRE LOS PUNTOS CRÍTICOS DE LA GRÚA	90
FIGURA 3.43 PROTECCIÓN DE PAPEL Y CINTA MAZQUIN PUESTA SOBRE LOS PEDAZOS DE RESINA RECIÉN PEGADOS EN LAS ZONAS DE INTERÉS DE LOS DISTINTOS COMPONENTES DE LA GRÚA	90
FIGURA 3.44 LOCALIZACIÓN DE LAS PIEZAS ANALIZADAS EN LA GRÚA	91
FIGURA 3.45 ZONAS DE LA GRÚA EN DONDE FUERON COLOCADAS LAS ESTAMPAS CIRCULARES (PATRÓN ALEATORIO)	100
FIGURA 3.46 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 1 (UNIDADES EN MM)	109
FIGURA 3.47 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 1 (UNIDADES EN MM)	109
FIGURA 3.48 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 2 (UNIDADES EN MM)	110
FIGURA 3.49 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 2 (UNIDADES EN MM)	110
FIGURA 3.50 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 3 (UNIDADES EN MM)	111
FIGURA 3.51 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 3 (UNIDADES EN MM)	111
FIGURA 3.52 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 4 (UNIDADES EN MM)	112
FIGURA 3.53 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 4 (UNIDADES EN MM)	112
FIGURA 3.54 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE X ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 5 (UNIDADES EN MM)	113
FIGURA 3.55 DESPLAZAMIENTOS EN EL EJE Y ANTE UN PESO DE 200 KG EN LA ZONA DE ESTUDIO 5 (UNIDADES EN MM)	113

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

FIGURA 4.1 GRÁFICA DE ϵ DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS VS ϵ DE ANSYS WORKBENCH®	116
FIGURA 4.2 GRÁFICA DE σ DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS VS σ DE ANSYS WORKBENCH® (UNIDADES EN PA)	118
FIGURA 4.3 GRÁFICA DE σ DE FOTOELASTICIDAD VS σ DE ANSYS WORKBENCH® (UNIDADES EN PA)	119
FIGURA 4.4 GRÁFICA DE Δ DE CDI EN 2D VS Δ DE ANSYS WORKBENCH® (UNIDADES EN MM)	120
FIGURA 4.5 PAREDES DEL SOPORTE DEL MARCO, EN DONDE SE OBSERVA EN LA IMAGEN DE LA DERECHA LA CONSIDERABLE DEFORMACIÓN (DE APERTURA)	

DEBIDO A QUE LA CARGA, DE 230 KG ACTUÓ PRÁCTICAMENTE EN SU TOTALIDAD SOBRE ESE LADO	121
FIGURA 4.6 NOTABLE DESALINEACIÓN DEL MARCO CON RESPECTO A SU EJE LONGITUDINAL, DEBIDO A LA INCLINACIÓN DEL SUELO, ANTE UNA CARGA DE 230 KG	122
FIGURA 4.7 FALLA DEL SOPORTE DEL MARCO Y POR CONSECUENCIA NO FUE POSIBLE QUE LA GRÚA MANTUVIERA, POR ACCIÓN PROPIA, EL PESO QUE SE LE CARGÓ (230 KG)	122
FIGURA 4.8 COMPORTAMIENTO DE LA PIEZA PIVOTE DE LA HORQUILLA ANTE UN PESO DE 200 KG	122

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

TABLA 2.1 TABLA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA COLADA DE ACERO ASTM A36	38
TABLA 2.2 TABLA DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO ASTM A36	39
TABLA 2.3 SENSIBILIDAD DE DISTINTAS ALEACIONES DE MATERIALES	43
TABLA 2.4 TIPOS DE RESINAS FOTOELÁSTICAS Y SUS APLICACIONES TÍPICAS	53

CAPÍTULO 3. PRUEBAS NUMÉRICAS Y EXPERIMENTALES

TABLA 3.1 NÚMEROS DE IDENTIFICACIÓN Y NOMBRE DE LAS PARTES PRINCIPALES DE LA GRÚA AUXILIAR	61
TABLA 3.2 PIEZAS PRINCIPALES MODELADAS	61
TABLA 3.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS GALGAS CONFORME A LA UBICACIÓN EN DONDE FUERON COLOCADAS EN LA GRÚA	83
TABLA 3.4 REGISTRO DE LAS DEFORMACIONES UNITARIAS EN LA GRÚA AUXILIAR, MEDIDAS CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS, CON UNA CARGA DE 200 KG	84
TABLA 3.5 REGISTRO ESFUERZOS NORMALES CALCULADOS PARA CADA GALGA EXTENSOMÉTRICA	86
TABLA 3.6 ORDEN DE FRANJA	96
TABLA 3.7 RESULTADOS CORRESPONDIENTES A LA MAGNITUD DE LA DIFERENCIA DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES	98
TABLA 3.8 VALORES CONSTANTES UTILIZADOS PARA LOS CÁLCULOS DE LA TABLA 4.12	99

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

TABLA 4.1 DATOS DE ε DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS VS ε DE ANSYS WORKBENCH®	114
TABLA 4.2 DATOS DE σ DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS VS σ DE ANSYS WORKBENCH® (UNIDADES EN PA)	116
TABLA 4.3 DATOS DE σ DE FOTOELASTICIDAD VS σ DE ANSYS WORKBENCH® (UNIDADES EN PA)	117
TABLA 4.4 DATOS DE δ DE CDI EN 2D VS δ DE ANSYS WORKBENCH® (UNIDADES EN MM)	118

OBJETIVO GENERAL

Aplicar modelado y simulación CAE (ANSYS Workbench®) y de 3 tipos de análisis experimental de esfuerzos y deformaciones para evaluar el comportamiento estructural de la grúa auxiliar con un peso de hasta 200 Kg.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar mediante una herramienta CAD, un modelo de la grúa a estudiar.
- Aplicar la metodología FEM al modelo utilizando el programa ANSYS Workbench®
- Aplicar los métodos de extensometría, fotoelasticidad y Correlación Digital de Imágenes en dos dimensiones (interferometría) en los puntos críticos de la estructura, determinados en la simulación numérica.
- Obtener e interpretar los resultados de los métodos de análisis aplicados (numéricos y experimentales).
- Comparar e interpretar los resultados.
- Confirmar el buen funcionamiento estructural de la grúa con las condiciones de operación dadas.
- Proponer mejoras en su diseño y manufactura.

JUSTIFICACIÓN

Este trabajo se deriva del proyecto PEI titulado “Prototipo grúa portátil para transferencias de personas con discapacidad motriz” con número de solicitud 211054 realizado por el Dr. Juan Alfonso Beltrán Fernández.

La necesidad de facilitar el manejo de pacientes con las limitaciones de movilidad que provocan padecimientos como la paraplejia, tetraplejia y bariatría ha llevado a los ingenieros mecánicos a trabajar en el campo de la biomecánica; para diseñar y crear diferentes tipos de dispositivos o máquinas que faciliten el traslado de este tipo de personas.

Es de suma importancia validar el correcto funcionamiento de este tipo de dispositivos ya que será usado directamente por personas. La calidad de vida de un paciente con problema de movilidad la mayoría de las veces es menor que la de una persona clínicamente sana. Lo anterior se debe al hecho de tener que realizar cualquier actividad física sufriendo las complicaciones consecuentes de tener una lesión o cualquier otra anomalía que implique daño motriz en la persona en cuestión. La complejidad para que el individuo pueda moverse depende directamente de la complejidad de la lesión, lo cual repercute además en el nivel de independencia del paciente y en los recursos que requerirá para llevar una vida lo más normal posible.

Los resultados obtenidos del Censo General de Población y Vivienda 2015, reportaron ocho personas con discapacidad motriz por cada 1 000 habitantes en el país, esto es, alrededor de 850 mil personas (INEGI, 2015).

En el documento que se presenta a continuación se reportan los resultados del análisis estructural realizado a la grúa auxiliar para el transporte de personas con problemas de movilidad, propiedad de la empresa “Acceso Sin Límites”, utilizando simulación numérica mediante el programa de elemento finito (FEM) ANSYS® Workbench y aplicando también los métodos experimentales de galgas extensométricas (extensometría), fotoelasticidad y Correlación Digital de Imágenes en dos dimensiones (interferometría), con el fin de determinar la carga máxima que podría soportar la grúa, además de hacer las observaciones y recomendaciones correspondientes en lo que se refiere al diseño y/o manufactura de la misma.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la información de la definición, características y clasificación de las grúas móviles hospitalarias es posible hablar entonces de la relevancia que tiene el validar estructuralmente un dispositivo como éste y la gran importancia que tiene además, debido a que es un elemento que es utilizado directamente por seres humanos y que por lo tanto un fallo en él podría resultar en daños a su integridad física.

En el capítulo 1 se hace un estudio sobre la situación en general y la cantidad de pacientes con problemas de movilidad en México. Además se presentaron los antecedentes históricos, evolución y clasificación de los distintos dispositivos utilizados para ayudar en el traslado de personas que presentan dicha discapacidad y se hizo referencia a la necesidad e importancia del desarrollo, validación y mejora de dispositivos como lo son las grúas móviles hospitalarias.

En el capítulo 2 se hace una recopilación de información y conceptos técnicos que fueron utilizados posteriormente como fundamento teórico de las pruebas y análisis, tanto numéricos como experimentales, realizados a la grúa que se está validando.

En el capítulo 3 se realiza el modelo y simulación del prototipo físico, utilizando los programas CAD SolidWorks® y de simulación ANSYS Workbench®. Además se describe el proceso de aplicación en el prototipo físico de la grúa, de los métodos experimentales de extensometría, fotoelasticidad e interferometría.

En el capítulo 4 se comparan y analizan los resultados de todos los métodos de análisis aplicados. Se nota que la tendencia de comportamiento de esfuerzos y deformaciones en la estructura (en las gráficas mostradas) fue prácticamente la misma en todos los métodos, aunque con ciertas diferencias en los valores obtenidos mediante experimentación con respecto a los resultados numéricos. Independiente a lo anterior, los máximos valores registrados de esfuerzos y deformación están muy por debajo del esfuerzo y deformación permisible del acero ASTM A36, por lo que se confirma el correcto funcionamiento de la grúa auxiliar cargando un peso de hasta 1962 N.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 DISCAPACIDAD MOTRIZ, SU CLASIFICACIÓN Y PADECIMIENTOS QUE LA OCASIONAN

“La movilización manual de personas puede derivar en riesgos, en particular dorso lumbares, para los trabajadores. Unos peligros a los que están expuestos de manera frecuente los profesionales de los sectores sanitario y asistencial, que a diario tienen que ayudar a moverse a personas hospitalizadas o con discapacidades motoras” (Álvarez-Casado, Hernández, & Rayo, 2010).

Los padecimientos o causas que pueden llevar a que una persona presente discapacidad motriz son variados, a continuación se enlistan algunos de ellos:

- **Infeciosas:** son ocasionadas por virus, bacterias y cualquier microorganismo huésped del ser humano. Consecuencias: amputaciones, lesiones de la médula espinal, lesión cerebral y poliomielitis.
- **Accidentales:** principalmente del tipo automovilístico e igual resultan en la mayoría de los casos en amputaciones, lesiones de la médula espinal y lesión cerebral.
- **Enfermedades diversas:** por ejemplo artritis reumatoide, enfermedad de Parkinson y esclerosis múltiple.
- **Congénitas:** se presentan durante la gestación o en el momento mismo del parto, tales como la ausencia de alguna extremidad o parálisis cerebral.
- **Falta de oxigenación cerebral:** como consecuencia de privación de oxígeno o deficiente irrigación del cerebro.
- **Quemaduras:** pueden deberse a factores térmicos o químicos, también pueden ser causadas por abrasión.
- **Edad avanzada:** son parte del proceso natural de envejecimiento, hay una pérdida de la fuerza muscular, del control muscular voluntario y del tono muscular.
- **Por riesgo de trabajo:** como consecuencia de exposición a sustancias tóxicas o temperaturas extremas, químicos y posiciones de estrés articular.
- **Quirúrgicas:** pueden ser radicales o transitorias, ya sea que se haga una resección total de una extremidad o que como consecuencia de una cirugía en forma temporal el sujeto muestre una discapacidad motriz debido a fracturas, amputación, lesión de la médula espinal, lesión cerebral, etcétera.
- **Latrogénicas:** pueden ser consecuencia de una cirugía en donde haya existido un manejo inadecuado del personal de salud, o a consecuencia de prescripción de un medicamento.
- **Hereditarias:** se transmiten genéticamente a la descendencia (distrofia muscular, esclerosis múltiple, y miopatías).

Existen distintas formas de clasificar a las personas con discapacidad motriz o física; una de ellas se refiere al grado de la discapacidad, y es la siguiente:

- **Mínima:** cuando la reducción de la capacidad funcional del individuo limita parcialmente su independencia en las actividades de la vida diaria, pero no su productividad.
- **Moderada:** cuando la reducción de la capacidad funcional del individuo limita parcialmente su independencia en las actividades de la vida diaria y su productividad.
- **Total:** cuando la reducción de la capacidad funcional del individuo es tan importante que lo hace totalmente dependiente e improductivo.

También pueden clasificarse de acuerdo a su duración en:

- **Temporales:** son con las cuales la persona vive por un tiempo restringido y que mediante los cuidados médicos y de rehabilitación adecuados no se generan secuelas de por vida y es posible regresar al estado previo a la discapacidad.
- **Permanentes:** son aquellas con las cuales la persona vive a partir del inicio de la discapacidad y cuyas secuelas pueden minimizarse pero la recuperación no es al 100%, o dicho de otra forma no es posible regresar al estado previo de la discapacidad.

Una de las consecuencias más importantes de la discapacidad es la parálisis que se refiere a la disminución, deficiencia o pérdida parcial o total de la capacidad del movimiento, acompañada generalmente de pérdida de la sensibilidad, debido a trastornos motores o musculares. Una de las maneras de clasificar a las parálisis está relacionada con las partes del cuerpo afectadas y se denomina topográfica, que es la siguiente:

- **Parálisis completa (plejía):** incluyen las tetraplejías que se refiere a la afección de los cuatro miembros; paraplejías, en donde hay afección de los dos miembros superiores o inferiores; hemiplejías, cuando se afectan dos miembros de un lado u otro del cuerpo y monoplejías donde sólo hay afectación de un solo miembro.
- **Parálisis parcial o incompleta (paresia):** este tipo de parálisis es de menor intensidad, puede ser tetraparesia, paraparesia, hemiparesia y monoparesia.

1.2 DISCAPACIDAD MOTRIZ EN MÉXICO

Las personas con discapacidad física, en términos generales, al tener problemas de desplazamiento y control, requieren de un entorno accesible, amable y respetuoso que le permita realizar sus actividades mediante la equiparación. Esto es; “si hay escaleras, que también haya rampas o elevadores, que el sistema de transporte público sea accesible, que las instalaciones cuenten con las opciones que permitan el acceso, uso y servicio así como los procedimientos de evacuación en caso de emergencia, con el fin de que las personas con discapacidad tengan el mismo acceso y las mismas oportunidades que el resto de la sociedad” (CNDH | Comisión Nacional de los Derechos Humanos - México, 2016).

El Censo General de Población y Vivienda 2015 captó las discapacidades severas y moderadas de la población. En el caso de las discapacidad motriz se preguntó si la persona tenía limitaciones o dificultades para moverse, caminar, usar sus manos o brazos; es decir, en este caso se captó la deficiencia y la discapacidad, se trató de indagar con precisión las limitaciones relacionadas con el movimiento y el desplazamiento considerando las extremidades inferiores y superiores, el tronco, cuello y cabeza.

Así, en el censo del 2015 se definió a las discapacidades de tipo motriz, como la limitación proveniente de una alteración o deficiencia músculo-esquelética que se refieren a la incapacidad de las personas para moverse o caminar, a las dificultades para mantener posturas de disposición del cuerpo o para las habilidades manipulativas como agarrar y sostener objetos. También se consideraron las dificultades para mover algún segmento del cuerpo como consecuencia de daño neurológico; se incluyó las secuelas de traumatismos, las de poliomielitis y lesiones medulares, entre otras.

“La discapacidad motriz es la discapacidad que concentra el mayor número de personas del resto de los tipos de discapacidad en la mayoría de los países” (Verdugo Alonso, 2003); en el caso de México sucede lo mismo, 45 de cada cien personas con discapacidad son de tipo motriz, lo que ubica a este tipo de discapacidad como la más importante del país por el monto de población que concentra.

Los resultados obtenidos del Censo General de Población y Vivienda 2015, reportaron ocho personas con discapacidad motriz por cada 1 000 habitantes en el país, esto es, poco más de 814 mil personas, de las cuales 76.2% vivían en las localidades urbanas y 23.8% en el medio rural; la diferencia entre hombres y mujeres es muy pequeña.

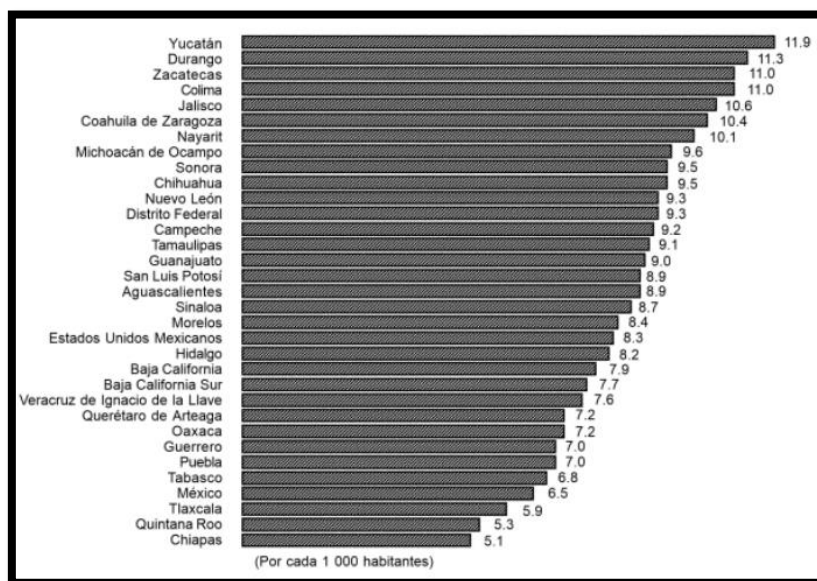


Fig. 1.1 Prevalencia de discapacidad motriz por entidad federativa (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015).

A fin de no ahondar más en términos médicos, lo cual no se pretende en este documento, se definen básicamente dos condiciones que afectan a un paciente de manera tal que es necesaria la utilización de dispositivos que auxilien en su movilización:

- Obesidad mórbida
- Paraplejia

“El sobrepeso y la obesidad se definen como una acumulación anormal o excesiva de grasa que puede ser perjudicial para la salud. En el caso de los adultos, la OMS define el sobrepeso y la obesidad como se indica a continuación:

- Sobrepeso: IMC igual o superior a 25.
- Obesidad: IMC igual o superior a 30.

El índice de masa corporal (IMC) es un indicador simple de la relación entre el peso y la talla que se utiliza frecuentemente para identificar el sobrepeso y la obesidad en los adultos. Se calcula dividiendo el peso de una persona en kilos por el cuadrado de su talla en metros (kg/m^2).

En tanto la obesidad mórbida es un tipo de obesidad que se destaca por presentar un índice de masa corporal superior a 35 y además se manifiesta acompañada de otra afección relacionada y por la defectuosa movilidad y desplazamiento del enfermo” (Organización Mundial de la Salud: OMS, 2016).

“La integración laboral de las personas con discapacidad es el resultado de un proceso en el que intervienen diversos factores, algunos inherentes a la persona misma y otros son del entorno que soporta dicho proceso” (Secretaría del Trabajo y Previsión Social | Gobierno | gob.mx, 2016).

1.3 DISPOSITIVOS UTILIZADOS PARA EL TRANSPORTE DE PACIENTES CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y SU EVOLUCIÓN HASTA LA ACTUALIDAD

Sin duda alguna, al tocar el tema del transporte de personas con problemas de movilidad, hace que inmediatamente nos remitamos a la silla de ruedas como el dispositivo auxiliar por excelencia utilizado para este fin.

Silla China, carruajes y silla tipo mesa

Para encontrar los inicios de la silla de ruedas, debemos remontarnos mucho en el tiempo. “Se cree que el primer intento de instalar unas ruedas en una silla fue alrededor del año 4000 A.C.” (Báez Martínez, 2014), ya que tanto la silla como la rueda se descubrieron en esa época.

Uno de los primeros dispositivos concebidos a partir de la invención de la rueda y que inevitablemente se relacionan como predecesor de dispositivos como la silla de ruedas es el

carruaje, del cual se presume su origen en Mesopotamia y Egipto entre los años 3500 y 3000 A.C. Su invención resulta de la necesidad de, además de transportar víveres y pasajeros, ser utilizado en la guerra para ataques a mayor velocidad y con mayor protección en los combates cuerpo a cuerpo.

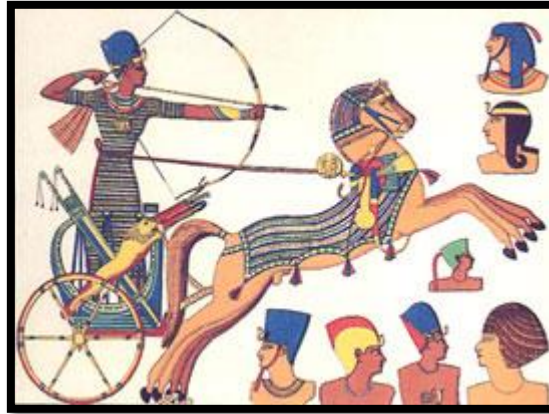


Fig. 1.2 Grabado egipcio que ilustra el uso de carruajes en la guerra (Pontificia Universidad Javeriana, 2013).

No obstante, la primera representación gráfica de una silla de ruedas data del año 525 A.C. en China. Ésta se ilustra en un grabado en piedra en un sarcófago y que precisamente muestra a una persona sentada en una silla con tres ruedas tipo carruaje, la cual parecía estar destinada a ser impulsada por terceras personas.



Fig. 1.3 Primer representación gráfica de una silla de ruedas que data de aproximadamente el año 525 A.C. (Báez Martínez, 2014).

De la misma época data la imagen encontrada en una vasija griega donde se puede apreciar una camilla infantil con ruedas. Aunque no es una silla, su relevancia radica en ser el resto arqueológico más antiguo de utilización de ruedas en mobiliario de cualquier tipo.



Fig. 1.4 Silla tipo mesa/camilla encontrada en restos arqueológicos en Grecia (Báez Martínez, 2014).

Primer silla de ruedas utilizada en el transporte de pacientes

De acuerdo a (Báez Martínez, 2014): “Aunque la fecha e inventores de la primera silla de ruedas no estén claros, la primera silla de ruedas concebida para el fin de transportar a una persona, con un diseño similar a las sillas actuales, fue fabricada, por un inventor desconocido, nada menos que para el monarca Felipe II de España quien debido a su dieta rica en carne roja, padecía de la enfermedad de la gota (artritis/ácido úrico)”.



Fig. 1.5 Primer silla de ruedas diseñada para el transporte de personas de la que se tiene registro. Equipada con 4 ruedas pequeñas, reposapiés e incluso respaldo reclinable (Báez Martínez, 2014).

Silla de Stephen Farfler

Avanzamos ahora hasta el año 1665, cuando Stephen Farfler, un joven relojero alemán de sólo 22 años construyó el primer vehículo auto propulsable para su propio uso. Este artefacto tiene un asombroso parecido con un handbike (bicicleta de tres ruedas o triciclo accionado con las manos, en lugar de con los pies, como una bicicleta o triciclo convencional) moderno.



Fig. 1.6 Silla de Stephen Farfler de accionamiento manual (Báez Martínez, 2014).

Silla Bath

En 1783 aparece la Silla "Bath", inventada por el fabricante John Dawson en la ciudad inglesa de Bath, de donde toma su nombre. Este modelo de tres ruedas dominara el mercado hasta el siglo XIX. No obstante, la silla "Bath" no era muy cómoda y durante el siglo siguiente fueron añadiéndose mejoras, pensando sobretodo en el confort del usuario, como respaldo y reposapiés ajustables. Una patente de 1869 describe una silla con ruedas traseras autopropulsable y delanteras pequeñas, llegando por fin a verdaderas sillas de ruedas impulsadas por el propio usuario.

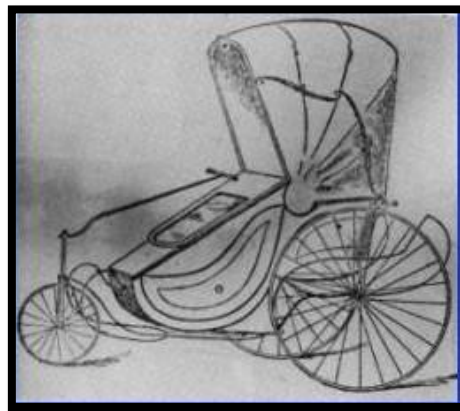


Fig. 1.7 Primera versión de la Silla Bath de tres ruedas (Báez Martínez, 2014).

Mejoras y adaptaciones a las sillas de ruedas

Posteriormente se fueron generando mejoras y adaptaciones, lo que llevó a tener espaldar reclinable y apoyapiés ajustable. Los marcos fijos son de madera, los asientos de mimbre firme y las ruedas grandes con aros de empuje con los que se auto propulsa el usuario. Las ruedas grandes pueden estar adelante o atrás. Se reduce el peso en comparación con las antiguas sillas a 58 libras teniendo aros de empuje y a 50 libras sin ellos. Gran parte del desarrollo es consecuencia de la Guerra Civil en Estados Unidos y de la Primera Guerra Mundial.



Fig. 1.8 Silla de ruedas con asiento de mimbre, espaldar y apoyapiés ajustables (Pontificia Universidad Javeriana, 2013).

Entre 1867 y 1875 se siguieron añadiendo mejoras, las ruedas pasan de madera a hierro y luego a llantas de caucho. Se agregaron aros de empuje con los que se auto propulsa el usuario y gracias a la invención de la bicicleta en el siglo XIX, finalmente se manufacturaron con radios de alambre.



Fig. 1.9 Silla de ruedas que incorpora radios de alambre y aros de empuje (Pontificia Universidad Javeriana, 2013).

Silla Plegable

Otro invento que ha influido decisivamente en la evolución de las sillas de ruedas, es sin duda el automóvil. La necesidad de transportar la silla, determinó la invención de la silla plegable.

En 1932, el ingeniero Harry Jennings construyó en Nueva York la primera silla de estructura tubular plegable, para su amigo parapléjico Herbert Everest. Juntos fundan Everest & Jennings, una compañía que monopolizaría las ventas de sillas de ruedas durante muchos años. Hasta tal punto que el gobierno de Estados Unidos interpuso una demanda antimonopolio contra Everest & Jennings, por controlar el precio de las sillas de ruedas. El caso finalmente fue sobreesido.

El diseño original de esta primera silla plegable se sigue utilizando al día de hoy en sillas básicas por todo el planeta, por supuesto, con algunas mejoras.



Fig. 1.10 Silla de Everest & Jennings (Báez Martínez, 2014).

Silla de ruedas motorizada

Aunque desde 1916 se fabricó en Londres la primera silla de ruedas motorizada, la cual por cierto era una silla de ruedas manual adaptada con diversos sistemas de engranajes poco eficientes y difíciles de manejar, fue hasta mediados de la década de los 50 que Everest & Jennings desarrollaron una silla de ruedas motorizada verdaderamente funcional que utilizaba un motor de tracción directa y un sistema de control por transistor.

Las últimas dos décadas han supuesto un enorme avance, tanto para las manuales como las eléctricas. Nuevos materiales, mejor rendimiento y sobretodo la posibilidad de personalizar las sillas de acuerdo a las necesidades individuales de cada persona.



Fig. 1.11 Silla de ruedas motorizada de Everest & Jennings (Báez Martínez, 2014).

Silla de ruedas en los deportes

Otra de las actividades que, como en otras áreas de las Ciencias de la Ingeniería que, ha llevado a importantes avances tecnológicos es sin duda el deporte, y en el tema de las sillas de ruedas no ha sido la excepción, debido a las adaptaciones y mejoras que se han conseguido debido a las necesidades de los atletas que las utilizan y a los requerimientos del deporte que practican. Principalmente, los juegos paralímpicos han resultado en una revolución en la fabricación de las sillas de ruedas manuales utilizadas por los atletas que participan en ellos. Se utilizan materiales como el aluminio y la fibra de carbono. Otorgan ligereza y resistencia, así también, el diseño que se requiere de una silla de ruedas para la práctica de un deporte debe ser lo suficientemente ergonómicos para el usuario. En este caso, la inclinación de las ruedas y los aros de empuje se ha modificado a fin de proporcionar un mejor agarre y aerodinamismo.

“Al apagarse el fuego de la guerra en el mundo, los ideales olímpicos de Pierre de Fredy, Barón de Coubertin, se recobraron. Y las nuevas juventudes dejaron atrás la lucha en las trincheras y en los campos de batalla para pensar más en la competencia en los campos, arenas y gimnasios deportivos” (Durand Alcántara, 2016).

“Es Ludwig Guttmann personalmente sentado en la silla de ruedas, quien empieza a realizar las primeras experiencias deportivas con sus pacientes los cuales tenían lesión medular pero con diferentes grados y tipos de capacidades residuales y Guttmann se da cuenta de que necesitaban algún incentivo o distracción que les ayudara a sobrellevar los innumerables retos, que su nueva condición les enfrentaba. Y sentado en una silla de ruedas comienza el mismo a experimentar jugando polo con un bastón.

Es en ese momento cuando nace el deporte sobre silla de ruedas, el primero de los deportes para personas con discapacidad y nace la luz para sus pacientes y un nuevo concepto para su tratamiento” (Durand Alcántara, 2016).

En 1944 se empiezan a practicar los dardos y el billar como deportes de competencia para las personas en silla de ruedas. En 1946 el polo es desplazado en su preferencia por la aparición del básquetbol sobre silla de ruedas, el cual despierta pasión por su práctica desde entonces y hasta hoy, y gracias a este deporte se incrementa en el mundo el interés por los deportes sobre silla de ruedas.

Así el 28 de julio de 1948, durante la ceremonia de inauguración de los Juegos Olímpicos de 1948 en Londres, Sir Ludwig Guttmann paralelamente en Stoke Mandeville introdujo la Primera Competencia de atletas en silla de ruedas, con 16 excombatientes de la Fuerza Armada Británica: 14 hombres y 2 mujeres. Estos juegos (de Stoke Mandeville) fueron creados originalmente para personas parapléjicas que perdieron el movimiento total o parcial de las piernas debido a una lesión medular, es decir, el Nacimiento del Movimiento Paralímpico se debió a los Deportes que se practicaban y practican en Sillas de Ruedas.

La historia ha demostrado que la idea de Guttmann tenía razón absoluta y el actual movimiento (ahora llamado Movimiento Paralímpico) continúa aspirando a ayudar a quienes persiguen la total realización de un sueño y la completa integración de las personas con una discapacidad, en todos los aspectos, al resto de la sociedad.



Fig. 1.12 Hoy en día, las disciplinas deportivas que son practicadas por personas en sillas de ruedas son muchas, siendo una de las más populares el básquetbol (Durand Alcántara, 2016).

Sillas de ruedas modernas (expectativas a futuro)

En sillas manuales ligeras, menos es más. Los fabricantes apuestan por hacer sillas cada día más ligeras y compactas, adaptadas al ritmo de vida moderno. En el futuro más cercano, es lógico que se siga por ese camino, investigando nuevos materiales, fuertes pero ligeros e incorporando innovaciones de diseño.

Como ya se mencionó el deporte y el ocio juegan un papel importante en el futuro de este sector, cada poco tiempo aparecen modelos específicos para cada deporte y otras actividades, creando nuevos campos de investigación y desarrollo.

El campo de las sillas eléctricas es mucho más abierto, debido al rapidísimo avance de la electrónica. La meta más cercana podría ser el desarrollo de motores con menor consumo y la implantación en el mercado de nuevas baterías, que recarguen más deprisa y tengan mayor capacidad. Todo destinado a ofrecer la mayor autonomía diaria al usuario.

De nuevo la industria automovilística podría ayudar a conseguir estos avances, esta vez gracias a su reciente apuesta por los coches eléctricos, lo que podría hacer realidad nuevas tecnologías en baterías y otros componentes.

Diversas innovaciones, como guiado con GPS, ya están en desarrollo y podrían estar disponibles en pocos años.

Los kits de motorización para sillas manuales, previsiblemente serán cada día más discretos y ligeros, siendo útiles para mayor cantidad de personas.

Silla Whill

De acuerdo al portal *ADAPTADO.es*, la silla Whill es sin duda una de las sillas de ruedas eléctricas más futuristas que existen en el mercado. Creada por un equipo de prestigiosos ingenieros que han trabajado en algunas compañías de renombre como Sony, Toyota, Olympus o Nissan. Su historia parece que comenzó cuando en 2010 un usuario de silla de ruedas les comentó la percepción negativa que tenían los usuarios hacia su silla de ruedas. Así que se propusieron crear una silla original que rompiera el concepto de debilidad o enfermedad que este usuario asociaba al uso de la silla de ruedas. Ése fue el punto de partida de Whill.



Fig. 1.13 Silla Whill (ADAPTADO.es, 2014).

Sin duda lo primero que llama la atención es su diseño futurista, pero además tiene unos cuantos detalles muy innovadores que no se habían visto hasta el momento. Estos puntos son su sistema de avance de asiento, la tecnología de ruedas delanteras y su sistema de control.

El avance del asiento es uno de los puntos más característicos de la silla. El objetivo es que el usuario se pueda posicionar en una postura más activa en la silla. El asiento avanza de manera eléctrica hacia la parte delantera de la silla. Lo cual resulta muy útil para ciertas maniobras como pueden ser las transferencias.



Fig. 1.14 El avance del asiento de la Silla Whill facilita la transferencia del paciente (ADAPTADO.es, 2014).

Ahora, sus ruedas delanteras, cuentan con tracción, por lo tanto podemos decir que estamos ante una silla de tracción en las cuatro ruedas. Tienen un tamaño muy considerable (25 cm de diámetro). Pero lo más innovador es que se trata de una rueda formada por pequeñas ruedas. De esta forma, para conseguir los giros, las que giran son las pequeñas ruedas que forman la rueda grande. Esto hace que la maniobrabilidad de la silla sea enorme y se pueda ahorrar espacio en las dimensiones de la silla.



Fig. 1.15 Las ruedas delanteras de la Silla Whill están compuestas por ruedas más pequeñas que permiten un rango de maniobrabilidad muy grande (ADAPTADO.es, 2014).

La silla tiene un ancho de 60 cm y un largo de 82.5 cm. En cuanto a la altura, depende del respaldo que se escoja, partiendo de unos 88 cm aproximadamente.



Fig. 1.16 Las dimensiones de la Silla Whill son hasta cierto punto reducidas y dependen del respaldo que se escoja (ADAPTADO.es, 2014).

1.4 TIPOS DE GRÚAS AUXILIARES UTILIZADAS PARA EL TRANSPORTE DE PACIENTES CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD

La evolución de las sillas de ruedas, principalmente y demás dispositivos que auxilian en el traslado de personas con problemas de movilidad, han resultado en opciones como lo son las grúas ligeras auxiliares. Son usadas principalmente en hospitales para movilizar a pacientes entre cuartos y unidades de atención o que son muy importantes para la atención del mismo paciente en su rehabilitación y limpieza. Sin embargo, el uso de estos dispositivos (grúas) no es exclusivo dentro de hospitales. Hoy en día, son utilizadas también para el transporte de pacientes dentro y fuera de sus hogares, incluso teniendo variantes de ellas que son adaptadas a automóviles particulares o de transporte público, así como algunas que están siendo instaladas para ayudar a subir escaleras dentro de centros comerciales y centros de transferencia modal, por ejemplo.

Empezaremos por definir lo que es una grúa auxiliar para el traslado de personas o pacientes con problemas de movilidad, así como identificar los tipos que existen y la gran variedad de arneses utilizados para realizar su función de manera eficaz y cómoda para quien precisamente está siendo transportado.

Una grúa auxiliar de traslado, para uso dentro de hospitales, en casa o incluso en exteriores, facilita la vida del paciente de manera enorme. Este tipo de grúa es muy útil, especialmente en casos en los que el paciente no pueda moverse y necesite ayuda externa. Las grúas de traslado permiten incorporar y desplazar a cualquier paciente, independientemente de sus

características físicas (dependiendo del peso, habrá que adquirir el arnés correspondiente). No es difícil de usar en absoluto. En primer lugar habrá que colocar el arnés alrededor del paciente, fijarlo a la grúa y ponerla en funcionamiento gracias a su mando. Se debe tener cargada la batería para no interrumpir el traslado; en caso de que la batería se gaste a mitad del traslado, la grúa dispone de un botón de parada de emergencia para inmovilizarla.

Hay tres tipos principales: hospitalarias, de bipedestación o mixtas:

- Grúas hospitalarias: sirve para trasladar pacientes enfermos que no puedan valerse por sí mismos, como encamados. Se pueden utilizar tanto en hospitales o residencias como en casa, son muy fáciles de emplear y el paciente se desplaza en suspensión tras ser elevado.
- Grúas de bipedestación: también llamadas “cambia pañales”, son grúas para personas que pueden mantenerse erguidas. Suelen incorporar plataforma para colocar los pies y un acolchado para acomodar las rodillas del usuario. Es recomendable para pacientes que tengan cierta movilidad en las piernas, ya que no pueden levantar a un paciente de la cama, sino solo a quien se encuentre sentado.
- Grúas mixtas: un híbrido, pues dependiendo del brazo de grúa se podrá tener una u otra función.

Dependiendo de las características del que será usuario de la grúa y del problema a solventar, convendrá elegir uno u otro modelo.

“De acuerdo al tipo de accionamiento existen 3 tipos de accionamiento de las grúas los cuales son: motor eléctrico, pistón hidráulico automático y pistón hidráulico manual” (Arratia Méndez, 2013).



Fig. 1.17 Grúa hidráulica manual, grúa con motor eléctrico y grúa hidráulica automática (Arratia Méndez, 2013).

Ahora bien, en el mercado se encuentran diferentes versiones de grúas hospitalarias móviles que tienen diferencias entre si y que ofrecen características particulares de las actividades y los usuarios para quienes están dirigidas. Por ejemplo, se tienen grúas compactas automáticas para espacios reducidos con un ancho de alrededor de 50 cm y pesos de aproximadamente 35 kg, debido a los material ligeros como el aluminio con el que casi en su totalidad son fabricadas y las cuales están diseñadas para levantar pesos de no más de 130 kg.



Fig. 1.18 Grúa hospitalaria compacta para espacios reducidos (Gómez, 2014).

Existen otras muy parecidas a las que recién se describieron. Sin embargo tiene una horquilla curva que además de otorgarles una estética distinta, permiten distribuir de mejor forma la carga en el elemento.



Fig. 1.19 Grúa hospitalaria compacta para espacios reducidos y horquilla curva (Gómez, 2014).

Por último se describen las grúas hospitalarias eléctricas y compactas que presentan la característica de ser plegables y que igualmente, debido a su diseño de mayor distancia entre patas, pueden ser utilizadas para levantar al paciente, tomándolo incluso de manera directa desde su silla de ruedas. Esto para auxiliar en su traslado hacia la cama, baño o simplemente suspenderlo.

La cualidad que tienen estas grúas de ser plegables otorgan mayor comodidad al usuario y una considerable reducción del espacio que requieren para ser almacenadas o transportadas.



Fig. 1.20 Grúa hospitalaria compacta plegable (Gómez, 2014).

Adicional a las mencionadas, existen en el mercado grúas, que no entran en la categoría de las grúas móviles de las cuales estamos hablando, pero que es importante mencionarlas, son las grúas de rieles o de techo, las cuales funcionan con un motor eléctrico.



Fig. 1.21 Grúa hospitalaria de techo (Gómez, 2014).

1.5 TIPOS DE ARNESES PARA GRÚAS AUXILIARES UTILIZADOS PARA EL TRANSPORTE DE PACIENTES CON PROBLEMAS DE MOVILIDAD

Tal vez uno de los accesorios fundamentales de una grúa hospitalaria es el arnés mediante el cual será levantado y transportado el paciente. Los hay de diferentes tamaños, materiales, medidas y configuraciones, y así como las grúas, dependen de la utilidad que se les vaya a dar y sobre todo el peso que deban soportar. Enseguida se muestran las características de los más comunes.

Arnés universal

Está diseñado para reducir la presión en las piernas durante el traslado. Recomendado para casos bariátricos.



Fig. 1.22 Arnés universal (Gómez, 2014).

Arnés para cambio de pañal

El arnés para cambio de pañal, como su nombre lo dice, está destinado para ser útil en esta actividad necesaria en pacientes que difícilmente pueden ser movidos hasta el sanitario.



Fig. 1.23 Arnés para cambio de pañal (Gómez, 2014).

Arnés para piernas juntas

Este arnés otorga una muy buena comodidad al paciente debido a la postura que le permite tomar. Normalmente está hecho de malla acolchada plastificada.



Fig. 1.24 Arnés para piernas juntas (Gómez, 2014).

Arnés de ajuste rápido (Fast - Fit)

El arnés tipo Fast - Fit es un arnés muy seguro y fácil de poner. Cuenta con cinturón frontal de ajuste rápido con velcro.



Fig. 1.25 Arnés tipo Fast - Fit (Gómez, 2014).

Arnés apoya cabeza

Este tipo de arnés es utilizado principalmente en transferencias delicadas de pacientes, los cuales no deben de ser movidos en exceso durante el traslado.



Fig. 1.26 Arnés apoya cabeza (Gómez, 2014).

Arnés envolvente

La forma envolvente de este tipo de arnés está concebida para trasladar pacientes inquietos o con ansiedad. El cuidador puede transferir al paciente sentado o recostado. Su talla es universal.



Fig. 1.27 Arnés envolvente (Gómez, 2014).

1.6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo a la información de la definición, características y clasificación de las grúas móviles hospitalarias es posible hablar entonces de la relevancia que tiene el validar estructuralmente un dispositivo como éste y la gran importancia que tiene además, debido a que es un elemento que es utilizado directamente por seres humanos y que por lo tanto un fallo en él podría resultar en daños a su integridad física.

Para la realización de este trabajo se parte de la necesidad de certificar el correcto funcionamiento en condiciones de máxima carga (200 kg) y uso estático (cargando el peso sin moverla) de un modelo piloto de una grúa hospitalaria accionada hidráulicamente de manera automática y que utiliza un arnés tipo universal.

Lo que se va a hacer es verificar el correcto funcionamiento de la estructura de la grúa auxiliar en condiciones críticas (de carga máxima) mediante la utilización de métodos experimentales y simulación numérica. La grúa se pretende utilizar para el traslado, intrahospitalario principalmente, de pacientes que presentan problemas de movilidad debido a alguna discapacidad o a obesidad mórbida. Está diseñada para soportar y mover masas de hasta 200 kg (1962 N). Se requiere de una segunda persona que sea quien mueva la estructura, junto con el paciente que estará siendo cargado por la misma.

1.7 METODOLOGÍA

En este trabajo se realizara en primera instancia el modelado y simulación numérica de un modelo piloto de una grúa hospitalaria accionada hidráulicamente de manera automática y que utiliza un arnés tipo universal. Una vez hecho esto, se identificarán los puntos críticos en donde se concentran los esfuerzos y/o deformaciones mayores, al soportar una carga de 200 kg. Posteriormente se aplicarán los métodos experimentales de extensometría, fotoelasticidad y Correlación Digital de Imágenes en 2D al prototipo físico y se comparan los resultados con los obtenidos mediante la simulación numérica. Finalmente se darán observaciones y recomendaciones al diseño actual y se concluirá si éste cumple con los mínimos necesario para el correcto funcionamiento de la estructura de la grúa o es necesario un rediseño.

1.8 SUMARIO

En este capítulo se hizo un estudio sobre la situación en general y la cantidad de pacientes con problemas de movilidad en México. Además se presentaron los antecedentes históricos, evolución y clasificación de los distintos dispositivos utilizados para ayudar en el traslado de personas que presentan dicha discapacidad y se hizo referencia a la necesidad e importancia del desarrollo, validación y mejora de dispositivos como lo son las grúas móviles hospitalarias. En el siguiente capítulo se expondrán los conceptos técnicos, teóricos y experimentales necesarios para el análisis que posteriormente se desarrollará en los capítulos 3 y 4 de esta tesis.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ESTRUCTURAS: DIFERENCIA ENTRE MARCO Y ARMADURA

Una estructura es la disposición y orden de las partes dentro de un todo; es así entonces que tanto un marco como una armadura son estructuras. La diferencia radica principalmente en el tipo de ensamble entre los elementos de la estructura, si es triangular es una armadura, mientras que si se trata de cuadrados es un marco.

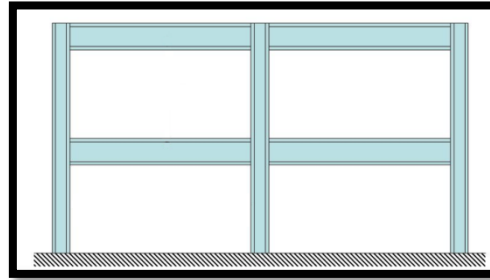


Fig. 2.1 Ejemplo de una estructura tipo marco (Hibbeler, 2006).

En una armadura las cargas son distribuidas a los soportes por medio de una combinación de miembros conectados por juntas articuladas, y debido a su configuración triangular, de manera ideal todos los miembros se encontrarán trabajando, ya sea en compresión o en tensión pura y que todas las fuerzas de empuje se resuelvan internamente. En la práctica, algunos esfuerzos de flexión pueden ocurrir como resultado de la fricción de las juntas y de las cargas distribuidas aplicadas a los miembros entre las juntas; generalmente, estos esfuerzos son menores comparados con las fuerzas axiales y, por lo común, se ignoran para propósitos analíticos (ARQUYS, 2012).

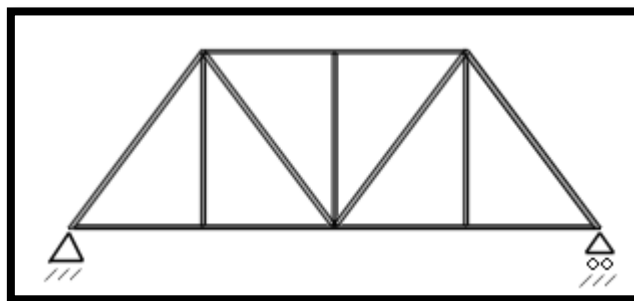


Fig. 2.2 Ejemplo de una estructura tipo armadura (Hibbeler, 2006).

En este caso el prototipo de grúa auxiliar que se estará analizando, es una estructura que cuenta en la parte de la grúa móvil con *marco* de carga, el cual es el elemento que soportará la mayor parte del peso del usuario (paciente con problemas de movilidad u obesidad mórbida).

2.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Se refiere al uso de ecuaciones de resistencia de materiales para encontrar los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre una estructura resistente, como edificaciones o esqueletos resistentes de maquinaria.

2.2.1 TIPOS DE ESTRUCTURAS

Para clasificar a las estructuras existe un concepto llamado grado de hiperestaticidad es el número de fuerzas redundantes de la estructura, es decir, el número de fuerzas incógnita independientes que no pueden determinarse mediante las ecuaciones de equilibrio de la estructura, dado que el número de incógnitas estáticas excede el número total de ecuaciones de equilibrio disponibles.

Una estructura es *hiperestática* o estáticamente indeterminada cuando está en equilibrio pero las ecuaciones de la estática resultan insuficientes para determinar todas las fuerzas internas o las reacciones (una estructura en equilibrio estable que no es hiperestática es isostática).

Las estructuras *isostáticas* son aquellas que sus reacciones pueden ser calculadas con las ecuaciones de la estática:

$$\Sigma F = 0$$

$$\Sigma M = 0$$

Es decir; La sumatoria de las fuerzas en los planos (x, y, z) es igual a cero y la sumatoria de los momentos en los planos (x, y, z) es igual a cero.

2.2.2 MÉTODOS DE ANALISIS ESTRUCTURAL

El tipo de método empleado difiere según la complejidad y precisión requerida por los cálculos:

- Métodos clásicos: Para estructuras muy sencillas entre los que se encuentran la teoría de vigas de Euler-Bernoulli es el método más simple, es aplicable sólo a barras esbeltas sometidas a flexión y esfuerzos axiales. Naturalmente no todas las estructuras se analizan por este método. Cuando existen elementos estructurales bidimensionales en general deben emplearse métodos basados en resolver sistemas de ecuaciones, como lo es el método de los nodos.
- Métodos programables: Así para determinar esfuerzos sobre marcos o pórticos se usa frecuentemente el método matricial de la rigidez basado en el modelo de barras largas, que idealiza los elementos resistentes como elementos unidimensionales sometidos predominantemente a flexión.
- Cuando se trata de analizar elementos más pequeños o con forma irregular donde pueden producirse concentraciones de tensiones se usan métodos numéricos más complejos como el Método de los Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en ingles).

2.2.3 ANÁLISIS DE ARMADURAS ISOSTÁTICAS

De una forma un poco más técnica podemos decir que una estructura isostática posee igual número de ecuaciones que de incógnitas, por lo cual, se puede resolver mediante un simple sistema de ecuaciones lineales o por los métodos básicos ya conocidos, dentro de los cuales, el más utilizado generalmente es el método de los nodos.

2.2.3.1 MÉTODO DE LOS NODOS

El método de los nodos o método de los nudos, consiste en el planteamiento de equilibrio mecánico de cada uno de los nodos o nudos de una armadura simple. Un nodo es cada uno de los puntos donde concurren dos o más barras. El equilibrio global de la estructura implica que el equilibrio local de cada uno de los nodos. Para que el método de los nodos sea aplicable a una estructura concreta deben cumplirse algunas condiciones geométricas entre ellas:

- Que la estructura tenga nodos articulados o se comporte de manera similar a una estructura de nodos articulados.
- Que el número de barras sea inferior a una cierta cantidad dada por el número de barras:

Para armaduras bidimensionales con fuerzas de trabajo sobre su plano el número de nodos n y el número de barras b debe satisfacer: $2n - 3 = b$.

Si el número de barras es inferior se tiene un mecanismo para el cual puede no existir equilibrio, y si el número de barras es superior el número de esfuerzos incógnita supera al de ecuaciones de la estática linealmente independientes.

Para una estructura tridimensional, la relación es $3n - 4 = b$.

2.2.4 ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS HIPERESTÁTICAS

Este tipo de estructuras no pueden ser analizadas únicamente mediante las ecuaciones de la estática o de equilibrio, ya que éstas últimas proporcionan un número insuficiente de ecuaciones. Los problemas hiperestáticos requieren condiciones adicionales usualmente llamadas ecuaciones de compatibilidad que involucran fuerzas o esfuerzos internos y desplazamientos de puntos de la estructura. Existen varios métodos generales que pueden proporcionar estas ecuaciones. Uno de los más utilizados es el método matricial de las rigideces.

2.2.4.1 MÉTODO MATRICIAL DE LAS RIGIDECES

Se llama de rigidez porque las ecuaciones finales a solucionar tienen como incógnitas los desplazamientos en función de las rigideces de los elementos.

Debido a que en el método de la rigidez se trabaja con los desplazamientos en un punto determinado es importante definir lo que es un grado de libertad. Los grados de libertad corresponden a las posibles formas de moverse que tiene una estructura, con e

Podemos plantear los pasos del método así:

1. Identificar los grados de libertad libres en los nudos
2. Plantear las ecuaciones de equilibrio de esos grados de libertad
3. Plantear las ecuaciones de compatibilidad de deformaciones, esto es, expresar las deformaciones internas de los elementos (expresados en letras minúsculas) en función de los desplazamientos externos de la estructura.
4. Plantear las ecuaciones de las leyes constitutivas del material, relaciones fuerza desplazamientos
5. Reemplazar las ecuaciones del paso 3 en las del paso 4
6. Reemplazar en las ecuaciones de equilibrio las ecuaciones halladas en el paso 5
7. Resolver para los desplazamientos
8. Reemplazar los desplazamientos encontrados en las ecuaciones del paso 3 para hallar deformaciones internas
9. Encontrar fuerzas de extremo de los elementos por medio de las ecuaciones del paso 4 y los valores del paso 8
10. Con las fuerzas de extremo de elemento resolver para cada elemento sus fuerzas internas y deformaciones.

2.2.5 DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA Y RIGIDEZ

A partir de los esfuerzos se pueden calcular directamente los desplazamientos y las tensiones. En el caso del método de los elementos finitos se suele determinar directamente el desplazamiento sin necesidad de calcular los esfuerzos internos. Una estructura correctamente diseñada además de ser funcional y económica debe cumplir obligatoriamente dos criterios razonables de seguridad:

- **El criterio de resistencia**, consistente en comprobar en que en ninguno de sus puntos el material sobrepasa el esfuerzo admisible máximo del material.
- **El criterio de rigidez**, consiste en comprobar que bajo las fuerzas y solicitaciones actuantes los desplazamientos y deformaciones de la estructura no sobrepasan el límite elástico del material. Dicho límite está relacionado con criterios de funcionalidad, pero también de estabilidad o de aplicabilidad de la teoría de la elasticidad lineal.

2.3 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (MEF)

En general, los problemas de ingeniería se pueden expresar con modelos matemáticos de situaciones físicas. Los modelos matemáticos de muchos problemas de ingeniería se representan con ecuaciones diferenciales con un conjunto de condiciones iniciales y/o de frontera. Las ecuaciones diferenciales se obtienen mediante la aplicación de las leyes y

principios fundamentales de la naturaleza de un sistema o de un volumen de control. Estas ecuaciones representan el equilibrio de la masa, la fuerza o energía. Las soluciones analíticas se componen de dos partes: Una parte homogénea y una particular.

En cualquier problema de ingeniería dado, hay dos conjuntos de parámetros de diseño que influyen en la forma en que se comporta un sistema. En primer lugar, están los parámetros que proporcionan información sobre el comportamiento natural de un sistema dado. Estos parámetros incluyen propiedades geométricas y del material, tales como el módulo de elasticidad, conductividad térmica, la viscosidad y segundo momento de área.

Por otro lado, hay parámetros que producen perturbaciones en un sistema, como por ejemplo las fuerzas externas, momentos, la diferencia de temperatura a través de un medio, y la diferencia de presión en el flujo.

Las características del sistema dictan el comportamiento natural de un sistema, y siempre aparecen en la parte homogénea de la solución de la ecuación diferencial que gobierna. Por el contrario, los parámetros que causan las perturbaciones aparecen en la solución particular. Es importante entender el papel de estos parámetros en el modelado de elementos finitos en términos de sus respectivas participaciones en la matriz de rigidez o conductancia y en matriz de fuerzas o cargas (Cruz Castro, Hernández Gómez, & Urriolagoitia Sosa, 2017).

Las características del sistema siempre se mostrarán en la matriz de rigidez, matriz de conductancia o matriz de resistencia, mientras que los parámetros de perturbación siempre aparecerán en la matriz de carga (Moaveni, 2007).

2.3.1 PASOS BÁSICOS PARA LA APLICACIÓN DEL MEF

Los pasos básicos que intervienen en cualquier análisis por el método del elemento finito

FASE DE PRE PROCESAMIENTO

1. Crear y discretizar el dominio de solución en elementos finitos; es decir, subdividir el problema en nodos y elementos.
2. Asumir una función de forma para representar el comportamiento físico de un elemento; es decir, una función continua se supone para representar el comportamiento aproximado (solución) de un elemento.
3. Desarrollar las ecuaciones para un elemento.
4. Ensamblar los elementos para presentar todo el problema. Construir la matriz de rigidez global.
5. Aplicar las condiciones de frontera, las condiciones iniciales y de carga.

FASE DE SOLUCIÓN

6. Resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales de forma simultánea para obtener resultados nodales, tales como los valores de desplazamiento

en diferentes nodos o valores de temperatura en diferentes nodos de un problema de transferencia de calor.

FASE DE POST PROCESAMIENTO

7. Obtener otra información importante. En este punto, se puede estar interesado en los valores de esfuerzos principales, los flujos de calor, etc.

En general, existen varios enfoques para la formulación de problemas de elementos finitos:

- a) Formulación directa. Este enfoque se utiliza para los problemas relativamente simples, y por lo general sirve como un medio para explicar el concepto de MEF.
- b) Formulación de residuales ponderados. Este es un método versátil, lo que permite la aplicación de MEF a problemas cuya funcional no puede ser construido. Este enfoque utiliza directamente las ecuaciones diferenciales que regulan, tales como las de transferencia de calor y la mecánica de fluidos.
- c) Enfoque variacional: Este enfoque se basa en el cálculo de variaciones, que implica buscar máximos y mínimos de una función. Este funcional corresponde a la energía potencial en la mecánica estructural.

Es importante tener en cuenta que los pasos básicos que intervienen en cualquier análisis de elementos finitos, independientemente de cómo se genera el modelo de elementos finitos, serán los mismos que los indicados anteriormente (Moaveni, 2007).

2.3.2 MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO PARA UN ELEMENTO TRIDIMENSIONAL ELÁSTICO. ASPECTOS GENERALES

En el diseño mecánico existen una gran variedad de estructuras en 3D que no pueden ser adecuadamente representados mediante modelos en 1D o 2D. Los elementos sólidos que se fundamentan en la teoría de elasticidad 3D son los elementos más generales para el análisis de esfuerzos cuando los elementos barra, viga, esfuerzo y deformación plana, placa superficie ya no son válidos o precisos. En general, el análisis estructural 3D es una de las formas más importantes y poderosas de suministro de información sobre el comportamiento de un diseño de ingeniería (Chen, 2015).

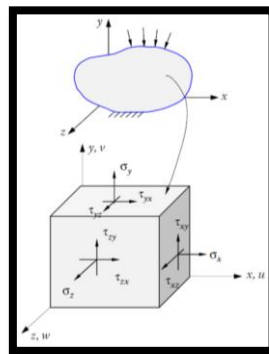


Fig. 2.3 Estado de esfuerzos en un punto de un cuerpo elástico 3D (Chen, 2015).

El estado de esfuerzos en un punto de un cuerpo elástico 3D se muestra en la **Fig. 2.3**. En forma vectorial, las seis componentes de esfuerzo independientes que determinan el estado de esfuerzos se pueden escribir como:

$$\sigma = \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}, \quad o \quad [\sigma_{ij}]$$

Del mismo modo, los seis componentes de la deformación unitaria independientes en 3D se pueden expresar como:

$$\varepsilon = \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}, \quad o \quad [\varepsilon_{ij}]$$

RELACIÓN ESFUERZO – DEFORMACIÓN UNITARIA

La relación esfuerzo - deformación unitaria en 3D está dada por:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

En forma matricial nos queda de la siguiente manera:

$$\sigma = E\varepsilon$$

DESPLAZAMIENTO

El campo de desplazamiento puede ser descrito como:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$$

RELACIÓN DESPLAZAMIENTO – DEFORMACIÓN UNITARIA

El campo de deformación unitaria está relacionado con el campo de desplazamiento como se indica a continuación:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z},$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

Estas seis ecuaciones se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3$$

O simplemente, en notación tensorial

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$$

ECUACIONES DE EQUILIBRIO

Los esfuerzos y el vector de fuerza f en cada punto, satisface las siguientes tres ecuaciones de equilibrio para los problemas elastoestáticos.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0,$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0,$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0$$

O en notación tensorial:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0$$

CONDICIONES DE FRONTERA

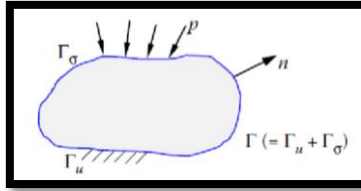


Fig. 2.4 La frontera de un dominio elástico 3D (Chen, 2015).

La frontera Γ de la región 3D se puede dividir en dos partes, Γ_u y Γ_σ (**Fig. 2.5**). Las condiciones de contorno o de frontera (BCS) se pueden describir como:

$$u_i = \bar{u}_i, \quad \text{En } \Gamma_u \text{ (desplazamiento específico)}$$

$$t_i = \bar{t}_i, \quad \text{En } \Gamma_\sigma \text{ (tracción específica)}$$

En el que las cantidades con barra denotan los valores dados, y la tracción (esfuerzo sobre una superficie) se define por $t_i = \sigma_{ij}n_j$ o en forma de matriz:

$$\begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix}$$

Con n siendo la normal.

ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Para análisis de esfuerzos en 3D, se deben de resolver las ecuaciones de la **relación esfuerzo - deformación unitaria**, la de la **relación desplazamiento - deformación unitaria** y las ecuaciones de equilibrio bajo las condiciones de frontera con el fin de obtener los esfuerzos, la deformación unitaria y los campos de desplazamiento (15 ecuaciones para 15 incógnitas de un problema en 3D). Las soluciones analíticas son a menudo difíciles de encontrar y por lo tanto los métodos numéricos tales como el Método del Elemento Finito se aplican a menudo en el análisis de esfuerzos en 3D.

TIPOS DE ELEMENTOS SÓLIDOS TÍPICOS

Se puede clasificar el tipo de elementos para los problemas en 3D de la siguiente manera, de acuerdo a sus formas y a los órdenes de las funciones de forma construidos en los elementos:

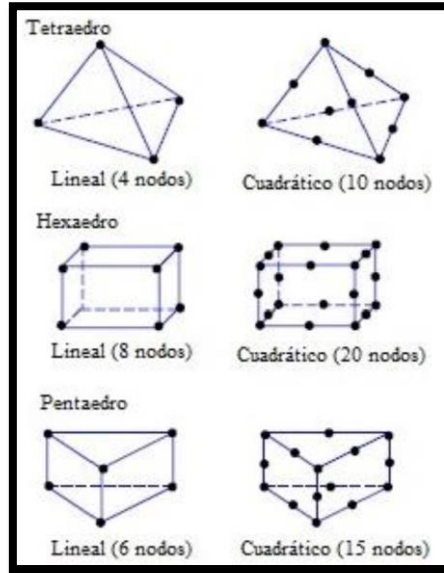


Fig. 2.5 Diferentes tipos de elementos sólidos en 3D (Chen, 2015).

Siempre que sea posible, se debe tratar de aplicar los elementos de orden superior (cuadrático), como el tetraedro de 10 nodos y el hexaedro de 20 nodos para el análisis de esfuerzos en 3D. Se debe de evitar el uso de los elementos lineales, especialmente el elemento tetraedro de 4 nodos en el análisis de esfuerzos en 3D: ya que son inexactos para tales fines. Sin embargo, son adecuados para utilizarlos en el análisis de deformación o de análisis de vibración.

ESFUERZO

Para calcular los esfuerzos dentro de un elemento, se utiliza la siguiente relación, una vez que el vector de desplazamiento nodal es conocido para dicho elemento:

$$\sigma = E\varepsilon = EBd$$

Los esfuerzos se evalúan en puntos seleccionados (puntos de Gauss o nodos) en cada elemento. Los valores de esfuerzos en los nodos son a menudo discontinuos y menos precisos. Se emplea a menudo para suavizar los resultados del campo de esfuerzos, un promedio de los esfuerzos de los elementos circundantes alrededor de un nodo.

El esfuerzo de Von Misses para problemas en 3D está dado por:

$$\sigma_e = \sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Donde σ_1 , σ_2 y σ_3 son los tres esfuerzos principales (Moaveni, 2007).

2.3.3 ANÁLISIS DE ESFUERZOS CON ANSYS

ANSYS® es un programa de elementos finitos destinado a la simulación, que predice cómo funcionará y responderá un determinado componente bajo una serie de condiciones y cargas (Marco Esteban & García Prada, 2010).

GENERACIÓN/IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN ANSYS

El proceso de análisis comienza con la generación de la geometría en ANSYS®. Sin embargo, dado que es muchas veces complicado modelar en este programa, existe la posibilidad de importarla desde otro programa, SolidWorks®, por ejemplo. Para ello el formato utilizado generalmente es IGES (Initial Graphics Exchange Specification), un formato neutro de datos que permite el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computador.

DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

Una vez que la geometría ha sido importada, se definen las propiedades del material, comenzando por el tipo de elemento. Para modelados irregulares como los producidos por sistemas CAD/CAM se recomienda utilizar el tipo de elemento Solid 186, que es de un orden superior en 3D y tiene 20 nodos.

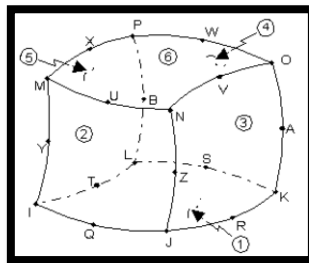


Fig. 2.6 Elemento Solid 186 3D 20 nodos (Marco Esteban & García Prada, 2010).

Una vez que se ha definido el tipo de elemento estructural, se definen las constantes que definen al material. Para análisis estáticos estructurales inicialmente se debe definir si el modelo responde a un comportamiento elástico lineal y si la geometría se considera isotrópica. Posteriormente se deben introducir datos como el valor del módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν) de los materiales utilizados.

MALLADO

Una premisa fundamental del uso del procedimiento de elementos finitos es que el elemento se divide en pequeñas regiones discretas conocidas como elementos finitos, como su propio nombre indica. Las ecuaciones se escriben para cada elemento y se ensamblan en una matriz global, calculando así la solución tras aplicar las cargas y restricciones del problema.

En general, no hay un tamaño específico de elemento para confiar más o menos en la solución, más bien es necesario llevar a cabo lo que se podría llamar pruebas de convergencia. Esto implicaría resolver el problema comenzando con un mallado cualquiera, observar y apuntar resultados. Repetir entonces el mismo problema con un mallado más fino, y comparar entonces los resultados con los del análisis previo. Si los resultados son similares, entonces el primer mallado es probablemente suficiente bueno para esa geometría, cargas y restricciones en particular. Si los resultados difieren en una gran cantidad, será necesario entonces repetir el análisis con una malla aún más fina.

Nótese que en este tipo de análisis, los términos referentes a una pequeña o una gran diferencia en los resultados obtenidos son muy subjetivos. Dependiendo así por ejemplo de la naturaleza del problema, del nivel de detalle requerido en los resultados, etc.

En conclusión, es deseable realizar este tipo de pruebas de convergencia en modelos de elementos finitos para confirmar que se ha utilizado un elemento lo suficientemente pequeño.

A medida que el mallado se hace más fino, el tamaño de los elementos es menor, y se recogen con mayor fiabilidad datos de elementos más próximos entre sí.

2.4 DEFORMACIÓN, DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACIÓN UNITARIA

Es necesario repasar conceptos fundamentales que ayudaran a comprender mejor el fenómeno de deformación y esfuerzo al que estará sometida la grúa auxiliar durante la realización de las pruebas experimentales.

Robert Hooke estableció en 1678 que “la relación que existe entre tensiones y deformaciones en los cuerpos sometidos a esfuerzos mecánicos es lineal siempre y cuando se trate de un material isotrópico, homogéneo y no se sobrepasa su límite elástico” (Hibbeler, 2006).

El concepto de deformación es análogo al de alargamiento o deformación unitaria y se expresa mediante la siguiente relación adimensional:

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

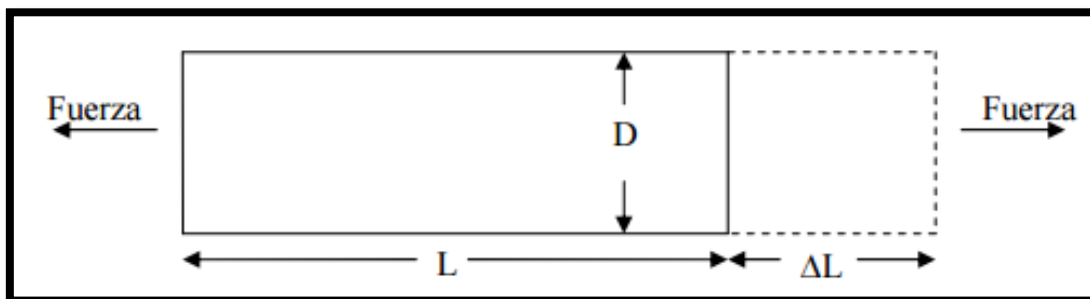


Fig. 2.7 Diagrama que representa la deformación unitaria de una barra (Callister, 2007).

El esfuerzo o tensión (σ) que soporta una estructura se define como la relación entre la fuerza y el área:

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

En el caso de la barra de sección circular mostrada en la **Fig. 2.1**, el área (A) será igual a:

$$A = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Para evitar confusión, es importante definir claramente los conceptos de deformación, deformación unitaria y desplazamiento.

Se entiende por deformación al cambio de tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre él mismo o por dilatación o contracción térmica. Se dice que un cuerpo sufrió deformación o está deformado cuando las posiciones relativas de sus puntos han cambiado. En cambio, en un cuerpo desplazado las posiciones de los puntos, respecto a un punto externo al cuerpo, han cambiado pero permanecen estables entre sí.

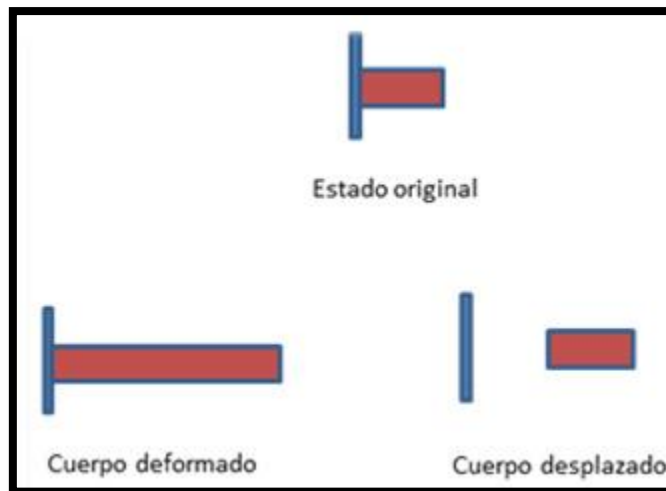


Fig. 2.8 Diferencia entre un cuerpo deformado y uno desplazado (Ortíz Berrocal, 2007).

Un factor muy importante para entender el fenómeno de deformación en materiales es el comprenderlo desde la manera en que éstos están constituidos a nivel de su estructura cristalina.

2.4.1 ESTRUCTURA CRISTALINA

La estructura cristalina es la forma sólida de cómo se ordenan y empaquetan los átomos, moléculas, o iones. Estos son empaquetados de manera ordenada y con patrones de repetición que se extienden en las tres dimensiones del espacio. La cristalografía es el estudio científico de los cristales y su formación.

El estado cristalino de la materia es el de mayor orden, es decir, donde las correlaciones internas son mayores. Esto se refleja en sus propiedades anisótropas y discontinuas. Suelen aparecer como entidades puras, homogéneas y con formas geométricas definidas (hábito) cuando están bien formados. No obstante, su morfología externa no es suficiente para evaluar la denominada cristalinidad de un material.

El grupo más pequeño de partículas en el material que constituye el patrón repetitivo es la celda unitaria de la estructura. La célula unitaria define completamente la simetría y la estructura de toda la red cristalina, que se construye mediante la traducción repetitiva de la celda unitaria a lo largo de sus ejes principales. Se dice que los patrones de repetición están situados en los puntos de la red de Bravais. Las longitudes de los ejes principales o bordes de la celda unitaria y los ángulos entre ellos son las constantes de la red, también llamadas parámetros de la red.

2.4.2 DEFECTOS E IMPUREZAS

Los cristales reales presentan defectos o irregularidades en sus disposiciones ideales y son estos defectos los que determinan críticamente muchas de las propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales reales. Cuando un átomo sustituye a uno de los principales componentes atómicos dentro de la estructura cristalina, puede producirse una alteración en las propiedades eléctricas y térmicas del material. Las impurezas también pueden manifestarse como impurezas de spin en ciertos materiales. La investigación sobre las impurezas magnéticas demuestra que una alteración sustancial de ciertas propiedades, como el calor específico, puede verse afectada por pequeñas concentraciones de una impureza, como por ejemplo las impurezas en las aleaciones ferromagnéticas semiconductoras pueden conducir a propiedades diferentes tal como se predijeron por primera vez a finales de los años sesenta. Las dislocaciones en la red cristalina permiten cortar a una tensión inferior a la necesaria para una estructura cristalina perfecta.

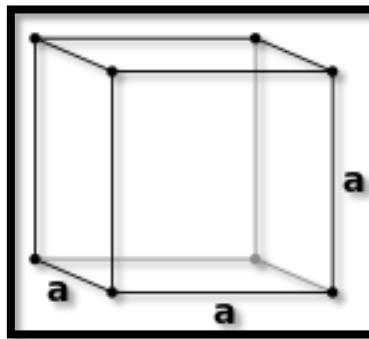


Fig. 2.9 Celda unitaria del tipo cubica simple (CS) (Callister, 2007).

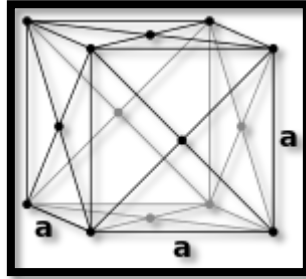


Fig. 2.10 Celda unitaria del tipo cubica centrada en las caras (FCC) (Callister, 2007).

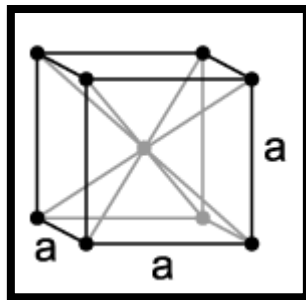


Fig. 2.11 Celda unitaria del tipo cubica centrada en el cuerpo (BCC) (Callister, 2007).

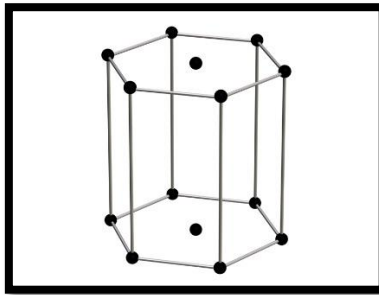


Fig. 2.12 Celda unitaria del tipo hexagonal compacta (HC) (Callister, 2007).

2.4.3 REDES CRISTALINAS METÁLICAS

Los metales regularmente cristalizan en estructuras cristalinas de tipo cubica centrada en el cuerpo (BCC), cubica centrada en las caras (FCC) y hexagonal compacta (HC).

En el caso de la estructura cubica centrada en el cuerpo (BCC) empaqueta dos átomos por celda y proporciona buena resistencia a la deformación a los materiales que la poseen. Un ejemplo de material que cristaliza con este tipo de estructura cristalina es el Hierro (Fe).

Mientras tanto la estructura cubica centrada en las caras (FCC) empaqueta cuatro átomos por celda y proporciona una mejor resistencia a la deformación a los materiales que la poseen, a comparación de los que cristalizan con estructura cubica centrada en el cuerpo (BCC). Un ejemplo de material que cristaliza con este tipo de estructura cristalina es el Cobre (Cu).

La estructura hexagonal compacta (HC) empaqueta seis átomos por celda y es característica de materiales poco deformables, a comparación de los que poseen estructura cubica centrada en el cuerpo (BCC) o cúbica centrada en las caras (FCC). Un ejemplo de material que cristaliza con este tipo de estructura cristalina es el Titanio (Ti).

2.5 ACERO ESTRUCTURAL ASTM A36

La grúa auxiliar que se analizara en este trabajo está fabricada de perfil tubular rectangular (PTR) de acero estructural ASTM A36. Por lo cual resulta de suma importancia conocer el origen, características y propiedades, así como principales aplicaciones de este material.

El acero estructural ASTM A36 se desarrolló desde hace muchos años en Estados Unidos para la fabricación de estructuras remachadas, atornilladas y soldadas, mejorando el contenido de carbono de los aceros disponibles en aquella época, como el ASTM A7. Con la innovación de este tipo de acero, las conexiones soldadas empezaron a desplazar a las remachadas (Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería, 2007).

La norma ASTM para acero estructural A36 indica que este tipo de acero es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización. Su composición química es la siguiente:

Tabla 2.1 Tabla de la composición química de la colada de acero ASTM A36 (ASTM, 2004).

Elemento	Porcentaje
Carbono (<i>C</i>)	0.26% máximo
Manganeso (<i>Mn</i>)	No hay requisito
Fósforo (<i>P</i>)	0.04% máximo
Azufre (<i>S</i>)	0.05% máximo
Silicio (<i>Si</i>)	0.40% máximo
Cobre (<i>Cu</i>)**	0.20% mínimo

** Cuando se especifique.

En cuanto a las propiedades mecánicas de este acero, la **Tabla 2.2** enlista las principales.

Tabla 2.2 Tabla de las principales propiedades mecánicas del acero ASTM A36 (ASTM, 2004).

Propiedad	Magnitud
Densidad	7850 kg/m ³
Esfuerzo de fluencia mínimo (σ_y)	250 MPa
Resistencia a la tracción (σ_T)	400 MPa (mínimo) y 550 MPa (máximo)
Módulo de elasticidad (E)	200 GPa

El módulo de elasticidad (E) del acero estructural ASTM A36 es constante en todos los grados de acero estructural. El acero A36 se produce en una amplia variedad de formas, que incluyen: planchas, perfiles estructurales, tubos y láminas.

Las piezas hechas a partir de acero A36 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura. Los más comúnmente usados son los menos costosos y rápidos como la soldadura por arco metálico protegido, con arco metálico y gas soldadura oxiacetilénica. Este tipo de acero es también comúnmente atornillado y remachado en las aplicaciones estructurales: edificios, puentes y torres, por ejemplo.

El acero estructural ASTM A36 es equivalente en la Norma Mexicana DGN-NMX al acero B-254.

La **Fig. 2.13** muestra la curva esfuerzo – deformación unitaria típica del acero estructural B-254 (ASTM A36).

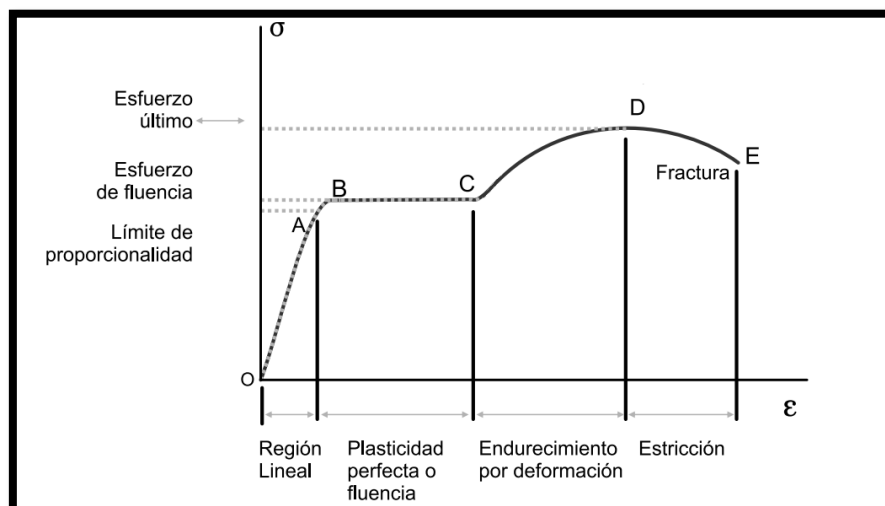


Fig. 2.13 Curva esfuerzo - deformación típica del acero estructural (ASTM, 2004).

2.6 MÉTODO EXPERIMENTAL DE EXTENSOMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE MICRO DEFORMACIONES

Debido a que en este trabajo se realizara la aplicación de varios métodos experimentales para la medición de deformaciones y esfuerzos en una estructura sometida a cargas, resulta fundamental el conocer los principios teóricos en los cuales están basados.

Basándose en la relación establecida por Hooke, la extensometría es el método que tiene por objeto la medida de las deformaciones superficiales de los cuerpos.

GALGA EXTENSOMÉTRICA Y EL PUENTE DE WHEATSTONE

Una galga extensométrica es un sensor basado en el efecto piezorresistivo, en el cuál un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica. Posteriormente es necesario utilizar un transductor que interprete estas variaciones en la resistencia eléctrica de la galga y las transforme en valores de deformación. Generalmente los resultados obtenidos están dados en micro deformaciones ($\mu\epsilon$) aunque obviamente depende de la resolución y capacidad del transductor (Hannah & Reed, 1994).

PUENTE DE WHEATSTONE

El puente de Wheatstone es el transductor por excelencia utilizado en este tipo de aplicaciones que involucran la medición de deformaciones (micro deformaciones) mediante el uso de galgas extensométricas.

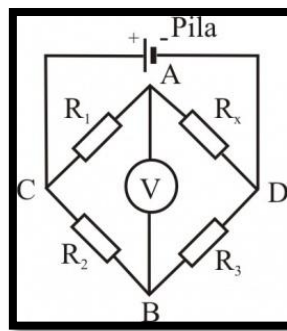


Fig. 2.14 Puente de Wheatstone (Brophy, 1979).

El puente Wheatstone es un circuito muy interesante y se utiliza para medir el valor de componentes pasivos como las resistencias.

Este circuito consiste en tres resistencias conocidas y una resistencia desconocida, conectadas entre sí en forma de diamante. Se aplica una corriente continua a través de dos puntos opuestos del diamante y se conecta un galvanómetro a los otros dos puntos. Cuando todas las resistencias se nivelan, las corrientes que fluyen por los dos brazos del circuito se igualan, lo que elimina el flujo de corriente, el puente puede ajustarse a cualquier valor de la resistencia desconocida, que se calcula a partir los valores de las otras resistencias. Se utilizan puentes de este tipo para medir la inductancia y la capacitancia de los componentes de circuitos. Para ello

se sustituyen las resistencias por inductancias y capacitancias conocidas. Los puentes de este tipo suelen denominarse puentes de corriente alterna, porque se utilizan fuentes de corriente alterna en lugar de corriente continua.

El puente de Wheatstone se muestra en la **Fig. 2.14** y está constituido por cuatro resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , de las cuales una de ellas es desconocida y su valor debe determinarse.

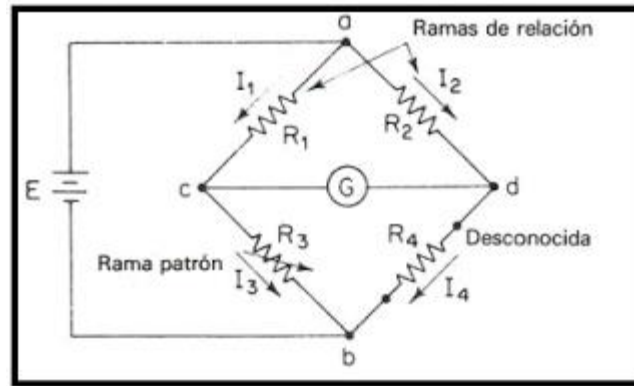


Fig. 2.15 Disposición del puente de Wheatstone (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

El puente de Wheatstone tiene cuatro ramas resistivas, una fuente (una batería) y un detector de cero (el galvanómetro). Para determinar la incógnita, el puente debe estar balanceado y ello se logra haciendo que el galvanómetro mida 0 V, de forma que no haya paso de corriente por él. Debido a esto se cumple que:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

Al lograr el equilibrio, la corriente del galvanómetro es 0, entonces:

$$I_1 = I_3 = \frac{E}{R_1 + R_3}$$

$$I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_x}$$

Donde $R_x = R_4$ y combinando las tres ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_3} = \frac{R_2}{R_2 + R_x}$$

Resolviendo:

$$R_1 R_x = R_2 R_3$$

Expresando R_x en términos de las resistencias restantes:

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1}$$

En donde R_3 se denomina “*rama patrón*” y R_2 y R_1 son “*ramas de relación*”.

El puente de Wheatstone se emplea en mediciones de precisión de resistencias desde 1 hasta varios Ohm.

TIPOS DE GALGAS

Existen varios tipos de galgas extensométricas que históricamente fueron desarrolladas a medida que se conocían nuevas teorías basadas en la mecánica, óptica, eléctrica, acústica y neumática. Huggenberger construyó el primer elemento extensométrico mecánico, aunque los que más se utilizan en los centros de investigación son las galgas extensométricas eléctricas que fueron introducidas por Runge y Simmons en 1939.

La utilización de uno u otro tipo de galga depende de la aplicación donde se necesiten, pero en general, deben seguir unas propiedades básicas:

- No deben verse influenciadas las medidas por efectos ambientales: temperatura, humedad, entre otros.

Como esta propiedad es, muchas veces, imposible de conseguir, al menos la galga no debe dar lugar a grandes variaciones.

- La exactitud de medida de deformaciones debe estar en torno a ± 1 pe en el rango adecuado de trabajo.
- El tamaño de la galga debe ser reducido para caracterizar el estado tensional de puntos y no de ‘zonas’ de tensión.

Galgas mecánicas. Este tipo de galgas son poco utilizadas en la actualidad excepto en los equipamientos para roturas de nuevos materiales. Se las conoce como extensómetros y van acompañadas de galgas de otro tipo. Incluyen pequeños muelles, anillos, entre otros, y su funcionamiento se basa en la compresión o alargamiento de la probeta a ensayar, la cual actúa mecánicamente contra los brazos del extensómetro.

Galgas ópticas. Aunque pareciera que tuvieran relación con la fotoelasticidad, este tipo de galgas han surgido gracias a la aparición del láser. Se basan en la difracción que produce una galga deformada sobre una luz que incide sobre ella.

Galgas eléctricas. Son las más utilizadas en la actualidad y se basan en las propiedades eléctricas de los materiales. Existen tres tipos: resistivas, capacitivas e inductivas. Las resistivas se analizan en el siguiente apartado.

Galgas acústicas. Se conocen desde principios del siglo XX aunque fueron perfectamente desarrolladas por R.S. Jerrett en 1944. Su funcionamiento se basa en la modificación de las propiedades acústicas de un material deformado. Para calcular la deformación se comparan con una probeta de material sin deformar en las mismas condiciones sonoras.

Galgas Extensométricas Eléctricas

Hoy en día, el método más empleado para la medida de deformaciones es el basado en las propiedades eléctricas de ciertos materiales. En 1856 Lord Kelvin enunció su principio de funcionamiento, cuando al deformar alambres de hierro y cobre y descubrió que su resistencia eléctrica variaba, siendo mucho mayor en el caso del hierro. En este experimento se utilizó un circuito eléctrico denominado Puente Wheatstone para medir con exactitud esta variación.

Casi 150 años después, este descubrimiento sigue siendo utilizado para la medida de deformaciones. Según este experimento, la resistencia R de un conductor uniforme que tenga una longitud L y un área seccional A con una resistividad específica ρ es:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Y si se denomina **sensibilidad** de aleación metálica utilizada como conductor al cociente entre la variación de resistencia por unidad de resistencia inicial (dR/R) y la deformación aplicada ($\varepsilon = dL/L$) se tiene que:

$$S = \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)$$

La sensibilidad recibe también el nombre de factor de galga (K).

Tabla 2.3 Sensibilidad de distintas aleaciones de materiales.

Material	Sensibilidad (S)
Constatan	2.1
Nicromo (80% Ni, 20% Cr)	2.2
Karma	2.0
Aleación 479	4.1

Si la resistividad no varía con la deformación, el factor de galga será $K = 1 + 2\mu$ y como $\mu \cong 0.3$, para muchos metales, se tiene $K \cong 1.6$. No obstante se pueden conseguir factores de galga superiores, más interesantes, puesto que de este modo para una misma deformación la variación de resistencia es mayor, reduciéndose los requerimientos de sensibilidad del montaje de medida.

Normalmente el fabricante proporciona el valor de K para sus galgas y también el de la resistencia R , con lo que sólo hay que obtener el valor del incremento de resistencia ΔR para saber la deformación:

La deformación unitaria obtenida de este modo es adimensional, aunque suele multiplicarse por un factor de 10^{-6} y hablar de micro deformaciones, utilizándose el símbolo $\mu\epsilon$ para designarlas.

GEOMETRÍA DE LAS GALGAS

Aunque las primeras galgas construidas eran alambres conductores alargados, diversos problemas de montaje y funcionamiento para prevenir sobrecargas, y el facilitar el montaje y concentrar la deformación en zonas pequeñas hizo que en los años 30 Runge y Simmons desarrollaran de forma independiente la primera galga donde un alambre en zigzag descansaba sobre una rejilla de material soporte. El sistema constaba, a su vez, de un terminal al principio y otro al final del elemento conductor.

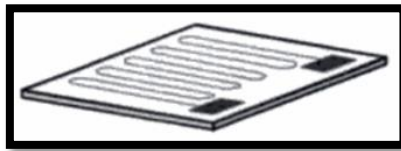


Fig. 2.16 Galga (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

TIPOLOGÍAS DE LAS GALGAS

Debido a que el proceso de fabricación es sencillo, han sido desarrolladas gran cantidad de tipologías de galgas. También existen varios tamaños en función de:

- Las dimensiones de la zona de instalación.
- La distribución de tensiones y deformaciones. Si hay concentración de tensiones hay que recurrir a galgas pequeñas.
- El material sobre el que se mide. Si el material es poco homogéneo (hormigón, materiales compuestos) conviene usar una galga más grande que para un material homogéneo (acero, aluminio).

La figura siguiente muestra galgas compuestas, en donde varias galgas sencillas son dispuestas en varias direcciones o en roseta formando ángulos determinados para obtener las tres componentes de deformación que se buscan ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} .

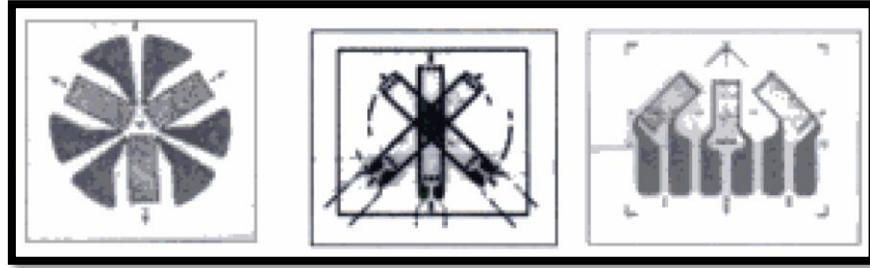


Fig. 2.17 Tipologías de galgas (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE MONTAJE

“Lord Kelvin utilizó un puente de Wheatstone como el de la Fig. 2.18 para su experimento inicial. Esto se debe a que la medida de la deformación de la pieza se basa en la obtención de la variación de resistencia de la galga extensométrica cuando se la somete a la misma deformación” (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002). Para ello se utiliza el montaje en puente de Wheatstone.

La tensión e en el puente equivale a:

$$e = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right)$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ se dice que el puente está equilibrado, siendo en este caso $e = 0$.

En el caso de que una de las resistencias varíe, por ejemplo, $R_1 \neq R_2 = R_3 = R_4$, se desequilibra el circuito y se puede medir e .

Este desequilibrio está relacionado directamente con el ΔR , o lo que es lo mismo, con ϵ .

Los principales problemas que aparecen al medir con galgas extensométricas son:

- Las variaciones de temperatura, que provocan dilataciones diferenciales entre la pieza y la galga pegada a ella, además de variaciones en la propia resistencia de la galga, con lo que se produce un falso de la medida de deformación.
- La humedad, que puede cambiar la resistencia eléctrica entre el medidor y tierra, afectando por tanto a las lecturas de resistencia.
- Los problemas de conexiones defectuosas en la soldadura, despegado de la galga por rigidez excesiva del cable, entre otros.

Para evitar estos problemas existen varias configuraciones: cuarto de puente, puente completo, montaje a dos hilos y montaje a tres hilos.

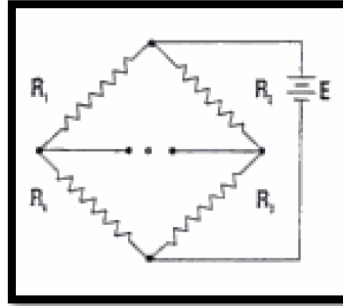


Fig. 2.18 Puente de Wheatstone (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

Montaje en cuarto de puente

En este caso una de las resistencias, por ejemplo R_1 , representa la galga extensométrica, mientras que las otras tres son resistencias patrón de valor igual a R_1 . Cuando la galga se deforma se produce una variación en R_1 (ΔR_1) que provoca el desequilibrio del puente, dando lugar a una tensión e no nula, de valor:

$$e = E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right)$$

Expresión a partir de la cual puede conocerse ΔR_1 a partir de la medida de la tensión e .

Montaje en medio puente

En el montaje en medio puente se montan dos galgas extensométricas, correspondientes a R_1 y R_4 , (Fig. 2.19), para conseguir, por ejemplo, una compensación del efecto de la temperatura. La galga R_1 , se sitúa sobre la pieza, mientras que la R_4 se monta en una pieza del mismo material y sometida a la misma temperatura, pero sin carga. De este modo el incremento de resistencia en R_1 , debido a los efectos de variación de la temperatura se compensa con el equivalente de R_2 que aparece con signo contrario en la ecuación.

Otra posibilidad de montaje en medio puente es la de la Fig. 2.20 en el que, además de compensarse los efectos de temperatura, se obtiene una medida doble de la deformación, ya que las deformaciones de R_1 y R_4 son iguales y de signo opuesto si la sección de la pieza es simétrica.

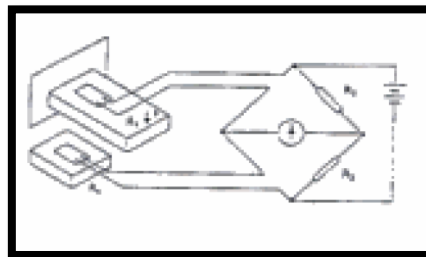


Fig. 2.19 Montaje en medio puente para temperatura (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

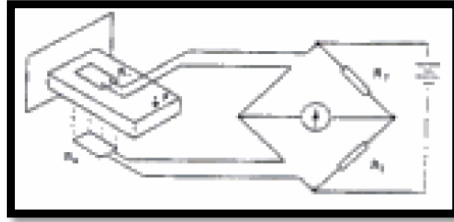


Fig. 2.20 Medio puente para tensión (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

Montaje en puente completo

Si las cuatro resistencias del puente corresponden a galgas extensométricas, el montaje se llama puente completo. Se utiliza para montajes como los de la Fig. 2.21 correspondientes a transductores para torsión y flexión.

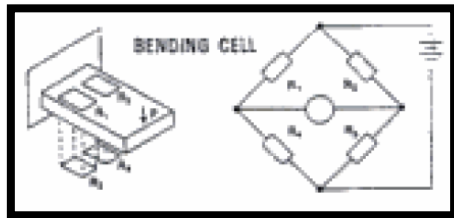


Fig. 2.21 Puente completo (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

Montaje de dos hilos vs montaje de tres hilos

El montaje en cuarto de puente, puede realizarse con dos o tres hilos. Este montaje presenta un problema, que es que la resistencia del cable que va desde los terminales de la galga al aparato de medida afecta toda ella a la misma rama del puente, con lo que la medida queda falseada. Para solucionar esto se recurre al montaje con tres hilos. Si la instalación se realiza de esta forma, se añade la misma resistencia en las dos ramas del puente, con lo que se compensa el error anterior.

Todos estos sistemas están incluidos en los equipos actuales como el que muestra la Fig. 2.22.



Fig. 2.22 Medidor P3500 (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

2.7 FOTOELASTICIDAD

Una de las formas de determinar los esfuerzos de forma visible en un elemento mecánico es mediante la técnica de la fotoelasticidad. La información obtenida mediante ella no solamente referirá la orientación que presenta dichos esfuerzos, sino también ayudara a determinar su magnitud, logrado con ello datos comparativos con patrones normalizados, para saber si un elemento resistirá las condiciones de funcionamiento que la práctica demanda.

La fotoelasticidad es un método de análisis de esfuerzos en el que se usa un modelo de elemento o estructura de interés. El método se hace de un plástico especial que posee las propiedades ópticas y de deformación convenientes. Puesto que el modelo es similar a la estructura real, la distribución de los esfuerzos permite una buena visualización del comportamiento de los mismos en el modelo real. Sin embargo, las propiedades mecánicas del material del modelo y del material de la estructura pueden diferir considerablemente. Este método se emplea principalmente, en problemas de distribución de esfuerzos en dos dimensiones, donde la deformación es básicamente paralela a un plano, así como para aquellos elementos cuyas formas dificultan el estudio analítico del problema y/o tienen espesor constante. La fotoelasticidad se fundamenta en un fenómeno óptico llamado **birrefringencia temporal**.

“La birrefringencia, también conocida como doble refracción, es el fenómeno óptico se observa cuando una radiación luminosa incide sobre un medio no isótropo. La onda se descompone en dos distintas que se propagan en diferentes direcciones. La primera sigue las leyes normales de la refracción y se llama rayo ordinario; la otra tiene una velocidad y un índice de refracción variables y se llama rayo extraordinario. Ambas ondas están polarizadas perpendicularmente” (Rossi, 2003).

El término de **birrefringencia temporal** se refiere a sustancias normalmente isótropas e inactivas ópticamente que pueden tornarse temporalmente birrefringentes u ópticamente activas por influencia de agentes externos como lo pueden ser las tensiones mecánicas las cuales hacen que la luz aparezca con distinta intensidad en distintos puntos del modelo.

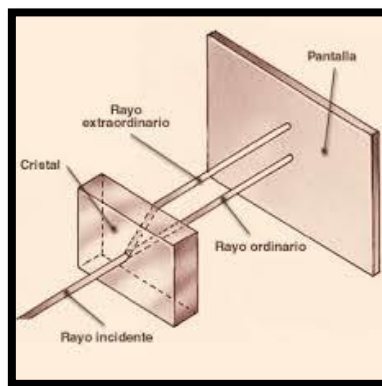


Fig. 2.23 Birrefringencia (Rossi, 2003).

FOTOELASTICIDAD EN MODELOS TRANSLÚCIDOS

Es una técnica muy precisa y con la ventaja de presentar el estado de tensiones de toda la pieza instrumentada, permitiendo además trabajar con modelos a escala, elaborados a base de plásticos transparentes o colocar estos plásticos sobre el prototipo. Para ello se usan plásticos translúcidos, como la resinas epoxi, de buenas características fotoelásticas y que presentan una propiedad específica que los hace adecuados para su uso en fotoelasticidad tridimensional. Estos modelos cargados y sometidos a cierta temperatura durante un periodo de tiempo, cuando se enfrían hasta la temperatura ambiente, conservan el mismo estado tensional, apareciendo el fenómeno denominado “esfuerzos congelados”.

FOTOELASTICIDAD REFLECTIVA

Este tipo de fotoelasticidad permite el análisis y la descripción de la distribución de los esfuerzos en elementos sometidos a carga mediante el uso de un polariscopio móvil. Su característica particular es que un haz de luz, saliente de una fuente o un foco, y que incide sobre la superficie de estudio, se refleja hacia el lente o polariscopio circular, el cual, interfiere con dicho haz y hace posible la apreciación de los patrones de franjas por el ojo humano. Existen patrones de las franjas isocromáticas (describen la diferencia de tensiones principales), y de los patrones de franjas isoclínicas (describen la dirección de los esfuerzos principales).

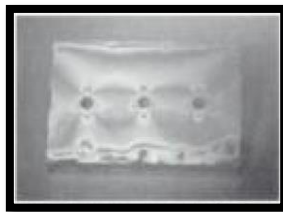


Fig. 2.24 Líneas isóclinas (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

En esta técnica se requiere el uso de materiales fotoelásticos (recubrimientos) que sirvan como apoyo para visualizar de mejor manera el efecto de patrones de franjas en materiales que quieran a analizarse y que posean superficies poco cooperativas en cuanto a lo que a reflexión de luz se refiere.

En este tipo de fotoelasticidad se utiliza el polariscopio por reflexión, el cual consta de un cabezal óptico que proporciona luz blanca. Esta luz atraviesa una lente donde es polarizada con un cuarto de onda de retardo. Una vez la luz se refleja en el material birrefringente puede ser analizada en la segunda lente, que es un analizador de un cuarto de onda.



Fig. 2.25 Polariscopio por reflexión (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

Su utilización es sencilla y a la hora de interpretar cualitativamente el estado de esfuerzos, el usuario ha de ser capaz de reconocer el índice de franja N a partir del color observado.

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = fN$$

En donde:

f es el valor de franja característico del material fotoelástico utilizado

La ecuación anterior puede ser escrita en términos de esfuerzos de la siguiente manera:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1 + \mu} * fN$$

Y a partir de ella es posible conocer el esfuerzo cortante máximo en cada punto:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} * \frac{E}{1 + \mu} * fN$$

Para un reconocimiento más fácil del índice de franja se puede utilizar el compensador, que se compone de dos láminas de material birrefringente que cambian la polaridad de forma adicional en la trayectoria. Esta birrefringencia extra es función de la posición relativa de las dos láminas. Midiendo la posición relativa de las dos laminas cuando se ha compensado toda la birrefringencia de la pieza (de forma que se aprecia una línea de color negro en el punto de medida), se puede conocer el índice de franja en el punto.

Finalmente, para la medida de la orientación de las deformaciones y tensiones principales, se coloca el analizador del polariscopio en la posición adecuada. En esta posición la luz se polariza según planos y en estas condiciones las líneas isóclinas, es decir aquellas de igual inclinación que las tensiones principales, aparecen como líneas negras cuando el analizador se orienta en su misma dirección. Por ello, midiendo la inclinación del polarizador cuando

aparece una línea negra en el punto de medida, se conoce la orientación de las tensiones principales en dicho punto.

Si se trabaja en un punto de estado uniaxial, como puede ser un contorno de la pieza, la tensión principal mínima es nula, y en este caso se puede conocer la tensión principal máxima.

En conclusión, el equipo permite:

- Medir la magnitud de la diferencia de tensiones principales en estados biaxiales.
- Medir la magnitud del esfuerzo en zonas uniaxiales.
- Interpretar el estado de esfuerzo a través de líneas equitensionales en toda la pieza.

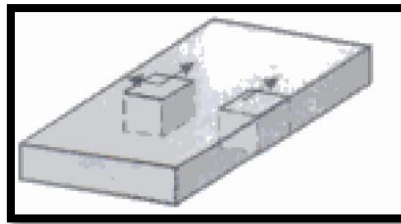


Fig. 2.26 Esfuerzos uniaxiales y biaxiales (Romero García, Museros Romero, Martínez Rodrigo, & Poy Gil, 2002).

FOTOELASTICIDAD POR REFRACCIÓN

En este tipo de fotoelasticidad se utiliza el polariscopio por refracción o transmisión del haz luminoso, el cual se monta sobre un proyector de transparencias, y consta de dos lentes (polarizador y analizador), así como de dos cristales extraíbles que producen un retardo de un cuarto de onda, todo ello mecánicamente acoplado para una rotación síncrona.

Al igual que con el polariscopio anterior, para la interpretación cualitativa del estado de esfuerzos, se ha de ser capaz de reconocer el índice de franja N a partir del color observado. Una vez que se conoce N , La diferencia de los esfuerzos principales en cada punto puede obtenerse a partir de la expresión:

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{CN}{t}$$

En donde:

C es una constante del material

N es el índice de franja

t es el espesor del modelo

El esfuerzo cortante máximo en cada punto se puede obtener así:

$$\tau_{max} = \frac{CN}{2t}$$

Como ya se ha dicho antes, si se estudia un punto de estado uniaxial, como puede ser un contorno de la pieza, la tensión principal mínima es nula, y se puede conocer el esfuerzo principal máximo.



Fig. 2.27 Polariscope por refracción.



Fig. 2.28 Polarizador y analizador.

RECUBRIMIENTO FOTOELÁSTICO

Los recubrimientos fotoelásticos se encuentran disponibles en diferentes presentaciones. En general son: en forma líquida para fabricar hojas de conformado, hojas sólidas y planas, y en líquidos para ser aplicados por rociado.



Fig. 2.29 Material necesario para la preparación de hojas de resina fotoelástica.

La selección de revestimientos y su adecuada aplicación a la pieza de ensayo son condiciones esenciales para el éxito del análisis fotoelástico. Existen varios factores que afectan la selección del recubrimiento. A continuación se mencionan los principales:

1. Método de aplicación del recubrimiento
2. Sensibilidad
3. Severidad del contorno

4. Efecto de refuerzo
5. Máxima elongación
6. Prueba de temperatura

La gama de recubrimientos ofrecida por los distribuidores de este tipo de productos es variada. La siguiente tabla muestra la ofrecida por Vishay MicroMeasurements®.

Tabla 2.4 Tipos de resinas fotoelásticas y sus aplicaciones típicas.

Tipo de resina	Aplicación típica
PS-1	Prueba sobre metales, hormigón, vidrio y plásticos duros en el rango elástico y elastoplástico.
PS-8	
PL-1	
PL-8	
PS-3	
PL-2	Las pruebas en materiales blandos como caucho, plástico y madera.
PL-3	
PS-4	
PS-6	
PS-6	

De acuerdo a la **Tabla 2.4**, el tipo de resina indicado para esta tesis, debido a que se trata de una prueba sobre metal, es el PL-1.

PROPIEDADES DE LA RESINA TIPO PL-1

- Factor K: 0.094 nominal, se requiere calibración para valor exacto (Propiedad óptica)
- Elongación máxima: 3 a 5% (Propiedad mecánica)
- Módulo de elasticidad: 420 000 psi [2,9 GPa]
- Relación de Poisson: 0.36
- Temperatura Máxima útil: 450 ° F [232 ° C]
- Sensibilidad (Strain – Optic) constante Para: 180 ° F [82 ° C]
- Transparencia: Excelente. Generalmente se oscurece después de 2 a 3 meses.

2.8 INTERFEROMETRÍA

Otro de los métodos que será utilizado en el análisis desarrollado en este trabajo es el de Correlación Digital de Imágenes (CDI) en dos dimensiones, el cual está basado en ciertos principios teóricos de la óptica en general y en particular de la técnica de interferometría.

En los años 1960 y 1970, investigadores en inteligencia artificial y robótica comenzaron a desarrollar algoritmos para ser usados mediante visión artificial y metodologías de estéreo visión en paralelo con aplicaciones de fotogrametría. A medida que las técnicas basadas en imágenes digitales fueron mejorando, el campo experimental de la ingeniería fue buscando aplicaciones de estas técnicas como: holografía, moiré, interferometría, entre otras (Schwider, 1990).

La interferometría es un método de medición que aplica el fenómeno de interferencia de las ondas (generalmente ondas de luz, radio o sonido). Las mediciones pueden incluir otras determinadas características de las propias ondas y los materiales por los que se propagan. Además, la interferometría se utiliza para describir las técnicas que utilizan ondas de la luz para estudiar los cambios de desplazamiento.

En 1887, Albert A. Michelson (Michelson & Morley, 1887) desarrolló el primer interferómetro y demostró el uso del principio de la interferencia de la luz como herramienta de medición. Aunque la tecnología (y la precisión de medición) ha avanzado mucho con el paso de los años, el principio básico del interferómetro de Michelson aún subyace en el núcleo de la interferometría.

Un interferómetro de Michelson se compone de un desdoblador del haz (espejo mitad plateado) y dos espejos. Cuando la luz atraviesa el espejo mitad plateado/desdoblador del haz (que refleja parcialmente) se divide en dos rayos con distintas trayectorias ópticas (una hacia el espejo 1 y otra hacia el espejo 2). Los rayos de vuelta se reflejan en los espejos y se vuelven a combinar en el desdoblador del haz antes de llegar al detector. La diferencia de trayectoria de los dos rayos genera una diferencia de fase que forma un patrón de borde de interferencia. Seguidamente, se analiza el patrón en el detector para evaluar las características de la onda, las propiedades del material o el desplazamiento de uno de los espejos (dependiendo de la medición para la que se utiliza el interferómetro).

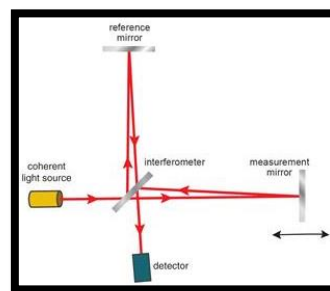


Fig. 2.30 Diagrama de funcionamiento del interferómetro de Michelson (Michelson & Morley, 1887).

2.9 CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

En la década de los 80, se publica el primer resultado de una investigación sobre deformaciones de un objeto utilizando imágenes digitales. Para ello, compararon la localización de pequeñas regiones en una imagen digital del objeto ensayado antes y después de ser aplicada la carga, pudiendo obtener una medición de campo completo de los desplazamientos producidos entre ambos estados (Peter & Ranson, 1982).

Posteriormente, este método fue mejorado incluyendo en el algoritmo numérico optimizaciones mediante el método de Newton - Raphson (Sutton, Wolters, Peters, Ranson, & McNeill, 1983), dando lugar al desarrollo de la técnica Correlación Digital de Imágenes.

En la actualidad, son muchos los ensayos experimentales que se realizan, en los cuales es muy difícil la aplicación de técnicas tradicionales como son la extensometría para la medición de desplazamientos y deformaciones durante un estado determinado de carga. Ensayos donde se requieren temperaturas muy altas, ensayos en materiales compuestos donde las *delaminaciones* (formación y separación de láminas o capas) hacen que se pierdan gran información con la utilización de galgas, ensayos a nivel microscópico o ensayos a altas velocidades son ejemplos donde técnicas como la interferometría y la aplicación de la técnica de correlación de imágenes adquieren gran potencial en el área de la Mecánica Experimental debido a la particularidad de ser técnicas de no contacto para la medición de campo completo de desplazamientos y deformaciones (López Alba, Díaz, Dorado, & López García, 2010).

La Correlación Digital de Imágenes (CDI) es un método no invasivo que mediante análisis de imágenes digitales del objeto sometido a ensayo permite obtener el campo completo de desplazamientos. Dependiendo si el desplazamiento se produce en el plano o fuera de él, la técnica de correlación de imágenes debe utilizarse en dos o en tres dimensiones (López Alba, Díaz, Dorado, & López García, 2010).

La técnica de CDI constituye una de las técnicas ópticas de mayor potencial en la actualidad, siendo muchas las investigaciones en los últimos años basadas en este campo. Los algoritmos están siendo mejorados de forma considerable para obtener una mejor precisión y reducir el tiempo de procesado.

La CDI es empleada en el análisis de muchas soluciones en el área de la mecánica experimental, en la industria aeronáutica, del automóvil, en el campo de la medicina. La aplicación de la técnica en nuevos campos es motivo de investigación permanente (López Alba, Díaz, Dorado, & López García, 2010).

CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D

La Correlación Digital de Imágenes (CDI) en dos dimensiones (2D) es utilizada para medir desplazamientos en especímenes de prueba sometidos a esfuerzos (López, López, & Pava, 2015). Los desplazamientos se detectan directamente a partir de imágenes digitales de la

superficie de un objeto (la muestra). En la Fig. 2.31 se muestra un ejemplo típico de un montaje experimental para la correlación digital de imágenes en dos dimensiones.

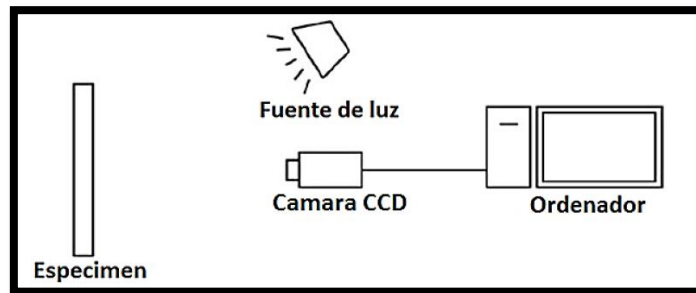


Fig. 2.31 Preparación para la medición de desplazamientos, usando Correlación Digital de Imágenes (López, López, & Pava, 2015).

PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE LA CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D

En el desarrollo de la técnica de correlación de digital de imágenes en dos dimensiones principalmente hay tres pasos:

Paso 1. Preparación de las probetas

Para llevar a cabo este proceso, la superficie del objeto a analizar debe tener rasgos característicos que permite igualar las facetas. Si la superficie del objeto medido tiene pocos rasgos característicos, como es el caso de las superficies homogéneas y uniformes, es necesario prepararla creando un patrón estocástico utilizando, por ejemplo, con un spray de color negro o contrastante. Lo se conoce como “moteado de la superficie”. El tamaño que tengan los puntos negros sobre la superficie puede influir en la precisión de los resultados obtenidos, por lo tanto se tiene que buscar cuál es la relación óptima dependiendo del ensayo a realizar (Lecompte, y otros, 2005). La Fig. 2.32 muestra un ejemplo típico del patrón aleatorio sobre la superficie de un objeto.

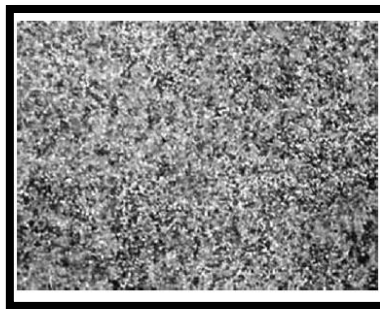


Fig. 2.32 Ejemplo típico de un patrón aleatorio sobre la superficie de un espécimen.

Paso 2. Obtención y procesamiento de imágenes

Una vez recogidas las imágenes durante la aplicación de la carga, se tiene una secuencia de imágenes desde el estado inicial o de referencia hasta el final o deformado.

Por lo general dichas imágenes se obtienen utilizando una cámara fotográfica con sensor CCD (Charge Coupled Device o, en español, Dispositivo de Carga Acoplada), el cual es más sensible a la luz que el sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor o, en español, Semiconductor Complementario de Óxido Metálico) y trabaja a manera de líneas de píxeles con una cobertura de los colores primarios. Además, captura un rango más amplio de tonos (luces brillantes, tonos medios y sombras) en las fotografías.

Las imágenes que van a ser analizadas se registran y almacenan en un ordenador como imágenes digitales.

Estas imágenes se comparan para detectar desplazamientos. La técnica de CDI calcula el movimiento en cada uno de los puntos de estas imágenes comparando la imagen en estudio con la imagen de referencia. Para el cálculo del movimiento, la imagen es dividida de forma uniforme en distintos conjuntos con múltiples puntos de píxel y generalmente cuadrados (tales como 20×20 píxeles). Cada conjunto es llamado faceta.

Cada faceta tiene además una intensidad de luz única (nivel de gris). Se supone que esta distribución de intensidad de la luz no cambia durante la deformación.

Cada faceta será procesada para calcular el valor medio de la escala de grises existente en cada una de ellas y se buscará la misma faceta en la imagen deformada. Para el proceso de búsqueda en la imagen deformada se establece un área de análisis sobre la que se hará la correlación, esta área de búsqueda se especifica con el número de píxeles en el que se superponen los centros de las facetas.

Para un punto P cualquiera de la imagen, una faceta cuadrada de dimensiones 20×20 píxeles centrada en el punto $P = (x_0, y_0)$ de la imagen de referencia es elegida y buscada en la imagen deformada. Para evaluar cada una de las facetas de la imagen de referencia y la de la imagen deformada, un criterio de correlación debe ser preestablecido para realizar el cálculo.

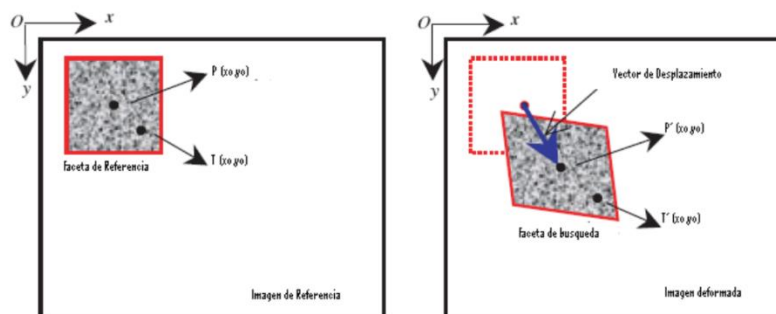


Fig. 2.33 Imagen de referencia e imagen deformada (López Alba, Díaz, Dorado, & López García, 2010).

Para el procesado de las imágenes y una optimización del proceso de cálculo del vector desplazamientos, diversos criterios de correlación son empleados en la actualidad. Las más comunes son Cruzada, Normalizada y Zero Correlación Cruzada Normalizada (Bing, Kemao, Huimin, & Anand, 2009).

El desplazamiento de la faceta en la imagen antes de la deformación, se encuentra mediante la búsqueda en el área del espécimen después de la deformación, cuya intensidad de luz es uniforme. Una vez que se encuentra la ubicación de este subconjunto o faceta en la imagen deformada, el desplazamiento de este subconjunto puede ser determinado.

La correlación se realizará para cada faceta en la que se haya dividido el área de interés.

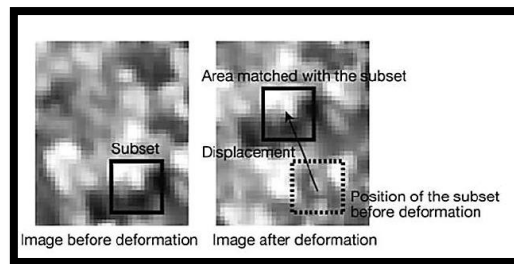


Fig. 2.34 Comparación del subconjunto antes y después de la deformación.

- Las técnicas experimentales que se emplearán en este trabajo son: extensometría, fotoelasticidad y Correlación Digital de Imágenes en 2D. Las cuáles servirán para validar los resultados obtenidos en la simulación numérica que también se realizará en ANSYS Workbench®. La finalidad de realizar ésta validación de resultados numéricos y experimentales es la de contar con más argumentos para aprobar el correcto funcionamiento estructural de la grúa auxiliar que es objeto de estudio en esta tesis y aportar, además, recomendaciones de diseño y/o fabricación de la misma.
- Los puntos en donde se colocarán las galgas, las láminas de resina fotoelástica y las zonas que se grabarán en video para su posterior análisis mediante el software de Aramis®, se determinarán de los resultados que se obtendrán del análisis numérico en ANSYS Workbench®.

2.4 SUMARIO

En este capítulo se hizo la recopilación de la información y conceptos técnicos que fueron utilizados posteriormente como fundamento teórico de las pruebas y análisis, tanto numéricos como experimentales, realizados a la grúa que se está validando.

En el siguiente capítulo se realizará el modelo y simulación del prototipo físico, utilizando los programas CAD SolidWorks® y de simulación ANSYS Workbench®. Además se describirá el proceso de aplicación en el prototipo físico de la grúa, de los métodos experimentales de extensometría, fotoelasticidad e interferometría.

CAPÍTULO III

PRUEBAS NUMÉRICAS Y EXPERIMENTALES

3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS PIEZAS DE LA GRÚA AUXILIAR

A continuación se muestra una vista de la grúa auxiliar modelada en Solid Works 2014 en donde se indican, mediante números de identificación y sus respectivos nombres, sus componentes principales.

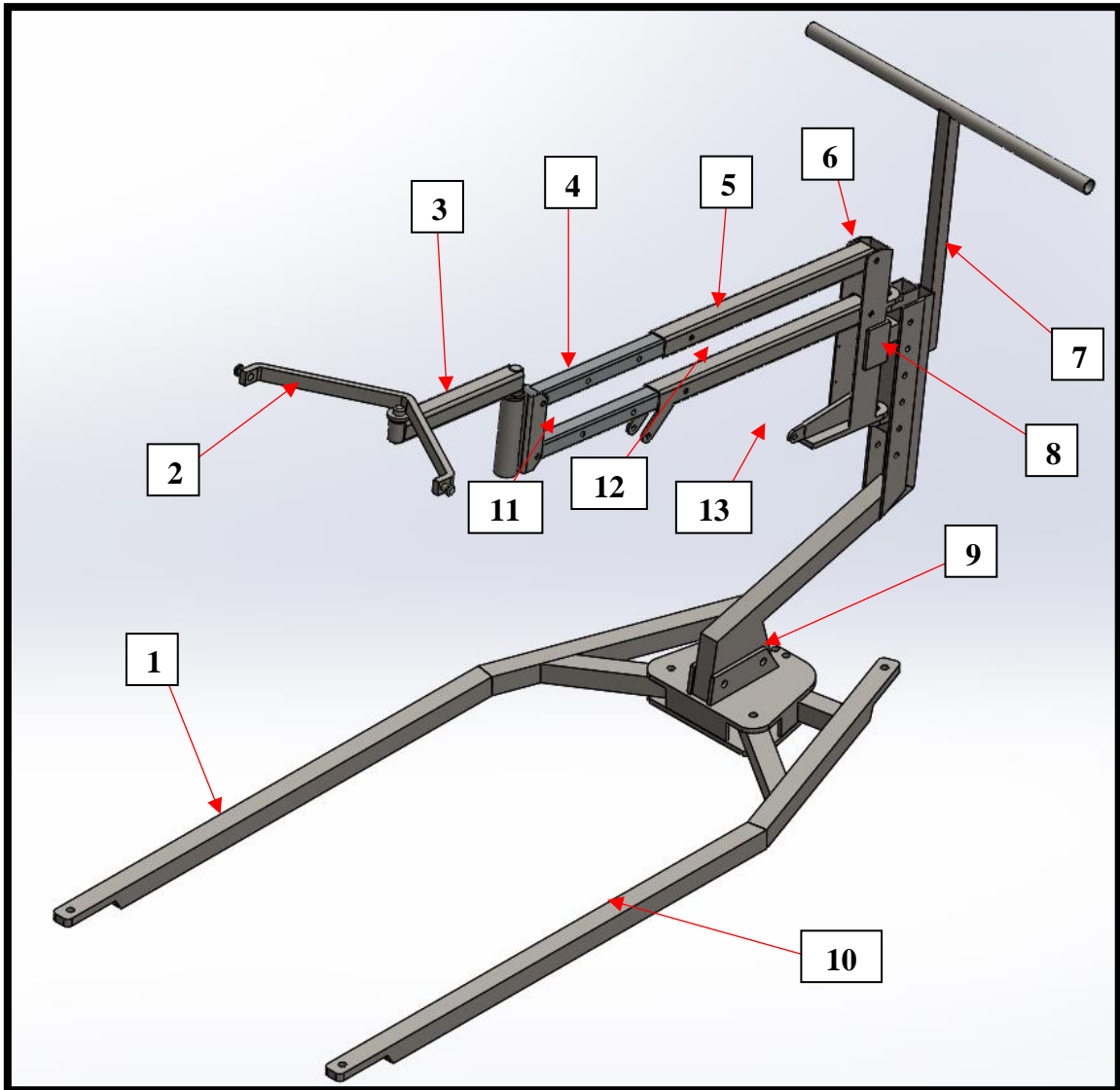


Fig. 3.1 Identificación de las partes principales de la grúa auxiliar.

Tabla 3.1 Números de identificación y nombre de las partes principales de la grúa auxiliar.


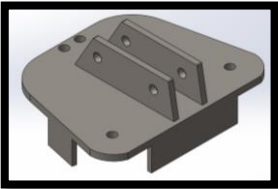
Número de identificación	Nombre de la pieza
1	Pata derecha
2	Horquilla
3	Barra Giratoria
4	Brazo telescópico superior
5	Brazo paralelo superior
6	Base principal superior
7	Manubrio y pedestal
8	Soporte del marco
9	Base inferior
10	Pata izquierda
11	Brazo telescópico inferior
12	Brazo paralelo inferior
13	Base principal inferior





3.2 PROCESO DE MODELADO Y SIMULACIÓN

MODELADO

Para el modelo de los componentes de la grúa y su posterior ensamble se utilizó el programa de CAD SolidWorks®. Para dibujar las piezas se utilizaron algunas dimensiones medidas del prototipo físico de la grúa pero en general para la mayoría de las dimensiones se utilizaron los planos del diseño original. Enseguida se muestra la tabla con el modelo de las principales piezas de la grúa auxiliar.

Tabla 3.2 Piezas principales modeladas.

Modelo	Nombre
	<ul style="list-style-type: none"> - Manubrio - Pedestal - Soporte del marco - Base inferior
	<ul style="list-style-type: none"> - Base inferior

	<ul style="list-style-type: none">- Ensamble pata derecha
	<ul style="list-style-type: none">- Ensamble pata izquierda
	<ul style="list-style-type: none">- Horquilla- Barra giratoria- Brazos telescópicos- Brazos paralelos
	<ul style="list-style-type: none">- Palanca

Durante el ensamble se notó que varias de las medidas indicadas en los planos causaban interferencia entre piezas, se optó por modificarlas, ajustando las dimensiones a fin de que los elementos acoplaran entre sí con tolerancia 0 en los puntos de unión y poder así llevar a cabo la simulación.

SIMULACIÓN

La metodología para realizar la simulación numérica al ensamble modelado de la grúa auxiliar es básicamente la siguiente:

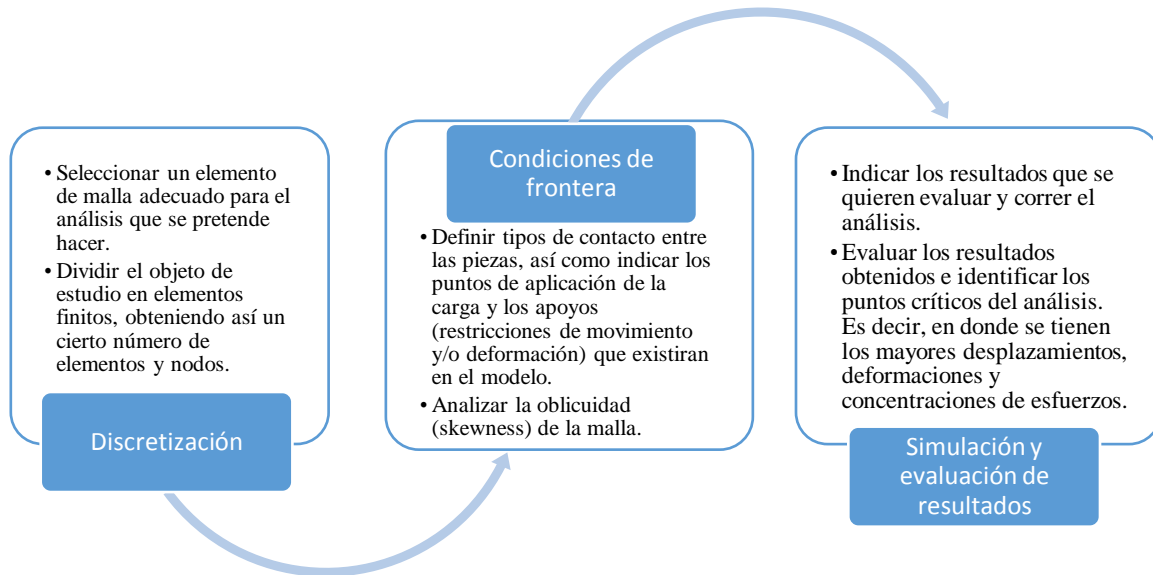
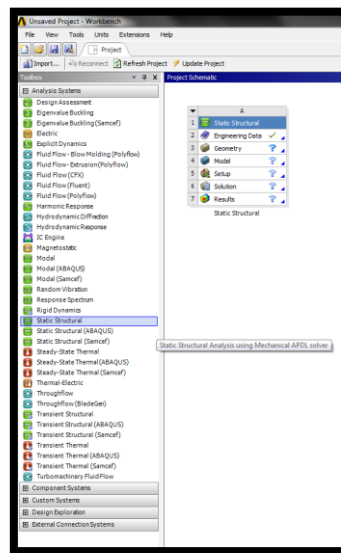


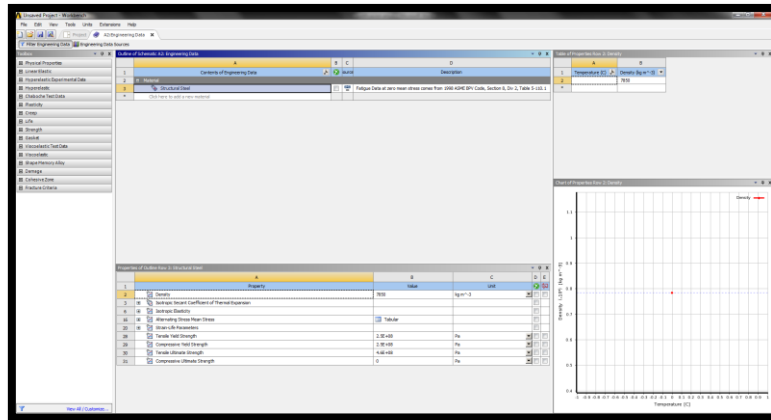
Fig. 3.2 Diagrama de flujo para la realización del análisis numérico a la grúa auxiliar.

Para la simulación, el archivo del ensamble final se exportó hacia la plataforma CAE de ANSYS Workbench® en formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification), un formato neutro de datos que permite el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computadora. Posterior a ello se accede a la plataforma de ANSYS Workbench® y se elige un nuevo análisis, en este caso de tipo Estático Estructural (*Static Structural*).

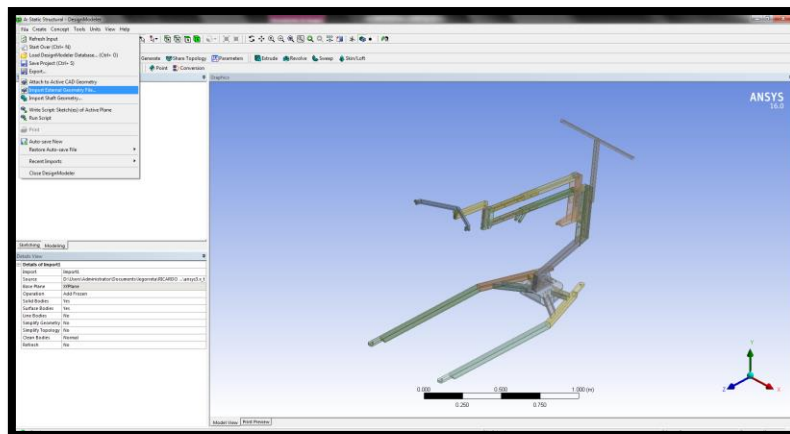


Posteriormente se definen las constantes que del material. En este caso el análisis que se hace es estructural, y se considera que el modelo responde a un comportamiento elástico - lineal. La geometría se considera isotrópica, puesto que se considera que las propiedades no dependen de la dirección.

Se utiliza un módulo de Young (E) de 210 GPa y un coeficiente de Poisson (ν) igual a 0.3. Se observa que dichos valores son los mismos que ANSYS Workbench® da por defecto al material Acero Estructural.



En la parte de geometry se abre el design modeler y se importa la geometría (**Import external geometry file**) seleccionando el archivo con extensión IGES. Posteriormente para generar el modelo se da click en el comando **Generate**.



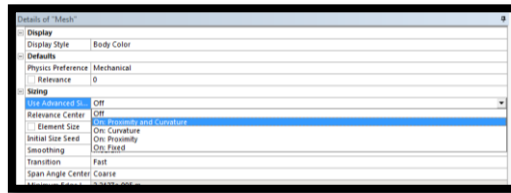
SELECCIÓN DEL ELEMENTO DE MALLA

Una vez que la geometría ha sido importada, se definen las propiedades del material, comenzando por el tipo de elemento. Para este análisis se ha elegido el tipo de elemento Solid 186, que es de un orden superior en 3D de 20 nodos. Solid 186 se recomienda para modelados irregulares como los producidos por sistemas CAD/CAM, como en este caso.

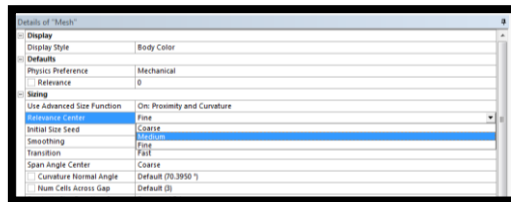
PARAMETROS DE DISCRETIZACION

Se procede al mallado considerando los siguientes parámetros:

En el apartado de *sizing* se activa la función de *use advanced size function* y se selecciona *proximity and curvature*. Esto debido a la geometría de la grúa auxiliar, la cual consta en su mayoría de partes planas y rectas con bordes a 90° y también con algunas piezas con acabados en curva.



En la calidad de la malla o *relevance center* se usa *medium* para no generar demasiados nodos y elementos que consuman recursos innecesarios en la solución.



Como tamaño mínimo del elemento se usa un valor de 6×10^{-3} m, igualmente con la finalidad de no generar un número excesivo de nodos y elementos.

Después de generar la malla (mediante el comando de *generate mesh*), tenemos el siguiente número de elementos y nodos:

- Número de nodos: 356781
- Número de elementos: 172847

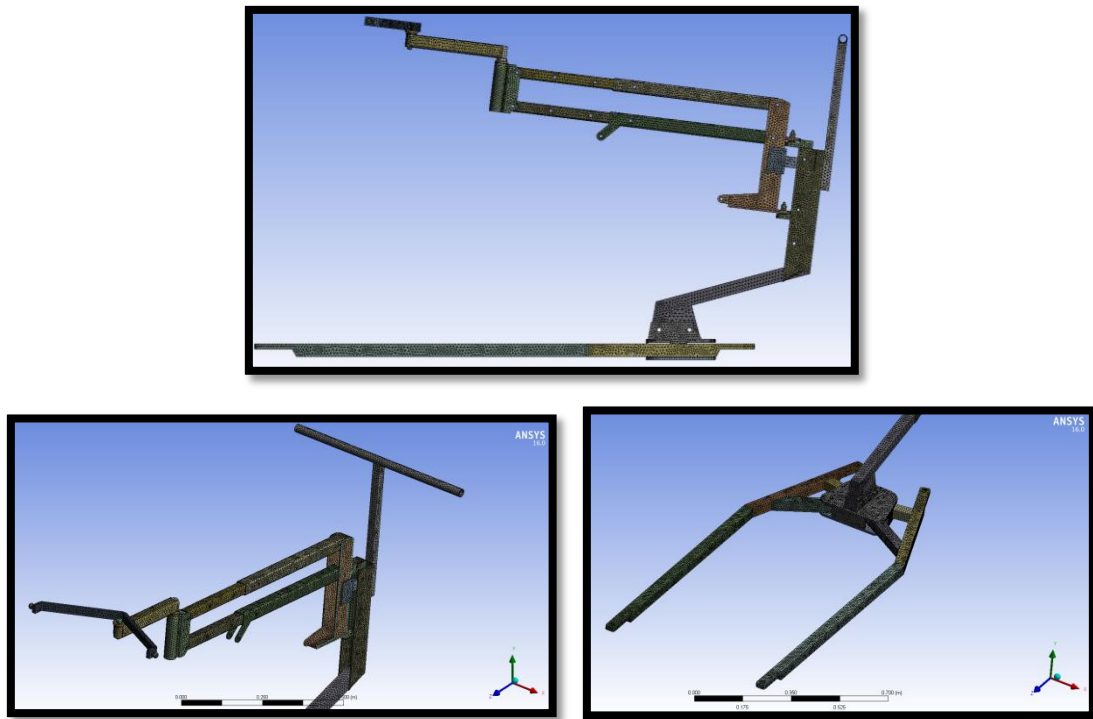
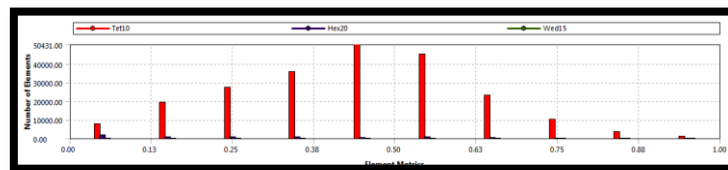


Fig. 3.3 Detalle del mallado en la estructura de la grúa auxiliar.

ANÁLISIS DEL MALLADO

A fin de tener un criterio para determinar la fiabilidad de la malla realizada a la estructura, se evalúa la oblicuidad (skewness) de la misma. Sabiendo que entre más alejados se encuentren los valores de 1.0, de mayor calidad se considera la malla.



TIPOS DE CONTACTOS

Existen varios tipos de contacto en ANSYS Workbench®, los cuales se describen a continuación:

Unión/Pegado (Bonded): Esta es la configuración predeterminada y se aplica a todas las regiones de contacto (superficies, sólidos, líneas, caras, bordes). Si las regiones de contacto están unidas, entonces no se permite ningún deslizamiento o separación entre caras o bordes.

Sin separación (No separation): Este ajuste de contacto es similar al caso Bonded. Sólo se

aplica a regiones de caras (para sólidos 3D) o bordes (para placas 2D). No se permite la separación de las geometrías en contacto.

Sin fricción (*Frictionless*): Este ajuste modela el contacto unilateral estándar; Es decir, la presión normal es igual a cero si se produce la separación. De este modo pueden formarse huecos en el modelo entre cuerpos dependiendo de la carga. Esta solución no es lineal porque el área de contacto puede cambiar a medida que se aplica la carga. Se asume un coeficiente cero de fricción, permitiendo así un deslizamiento libre. El modelo debe estar bien restringido al usar este ajuste de contacto. Se añaden muelles débiles al conjunto para ayudar a estabilizar el modelo con el fin de lograr una solución razonable.

Rugosidad: Al igual que el ajuste sin fricción, este ajuste modela un contacto de fricción perfectamente rugoso donde no hay deslizamiento. Sólo se aplica a regiones de caras (para sólidos 3D) o bordes (para placas 2D). De forma predeterminada, no se realiza ningún cierre automático de espacios. Este caso corresponde a un coeficiente de fricción infinito entre los cuerpos de contacto.

Fricción: En este ajuste, las dos geometrías de contacto pueden soportar esfuerzos de cizallamiento hasta una cierta magnitud a través de su interfaz antes de que comiencen a deslizarse entre sí. Este estado se conoce como "pegado". El modelo define una tensión de corte equivalente a la que el deslizamiento en la geometría comienza como una fracción de la presión de contacto. Una vez superada la tensión de cizallamiento, las dos geometrías se deslizan entre sí. El coeficiente de fricción puede ser cualquier valor no negativo.

Deslizamiento forzado de fricción: En este ajuste, se aplica una fuerza de resistencia tangente en cada punto de contacto. La fuerza tangente es proporcional a la fuerza de contacto normal. Este ajuste es similar a **Frictional** excepto que no hay ningún estado de "pegado".

De acuerdo a la definición de los tipos de contacto y al funcionamiento real de la grúa se definieron los contactos del ensamble. Se utilizaron contactos tipo **Unión/Pegado** y **Sin Separación**. Además se utilizaron articulaciones de tipo cilíndrico y de cojinete (**bushing**) debido al comportamiento del componente en cuestión.

CONDICIONES DE FRONTERA

Para el análisis se restringió el movimiento de la grúa auxiliar mediante un apoyo de tipo **Fijo** (**Fixed**) en ambas patas con el fin de simular la acción de los frenos de las ruedas, los cuales serán accionados durante la realización de las pruebas experimentales.

La fuerza debido al peso que se la grúa debe cargar será aplicada en cada uno de los extremos de la horquilla, exactamente en los botones laterales. Debido a que se considera que la carga es simétrica, ésta será distribuida equitativamente en los dos puntos de aplicación. En cada uno la fuerza aplicada es de 981 N (100 kg) en dirección negativa del eje Y.

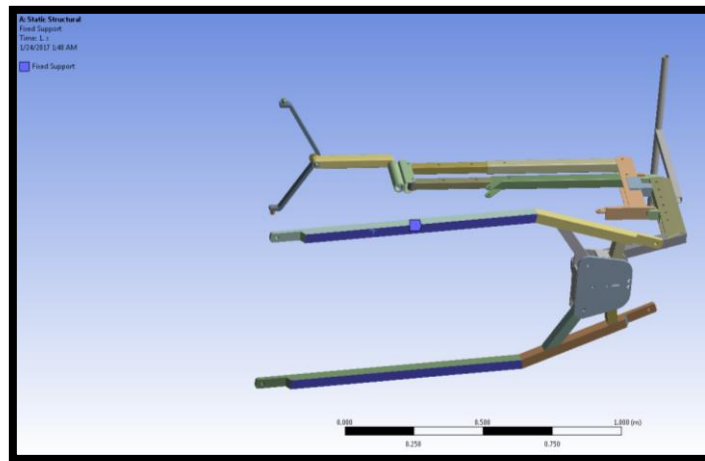


Fig. 3.4 Ubicación de los apoyos fijos en la grúa auxiliar.

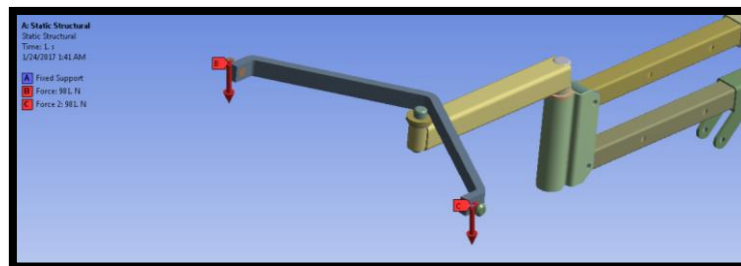


Fig. 3.5 Ubicación de las fuerzas aplicadas sobre la estructura de la grúa auxiliar.

RESULTADOS A EVALUAR

Teniendo como propósito el obtener resultados fiables y comparables con los métodos experimentales se definen como resultados a evaluar el Esfuerzo Equivalente (Equivalent Stress (Von Mises)), la Deformación Total (Total Deformation) y la Deformación Unitaria Equivalente (Equivalent Strain (Von Mises)).

Los resultados de esfuerzo equivalente son directamente comparables con los que se obtendrán mediante el método de fotoelasticidad. Los resultados de Deformación Total son directamente comparables con los que se obtendrán mediante el método de Correlación Digital de Imágenes en 2D y los resultados de Deformación Unitaria Equivalente son directamente comparables con los que se obtendrán mediante el método de extensometría.

Para evaluar los resultados es necesario dar Click en el comando de *Solve*.

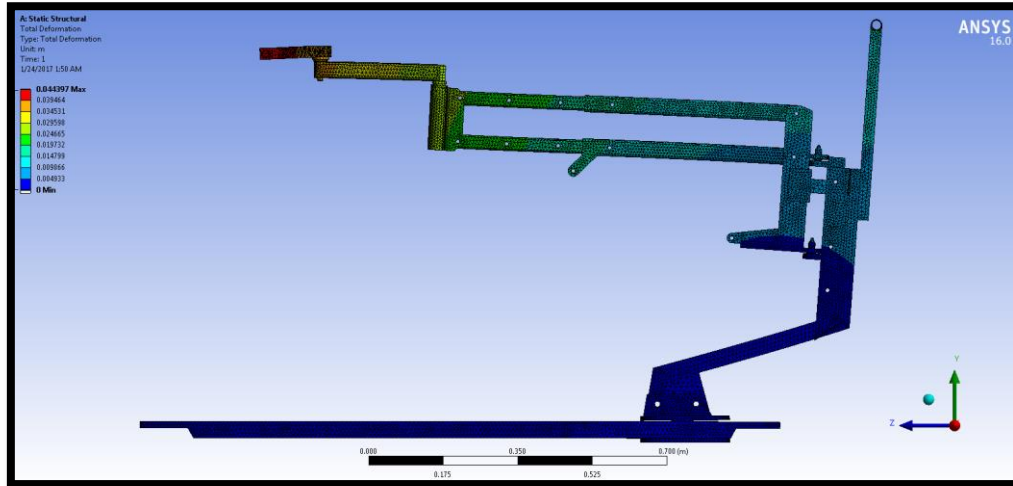


Fig. 3.6 Comportamiento estructural de la grúa auxiliar ante una carga de 200 kg (evaluando deformación total).

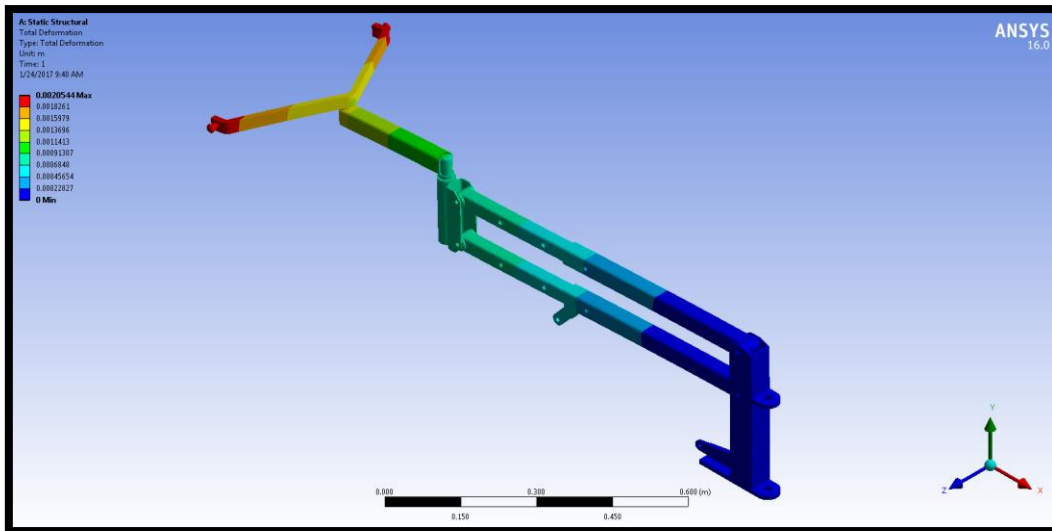


Fig. 3.7 Evaluación de la deformación total de la estructura superior de la grúa ante una carga de 200 kg.

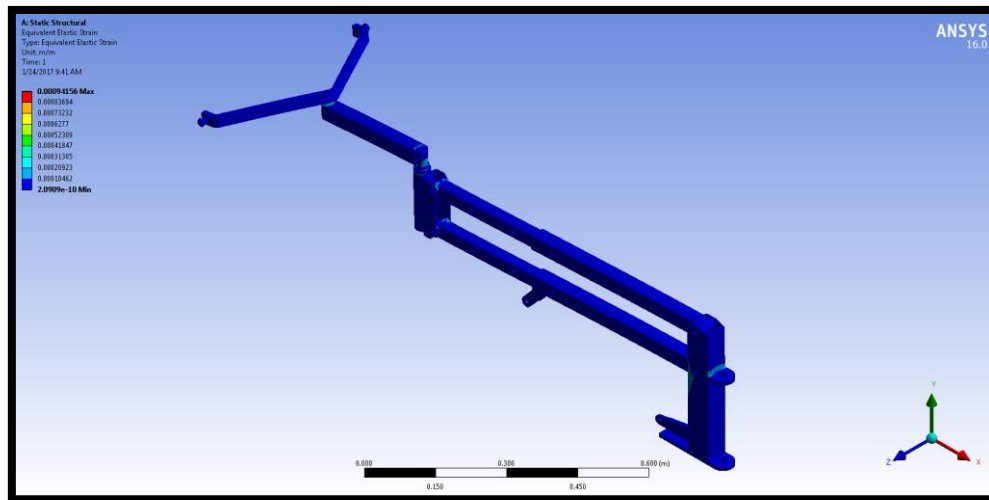


Fig. 3.8 Evaluación de la deformación unitaria de la estructura superior de la grúa ante una carga de 200 kg.

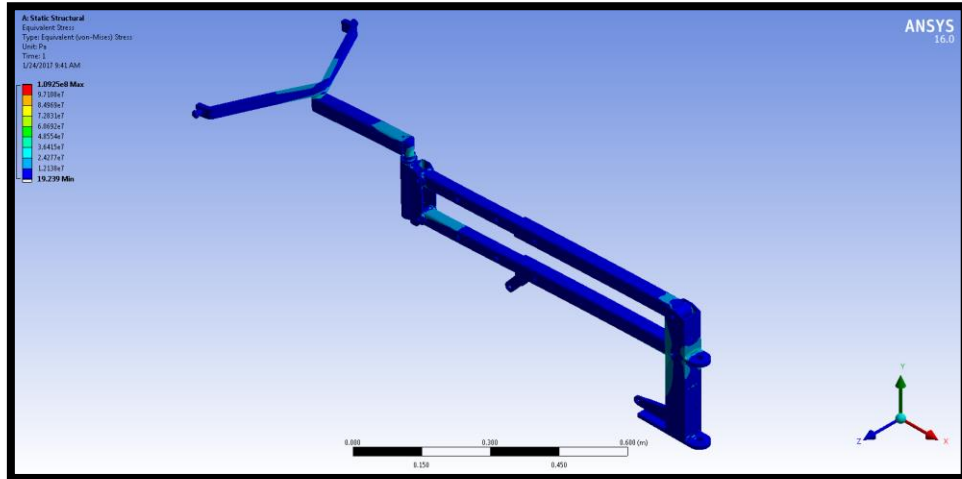


Fig. 3.9 Evaluación del esfuerzo equivalente (de Von Misses) de la estructura superior de la grúa cargando 200 kg.

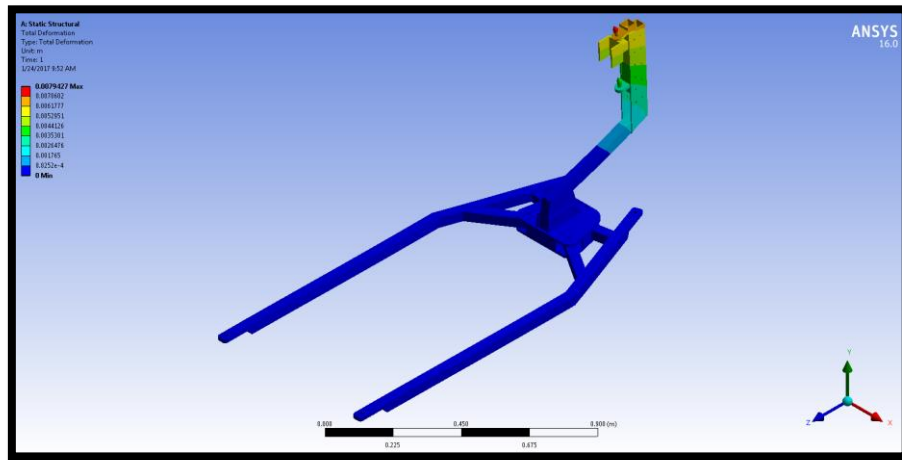


Fig. 3.10 Evaluación de la deformación total de la estructura inferior de la grúa ante una carga de 200 kg.

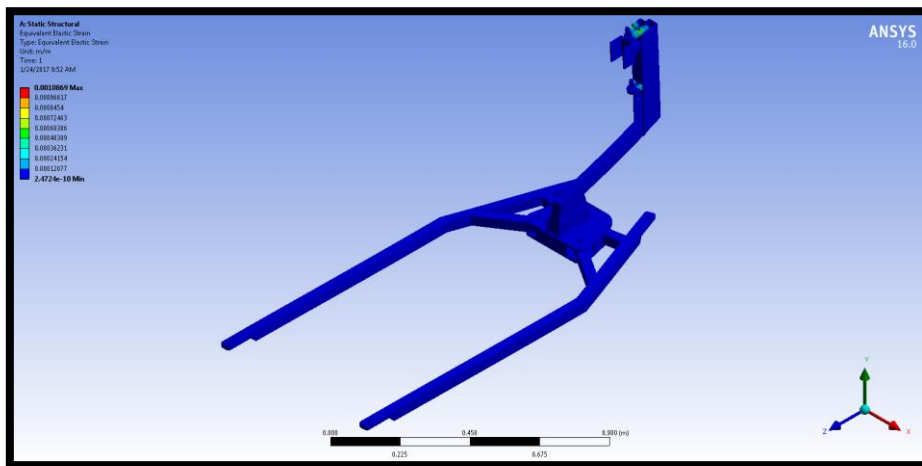


Fig. 3.11 Evaluación de la deformación unitaria de la estructura inferior de la grúa ante una carga de 200 kg.

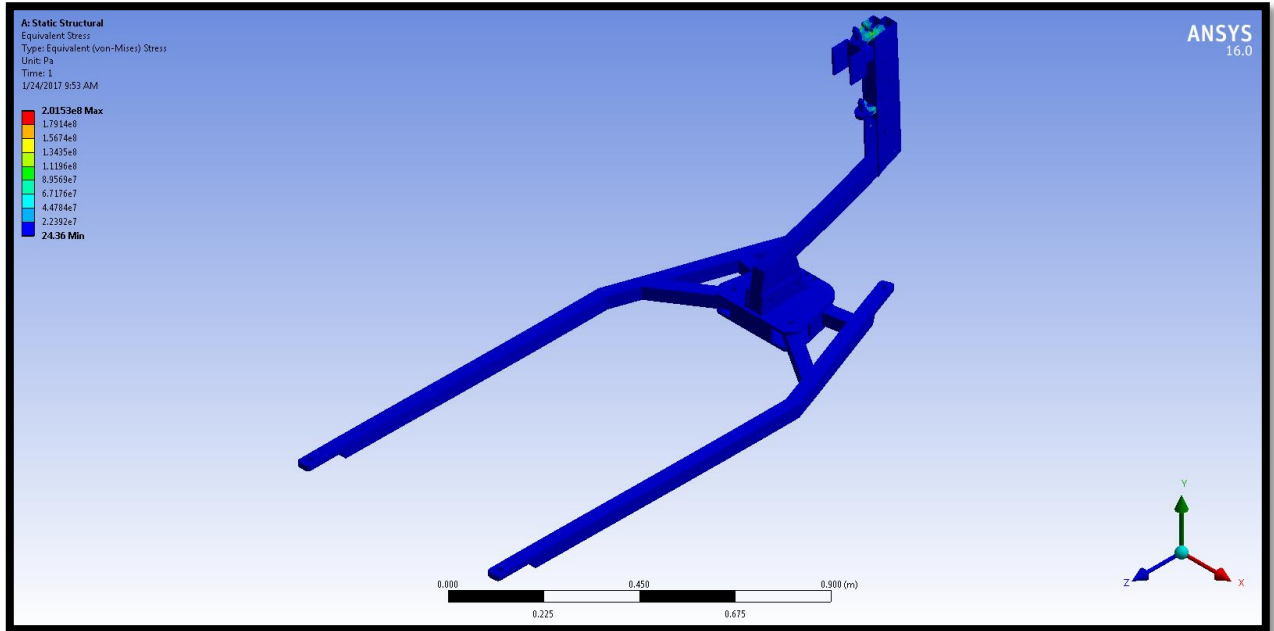


Fig. 3.12 Evaluación del esfuerzo equivalente (de Von Misses) de la estructura inferior de la grúa cargando 200 kg.

Enseguida se muestran los puntos de medición que son comparables con los resultados obtenidos con las galgas extensométricas.

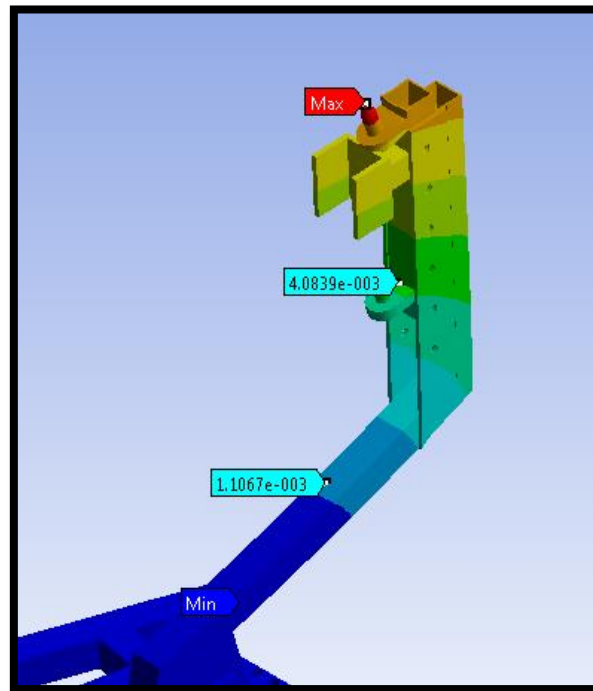


Fig. 3.13 Puntos de medición de deformación total en la estructura inferior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

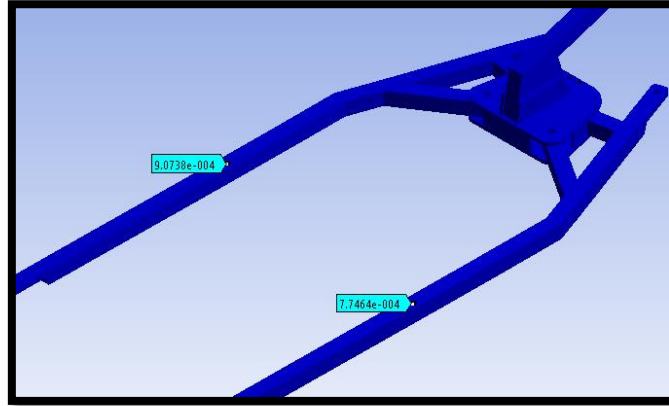


Fig. 3.14 Puntos de medición de deformación total en la estructura inferior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

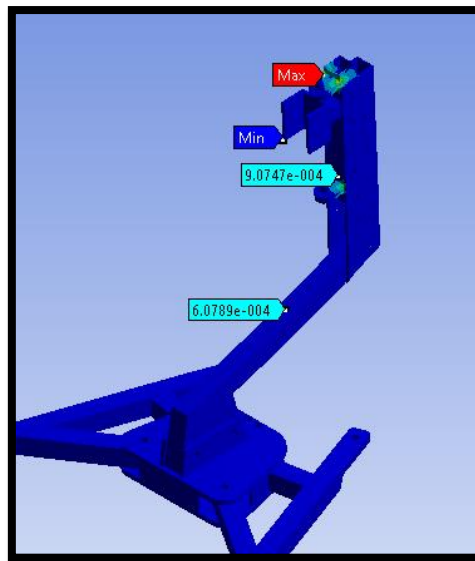


Fig. 3.15 Puntos de medición de deformación unitaria en la estructura inferior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

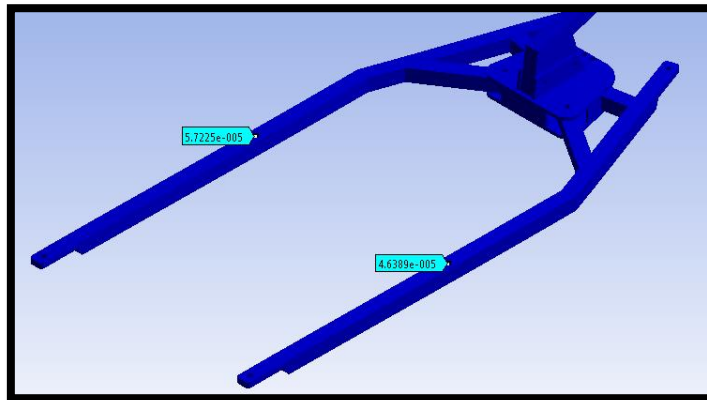


Fig. 3.16 Puntos de medición de deformación unitaria en la estructura inferior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

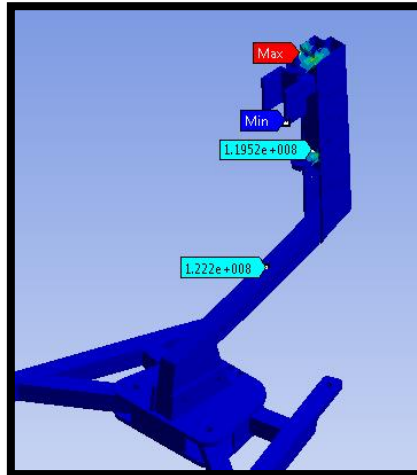


Fig. 3.17 Puntos de medición de esfuerzo equivalente en la estructura inferior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

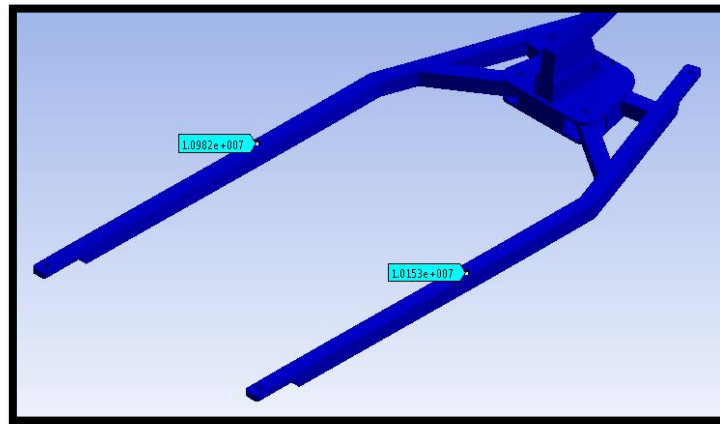


Fig. 3.18 Puntos de medición de esfuerzo equivalente en la estructura inferior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

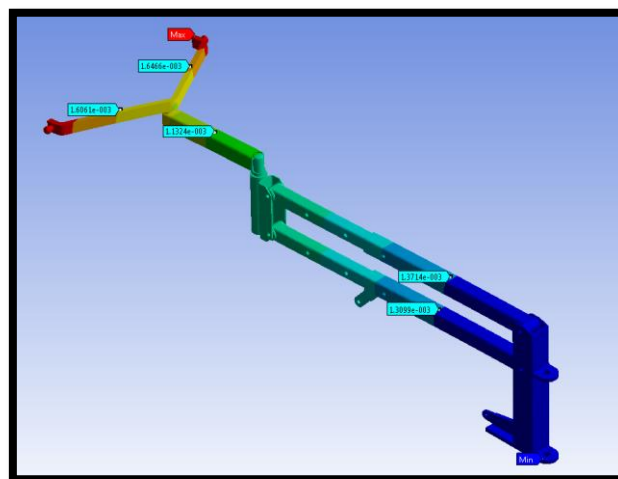


Fig. 3.19 Puntos de medición de deformación total en la estructura superior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

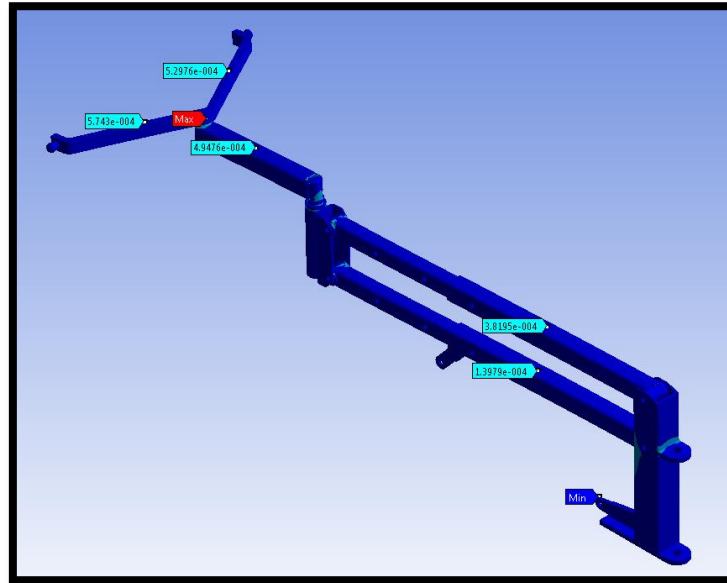


Fig. 3.20 Puntos de medición de deformación unitaria en la estructura superior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

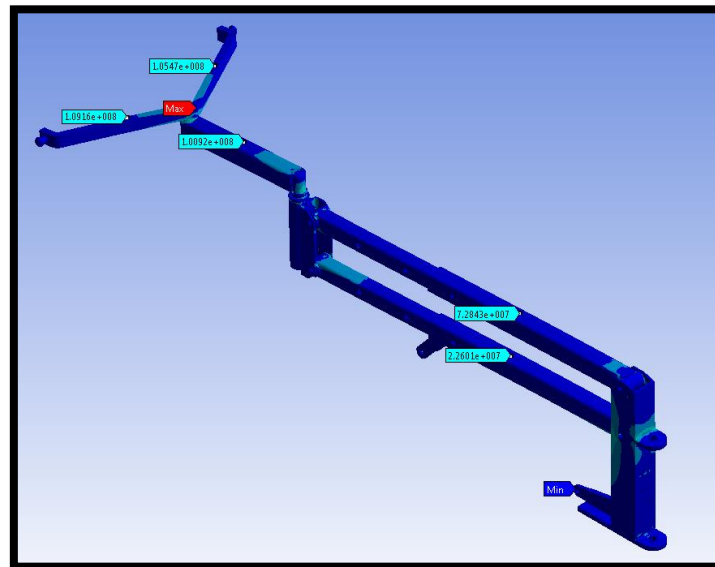


Fig. 3.21 Puntos de medición de esfuerzo equivalente en la estructura superior de la grúa auxiliar cargando 200 kg.

PUNTOS CRÍTICOS

Del análisis realizado se determinaron los puntos en donde se tienen los mayores esfuerzos y deformaciones y es aquí en donde se instrumentará con galgas y resina foto elástica para aplicar el método de extensometría y fotoelasticidad, respectivamente. Además será aquí en donde se analizará igualmente la deformación y/o desplazamientos mediante el uso del software de Correlación Digital de Imágenes en 2D Aramis®.

3.3 PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.3.1 MATERIALES Y HERRAMIENTAS PARA INSTRUMENTACIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

- 18 galgas extensométricas marca Vishay MicroMeasurements® con una resistencia eléctrica de 120 Ω
- Tester marca Vishay MicroMeasurements®
- Puente de Wheatstone (Medidor de deformaciones lineales) marca Vishay MicroMeasurements®
- 30 mts. de cable calibre #26 de 7 polos
- Soldadura
- Cautín
- Pasta para soldar
- Pegamento para galgas marca Vishay MicroMeasurements®
- Catalizador marca Vishay MicroMeasurements®
- Desengrasante marca Vishay MicroMeasurements®
- Neutralizador marca Vishay MicroMeasurements®
- Gasas
- Escuadra o regla graduada
- Lápiz 2H
- Cinta Celofán marca Vishay MicroMeasurements® M-Bond 200
- Hoja de papel con eje de coordenadas referencial trazado sobre ella
- Vidrio de apoyo para el pegado de galgas
- Prensa tipo de uso en carpintería
- 2 Pesas de 500 g, 2 pesas de 200 g y 1 de 100 g
- Lija de grano #600, 1000 y 2000

3.3.2 MATERIALES Y HERRAMIENTAS PARA INSTRUMENTACIÓN DE RESINA FOTOELÁSTICA

- Resina PH.1 marca Vishay MicroMeasurements®
- Catalizador PLH-1 marca Vishay MicroMeasurements®
- Abate lenguas
- Gasas
- Balanza granulométrica
- Vasos desechables
- Guantes
- Espátula
- Pegamento UHU
- Hojas de papel blanco
- Papel reflejante auto adherible
- Cinta masking

3.3.3 MATERIALES Y HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS MEDIANTE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

- Cámara fotográfica y de video
- Tripie para la cámara fotográfica y de video
- Computadora para el procesamiento de imágenes (Correlación Digital de Imágenes en 2D)
- Programa Aramis®

3.3.4 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se realizaron colocando peso sobre la canasta (arnés) de la grúa, aumentando gradualmente éste de 20 en 20 kg hasta llegar a 200 kg. En el caso de las galgas se tomaron lecturas en cada momento de la prueba (0 kg, 20 kg, 40 kg,..., 200 kg). Con la resina fotoelástica se tomaron fotografías del estado de esfuerzos en cada punto solamente a carga máxima (200 kg).

3.4 PROCEDIMIENTO PARA APLICACIÓN DE GALGAS EXTENSOMETRICAS (METODO DE EXTENSOMETRIA)

1.- Primeramente se marcaron áreas de aproximadamente 1 cm x 1 cm en las zonas consideradas como críticas (en dónde se estima que se presente el mayor esfuerzo debido a la carga) en cada uno de los elementos que componene a la grua. Estas areas fueron delimitadas utilizando cinta masking. Para cada punto de estudio se tienen 2 áreas marcadas, una en la parte superior del elemento y otra en la parte inferior del mismo, ésto debido a que de acuerdo con las condiciones de trabajo de la grúa (flexión), se espera que el mayor esfuerzo a tensión en los elementos se encuentre precisamente en su parte media superior y el mayor esfuerzo a compresión en su parte media inferior.



Fig. 3.22 Delimitación de las áreas o puntos críticos a estudiar en la grúa.

2.- Posteriormente y con la ayuda de removedor de pintura y lijas de distintos tipos, se procedió a limpiar y pulir las áreas marcadas, a fin de obtener un acabado tipo espejo, con la menor rugosidad superficial posible y la mayor claridad en la zona, necesaria para el correcto trazo de ejes de referencia y posterior colocación de las galgas.



Fig. 3.23 Aplicación del removedor de pintura sobre las áreas en donde posteriormente se pegaron las galgas extensométricas.



Fig. 3.24 Zonas de interés del marco, libres de pintura y listas para ser marcadas con los ejes de referencia para pegar las galgas.

3.- Una vez listas las superficies de cada uno de los puntos de estudio, se procedió a trazar ejes de referencia auxiliares para la correcta alineación de la galga al momento de pegarla. Para marcar dichos ejes se utilizaron escuadras y lápices de punta 2H, teniendo en cuenta que no se debía hacer una presión excesiva con el lápiz a fin de evitar la creación de concentradores de esfuerzos debido a las líneas dibujadas.



Fig. 3.25 Ejes de referencia marcados en una de las áreas que fue instrumentada con galga extensométrica.

4.- Pegado de las galgas: Para pegar las galgas se siguió al pie de la letra el procedimiento indicado por el proveedor Vishay Micro Measurements®, el cual nos indica que una vez que se tienen los ejes de referencia trazados en el área en donde se pegara la galga, se procede a limpiar con desengrasante y neutralizador el lugar. Después se colocó catalizador en el lugar que ocuparía la galga en la pieza al ser pegada y se dejó secar por aproximadamente 30 segundos. Posterior a ello, se añasó una gota del pegamento especial sobre la galga y se procedió a colocarla en el área en donde fue puesto el catalizador, teniendo extremo cuidado de no tocar la galga directamente con las manos, por lo mismo fue necesario el uso de guantes, pinzas y cinta celofán.



Fig. 3.26 Galga pegada y alineada con los ejes de referencia trazados.

Al momento de pegar la galga y una vez que se tenía colocada en el punto deseado, el manual del proveedor indica que se debe hacer presión con el dedo pulgar apoyado sobre la cinta celofán que cubre la galga extensométrica durante aproximadamente 1 minuto para que la temperatura corporal ayudara a que la adhesión con la superficie se diera mejor.



Fig. 3.27 Imagen que muestra el procedimiento de hacer presión directamente con el dedo pulgar sobre la cinta celofán que cubre la galga recién pegada, a fin de ayudar en la adhesión de la misma con la superficie.

Se utilizaron dos tipos de galgas extensométricas (strain gages) marca MicroMeasurements. El primer tipo (tipo A) son modelo EA-06-120LZ-120/E de 120 ohms de resistencia y factor de galga de 2.08 y el segundo tipo (tipo B) son modelo EF-06-120LZ-120/E de 120 ohms de resistencia y factor de galga de 2.14.



Fig. 3.28 Paquete de galgas aplicadas a la grúa durante las pruebas.

5.- Retiro de la cinta celofán: Después de dejar secar el pegamento con el que fueron pegadas las galgas a la grúa, aproximadamente una hora, se procedió a retirar la cinta celofán que las protegía, teniendo mucho cuidado de no hacerlo de manera que se pudieran inducir esfuerzos residuales en la galga o despegarla parcial o totalmente. La técnica correcta indica que se debe hacer lentamente y procurando que el dedo que sostiene el extremo de la cinta celofán describa una trayectoria paralela y lo más cercana posible a la longitud de la galga extensométrica.



Fig. 3.29 Retiro de la cinta celofán de una de las galgas pegadas.

6.- Soldado de los alambres conductores a las galgas: Antes de soldar los alambres conductores a las terminales de las galgas, se estañaron sus puntas para tener mayor precisión al momento de llevarlos a la galga.



Fig. 3.30 Estañado de las puntas de los alambres conductores que posteriormente serían soldadas a las galgas extensométricas.

Ya con las puntas estañadas de los alambres conductores, se procedió a soldarlos en los terminales de la galga, considerando la configuración indicada en el manual de instrumentación de Vishay Micro Measurements®, que indica que dos de los alambres deben de soldarse juntos (trenzados) en una de las terminales de la galga y la otra punta (alambre) se suelda sólo en la otra terminal. Otra consideración importante fue la de no tocar las terminales de la galga directamente con el cautín al momento de soldar ya que de haber sido así se corría un riesgo muy alto de quemar el circuito de la misma.



Fig. 3.31 Soldado de los alambres conductores a una de las galgas.

Para comprobar que los cables conductores estuvieran correctamente soldados a las terminales de la galga extensométricas se utilizó el Gage Installation Tester marca Vishay MicroMeasurements®, sabiendo que para que esto fuera así, la resistencia medida por el aparato debía ser de 120 Ohms precisamente.



Fig. 3.32 Procedimiento para comprobar un correcto soldado de los alambres conductores en la galga.



Fig. 3.33 Imágenes de la grúa completamente instrumentada con galgas extensométricas listas para ser utilizadas en las pruebas.



Fig. 3.34 Pesas utilizadas para la realización de las pruebas en la grúa.



Fig. 3.35 Imagen de la grúa cargando 36 kg.

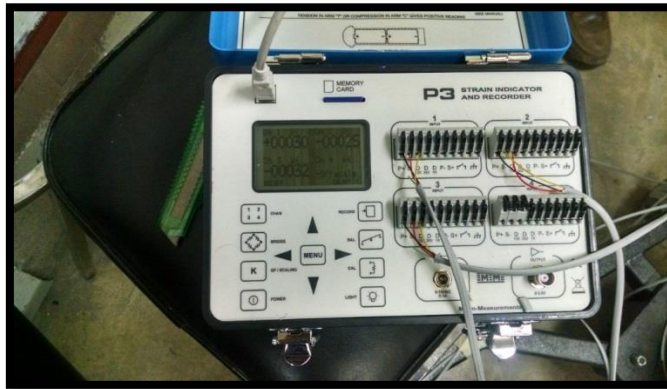


Fig. 3.36 Medidor de deformaciones (Puente de Wheatstone) Modelo P3 Marca Vishay MicroMeasurements®, utilizado durante las pruebas realizadas a la grúa.



Fig. 3.37 Prueba de la grúa en donde se muestra el brazo telescópico completamente extendido y en posición máxima, utilizando a una persona de alrededor de 120 kg.

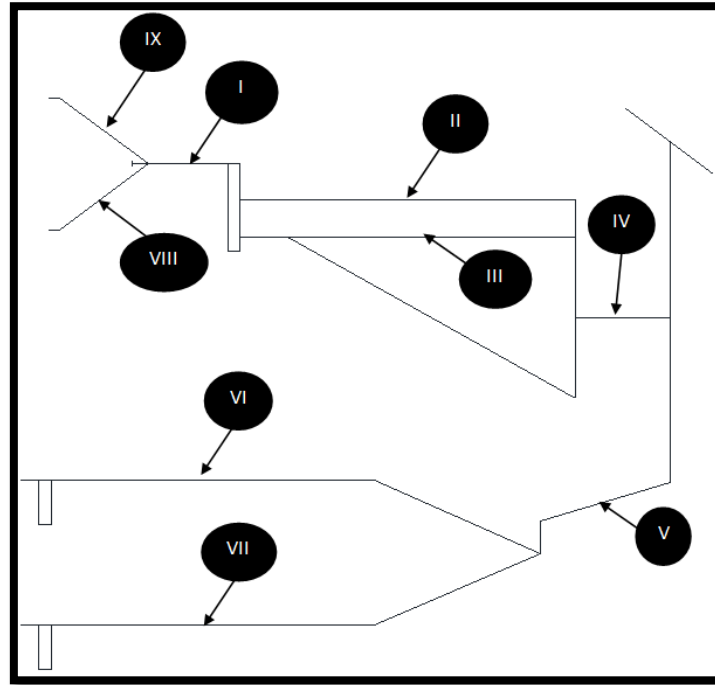


Fig. 3.38 Identificación de puntos en donde fueron pegadas galgas a fin de conocer las microdeformaciones en esas zonas (zonas críticas).

Tabla 3.3 Identificación de las galgas conforme a la ubicación en donde fueron colocadas en la grúa.

Galga	Ubicación
1	VI superior
1a	VI inferior
2	VII superior
2a	VII inferior
5	IV superior
6	IV inferior
7	V superior
8	V inferior
A	II superior
B	II inferior
C	III superior
D	III inferior
E	I superior
F	I inferior
G	IX superior
H	IX inferior
I	VIII superior
J	VIII inferior

Los datos de las mediciones registradas por las galgas extensométricas en cada punto instrumentado, se encuentran en la siguiente tabla (Tabla 3.1).

Tabla 3.4 Registro de las deformaciones unitarias en la grúa auxiliar, medidas con galgas extensométricas, con una carga de 200 kg.

Número de galga	Lectura de ϵ bajo una carga de 200 kg
1	8.15E-05
1A	1.98E-04
2	-8.60E-05
2A	9.90E-05
5	6.00E-06
6	-2.00E-06
7	-8.37E-04
8	7.82E-04
A	2.90E-05
B	2.65E-05
C	5.75E-05
D	-3.90E-05
E	9.30E-05
F	-1.93E-04
G	2.64E-04
H	-2.60E-04
I	2.96E-04
J	-2.50E-04

Una vez que se tienen los valores de las deformaciones unitarias de cada galga se procede a aplicar la ley de Hooke para obtener los esfuerzos generados en cada zona instrumentada.

$$\sigma = E\varepsilon$$

Para determinar la deformación unitaria máxima que el acero estructural A36 debe tener para seguir en comportamiento elástico, utilizamos los siguientes datos:

De la ley de Hooke despejamos a ε :

Por lo tanto:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Sabiendo que:

$$\sigma = \text{Esfuerzo de fluencia}$$

$$E = \text{Módulo de Elasticidad}$$

Por lo tanto:

$$\varepsilon = \frac{250 \text{ MPa}}{210 \text{ GPa}} = 0.00119$$

Los datos de los cálculos de los esfuerzos para cada galga extensométrica se encuentran en la siguiente tabla (**Tabla 3.5**).

Tabla 3.5 Registro esfuerzos normales calculados para cada galga extensométrica.

Número de galga	Lectura de ϵ bajo una carga de 200 kg	Cálculo de $\sigma = E \epsilon$ (Pa)
1	8.15E-05	1.71E+07
1A	1.98E-04	4.16E+07
2	-8.60E-05	-1.81E+07
2A	9.90E-05	2.08E+07
5	6.00E-06	1.26E+06
6	-2.00E-06	-4.20E+05
7	-8.37E-04	-1.76E+08
8	7.82E-04	1.64E+08
A	2.90E-05	6.09E+06
B	2.65E-05	5.57E+06
C	5.75E-05	1.21E+07
D	-3.90E-05	-8.19E+06
E	9.30E-05	1.95E+07
F	-1.93E-04	-4.05E+07
G	2.64E-04	5.53E+07
H	-2.60E-04	-5.46E+07
I	2.96E-04	6.21E+07
J	-2.50E-04	-5.24E+07

De la tabla anterior se observa que la deformación unitaria (ϵ) máxima registrada está en la galga A con un valor de 0.000782 y por consecuencia el mayor valor de esfuerzo normal registrado, igualmente está en esta zona con una magnitud de 164 MPa.

3.5 PROCEDIMIENTO PARA APLICACIÓN DE RESINA FOTOELÁSTICA (MÉTODO DE FOTOELASTICIDAD)

Para la preparación de la resina fotoelástica se siguió el procedimiento indicado por el proveedor Vishay Micro Measurements®, teniendo que:

$$A = 90 \text{ in}^2$$

$$t = 0.5 \text{ mm} = 0.02 \text{ in}$$

$$W \text{ vaso} = 4.27 \text{ g}$$

$$W = 18.5 \times A \times t = 18.5 \times 90 \text{ in}^2 \times 0.02 \text{ in} = 33.3 \text{ g}$$

$$PL - 1 = \frac{W \times 100}{120} + W \text{ vaso} = \frac{33.3 \text{ g} \times 100}{120} + 4.27 \text{ g} = 32.02 \text{ g}$$

$$PLH - 1 = \frac{W \times 20}{120} + W \text{ vaso} = \frac{33.3 \text{ g} \times 20}{120} + 4.27 \text{ g} = 9.82 \text{ g}$$

En donde:

A = Área de la hoja de resina fotoelástica.

t = Espesor deseado en la sábana (hoja) de resina fotoelástica.

W = Peso total de la mezcla.

PL-1 = Cantidad de resina requerida para la mezcla.

PLH-1 = Cantidad de catalizador requerida para la mezcla.

W vaso = Peso del vaso utilizado para preparar la mezcla.



Fig. 3.39 Vaso utilizado para pesar la cantidad necesaria de resina y catalizador de la mezcla.



Fig. 3.40 Resina fotoelástica PL-1 Marca Vishay MicroMeasurements®.



Fig. 3.41 Catalizador PLH-1 Marca Vishay MicroMeasurements®.



Fig. 3.42 Hoja de resina fotoelástica obtenida, previa a ser retirada de la plancha y seccionada para ser usada sobre los puntos críticos de la grúa.

A fin de proteger los pedazos de resina fotoelástica colocados y asegurar un mejor pegado, se procedió a cubrirlas con papel y cinta masking, lo más ajustada posible para evitar que se formaran burbujas de aire (en el pegamento) entre la pieza y la resina.



Fig. 3.43 Protección de papel y cinta masking puesta sobre los pedazos de resina recién pegados en las zonas de interés de los distintos componentes de la grúa.

IDENTIFICACIÓN DE COLORES Y ORDEN DE FRANJA (*N*)

Algunas de las zonas analizadas con el recubrimiento fotoelásticos no mostraron ninguna variación de color, es decir, durante la prueba, mientras se cargaron los 200 kg a la grúa, el color ámbar característico de la resina fotoelástica, se mantuvo. Se deduce que esto es debido al comportamiento que presentan las fibras internas de las piezas de la grúa las cuales tienden a distribuir uniformemente el esfuerzo generado a lo largo del eje longitudinal de la pieza en cuestión. Esto aunado a la rigidez del material, la magnitud de la carga aplicada, el grosor de la hoja de resina fotoelástica utilizada y el pegamento que sirvió de unión hacia la estructura hacen que sea difícil observar perturbaciones importantes en este análisis. En la mayoría de las imágenes las variaciones en el color ámbar que se observan son debidas a esfuerzos residuales de las láminas (hojas) de resina fotoelástica o a incrustaciones durante la preparación de las mismas o mientras fueron pegadas a la grúa.

En la Fig. 3.44 se observa la ubicación de las partes utilizadas para el análisis mediante resina fotoelástica y posteriormente de cada una, de acuerdo a los colores que se muestran, se obtienen los valores del orden de franja (N).

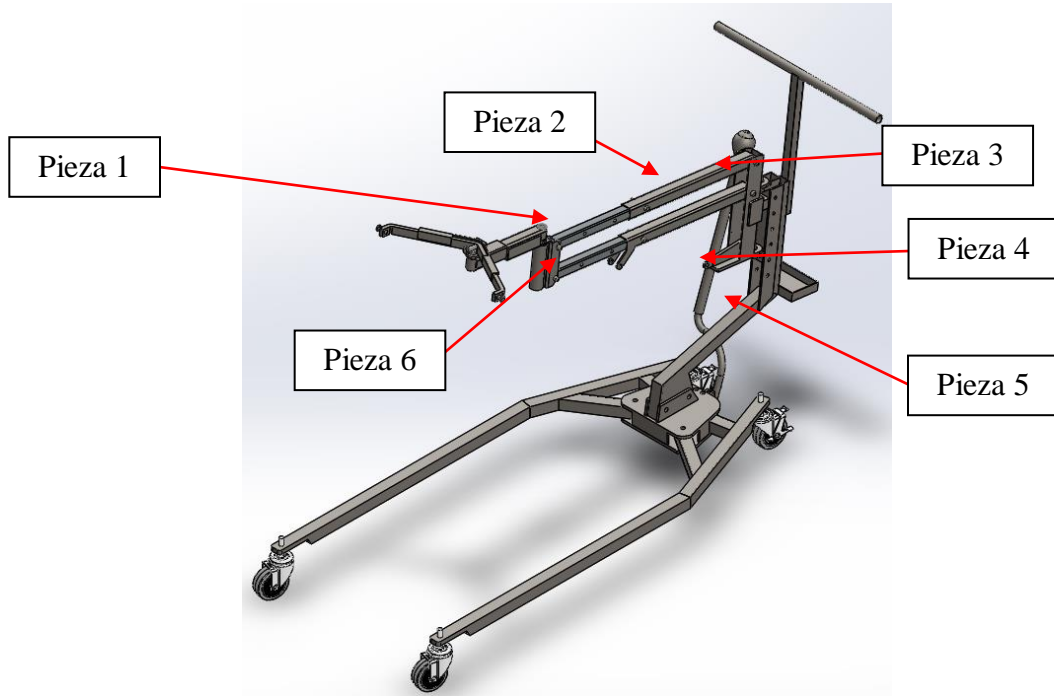
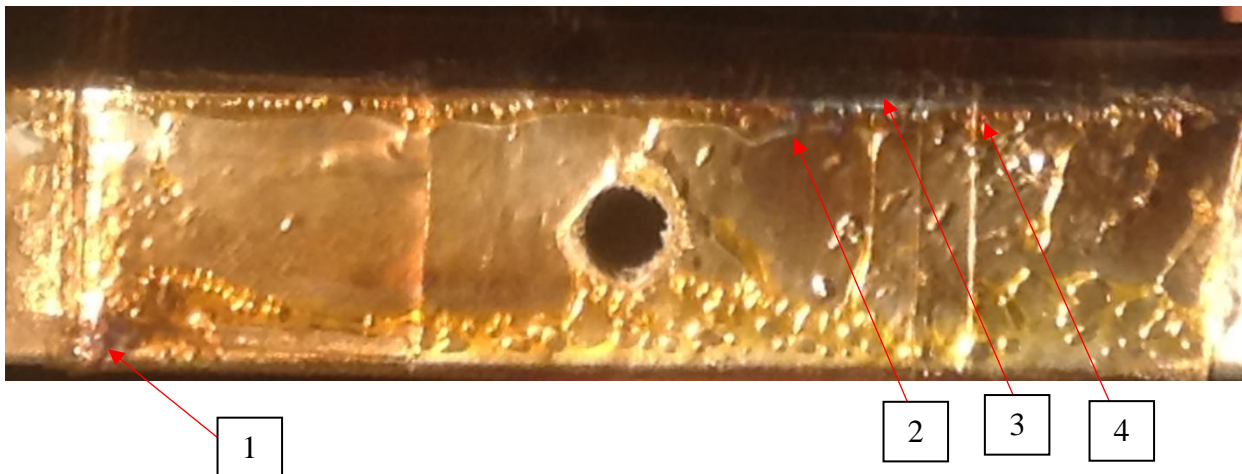


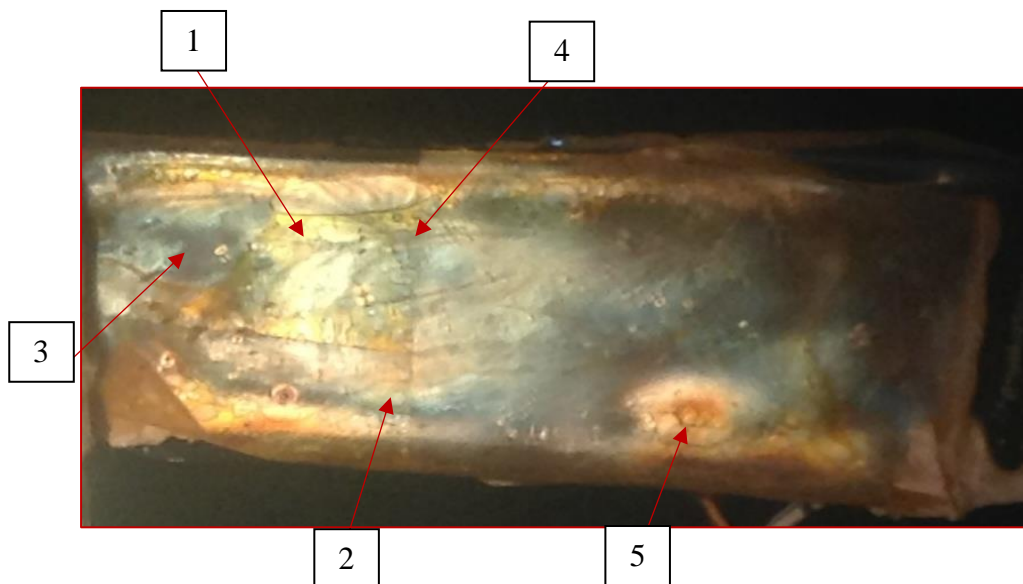
Fig. 3.44 Localización de las piezas analizadas en la grúa.

Pieza 1.- Brazo telescópico superior – Conjunto grúa móvil.



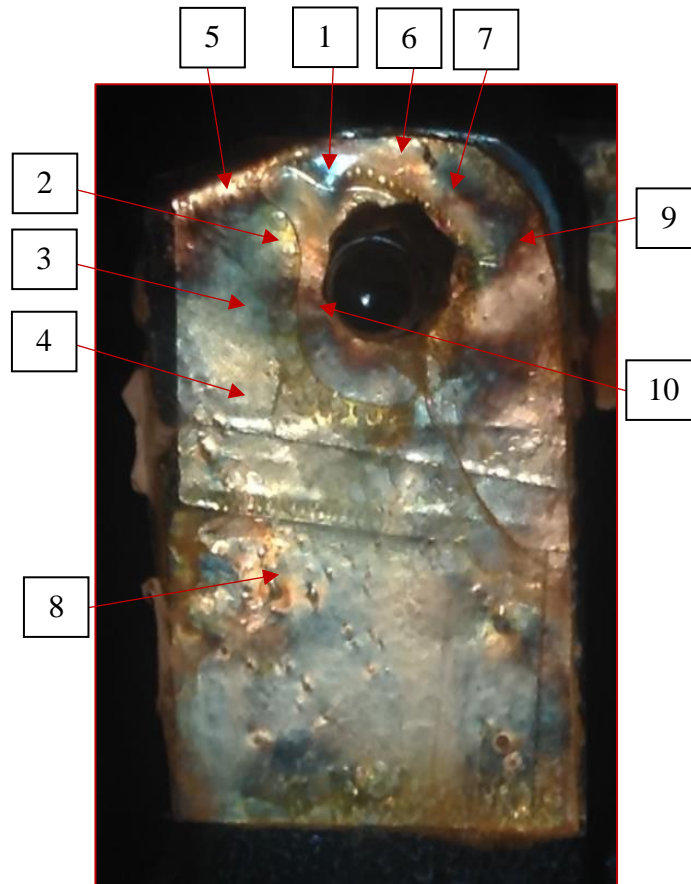
Número asignado	Color identificado	Orden de franja (N)
1	Transición Rojo/Azul	1
2	Azul - Verde	1.22
3	Azul - Verde	1.22
4	Rosa Rojo	1.82

Pieza 2.- Brazo paralelo superior – Conjunto grúa móvil



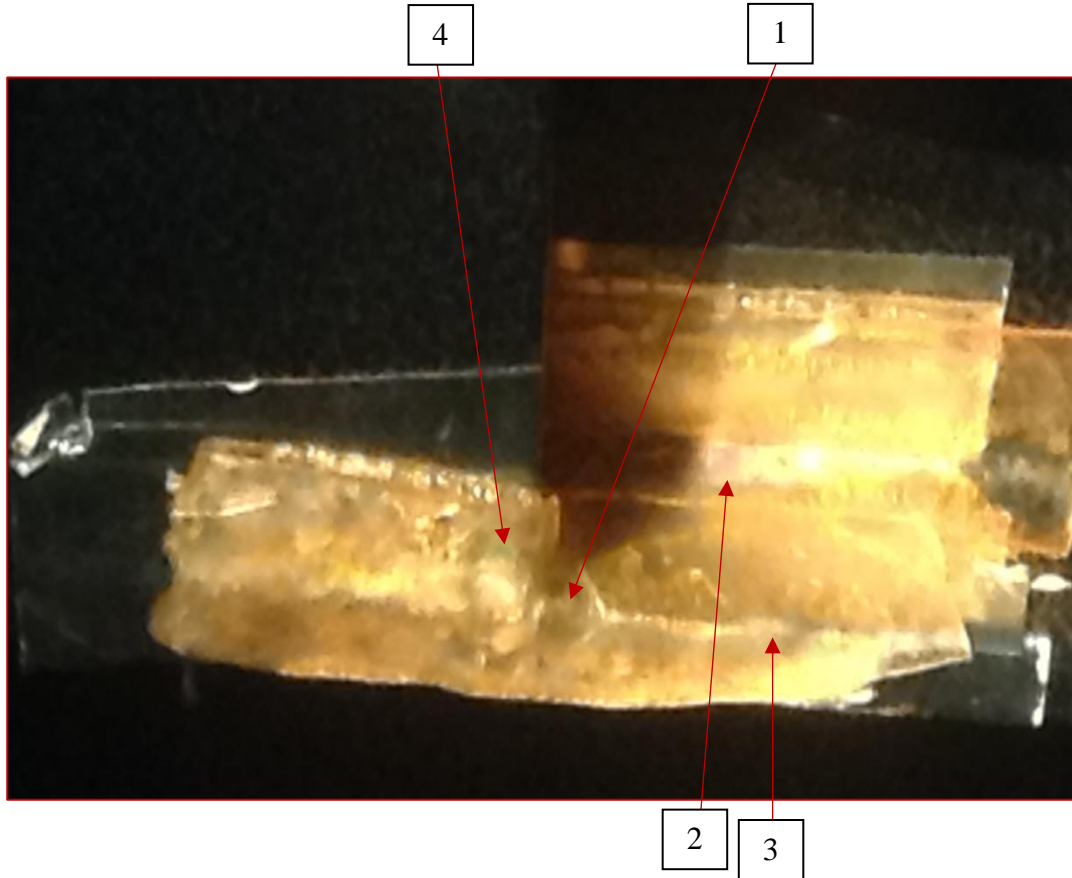
Número asignado	Color identificado	Orden de franja (N)
1	Amarillo Pálido	0.6
2	Rojo Suave	0.9
3	Transición Rojo/Azul	1
4	Azul - Verde	1.22
5	Rosa Rojo	1.82

Pieza 3.- Base principal superior – Conjunto grúa móvil.



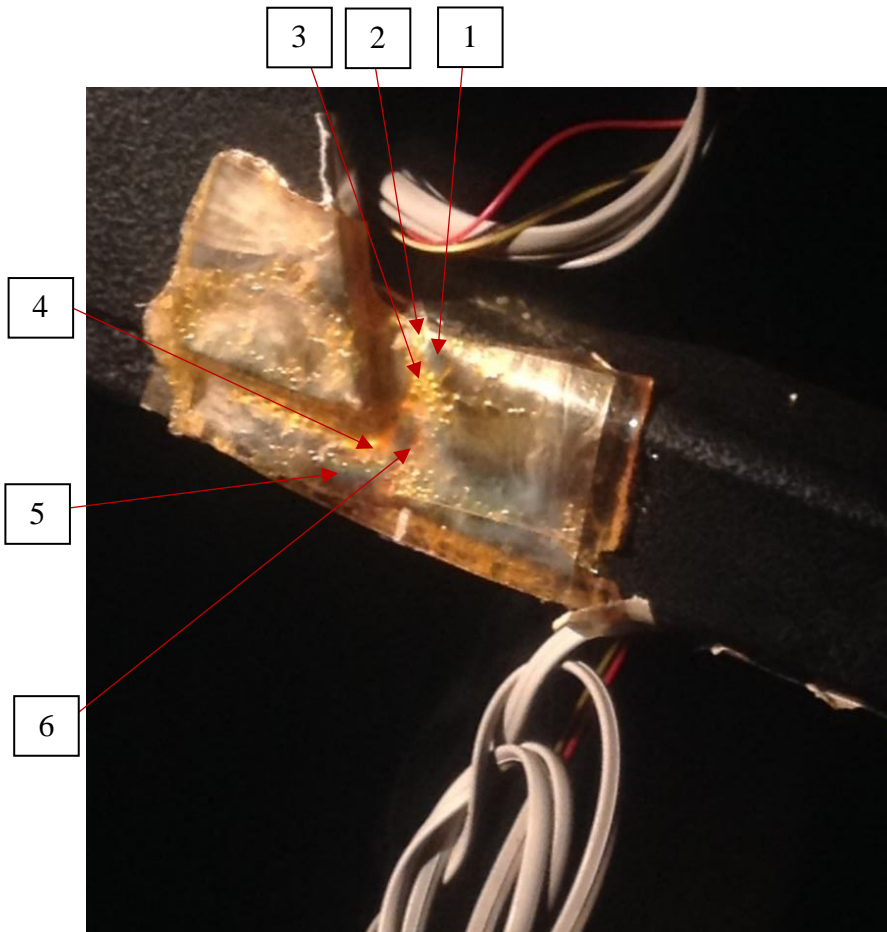
Número asignado	Color identificado	Orden de franja (N)
2, 4 y 8	Amarillo Pálido	0.6
6	Rojo Suave	0.9
1, 5 y 7	Transición Rojo/Azul	1
3 y 9	Azul - Verde	1.22
10	Rosa Rojo	1.82

Pieza 4.- Base principal inferior – Conjunto grúa móvil.



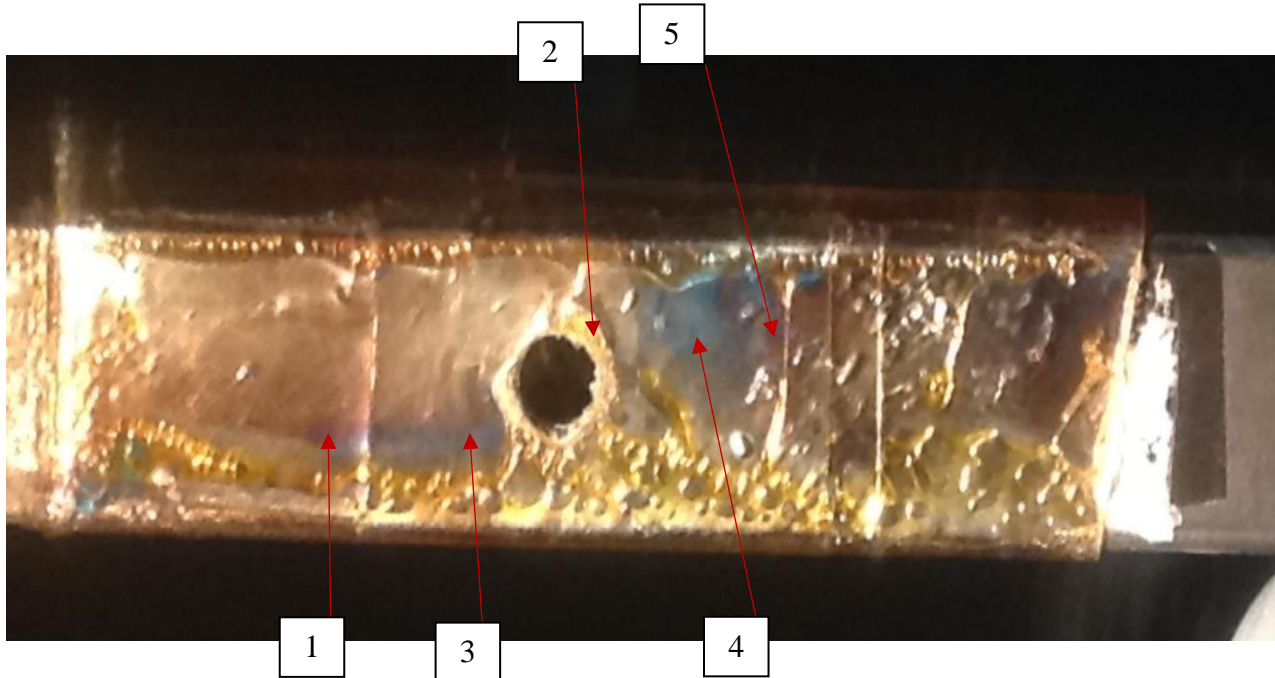
Número asignado	Color identificado	Orden de franja (N)
1	Amarillo Pálido	0.6
2	Rojo Suave	0.9
3	Transición Rojo/Azul	1
4	Azul - Verde	1.22

Pieza 5.- Soporte general – Conjunto grúa móvil.



Número asignado	Color identificado	Orden de franja (N)
1	Transición Rojo/Azul	1
5	Azul - Verde	1.22
2 y 4	Amarillo	1.39
3 y 6	Rosa Rojo	1.82

Pieza 6.- Brazo telescópico inferior – Conjunto grúa móvil.



Número asignado	Color identificado	Orden de franja (N)
1 y 5	Rojo Suave	0.9
3 y 4	Transición Rojo/Azul	1
2	Amarillo	1.39

En las demás partes de la grúa que fueron evaluadas con las láminas de resina fotoelástica no se obtuvieron registros de perturbaciones en el color ámbar característico de la resina. Es decir no se observaron perturbaciones considerables.

CÁLCULOS PARA OBTENER EL VALOR DE LA DIFERENCIA DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES EN LAS PIEZAS EVALUADAS

Para realizar los cálculos necesarios para obtener el valor de la diferencia de los esfuerzos principales en las piezas evaluadas con la técnica de fotoelasticidad seguiremos la siguiente metodología (Espinal Gutiérrez, Beltrán Fernández, & Hernández Gómez, 2011):

1.- Utilizando la **Tabla 3.6**, identificar el índice de franja (N) de acuerdo al color que aparece en la pieza recubierta con resina.

Tabla 3.6 Orden de franja (Vishay MicroMeasurements, 2007).

ISOCHROMATIC FRINGE CHARACTERISTICS				
COLOR	APPROXIMATE RELATIVE RETARDATION		FRINGE ORDER N	
	nm	in $\times 10^{-6}$		
Black	0	0	0	
Pale Yellow	345	14	0.60	
Dull Red	520	20	0.90	
Red/Blue Transition	575	22.7	1.00	
Blue-Green	700	28	1.22	
Yellow	800	32	1.39	
Rose Red	1050	42	1.82	
Red/Green Transition	1150	45.4	2.00	
Green	1350	53	2.35	
Yellow	1440	57	2.50	
Red	1520	60	2.65	
Red/Green Transition	1730	68	3.00	
Green	1800	71	3.10	

2.- Conocer la diferencia de deformaciones principales ($\epsilon_1 - \epsilon_2$) mediante la fórmula:

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{N_n \lambda}{2kt}$$

En donde:

$N_n =$ Orden de franja

$\lambda =$ Longitud de onda

$k =$ Coeficiente de recubrimiento

$t =$ Espesor (depende del grosor de la hoja de resina fotoelástica)

3.- Simplificando obtenemos:

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = N_n f$$

En donde:

$f =$ Valor de franja

4.- Se deduce que:

$$f = \frac{\lambda}{2kt}$$

5.- De acuerdo al fabricante de la resina PL-1:

$$\lambda = 22.7 \times 10^{-6} \text{ in } \text{ ó } 0.577 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$$k = 0.10$$

$$t = 0.5 \text{ mm} = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

6.- Sustituyendo valores en la fórmula de f tenemos:

$$f = \frac{0.577 \times 10^{-6} \text{ m}}{2(0.10)(0.5 \times 10^{-3} \text{ m})} = 0.00577$$

7.- Para obtener la diferencia de los esfuerzos principales ($\sigma_1 - \sigma_2$):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E}{1 + \nu} (\epsilon_1 - \epsilon_2)$$

En donde:

E = *Módulo de elasticidad*

ν = *Coficiente de Poisson*

TABULACIÓN DE RESULTADOS

A fin de obtener la magnitud de la diferencia de los esfuerzos principales se realizan para cada pieza los cálculos indicados en la metodología mostrada anteriormente (Espinal Gutiérrez, Beltrán Fernández, & Hernández Gómez, 2011) y a continuación se muestra la tabla con los datos obtenidos.

Tabla 3.7 Resultados correspondientes a la magnitud de la diferencia de los esfuerzos principales.

No. de Pieza	$N = N_n$	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ en m	$\sigma_1 - \sigma_2$ en Pa	$(\sigma_1 - \sigma_2)_{\max}$ en MPa
1	1	0,000577	9320769,231	16,9638
	1,22	0,00070394	11371338,46	
	1,82	0,00105014	16963800	
2	0,6	0,0003462	5592461,538	16,9638
	0,9	0,0005193	8388692,308	
	1	0,000577	9320769,231	
	1,22	0,00070394	11371338,46	
	1,82	0,00105014	16963800	
3	0,6	0,0003462	5592461,538	16,9638
	0,9	0,0005193	8388692,308	
	1	0,000577	9320769,231	
	1,22	0,00070394	11371338,46	
	1,82	0,00105014	16963800	
4	0,6	0,0003462	5592461,538	11,37133846
	0,9	0,0005193	8388692,308	
	1	0,000577	9320769,231	
	1,22	0,00070394	11371338,46	
5	1	0,000577	9320769,231	16,9638
	1,22	0,00070394	11371338,46	
	1,39	0,00080203	12955869,23	
	1,82	0,00105014	16963800	
6	0,9	0,0005193	8388692,308	12,95586923
	1	0,000577	9320769,231	
	1,39	0,00080203	12955869,23	

En donde:

N = Índice de franja

N_n = Orden de franja

ε_1 = Deformación principal máxima (m)

ε_2 = Deformación principal mínima (m)

σ_1 = Esfuerzo principal mínimo (Pa)

σ_2 = Esfuerzo principal mínimo (Pa)

Para este caso se considero $N = N_n = 1$, debido a que las franjas de colores observadas fueron las mismas desde el momento que aparecieron y se mantuvieron así hasta el final. La única diferencia observada fue que conforme la carga aumentaba, los colores observados se intensificaron.

Tabla 3.8 Valores constantes utilizados para los cálculos de la **Tabla 4.12**.

Valores constantes		
$f = \lambda/2kt$	=	0,00577
E	=	2,10E+11 Pa
v	=	0,3

En donde:

f = Valor de franja (adimensional)

λ = Longitud de onda (m)

k = Coeficiente de recubrimiento

t = Espesor (m) (depende del grosor de la hoja de resina fotoelástica)

E = Módulo de elasticidad (Pa)

v = Coeficiente de Poisson

Como se observa en la **Tabla 3.7** tenemos que en la última columna (extremo derecho) se tienen los valores correspondientes al esfuerzo máximo registrado en cada una de las piezas analizadas, los cuales están muy por debajo del esfuerzo de fluencia (deformaciones permanentes) del material del que está fabricada la grúa (Acero Estructural ASTM A36): 250 MPa.

3.6 PREPARACIÓN Y PROCEDIMIENTO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES EN 2D

Para la preparación de las zonas de estudio, en este caso de la grúa auxiliar, se utilizaron estampas (stickers) blancas en forma de círculo de aproximadamente 0.6 mm de diámetro, los cuáles fueron pegados en las áreas de interés a fin de generar un patrón aleatorio que sirviera de referencia para la medición de los desplazamientos entre los puntos.

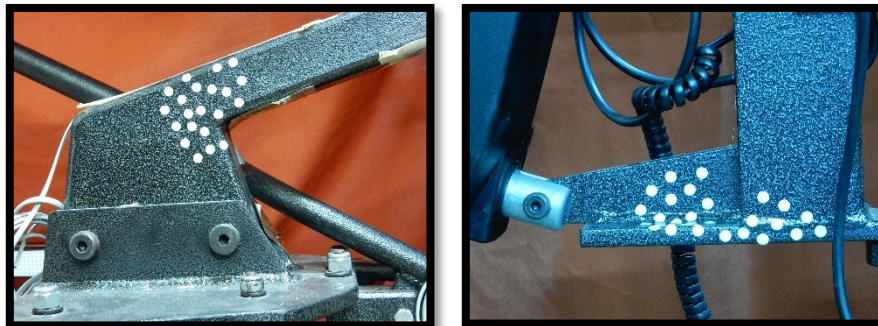


Fig. 3.45 Zonas de la grúa en donde fueron colocadas las estampas circulares (patrón aleatorio).

Así como en la aplicación de los métodos anteriores de extensometría y fotoelasticidad, las pruebas se realizaron colocando pesas en la grúa, aumentando de manera gradual la magnitud de los pesos hasta llegar a 200 kg. Se comenzó poniendo pesas de 20 kg cada una hasta acumular 80 kg. Posteriormente se colocaron pesas de 15 kg cada una hasta alcanzar los 200 kg anteriormente mencionados. Estas pruebas se realizaron varias ocasiones obteniendo en cada una, video del comportamiento de una de las zonas de estudio previamente preparada.

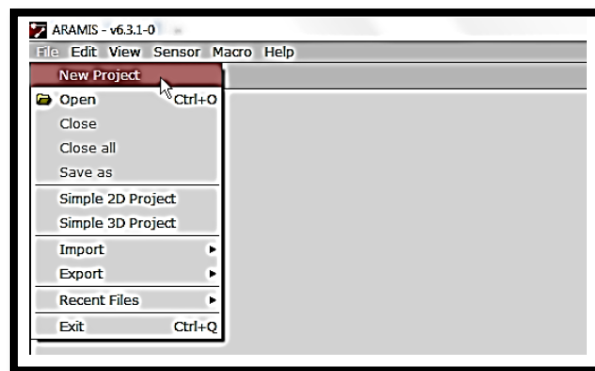
Para la grabación de los videos se utilizó una cámara profesional Nikon Modelo COOLPIX S9700 de 16 MPx y grabación Full HD 1080p a 30 fps. Además para tener una mejor estabilidad en la cámara, se utilizó un trípode plegable que ayudo además a tener una correcta alineación y distancia con las zonas de estudio de la grúa.

Posteriormente los videos serán convertidos a secuencias de imágenes mediante el programa Free Video to JPG Converter.

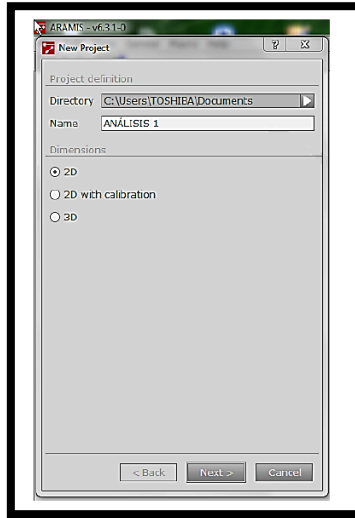
PROCESADO DE VIDEOS/IMÁGENES MEDIANTE EL USO DEL PROGRAMA ARAMIS®

Para el procesado de la información (imágenes) obtenida de las pruebas realizadas a la grúa auxiliar se seguirá el siguiente procedimiento (López, López, & Pava, 2015):

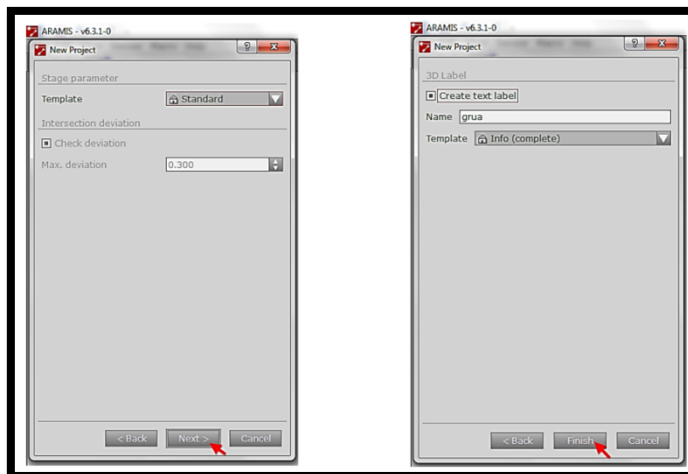
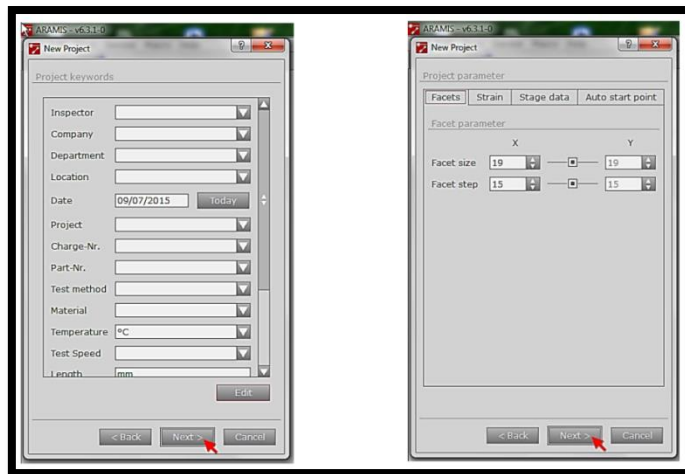
- 1.- Abrir Aramis®.
- 2.- Para iniciar es necesario abrir un nuevo proyecto dentro de la interfaz de Aramis® y posteriormente importar el video o en su defecto imágenes de la prueba realizada. Es necesario tener debidamente ubicada cada serie de imágenes en una carpeta independiente para evitar pérdida o confusión de información.



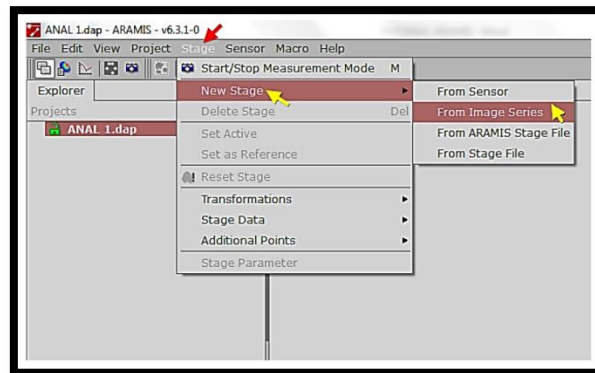
- 3.- Escribir el nombre que tendrá el análisis e inmediatamente seleccionar que se trata de un análisis 2D.



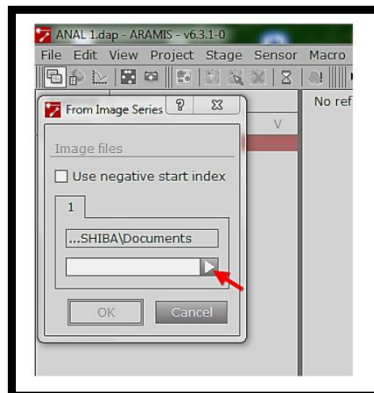
4.- en las ventanas que se muestran en las siguientes figuras no modificar los valores predeterminados. Simplemente dar click en Siguiente (Next).



5.- En la ventana que se muestra se selecciona Nueva Etapa (New Stage) y después Desde una Serie de Imágenes (From Image Series).



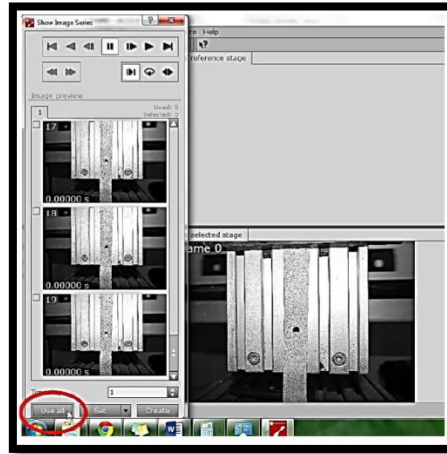
6.- En esta etapa, es necesario dar click en el botón del buscador que se aprecia en la captura. Con ello, se desplegará la ventana en la que se seleccionará la carpeta que contenga la secuencia de imágenes que se quiere analizar. Al abrir dicha carpeta daremos doble click solo en la primera fotografía con lo cual se importaran automáticamente todas las imágenes contenidas en la carpeta.



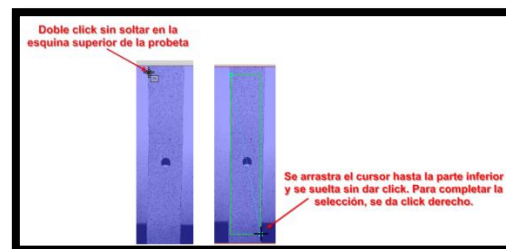
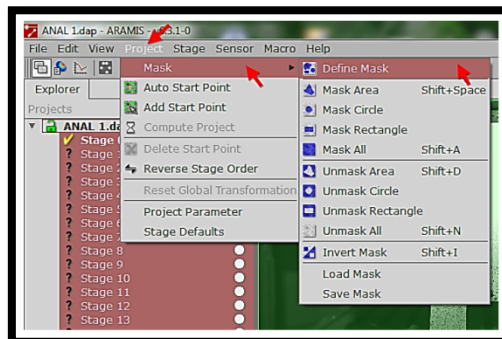
7.- Debido a que las fotografías contienen colores, se desplegará una ventana que solicitará la conversión de las mismas a escala de grises, ya que solo así se genera el contraste entre grises y blancos necesario en la técnica de Correlación Digital de imágenes.



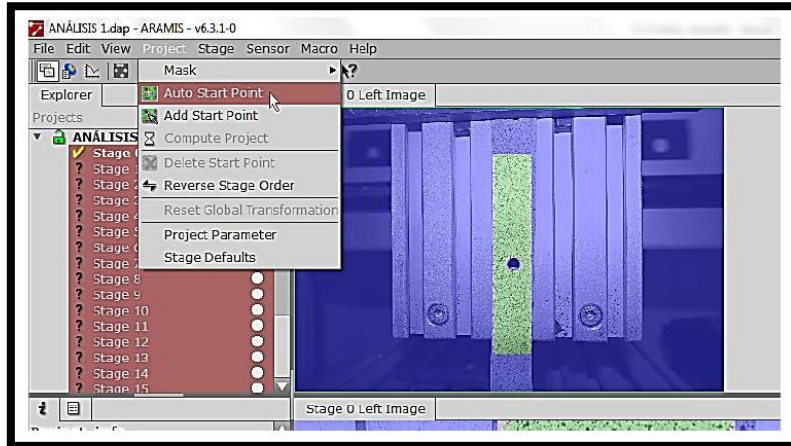
8.- Se mostrará una ventana con una vista previa de todas las fotografías capturadas por la cámara profesional utilizada. En esta parte del proceso se da click en el botón USE ALL, con lo cual se estarán integrando todas las imágenes en el análisis.



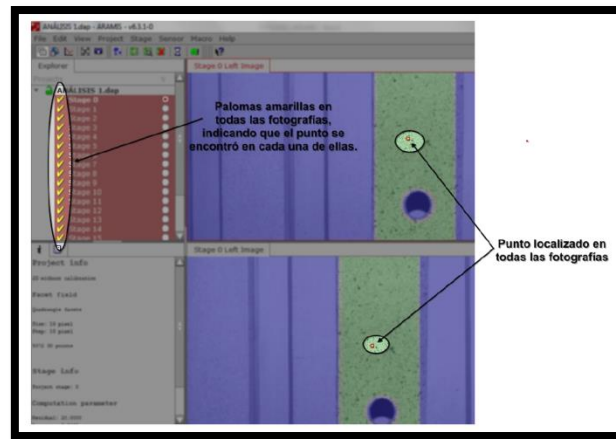
9.- El siguiente paso es seleccionar la superficie de la pieza que realmente es necesaria considerar en el análisis de desplazamientos.



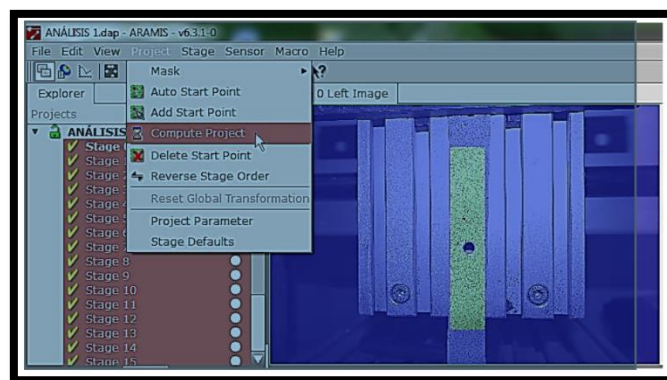
10.- A continuación es necesario identificar un punto de referencia en la primera fotografía visualizada. Dicho punto debe ser de tal característica que el programa pueda seguirlo en cada una de las fotografías subsecuentes.



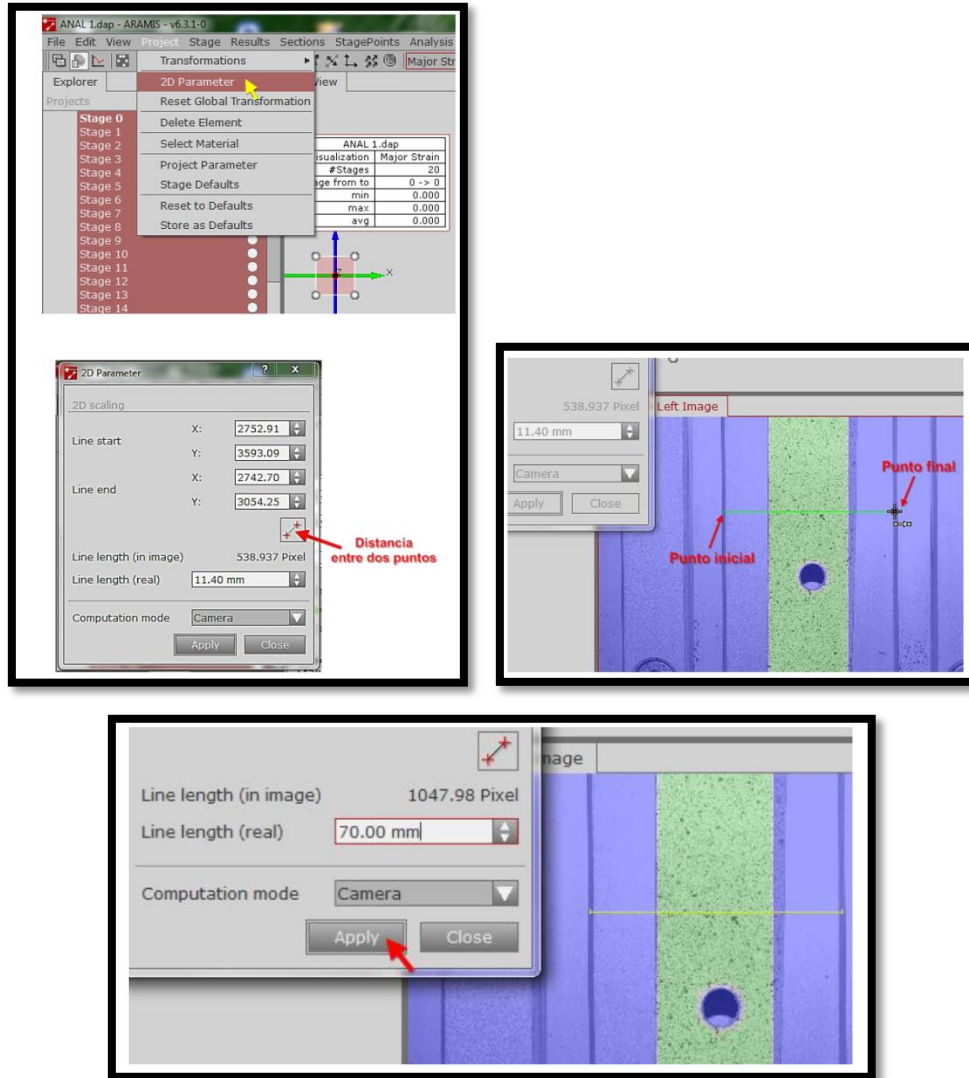
Al terminar este proceso, se observa que el programa encontró el mismo punto en todas las fotografías, donde cada una de ellas corresponde a una etapa diferente del ensayo de tensión.



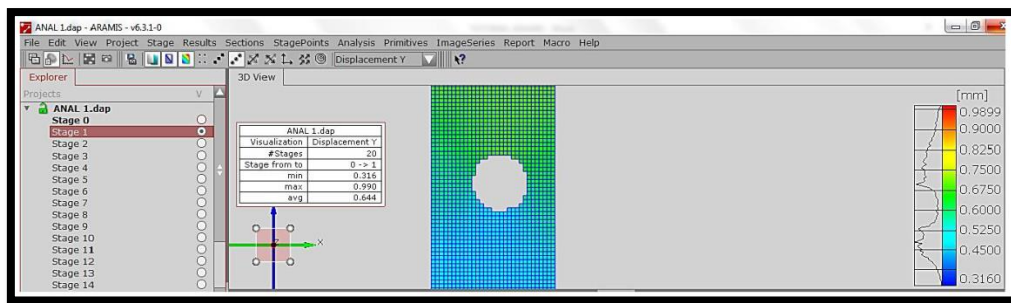
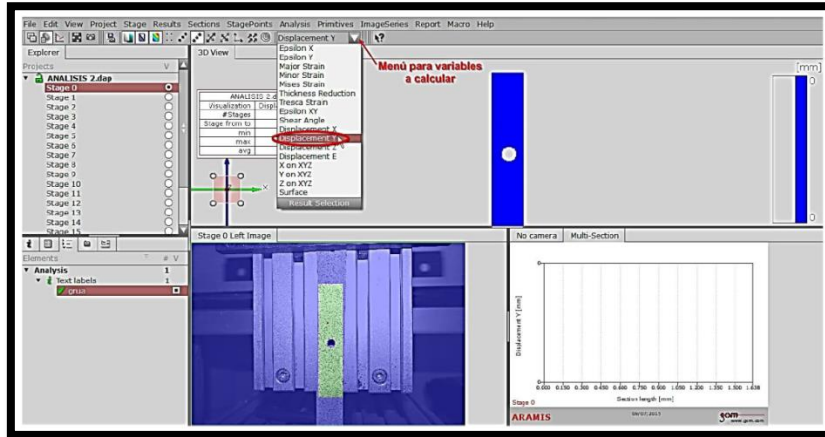
11.- Finalmente, se lleva a cabo la el cómputo del análisis, con el cual se podrán obtener los resultados que se requieran.



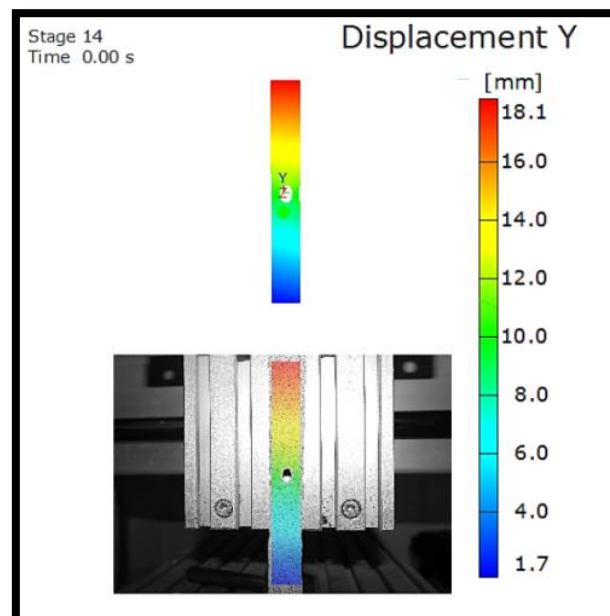
12.- El siguiente paso es uno de los más importantes de todo el método ya que, antes de solicitar algún resultado se debe considerar que durante la etapa de posicionamiento de los componentes del equipo fotográfico, tales como base, trípode y montaje de la cámara. Por lo tanto es necesario establecer una dimensión real de referencia. Al hacer click en el botón de distancia entre dos puntos, el programa nos dará la posibilidad de acotar alguna dimensión que se observe en el ambiente del ensayo, de la cual se tiene que conocer su valor real previamente.



13.- Echo lo anterior, estamos en condiciones de solicitar cualquier resultado, tal como deformaciones o desplazamientos.

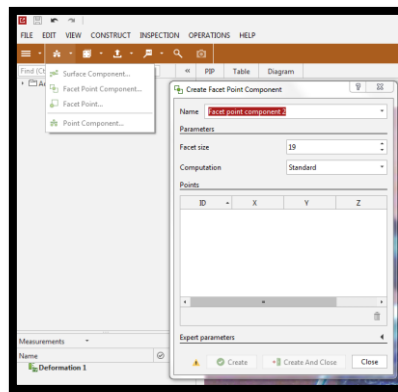


14.- Para tener más información acerca del comportamiento del elemento analizado es necesario solicitar reportes. En el reporte es posible observar el comportamiento en toda una sección de la pieza.

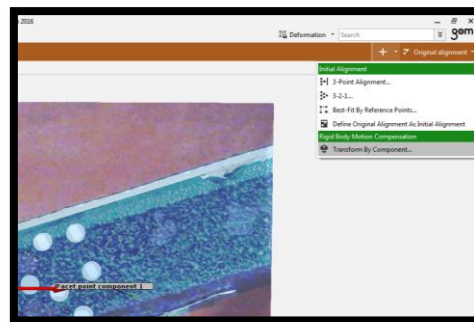


15.- Una consideración muy importante que se debe hacer para los análisis de las piezas de la grúa auxiliar mediante CDI en 2D en Aramis fue la de generar **compensaciones de cuerpo rígido** ya que debido al comportamiento estructural de la grúa en donde se tiene inicialmente un desplazamiento de las piezas y posteriormente deformación, es necesario bloquear el movimiento en esos puntos para que en los resultados se observe únicamente la deformación de las piezas.

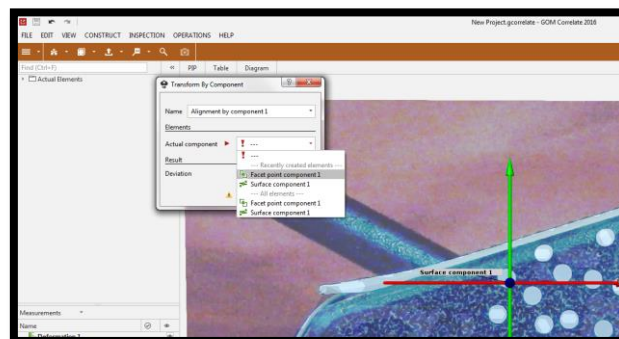
15a.- Primeramente se debe crear un nuevo componente punto de faceta (facet point component) dando CTRL + Click Izquierdo para seleccionar el lado que permanecerá fijo (se recomiendan tres puntos).



15b.- Declarar la compensación de cuerpo rígido.



15c.- seleccionar el punto de faceta creado en el paso 15a.



Enseguida se muestran los resultados obtenidos de desplazamiento (deformación) en x, y de cada una de las zonas de estudio.

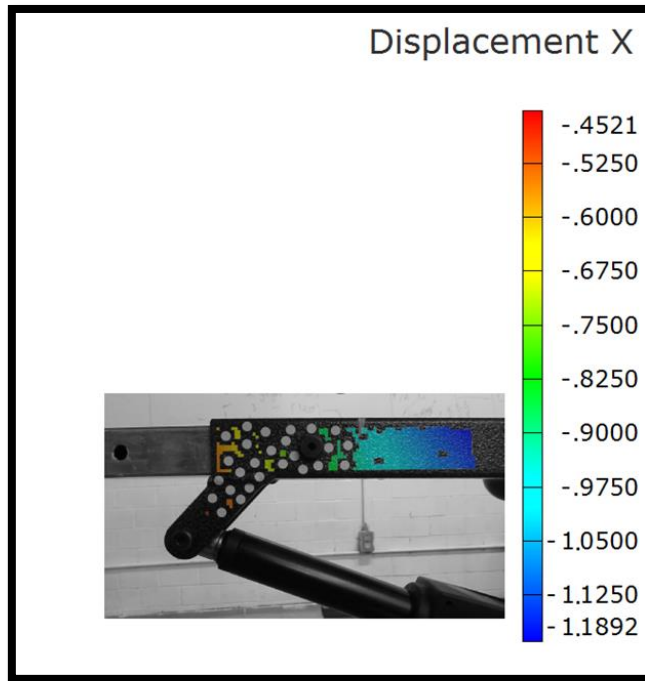


Fig. 3.46 Desplazamientos en el eje X ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 1 (unidades en mm).

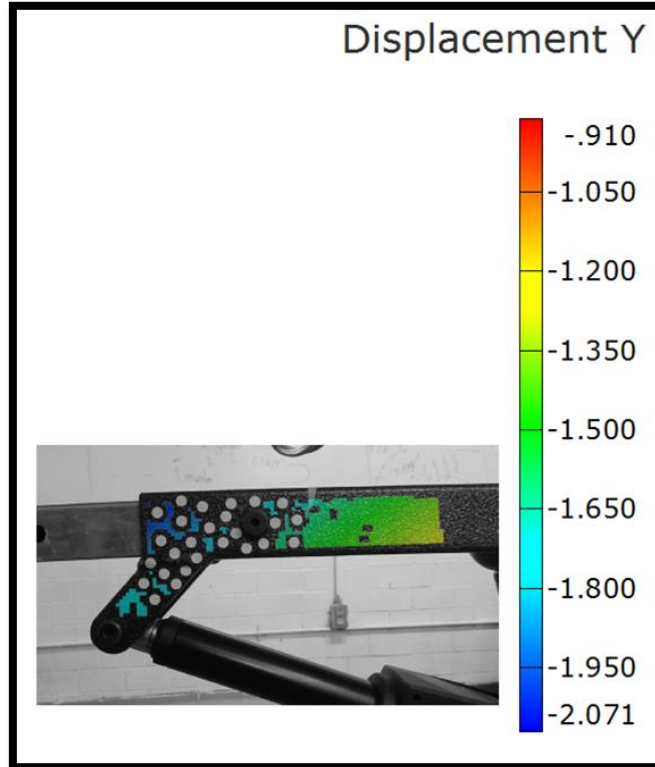


Fig. 3.47 Desplazamientos en el eje Y ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 1 (unidades en mm).

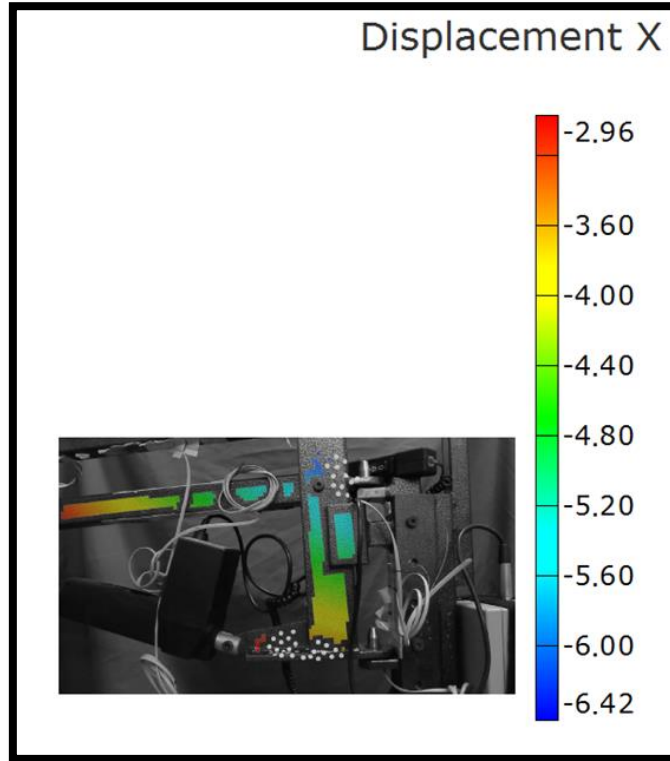


Fig. 3.48 Desplazamientos en el eje X ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 2 (unidades en mm).

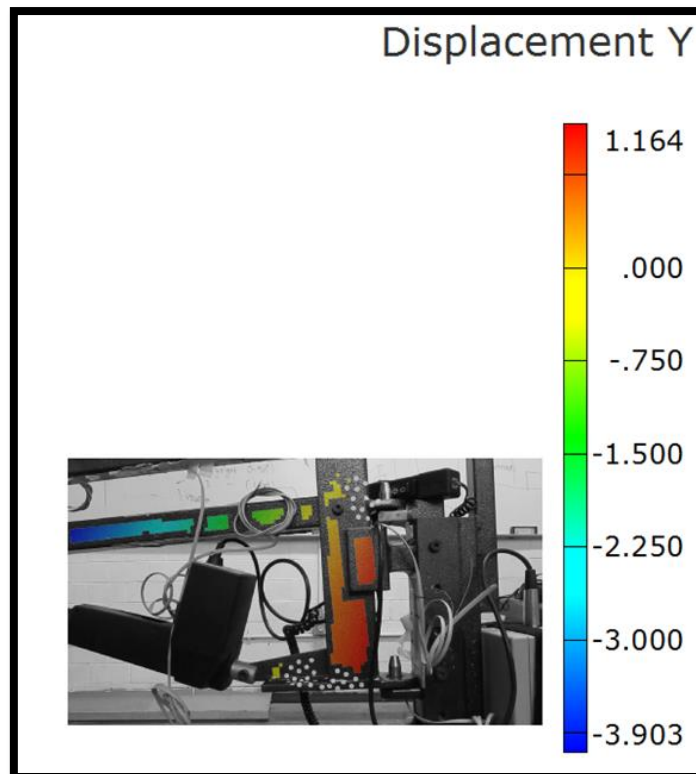


Fig. 3.49 Desplazamientos en el eje Y ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 2 (unidades en mm).

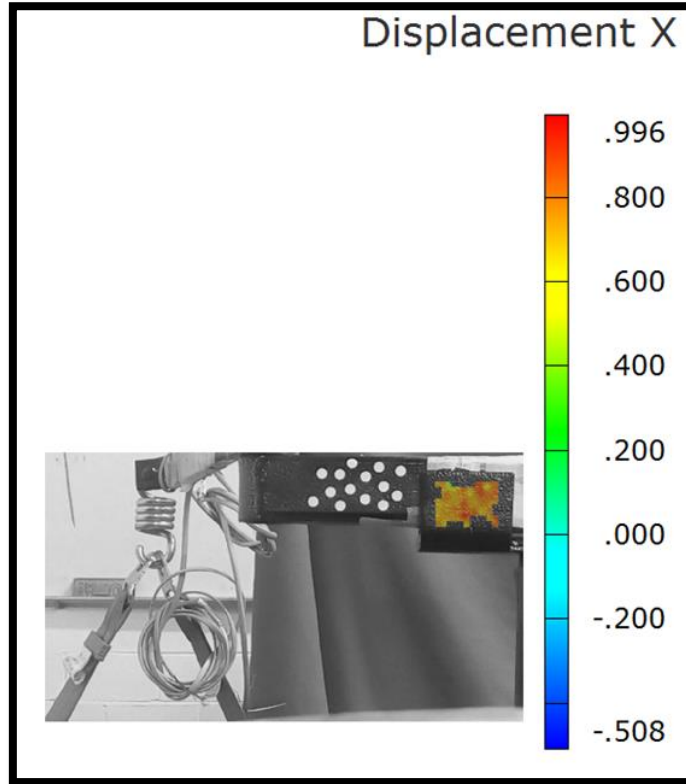


Fig. 3.50 Desplazamientos en el eje X ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 3 (unidades en mm).

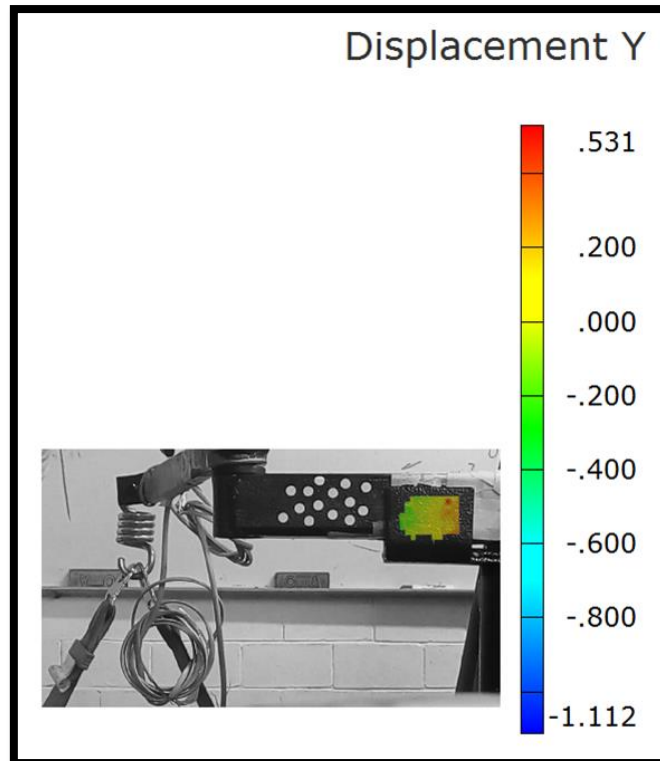


Fig. 3.51 Desplazamientos en el eje Y ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 3 (unidades en mm).

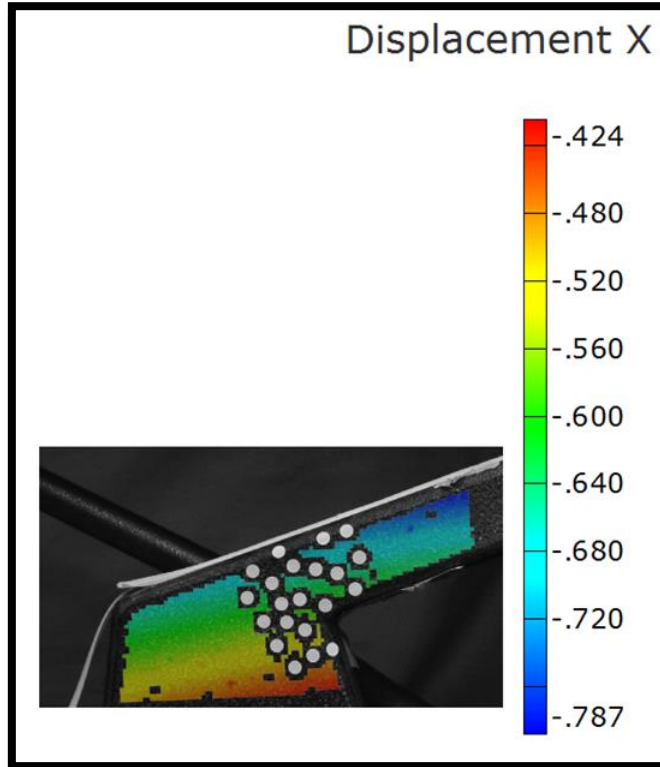


Fig. 3.52 Desplazamientos en el eje X ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 4 (unidades en mm).

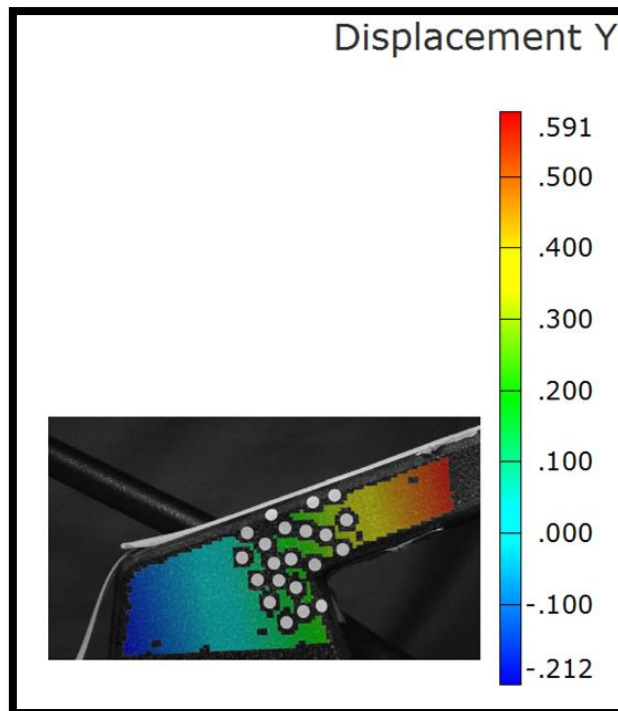


Fig. 3.53 Desplazamientos en el eje Y ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 4 (unidades en mm).

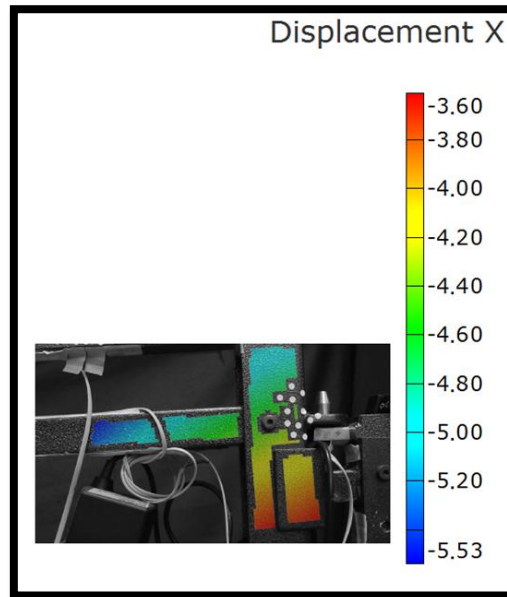


Fig. 3.54 Desplazamientos en el eje X ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 5 (unidades en mm).

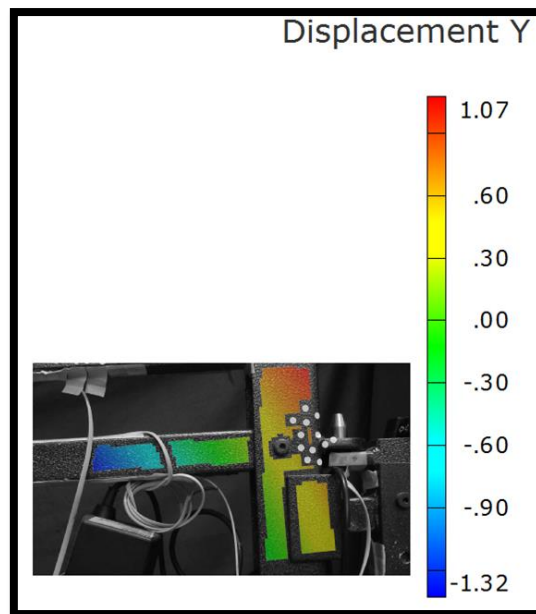


Fig. 3.55 Desplazamientos en el eje Y ante un peso de 200 kg en la zona de estudio 5 (unidades en mm).

3.7 SUMARIO

En este capítulo se realizaron las pruebas experimentales de fotoelasticidad, extensometría y CDI en 2D, además de la simulación numérico. Se describió el proceso de realización para cada método y se mostraron los resultados obtenidos.

En el siguiente capítulo se compararán y analizarán los resultados de todos los métodos de análisis aplicados.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE DEFORMACIONES UNITARIAS EN GALGAS EXTENSOMÉTRICAS Y ANSYS WORKBENCH®

Tabla 4.1 Datos de ϵ de galgas extensométricas vs ϵ de ANSYS Workbench®.

Número de galga	ϵ galga	ϵ ANSYS
1	8.15E-05	5.72E-05
1A	-1.98E-04	-4.96E-05
2	8.60E-05	4.63E-05
2A	-9.90E-05	-6.66E-05
5	6.00E-06	9.07E-04
6	-2.00E-06	-3.14E-04
7	-8.37E-04	-6.07E-04
8	7.82E-04	4.32E-04
A	2.90E-05	3.81E-04
B	2.65E-05	2.10E-04
C	5.75E-05	1.39E-04
D	-3.90E-05	-1.11E-04
E	9.30E-05	4.94E-04
F	-1.93E-04	-3.53E-04
G	2.64E-04	5.29E-04
H	-2.60E-04	-5.08E-04
I	2.96E-04	5.74E-04
J	-2.50E-04	-4.22E-04

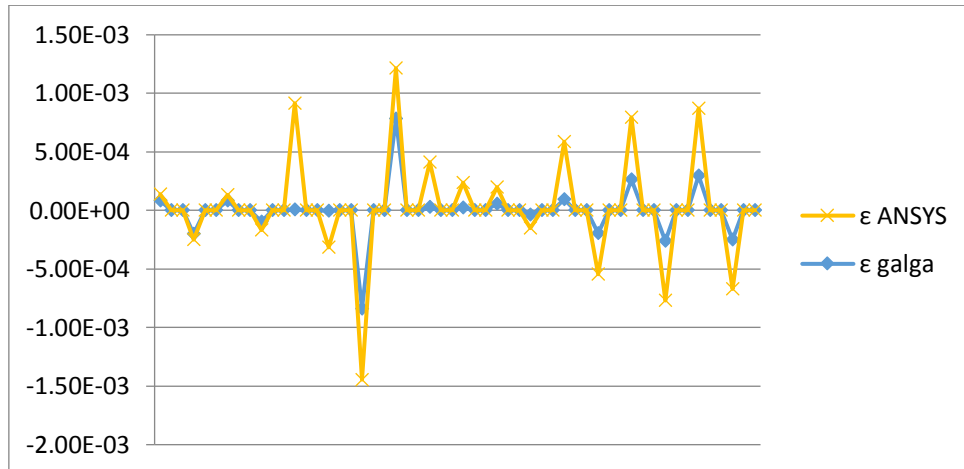


Fig. 4.1 Gráfica de ϵ de galgas extensométricas vs ϵ de ANSYS Workbench®.

De lo anterior se puede observar que ambos resultados son muy parecidos aunque los valores de las galgas son inconsistentes debido posiblemente a la perturbación de temperatura y vibración que se tuvo durante las pruebas, así como la acción de la humedad del ambiente sobre la galga o incluso detalles en la instalación e instrumentación de las mismas.

4.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE ESFUERZOS EN GALGAS EXTENSOMÉTRICAS Y ANSYS WORKBENCH®

Tabla 4.2 Datos de σ de galgas extensométricas vs σ de ANSYS Workbench® (Unidades en Pa).

Número de galga	σ galga	σ ANSYS
1	1.71E+07	1.09E+07
1A	-4.16E+07	-1.04E+07
2	1.81E+07	1.01E+07
2A	-2.08E+07	-1.40E+07
5	1.26E+06	1.19E+08
6	-4.20E+05	-6.59E+07
7	-1.76E+08	-1.22E+08
8	1.64E+08	9.07E+07
A	6.09E+06	7.28E+07
B	5.57E+06	4.41E+07
C	1.21E+07	2.26E+07
D	-8.19E+06	-2.33E+07
E	1.95E+07	1.01E+08
F	-4.05E+07	-7.41E+07
G	5.53E+07	1.05E+08
H	-5.46E+07	-1.07E+08
I	6.21E+07	1.09E+08
J	-5.24E+07	-8.86E+07

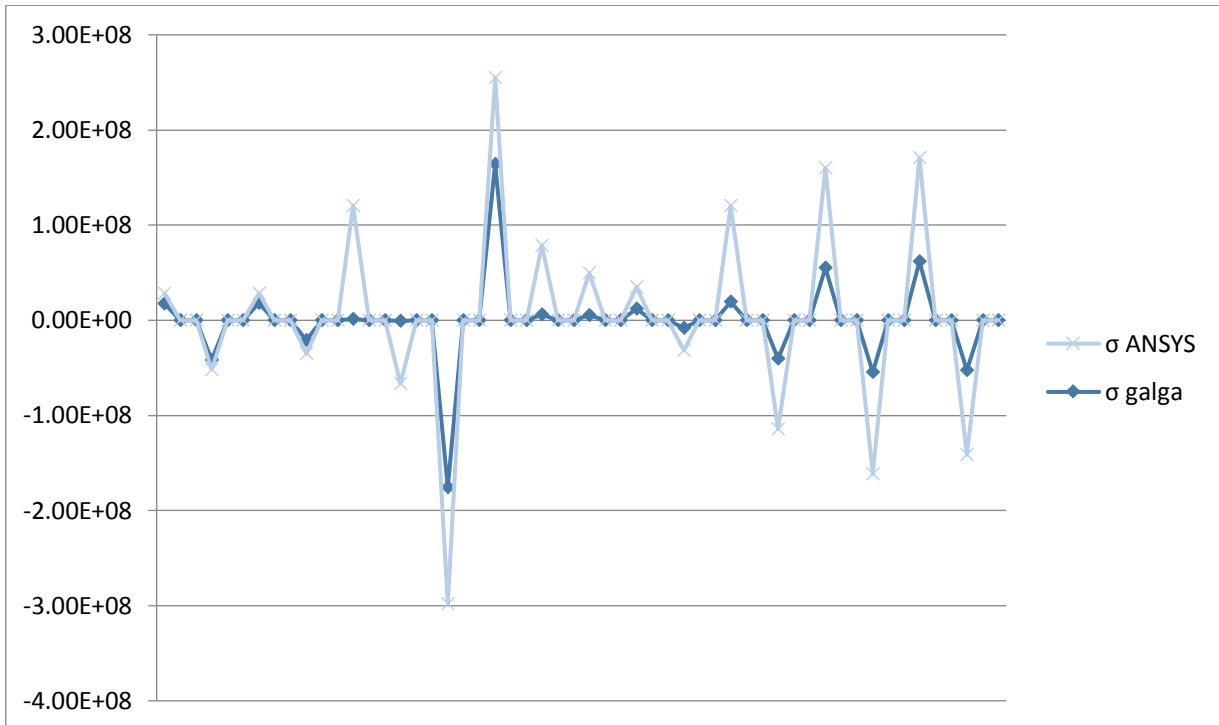


Fig. 4.2 Gráfica de σ de galgas extensométricas vs σ de ANSYS Workbench® (Unidades en Pa).

4.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE ESFUERZOS EN FOTOELASTICIDAD Y ANSYS WORKBENCH®

Tabla 4.3 Datos de σ de fotoelasticidad vs σ de ANSYS Workbench® (Unidades en Pa).

σ fotoelasticidad	σ ANSYS	Número de pieza
1.69E+07	7.28E+07	1
1.69E+07	3.15E+07	2
1.69E+07	1.22E+08	3
1.14E+07	1.60E+07	4
1.69E+07	1.20E+08	5
1.30E+07	6.50E+07	6

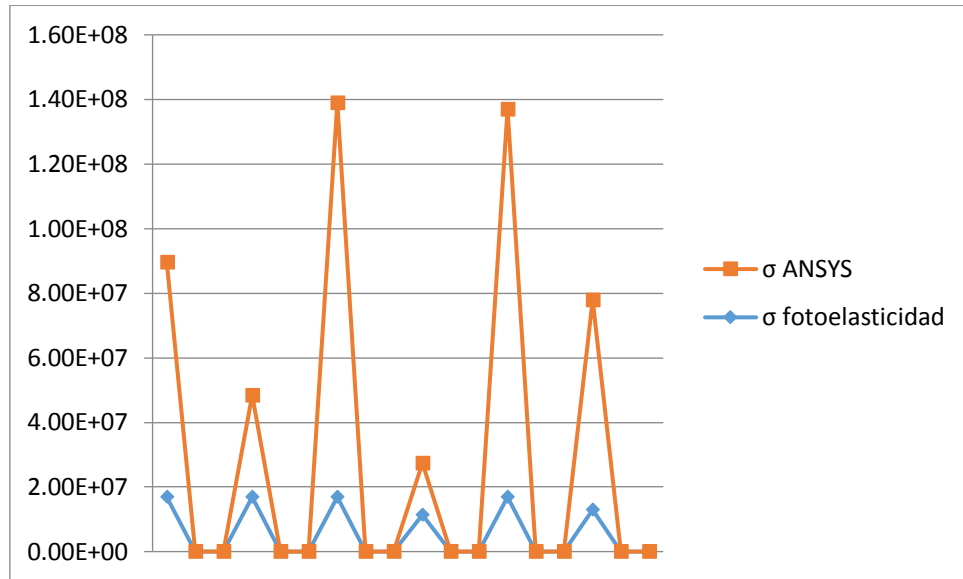


Fig. 4.3 Gráfica de σ de fotoelasticidad vs σ de ANSYS Workbench® (Unidades en Pa).

4.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE DEFORMACIONES EN CDI EN 2D Y ANSYS WORKBENCH®

Tabla 4.4 Datos de δ de CDI en 2D vs δ de ANSYS Workbench® (Unidades en mm).

Zona de estudio	δ ANSYS	δ CDI
1	-1.50E+00	-2.07E+00
2	-5.30E-01	-6.42E+00
3	-1.13E+00	-1.10E+00
4	-5.60E-01	-7.80E-01
5	-5.20E-01	-5.53E+00

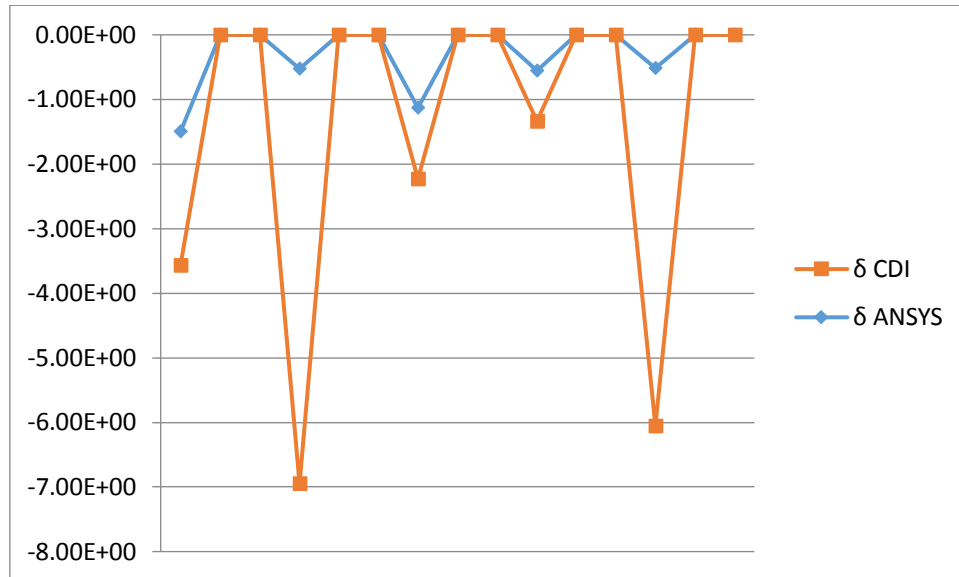


Fig. 4.4 Gráfica de δ de CDI en 2D vs δ de ANSYS Workbench® (Unidades en mm).

4.5 RESULTADOS MÁXIMOS (CRÍTICOS) DE TODOS LOS MÉTODOS APLICADOS A LA GRÚA AUXILIAR

Resultados máximos en ANSYS Workbench® (esfuerzos equivalentes, deformaciones unitarias equivalentes y deformaciones totales):

$$\sigma = 119 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 0.000907$$

$$\delta = 2.05 \text{ mm}$$

Resultados máximos en galgas extensométricas (deformaciones unitarias):

$$\sigma = 164 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 0.000782$$

Resultados máximos en fotoelasticidad (diferencia de esfuerzos normales):

$$\sigma = 16.9 \text{ MPa}$$

Resultados máximos en CDI en 2D (deformaciones totales / desplazamientos):

$$\delta = -6.42 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta el valor máximo permitido de deformación unitaria y el esfuerzo de fluencia del acero estructural ASTM A36 del que están hechos los perfiles tubulares rectangulares (PTR) de los cuales está fabricada la grúa auxiliar

$$\sigma_{fluencia} = 250 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{max\ perm} = 0.0011$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Por lo tanto es válido decir que conforme a los resultados mostrados la carga de 200 kg (1962 N) no representa ningún riesgo que comprometa la integridad estructural de la misma, ya que como se comprueba con los resultados de las pruebas realizadas, las deformaciones y esfuerzos generados, están dentro del rango lineal elástico del material. No obstante a continuación se hacen algunas observaciones, recomendaciones y comentarios constructivos sobre el diseño y la fabricación de la grúa auxiliar.

4.6 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Durante la realización de las pruebas experimentales a la grúa se observó un daño significativo (falla) en el soporte del marco de carga hacia el pedestal de la grúa. Debido a la inclinación del suelo y tomando en cuenta que en condiciones de uso normal, no se asegura que el marco en donde descansa la mayor parte del peso colocado en el arnés o canasta, dependiendo el caso, permanezca inmóvil. Ya sea por las condiciones del suelo, alguna pendiente por donde se requiera pasar con el paciente o por el propio movimiento del mismo, el marco tenderá a moverse y recargarse en uno de los lados del soporte hacia el pedestal. Es por ello que se recomienda ampliamente reforzar dicho elemento (soporte), ya sea aumentando la cédula (espesor) de la placa utilizada para su fabricación, aumentando su longitud a fin de que exista una mayor área de contacto (y soporte por consiguiente) con el marco, cambiar el material con el que está fabricado actualmente por uno con mayor rigidez o eliminar el juego que hay entre el marco y el propio soporte, ajustando y alineando el perno (pasador) que los une.

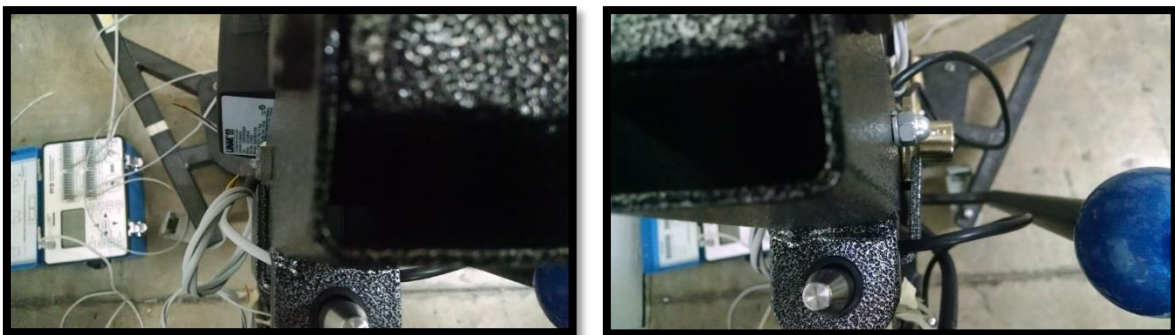


Fig. 4.5 Paredes del soporte del marco, en donde se observa en la imagen de la derecha la considerable deformación (de apertura) debido a que la carga, de 230 kg actuó prácticamente en su totalidad sobre ese lado.



Fig. 4.6 Notable desalineación del marco con respecto a su eje longitudinal, debido a la inclinación del suelo, ante una carga de 230 kg.



Fig. 4.7 Falla del soporte del marco y por consecuencia no fue posible que la grúa mantuviera, por acción propia, el peso que se le cargó (230 kg).

Otra de las piezas que fue severamente castigada, debido al peso utilizado en las pruebas fue el pivote de la horquilla y la junta soporte que lo rodea debido a que como se observa se tuvo una desalineación con respecto al eje vertical lo que provoco que se cargara en uno de los lados de la junta y finalmente repercutiera en una inclinación en la horquilla. Se recomienda como propuesta de solución a este problema, cerrar la tolerancia del agujero con el pivote con la finalidad de darle mayor rigidez al ensamble, eliminar el ensamble y hacerlo un solo elemento o en su defecto cambiar el material (mayor rigidez) del que está fabricado el elemento.



Fig. 4.8 Comportamiento de la pieza pivote de la horquilla ante un peso de 200 kg.

4.7 SUMARIO

En este capítulo se compararon y analizaron los resultados de todos los métodos de análisis aplicados. Se notó que la tendencia de comportamiento de esfuerzos y deformaciones en la estructura (en las gráficas mostradas) fue prácticamente la misma en todos los métodos, aunque con ciertas diferencias en los valores obtenidos mediante experimentación con respecto a los resultados numéricos. Independiente a lo anterior, los máximos valores registrados de esfuerzos y deformación están muy por debajo del esfuerzo y deformación permisible del acero ASTM A36, por lo que se confirma el correcto funcionamiento de la grúa auxiliar cargando un peso de hasta 1962 N.

CONCLUSIONES

- Se cumplieron los objetivos general y particulares planteados en el inicio de este documento debido a que en primer lugar se obtuvo un modelo CAD útil para posteriormente ser simulado en ANSYS Workbench®. Posterior a ello se aplicaron de los 3 tipos de análisis experimental de esfuerzos y deformaciones propuestos para este trabajo: extensometría, fotoelasticidad y Correlación Digital de Imágenes en dos dimensiones (interferometría). Se instrumentaron los puntos críticos en la estructura determinados en la simulación numérica para evaluar el comportamiento estructural de la grúa auxiliar con una carga de hasta 200 kg.
- Durante la aplicación de los métodos de medición de deformación y de revelación de esfuerzos, descritos en este trabajo, se han presentado diversas dificultades, particularmente en el método de fotoelasticidad, sin embargo fue posible obtener resultados referenciales y comparables, perfectibles sin duda, pero útiles. Dichos resultados fueron comparados e interpretados a fin de comprender mejor el comportamiento estructural de la grúa. Se obtuvieron además, graficas trazadas con los resultados obtenidos, que muestran tendencias en cuanto a la manera en que los esfuerzos y deformaciones se presentan en cada punto analizado.
- De acuerdo al trabajo realizado y a los resultados obtenidos, la grúa auxiliar analizada en esta tesis, estructuralmente cumple con lo necesario para desempeñar sin problema su función de soportar estáticamente masas de hasta 200 kg.
- Finalmente se hicieron observaciones y recomendaciones con respecto al diseño actual del prototipo.

PRODUCTIVIDAD

Publicación de un artículo de revista:

- Legorreta Correa, C. E., Beltrán Fernández, J. A., & García Castilla, G. (2015). Análisis mecánico-estructural de una grúa auxiliar para el traslado de pacientes con problemas de movilidad aplicando el método de extensometría y simulación FEM. Revista Científica, Vol. 19, Núm. 1. ESIME IPN, 17-27.

TRABAJOS FUTUROS

- Simular numéricamente el modelo de la grúa auxiliar con el programa ANSYS® Workbench considerando ahora condiciones dinámicas (con la grúa en movimiento y sosteniendo su carga máxima de diseño, es decir, 200 kg) y comparar resultados con los obtenidos en condiciones estáticas.
- Aplicar los métodos experimentales de extensometría y fotoelasticidad a la grúa auxiliar utilizada para este trabajo considerando condiciones dinámicas y comparar resultados con los obtenidos en condiciones estáticas.
- Aplicar la técnica de Correlación Digital de Imágenes en 2D utilizando el programa Aramis® de GOM® a la grúa auxiliar utilizada para este trabajo considerando condiciones dinámicas y comparar resultados con los obtenidos en condiciones estáticas.
- Aplicar la técnica de Correlación Digital de Imágenes en 2D utilizando el programa Aramis® de GOM® a fin de determinar el comportamiento de la estructura en los 3 ejes de referencia.
- Utilizar el método matricial de las rigideces para calcular esfuerzos y deformaciones en cada elemento de la estructura de la grúa auxiliar, tanto en condiciones estáticas como dinámicas. Los resultados en condiciones estáticas podrían compararse con los obtenidos de los métodos numérico y experimentales desarrollados en esta tesis.

REFERENCIAS

- Grúas SunLift - Modelos hidráulicos y eléctricos. (2014). *SunRise Medical*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (16 de Agosto de 2015). Obtenido de www.inegi.org.mx/
- CNDH | Comisión Nacional de los Derechos Humanos - México. (2016). Obtenido de www.cndh.org.mx/
- Instituto de Biomecánica de Valencia . (2016). Obtenido de <http://www.ibv.org/en/>
- Organización Mundial de la Salud: OMS. (Junio de 2016). Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/es/>
- Ortopedia LowCost - Moliner. (2016). Obtenido de <http://www.ortopedialowcost.com/>
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social | Gobierno | gob.mx. (2016). Obtenido de www.gob.mx/stps
- ADAPTADO.es. (20 de Febrero de 2014). *ADAPTADO.es*. Obtenido de <http://www.adaptado.es/silla-whill/>
- AHMSA. (2010). Manual de diseño para la construcción con acero. *AHMSA.com*.
- Álvarez-Casado, E., Hernández, A., & Rayo, V. (2010). El riesgo asociado a la movilización de pacientes. *Gestión Práctica de Riesgos Laborales*, 26-29.
- ARQUYS . (2012). Armaduras. *ARQUYS.com*.
- Arratia Méndez, M. (2013). *Diseño sustentable de un prototipo de dispositivo para traslado de pacientes*. Ciudad de México, México: Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- ASTM. (2004). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*.
- Báez Martínez, L. (2014). *DISGOO*. Obtenido de http://www.minusval2000.com/otros/reportajes/historia_silla_de_ruedas/index.html
- Bing, P., Kema, Q., Huimin, X., & Anand, A. (2009). Two dimensional digital image correlation for in plane displacement and strain measurement. A review. *Measurement Science and Technology Vol. 20*.
- Briñez de León, J. C., Restrepo Martínez, A., & López Giraldo, F. (2013). Estudios de fotoelasticidad: Desarrollos y aplicaciones. *Revista Politécnica No. 16*.
- Brophy, J. J. (1979). *Electrónica fundamental para científicos. Segunda Edición*. Barcelona, España: Reverté S.A.
- Budynas, R. G. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: McGraw Hill.

- Callister, W. D. (2007). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona, España: Reverté.
- Camargo Aguilar, D., Cruz Flores, R., González Villa, J. C., & Maqueda Rodríguez, L. (2005). *Sistema de grúas para personas discapacitadas para el Centro de Rehabilitación Infantil Teletón; derivado del proyecto de investigación CGPI No. 20031103*. CDMX: Tesis de Licenciatura IPN ESIME Azcapotzalco.
- Chen, X. (2015). *Finite modeling and simulation with ANSYS Workbench*. USA: CRC Press.
- Cruz Castro, J., Hernández Gómez, L. H., & Urriolagoitia Sosa, G. (2017). *Análisis de fatiga mecánica para la grúa del edificio del reactor de una central nuclear tipo BWR*. Ciudad de México, México: Tesis de Maestría. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Adolfo López Mateos.
- Durand Alcántara, S. (2016). *CONADE.gob*. Obtenido de Federación Mexicana de Deportes sobre Silla de Ruedas : <http://historico.conade.gob.mx/eventos/femedessir/antecedentes.html>
- Élie, L. (2004). *Diccionario Akal de Física*. Madrid, España: Akal, S.A.
- Espinal Gutiérrez, Y., Beltrán Fernández, J. A., & Hernández Gómez, L. H. (2011). *Evaluación biomecánica de la integridad estructural en dientes molares*. Ciudad de México, México: Tesis de Maestría en Ciencias. SEPI ESIME Zacatenco IPN.
- Gómez, F. J. (2014). *Ortopedia Plus*. Obtenido de <https://www.ortopediaplus.com/blog/elegir-grua-de-traslado-tipos-y-utilidades.html>
- Hannah, R. L., & Reed, S. E. (1994). *Strain Gage User's Handbook*. Cambridge, G.B.: Elsevier Science Publishers.
- Hibbeler, R. C. (2006). *Mecánica de Materiales. Sexta Edición*. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Prentice Hall.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., y otros. (2005). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers In Engineering Vol. 44*.
- López Alba, E., Díaz, F. A., Dorado, R., & López García, R. (2010). Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Asociación Española de Ingeniería Mecánica*.
- López, D. R., López, A., & Pava, N. D. (2015). *Tutorial para la medición de desplazamientos y deformaciones en 2D mediante correlación de imágenes usando cámara profesional y el software Aramis v.6.3.1*. México, DF.

- Marco Esteban , E., & García Prada, J. C. (2010). *Metodología para el análisis a fatiga mediante el código Pro Engineer: Aplicación a un eje ferroviario*. Madrid, España: Tesis de Licenciatura. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Mecánica.
- Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the Relative Motion of the Earth and of the Luminiferous Ether. *Sidereal Messenger*, vol. 6, pp.306-310.
- Moaveni, S. (2007). *Finite Element Analysis: theory and application with ANSYS. 3rd. Edition*. Upper Saddle River, N.J., E.U.A.: Pearson. Prentice Hall.
- Ortíz Berrocal, L. (2007). *Resistencia de Materiales*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Peter, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering Vol. 21*.
- Pontificia Universidad Javeriana. (2013). *Proyecto anDAR Inclusión Social*. Obtenido de http://portales.puj.edu.co/proyecto_andar
- Rao, C. R., & Guha, S. K. (2001). *Principles of Medical Electronics and Biomedical Instrumentation*. Hyderabad, India: Universities Press.
- Romero García, M., Museros Romero, P., Martínez Rodrigo, M., & Poy Gil, A. (2002). *Resistencia de Materiales*. Castelló, España: Universitat Jaume.
- Rossi, B. (2003). *Fundamentos de Óptica*. Barcelona, España: Reverté, S.A.
- Schwider, J. (1990). Advanced Evaluation Techniques in Interferometry in Progress in Optics. *Elsevier Sci. Pub Co*.
- Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image Vision Comput*.
- Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. (2007). Revista técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Volume 30, Issue 1. *La Facultad*.
- Verdugo Alonso, M. Á. (2003). *Aportaciones de la definición de retraso mental a la corriente inclusiva de las personas con discapacidad*. San Sebastián, España: Siglo Cero.
- Vishay MicroMeasurements. (2007). Sheets, Application Note ib- 221-d. *Instructions for casting and contouring photostress*.
- Wenner, F., & Wellington Smith, A. (1924). *Measurement of low resistance by means of the Wheatstone bridge*. Washington D.C., E.U.A.: U.S. Govt. Print. Off.