



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE ENERGÍA DE
DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR CARGA DE IMPACTO CON
RESPECTO A CARGA ESTÁTICA EN LA FALLA DE VIGAS DE ACERO
ASTM A36”**

AUTOR: PAREDES PÉREZ, JUAN ANTONIO

DIRECTOR: ING. PÉREZ ROSALES, JOSÉ EMILIO MSC.

SANGOLQUÍ

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y
MECANICA**
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR CARGA DE IMPACTO CON RESPECTO A CARGA ESTÁTICA EN LA FALLA DE VIGAS DE ACERO ASTM A36.”** Realizado por el señor **JUAN ANTONIO PAREDES PÉREZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **JUAN ANTONIO PAREDES PÉREZ** para que los sustenten públicamente.

Sangolquí, 06 de Febrero del 2018

Ing. José Pérez MSC

DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y
MECANICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo **JUAN ANTONIO PAREDES PÉREZ**, con la cédula de identidad N° 1804277687 declaro que este trabajo de titulación “**ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR CARGA DE IMPACTO CON RESPECTO A CARGA ESTÁTICA EN LA FALLA DE VIGAS DE ACERO ASTM A36.**” Ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en la citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 06 de Febrero del 2017

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Juan Paredes Pérez' con un trazo decorativo horizontal que cruza la línea de la firma.

JUAN ANTONIO PAREDES PÉREZ

C.C. 1804277687



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y
MECANICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo **JUAN ANTONIO PAREDES PÉREZ**, autorizo a la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA POR CARGA DE IMPACTO CON RESPECTO A CARGA ESTÁTICA EN LA FALLA DE VIGAS DE ACERO ASTM A36.”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 06 de Febrero del 2017

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Juan Antonio Paredes Pérez', is written over a horizontal line.

JUAN ANTONIO PAREDES PÉREZ

C.C. 1804277687

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo realizado en el presente proyecto está dedicado a mi familia, especialmente a mis padres Juan Antonio y María Elena, por su apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida, por sus consejos, ejemplo y comprensión con la que me incentivaron a realizar mis metas, viéndolas ahora convertirse en una realidad.

Juan Antonio Paredes Pérez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi padre, que con su cariño y firmeza ha sido un pilar fundamental en la toma de decisiones y ha sabido guiarme en cada momento de mi vida, por todo su apoyo es que he llegado hasta donde estoy.

A mi madre, que es mi confidente y siempre me ha brindado sus consejos, dándome palabras de aliento en los momentos más difíciles, sin dejar que me dé por vencido. Es una mujer ejemplar y es por ella que seguiré adelante cumpliendo cada meta propuesta.

A mis hermanas que desde pequeño siempre tuvieron tiempo para compartir conmigo, con alegría y afecto han sabido aconsejarme para verme lograr mis objetivos.

A mis abuelos, en especial a Mami Loli, quien a pesar de no estar físicamente en estos momentos, sé que me apoyó desde el primer momento y durante todo el transcurso de la carrera, con su felicidad y constancia inculcada me dio fuerzas para afrontar cualquier situación.

Al ingeniero José Pérez por brindar los principales planteamientos del proyecto, su gran colaboración y conocimientos puestos en práctica para fomentar un espíritu investigativo y de excelencia. A los docentes que forman parte de la Carrera de Ingeniería Mecánica que con sus enseñanzas se pudo lograr la culminación de este objetivo. Y por último pero no menos importante a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE que me acogió estos años de formación académica y supo formarme tanto en la vida estudiantil como para la profesional.

Juan Antonio Paredes Pérez

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvi
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Definición del problema.....	3
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. General.....	3
1.4.2. Específicos.....	4
1.5. Justificación e importancia.....	4
1.6. Alcance del proyecto.....	5
1.6.1. Equipamiento.....	5
1.6.2. Componentes mecánicos.....	5
1.7. Estructura del documento.....	6
CAPÍTULO II.....	7
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1. Principio de conservación de la energía.....	7
2.1.1. Energía cinética.....	7

2.1.2. Energía potencial.....	8
2.1.3. Ley de conservación de la energía mecánica.....	8
2.2. Estática.....	10
2.2.1. Vigas – efectos externos.....	10
2.2.2. Tipos de vigas.....	10
2.2.3. Vigas – efectos internos.....	11
2.2.3.1. Cortadura y flexión.....	12
2.2.3.2. Relaciones entre carga, fuerza cortante y momento flector.....	12
2.3. Dinámica.....	13
2.3.1. Generalidades de la fuerza de impacto.....	13
2.3.2. Teoría de impulsiones.....	14
2.3.2.1. Impulsión sobre una partícula.....	14
2.3.2.2. Coeficiente de restitución.....	15
2.4. Mecánica de materiales.....	15
2.4.1. Propiedades Mecánicas.....	15
2.4.1.1. Ductilidad.....	17
2.4.1.2. Tenacidad.....	17
2.4.1.3. Fluencia.....	18
2.4.1.4. Resistencia a la ruptura.....	18
2.4.1.5. Rigidez.....	19
2.4.1.6. Elasticidad.....	19
2.4.1.7. Plasticidad.....	20
2.4.1.8. Capacidad Energética.....	20
2.4.1.9. Tipos de ensayos de materiales.....	20
2.5. Estudios energéticos sobre la deformación de vigas de acero.....	21
2.5.1. Deformaciones unitarias longitudinales en vigas.....	21
2.5.2. Materiales elásticos lineales.....	23
2.5.2.1. Esfuerzos normales en vigas.....	23
2.5.2.2. Localización del eje neutro.....	24
2.5.2.3. Relación momento-curvatura.....	25

2.5.3.	Energía de deformación	25
2.5.3.1.	Comportamiento elástico lineal.....	26
2.5.3.2.	Energía de deformación por flexión para cargas estáticas	27
2.5.3.3.	Energía de deformación por flexión producida por impacto.....	30
2.6.	Ensayos destructivos sobre vigas normalizados	32
2.6.1.	Ensayo de flexión	32
2.6.1.1.	Probetas para ensayos de flexión	33
2.6.1.2.	Equipos para los ensayo de flexión	33
2.6.1.3.	Puesta en marcha de los ensayos de flexión	34
2.6.2.	Ensayos de impacto	35
2.6.3.	Propiedades de impacto.....	35
2.6.3.1.	Sensibilidad de la muesca	35
2.6.3.2.	Relación con el diagrama esfuerzo - deformación.....	36
2.6.3.3.	Designación de eje de la probeta	36
2.6.4.	Ensayo de impacto tipo Charpy	37
2.6.4.1.	Alcance y aplicabilidad de los ensayos de impacto	38
2.6.4.2.	Clasificación según su velocidad	38
2.6.5.	Norma E23-07a.....	39
2.6.5.1.	Diseño de las probetas para ensayos.....	39
2.6.5.2.	Preparación de probetas	39
CAPÍTULO III.....		41
3.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ACCESORIOS	41
3.1.	Diseño Mecánico	41
3.1.1.	Consideraciones de diseño.....	41
3.1.2.	Parámetros de diseño	41
3.1.3.	Dimensionamiento, diseño de piezas y selección de materiales	42
3.1.3.1.	Cálculo de fuerzas y reacciones en la probeta de ensayos.....	42
3.1.3.2.	Diseño del percutor de ataque.....	46
3.1.3.2.1.	Análisis de esfuerzos a lo largo de los puntos AA' Y BB'	48
3.1.3.3.	Diseño accesorio de sujeción punzón-acoplado.....	53

3.1.3.4.	Diseño del eje sostenedor del punzón cilíndrico.....	58
3.1.3.5.	Diseño de tubo conductor para pruebas de caída libre	63
3.1.3.6.	Diseño amortiguadores de impacto para celda de carga.....	64
3.2.	Fabricación de Probetas y Cilindros de prueba.....	69
3.2.1.	Probetas	69
3.2.2.	Cilindros de Prueba	71
CAPÍTULO IV		73
4.	PROTOCOLO DE PRUEBAS	73
4.1.	Plan de pruebas	73
4.1.1.	Equipos a utilizarse.....	73
4.1.1.1.	Ensayos universales: MTS TK/T5002 y AMSLER RM-09	73
4.1.1.2.	Quantrol “Advanced Force & Torque Indicador-AFTI”	75
4.1.1.5.	“Amsler Pendulum Impact Testing Machine”	79
4.2.	Puesta en marcha, recolección de datos y condiciones a considerar	80
4.2.1.	Ensayos de caída libre.....	81
4.2.2.	Ensayos de impacto.....	86
4.2.3.	Ensayos estáticos.....	88
4.2.4.	Análisis y comparación de resultados energía de deformación	91
CAPÍTULO V		92
5.	ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
5.1.	Ensayo de impacto.....	92
5.1.1.	Sobre rampa inclinada.....	92
5.1.2.	Caída libre a través de tubo de pruebas	98
5.1.3.	Fuerza de impacto teoría de caída de un cuerpo-persona	109
5.1.4.	Ensayos Charpy.....	112
5.1.4.1.	“Amsler Pendulum Impact Testing Machine”	112
5.1.4.2.	Péndulo Charpy – Resistencia al impacto instrumentado.....	116
5.2.	Ensayos con cargas estáticas	119
5.2.1.	Probetas de acero ASTM A36	120
5.2.1.1.	Probeta #1	120

5.2.1.2. Probeta #2	126
5.2.1.3. Probeta #3	128
5.2.1.4. Probeta #4	131
5.2.1.5. Probeta #5	132
5.2.1.6. Probeta #6	135
5.2.1.7. Probeta #7	138
5.2.1.8. Probeta #8	140
5.2.1.9. Probeta #9	143
5.2.2. Probetas de acero SAE 1040.....	145
5.2.2.1. Probeta #10	146
5.2.2.2. Probeta #11	151
5.2.2.3. Probeta #12	154
5.2.2.4. Probeta #13	156
5.2.2.5. Probeta #14	159
5.3. Resultados	162
5.3.1. Análisis y comparación	162
CAPÍTULO VI	165
6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO	165
6.1. Costos directos.....	165
6.1.1. Materiales	165
6.1.2. Remuneraciones.....	166
6.1.3. Costos mano de obra.....	166
6.2. Costos indirectos.....	167
6.3. Costo total	167
CAPÍTULO VII	168
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	168
7.1. Conclusiones.....	168
7.2. Recomendaciones.....	169
BIBLIOGRAFÍA.....	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vigas isostáticas e hiperestáticas.....	11
Figura 2 Viga sometida a carga distribuida.....	11
Figura 3 Viga cargada con un tramo elemental dx con posición x y $x+dx$	12
Figura 4 Comportamiento dinámico partícula durante impulsión.	14
Figura 5 Propiedades mecánicas de los materiales	16
Figura 6 Diagrama esfuerzo-deformación.....	17
Figura 7 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria, materiales sin punto de fluencia... ..	18
Figura 8 Diagrama esfuerzo-deformación del acero.....	19
Figura 9 Ensayos de materiales que se aplicarán en el proyecto.....	20
Figura 10 Deformaciones de una viga en flexión pura: elevación de la viga.	21
Figura 11 Viga deformada.	21
Figura 12 Distribución de esfuerzos.	23
Figura 13 Sección transversal de la viga.	24
Figura 14 Diagrama carga-desplazamiento.....	26
Figura 15 Viga en flexión pura por pares de momento.....	27
Figura 16 Momento vs. Ángulo subtendido.....	29
Figura 17 Sensibilidad de un entalle en V en ensayo Charpy.....	36
Figura 18 Designación del eje de la probeta.....	37
Figura 19 Posición de la probeta en ensayo Charpy.	38
Figura 20 Forma y posición de la probeta para ensayo Charpy.	38
Figura 21 Geometrías de las probetas, ensayos Charpy.....	39
Figura 22 Geometría de una probeta tipo Charpy.	40
Figura 23 Probeta tipo "V" acero ASTM A 36 para ensayos.....	42
Figura 24 Reacciones en la probeta	45
Figura 25 Dimensionamiento del percutor.	47
Figura 26 Diseño del percutor.....	47
Figura 27 Análisis de esfuerzos en el percutor.....	48
Figura 28 Relación de esfuerzo cortante en vigas y la distancia a la línea neutra.....	49

Figura 29 Análisis estático de VonMises - Percutor.....	51
Figura 30 Análisis de desplazamientos –Percutor.....	51
Figura 31 Análisis de deformación unitaria - Percutor.....	52
Figura 32 Análisis de factor de seguridad - Percutor.....	52
Figura 33 Dimensionamiento accesorio de sujeción.....	54
Figura 34 Análisis estático de VonMises - Acople.....	56
Figura 35 Análisis de desplazamientos - Acople.....	57
Figura 36 Análisis de deformación unitaria - Acople.....	57
Figura 37 Dimensionamiento de eje sostenedor.....	58
Figura 38 Diagrama de cuerpo libre eje sostenedor.....	59
Figura 39 Diagrama de fuerza cortante de eje.....	60
Figura 40 Diagrama de Momento Flector de eje.....	60
Figura 41 Análisis de VonMises eje.....	61
Figura 42 Análisis de desplazamientos en el eje.....	62
Figura 43 Análisis de deformación unitaria del eje.....	62
Figura 44 Análisis del factor de seguridad eje.....	63
Figura 45 Dimensionamiento de tubo conductor.....	64
Figura 46 Dimensionamiento de amortiguadores.....	65
Figura 47 Masa de prueba grande y amortiguador de nylon.....	66
Figura 48 Análisis de VonMises impacto amortiguador y cilindro de prueba.....	67
Figura 49 Análisis de VonMises Amortiguador de Nylon.....	68
Figura 50 Análisis de desplazamiento de amortiguador de nylon.....	68
Figura 51 Análisis de deformación unitaria de amortiguador de nylon.....	69
Figura 52 Dimensiones cilindro de prueba pequeño.....	71
Figura 53 Dimensiones cilindro mediano.....	72
Figura 54 Dimensiones cilindro grande.....	72
Figura 55 Máquina: MTS TK/T5002.....	74
Figura 56 Máquina: AMSLER RM-09.....	75
Figura 57 Equipo: Quantrol “Advanced Force & Torque Indicador-AFTI”.....	76
Figura 58 Equipo de fuerza de impacto, con sistema de elevación, frenado y HMI.....	77

Figura 59 Posicionamiento de la altura de la rampa.....	77
Figura 60 Equipo de ensayo tipo Charpy.....	78
Figura 61 Máquina: Amsler Pendulum Impact Testing Machine.....	80
Figura 62 Caracterización de curvas: a) F/Peso vs. Energía; b) Fuerza vs. Energía – Protocolo de pruebas.....	83
Figura 63 Fuerza vs. Desplazamiento en Flexión – Protocolo de Pruebas	89
Figura 64 ln (Fuerza) vs. ln (Desplazamiento) en escala – Protocolo de Pruebas	90
Figura 65 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de móvil de prueba.	93
Figura 66 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de móvil de prueba.	93
Figura 67 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de esfera.	95
Figura 68 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de esfera.	95
Figura 69 Aceitado y enceramiento balanza.....	98
Figura 70 Verificación de medidas de masa cilíndricas de prueba.....	99
Figura 71 Ubicación cilindros, pasador-tubo, amortiguadores e instrumentación.....	100
Figura 72 Caracterización curva (F/Peso) vs. E-cilindro pequeño.....	101
Figura 73 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de cilindro pequeño.....	102
Figura 74 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de cilindro mediano.	103
Figura 75 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de cilindro mediano.....	104
Figura 76 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de cilindro grande.....	105
Figura 77 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de cilindro mediano.....	106
Figura 78 Geometría de las probetas de Acero ASTM A36 y SAE 1040.....	112
Figura 79 Colocación de la probeta.....	114
Figura 80 Altura de caída del martillo-Ensayo Charpy.....	114
Figura 81 Probetas ASTM A 36 luego del ensayo Charpy.....	115
Figura 82 Probetas SAE 1040 luego del ensayo Charpy.....	116
Figura 83 Ensayo Charpy instrumentado-Probeta acero SAE 1040(5x5).....	116
Figura 84 Probetas después del ensayo Charpy fallido.....	117
Figura 85 Alambre de cobre luego del ensayo Charpy.....	118
Figura 86 Cable de acero inoxidable después del ensayo Charpy.....	119
Figura 87 Ubicación probeta ASTM A36, percutor y soportes-MTS TK/T5002.....	120

Figura 88 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 1, ASTM A36	122
Figura 89 Probeta de Acero ASTM A36 después del ensayo estático.	122
Figura 90 ln(Fuerza) vs. ln (Desplazamiento) ASTM A36-Ensayo Flexión.	124
Figura 91 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 1.1.	125
Figura 92 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 2.2.	125
Figura 93 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 2, ASTM A36	127
Figura 94 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 3, ASTM A36	129
Figura 95 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 3.1.	130
Figura 96 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 3.2.	130
Figura 97 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 4, ASTM A36	132
Figura 98 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 5, ASTM A36	134
Figura 99 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 5.1.	134
Figura 100 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 5.2.	135
Figura 101 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 6, ASTM A36	136
Figura 102 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 6.1.	137
Figura 103 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 6.2.	137
Figura 104 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 7, ASTM A36	139
Figura 105 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 7.1.	139
Figura 106 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 7.2.	140
Figura 107 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 8, ASTM A36	141
Figura 108 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 8.1.	142
Figura 109 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 8.2.	142
Figura 110 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 9, ASTM A36	144
Figura 111 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 9.1.	144
Figura 112 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 9.2.	145
Figura 113 Ubicación probeta SAE 1040, percutor y soportes-MTS TK/T5002.....	146
Figura 114 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 10, SAE 1040.....	147
Figura 115 Probeta de Acero SAE 1040 después del ensayo de carga estática.....	148
Figura 116 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 10.1.	148
Figura 117 ln(Fuerza) vs. ln(Desplazamiento) Ensayo Flexión- SAE 1040.	149

Figura 118	Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 10.2.	150
Figura 119	Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 11, SAE 1040.....	152
Figura 120	Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 11.1.	152
Figura 121	Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 11.2.	153
Figura 122	Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 12, SAE 1040 (5x5)	155
Figura 123	Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 12.1.	155
Figura 124	Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 12.2.	156
Figura 125	Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 13, SAE 1040 (5x5)	157
Figura 126	Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 13.1.	158
Figura 127	Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 13.2.	159
Figura 128	Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 14, SAE 1040 (5x5)	161
Figura 129	Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 14.1.	161
Figura 130	Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 14.2.	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Factores de corrección de energía de deformación por cortante</i>	30
Tabla 2	<i>Dimensiones de probetas para los ensayos</i>	42
Tabla 3	<i>Propiedades Mecánicas Percutor</i>	53
Tabla 4	<i>Propiedades Mecánicas de accesorio de sujeción</i>	58
Tabla 5	<i>Propiedades Mecánicas de amortiguador de nylon</i>	69
Tabla 6	<i>Número y tipo de probetas a construirse</i>	70
Tabla 7	<i>Datos a anotarse durante el ensayo de caída por el plano inclinado - protocolo de pruebas</i>	81
Tabla 8	<i>Masa y dimensiones geométricas de los cilindros de prueba - Protocolo de pruebas.</i>	82
Tabla 9	<i>Datos a anotarse durante el ensayo de caída libre por tubo conductor - protocolo de pruebas</i>	82
Tabla 10	<i>Datos a calcularse después de las pruebas de caída por plano inclinado o por tubo conductor-Protocolo de pruebas.</i>	83
Tabla 11	<i>Recopilación de ecuaciones características, ensayos de caída - Protocolo de pruebas.</i>	84
Tabla 12	<i>Cálculo de la relación C1 para ensayos caída -Protocolo de pruebas</i>	85
Tabla 13	<i>Error porcentual entre constantes-Protocolo de pruebas</i>	85
Tabla 14	<i>Dimensiones geométricas de las probetas, ensayos de impacto - Protocolo de pruebas.</i>	86
Tabla 15	<i>Resultados energía de deformación absorbida por impacto - Protocolo de pruebas.</i>	87
Tabla 16	<i>Ejemplo formato para los datos de los ensayos estáticos - Protocolo de pruebas</i>	88
Tabla 17	<i>Resultados energía de deformación absorbida en ensayos de impacto y estáticos - Protocolo de pruebas</i>	91
Tabla 18	<i>Datos del Ensayo de Caída libre 1-Móvil de prueba.</i>	92
Tabla 19	<i>Datos del Ensayo de caída libre 2-Esfera</i>	94

Tabla 20	<i>Constante de comparación Energía-Peso sobre fuerza entre carrito móvil y esfera.</i>	96
Tabla 21	<i>Propiedades físicas y geométricas del cilindro de pruebas pequeño</i>	99
Tabla 22	<i>Datos del ensayo de caída libre 3-Cilindro pequeño</i>	101
Tabla 23	<i>Propiedades físicas y geométricas del cilindro de pruebas mediano</i>	102
Tabla 24	<i>Datos del ensayo de caída libre 3-Cilindro mediano</i>	103
Tabla 25	<i>Propiedades físicas y geométricas del cilindro de pruebas grande</i>	104
Tabla 26	<i>Datos del ensayo de caída libre 3-Cilindro grande</i>	105
Tabla 27	<i>Constante de comparación Energía - Peso sobre fuerza entre cilindros pequeño y grande</i>	106
Tabla 28	<i>Constante de comparación Energía - Peso sobre fuerza entre cilindros mediano y pequeño</i>	107
Tabla 29	<i>Constante de comparación Energía - Peso sobre fuerza entre cilindros grande y mediano</i>	107
Tabla 30	<i>Fuerza de impacto hombre de 68 [Kg] a diferentes alturas</i>	111
Tabla 31	<i>Geometrías de las probetas para ensayos de impacto</i>	113
Tabla 32	<i>Datos del ensayo Charpy 1-Probetas acero ASTM A36 (8x8) y SAE 1040 (5x5)</i>	115
Tabla 33	<i>Dimensiones de probetas ASTM A36 para ensayos estáticos</i>	120
Tabla 34	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 1-acero ASTM A36 (8x8)</i>	121
Tabla 35	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 2-acero ASTM A36 (8x8)</i>	126
Tabla 36	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 3-acero ASTM A36 (8x8)</i>	128
Tabla 37	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 4-acero ASTM A36 (8x8)</i>	131
Tabla 38	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 5-acero ASTM A36 (8x8)</i>	133
Tabla 39	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 6-acero ASTM A36 (8x8)</i>	135
Tabla 40	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 7-acero ASTM A36 (8x8)</i>	138
Tabla 41	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 8-acero ASTM A36 (8x8)</i>	140
Tabla 42	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 9-acero ASTM A36 (8x8)</i>	143
Tabla 43	<i>Dimensiones de probetas SAE 1040 para ensayos estáticos</i>	146
Tabla 44	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 10-Probeta acero SAE (5x5)</i>	146

Tabla 45	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 11-Probeta acero SAE (5x5)</i>	151
Tabla 46	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 12-Probeta acero SAE (5x5)</i>	154
Tabla 47	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 13-Probeta acero SAE (5x5)</i>	157
Tabla 48	<i>Datos del ensayo estático de Flexión 14-Probeta acero SAE (5x5)</i>	160
Tabla 49	<i>Resultados de la energía de deformación para los ensayos dinámicos y estáticos</i>	163
Tabla 50	<i>Relación de la energía de deformación para cargas de impacto con cargas estáticas</i>	164
Tabla 51	<i>Costos de Materiales</i>	165
Tabla 52	<i>Remuneración a profesionales</i>	166
Tabla 53	<i>Remuneración a estudiante</i>	166
Tabla 54	<i>Costos mano de obra</i>	166
Tabla 55	<i>Total costos directos</i>	167
Tabla 56	<i>Costos indirectos</i>	167
Tabla 57	<i>Costo total</i>	167

RESUMEN

El presente proyecto muestra el proceso de recopilación de información de estudios relacionados a la fuerza de impacto en caída libre de una masa conocida a determinada altura y energía de deformación para casos estáticos y dinámicos, ensayos energéticos, ensayos destructivos normalizados y análisis de resultados teóricos esperados dentro de un estado del arte, así como también el diseño y construcción de accesorios necesarios para garantizar ensayos seguros y repetitivos, a fin de plantear un protocolo de pruebas para futuras prácticas de laboratorio en las máquinas: Ensayos universales MTS TK/T5002, AMSLER RM-09 (ensayos estáticos) y Equipo medidor de fuerza de impacto, con sistema de elevación, frenado y HMI (ensayos dinámicos). En cada capítulo se va detallando paso a paso el proceso, basándose en una metodología de orientación teórico práctico de “Aplicación Tecnológica”. El resultado del trabajo de titulación cuenta con una fuerte sustentación teórica, caracterización de curvas y determinación de la relación entre energía de deformación plástica por carga de impacto con respecto a carga estática en la falla de vigas de acero ASTM A36 y SAE 1040, para validar los resultados de las pruebas se determina el número de probetas mediante un análisis estadístico. El autor del proyecto realizó el estudio en su totalidad, con la finalidad de facilitar nuevos ensayos, repetitividad de las mismos y futuras investigaciones, por lo tanto se adjunta planos, protocolos de pruebas, dimensiones geométricas normadas de vigas tipo probetas y programas afines al proyecto.

PALABRAS CLAVE:

- **ENERGÍA DE DEFORMACIÓN**
- **FUERZA DE IMPACTO**
- **ESTÁTICA**
- **DINÁMICA**
- **MECÁNICA**

ABSTRACT

The present project shows the compilation process of information from studies related to force of impact in free fall of a known mass at a certain height and deformation energy for static and dynamic cases, energy test, standardized destructive test and analysis of expected theoretical results within a state of the art, as well as the design and construction of necessary accessories to guarantee safe and repetitive, in order to propose a test protocol for future laboratory practices in machines: Universal tests MTS TK / T5002, AMSLER RM-09 (static tests) and Impact strength measuring equipment, with lifting, braking and HMI systems (dynamic tests). In each chapter the step-by-step process is detail, based on a methodology of practical theoretical orientation of "Technological Application". The results of the titration work has a strong theoretical support, characterization of curves and determination of the relation between energy of plastic deformation by impact load over static load at failure of steel beams ASTM A36 and SAE 1040, to validate the results of the tests, the number of test pieces is determined by statistical analysis. The author of the project carried out the study in its entirety, so that to facilitate new test, repeatability and future researches, it is attached plans, test protocols, geometric dimensions of specimen type beams and programs related to the project.

KEY WORDS:

- **DEFORMATION ENERGY**
- **IMPACT FORCE**
- **STATIC**
- **DYNAMIC**
- **MECHANICS**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

El presente trabajo de titulación tiene la finalidad principal realizar un estudio de la relación entre la energía de deformación plástica por carga de impacto con respecto a carga estática en la falla de vigas tipo probeta de acero ASTM A36 y también determinar la fuerza de impacto de un cuerpo conociendo únicamente su masa y altura, mediante patrones de comparación. Para ello en todo momento se basará en la hipótesis que energía necesaria para causar una deformación plástica por carga de impacto, es igual o por lo menos guarda una relación con la energía de deformación por cargas estáticas en la falla de vigas de acero. Por lo que se ha visto necesario primero realizar un estado del arte y análisis teórico para ambos casos, enfocados únicamente en las variables físicas de fuerza, energía y trabajo.

Para la posterior implementación de un protocolo de pruebas, primero se deberá diseñar y construir accesorios de sujeción y control, tanto para las vigas tipo probeta y percutores de ataque en los ensayos de impacto y estáticos, como para las masas de prueba en los ensayos de caída libre, y así poder montarlos sobre las máquinas a usarse. También se especificará las condiciones bajo las cuales se realizarán las pruebas, las características geométricas y mecánicas de las vigas tipo probeta y de las masas cilíndricas de control, y los procedimientos a seguirse para asegurar que el ensayo sea válido.

Se pretende realizar las distintas pruebas con el mínimo tamaño de muestras requerido estadísticamente bajo el protocolo de prueba, implementar una plantilla que contenga todo el desarrollo y soluciones del modelamiento, la caracterización de curvas y enunciar las conclusiones de la hipótesis inicial.

1.2. Antecedentes

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se caracteriza por incentivar la investigación científica, el área de Mecánica de Materiales para las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica es un pilar fundamental dentro de los conocimientos del perfil de egresado que ofrecen, por lo que se vuelve indispensable estudiar el comportamiento de los materiales sometidos a distintos tipos de esfuerzos tanto teóricamente en las aulas como con modelos prácticos simplificados en los laboratorios, ubicados en el campus universitario de Sangolquí.

En el laboratorio encontramos máquinas: mecánicas, manuales y de accionamiento eléctrico que realizan análisis del comportamiento mecánico de los materiales, así como también presta servicio de vinculación con la sociedad donde se realizan ensayos para varias empresas y da soporte a actividades de investigación.

Los nuevos estudios realizados en cuanto a materiales y sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y tecnológicas han dado una nueva necesidad de realizar investigación en campos como el análisis energético en la falla de vigas. Los conocimientos en energía de deformación son parte de estos estudios, tanto dinámica como estáticamente, son muy importantes para el diseño y construcción de piezas mecánicas en las cuales se necesite un comportamiento fiable y alto rendimiento bajo condiciones específicas.

La necesidad de ampliar dichos conocimientos acerca de energía de deformación para diferentes tipos de ensayos sobre vigas de acero y la relación que pueden guardar entre sus variables, y al contar con máquinas modernas y adecuadas para la toma de datos precisos en el Laboratorio de Mecánica de Materiales, motiva este presente trabajo.

1.3. Definición del problema

El desconocimiento generalizado por parte de profesores y estudiantes acerca de la fuerza de impacto y del estudio en relación con energía de deformación en flexión con fuerzas de impacto y estáticas necesarias para producir la falla plástica sobre vigas de acero ASTM A36 y SAE 1040, las relaciones matemáticas, físicas y mecánicas que estas comparten bajo la premisa de tener características geométricas similares para la probetas, los mismos percutores de ataque y tipos de apoyos tanto para el desarrollo teórico como para los dos tipos de ensayos a analizarse. Considerando en todo momento que los dos objetos involucrados en dichos eventos absorben energía de deformación, y su conocimiento es indispensable para realizar un diseño adecuado y seguro de componentes mecánicos de los cuales podría depender cuantiosos daños materiales y la vida de personas, como cascos de seguridad y su máxima resistencia al presentarse la caída de objetos contundentes sobre los mismos o situaciones en donde se involucren accidentes de vehículos en movimiento.

Se desea poner en marcha el proyecto para beneficio de los estudiantes del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" quienes se involucren en el desarrollo de investigaciones científicas más profundas en el área de Mecánica de Materiales, teniendo como resultado una mejor comprensión de los temas relacionados a su carrera y un aumento en su conocimiento, esta razón motiva a que el presente proyecto sea necesario.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Determinar la relación entre energía de deformación plástica por carga de impacto con respecto a carga estática en la falla de vigas de acero ASTM A36.

1.4.2. Específicos

- Plantear un estado del arte de la energía de deformación estática y de impacto que absorben las vigas para producir falla, en donde se especifiquen las ecuaciones y estudios relacionados.
- Especificar la operación, medición y toma de datos de la maquinaria a utilizarse, para así proceder a realizar un protocolo de pruebas.
- Diseñar y construir accesorios tanto para la sujeción de las vigas tipo probeta sobre los apoyos como para controlar la trayectoria en las pruebas de fuerza de impacto.
- Analizar la relación entre fuerza de impacto y energía, tanto teórica como experimentalmente.
- Realizar un análisis de resultados y caracterización de curvas, para determinar si cumple o se refuta la hipótesis “La energía de deformación en impacto es igual a la energía de deformación con carga estática”.

1.5. Justificación e importancia

Los equipos denominados “Medidor de fuerza de impacto, con sistema de elevación, frenado y HMI” y “Péndulo Charpy para analizar la resistencia al impacto en polímeros de acuerdo a la norma ASTM D6110–02” fueron concebidos como trabajos de grado, estos nos facilitan la toma rápida y precisa de datos para ensayos de impacto (Charpy) por lo que es necesario para el laboratorio de Mecánica de materiales dar continuidad a la línea de investigación con un análisis de tipo energético sobre vigas de acero. Realizar una comparación de resultados con otro tipo de pruebas, como cargas estáticas, con las máquinas de “Ensayos Universales” MTS TK/T5002 y AMSLER RM-09, y fuerza de impacto con Quantrol “Advanced Forcé& Torque Indicador-AFTI” con su celda de carga, equipos que actualmente se encuentra en perfecto funcionamiento y certificados para obtener datos confiables, y poder proceder con su posterior análisis.

Todo el estudio se enfocará a brindar una mejor comprensión de la relación que guardan los fenómenos físicos de fuerzas de impacto, energía de deformación y trabajo aplicado para los tres tipos de ensayos a analizarse, con los que profesores puedan

sustentar sus cátedras con resultados prácticos y caracterización de curvas teóricas, facilitando el proceso pedagógico de enseñanza para así lograr difundir en los estudiantes un concepto claro, sentando bien las bases para que continúen sus estudios con los lineamientos de la carrera.

1.6. Alcance del proyecto

En la presente investigación se plantea determinar la fuerza de impacto de una masa conocida y la relación entre energía de deformación por carga de impacto con respecto a la energía de deformación por carga estática, cuyos resultados serán una contribución con las investigaciones afines al laboratorio de Mecánica de Materiales. Para el desarrollo de la experimentación se aplicará procesos adecuados dentro del protocolo de pruebas a realizarse por los tres tipos de ensayos basándose principalmente en las normas ASTM A370 y ASTM E23, las cuales permitan una correcta medición de las variables físicas y mecánicas, para así lograr obtener datos confiables y reproducibles a geometrías establecidas.

Por lo que se tomarán en cuenta los siguientes puntos:

1.6.1. Equipamiento

- Ensayos universales: MTS TK/T5002 y AMSLER RM-09
- Equipo medidor de fuerza de impacto, con sistema de elevación, frenado y HMI.
- Péndulo Charpy - resistencia al impacto en polímeros.
- Quantrol “Advanced Forcé& Torque Indicador-AFTI” y su celda de carga.

1.6.2. Componentes mecánicos

Se diseñará y construirá accesorios para la sujeción de las vigas tipo probeta sobre los apoyos y del percutor de ataque sobre los pistones hidráulicos o de tornillo, según sea el caso, tanto para la máquina especificada como para la de “Ensayos Universales”, todo esto con el fin de que se cumplan condiciones similares para ambos ensayos.

También se analizará los implementos necesarios para controlar la caída libre de un determinado cuerpo a una altura conocida, asegurando que los sensores involucrados no se deformen con el impacto del mismo.

Será necesario plantear las dimensiones geométricas de la viga tipo probeta y estandarizarlas, así como también de los cuerpos de prueba para caída libre. De acuerdo al acero: estructural ASTM A36, endurecido SAE 1040 y de transmisión AISI 1018 que se disponga en mercado regional en el distrito metropolitano de Quito.

1.7. Estructura del documento

En el capítulo I del presente proyecto de titulación se propone una descripción del alcance del trabajo a realizarse, tanto de los accesorios necesarios como de los ensayos, en donde se incluirá los objetivos y resultados finales que se esperan obtener. En el capítulo II se estructurará un estado del arte acompañado de una descripción a detalle del proyecto donde se sustenta la teoría a aplicarse durante todo el proceso de desarrollo. En el capítulo III se planteará y desarrollará todo el diseño mecánico de piezas, acoples y partes de las máquinas a utilizarse, así como también un análisis y selección de materiales para los mismos. El capítulo IV desarrollará protocolos de pruebas necesarios para todos los ensayos, revisión de las condiciones e instrumentación, puesta a punto de máquinas a intervenir. En el capítulo V describe los ensayos paso a paso, el análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas en laboratorio y la caracterización de curvas de las variables físicas analizadas durante todos los ensayos así como una comparación teórica. El capítulo VI detalla los costos directos e indirectos mediante un análisis económico y financiero. En el capítulo VII se presentan las conclusiones y recomendaciones, con la descripción de trabajos futuros. Al finalizar el capítulo VIII se tiene la sección de anexos en donde se encontrarán los protocolos de pruebas y accesorios para la reproducción de pruebas, lineamiento, geometrías de las probetas y planos.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DEL ARTE

Fundamentos teóricos para el análisis de la fuerza de impacto y la energía de deformación para ensayos estáticos y de impacto sobre vigas de acero.

2.1. Principio de conservación de la energía

El principio de conservación de la energía surge del enunciado (Huygens, 1669): “En el caso de choques perfectamente elásticos, además de la cantidad de movimiento, se debía conservar otra magnitud, el producto de la masa por la velocidad al cuadrado.” (Yavorski, Detlaf, 2009)

Dicha conservación indica que la energía no puede crearse ni destruirse; solo puede transformarse. Este principio parte de observaciones experimentales y se conoce como la primera ley de la termodinámica. La energía puede cruzar la frontera de un sistema cerrado en dos formas distintas: calor y trabajo. (Cengel & Boles, 1998)

La primera ley de la termodinámica no puede demostrarse matemáticamente, pero puede ser tomada como una prueba de su cumplimiento el hecho de que no se conoce ningún proceso en la naturaleza que la haya violado.

En el caso de la energía mecánica se puede decir que, en ausencia de rozamientos y sin la intervención de ningún trabajo externo, la suma de las energías cinéticas y potencial permanece constante. (Ayala, 2011)

Fenómeno que se ampliará a continuación:

2.1.1. Energía cinética

Para todo impacto la energía cinética no se conserva, ya que en el momento de la colisión se transforma en otra que puede ser sonido, dislocaciones plásticas, calor, etc., siguiendo el principio de la entropía creciente de la termodinámica. (Cengel & Boles, 1998)

La variación de la energía cinética es:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad [2.1]$$

Donde:

- m : Masa. [Kg]
- v_1 y v_2 : Velocidades antes y después del choque. [m/s]

2.1.2. Energía potencial.

Se idealiza que el trabajo de la gravedad sobre un elemento de determinada masa, el cual cae por un plano inclinado de altura conocida. La energía potencial medida entre dos puntos dentro del plano a diferentes alturas.

$$\Delta E_p = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad [2.2]$$

Donde:

- m : Masa. [Kg]
- h_1 y h_2 : Alturas en los puntos A y B. [m]

Por lo tanto observamos que es independiente de la longitud y de la inclinación del plano. (Michinel & Martínez, 1994)

2.1.3. Ley de conservación de la energía mecánica

1) Se llama energía mecánica (E_m), a la energía del movimiento mecánico y de la interacción. La E_m de un sistema es igual a la suma de su energía cinética E_c y de la energía potencial E_p . (Yavorski, Detlaf, 2009)

$$E_m = E_c + E_p \quad [2.3]$$

Si se produce un incremento en el sistema durante un intervalo de tiempo dt infinitesimal.

$$dE_m = \delta A_{n.p} + \frac{\partial E_p}{\partial t} \cdot dt \quad [2.4]$$

Donde:

- $\delta A_{n.p}$: todos los trabajos infinitesimales realizados por todas las fuerzas externas e internas, no potenciales, que actúan sobre el sistema. (Yavorski, Detlaf, 2009)
- $\partial E_p / \partial t \cdot dt$: el cambio que experimenta la energía potencial del sistema, debida al carácter cambiante de las fuerzas potenciales externas, esta sería la energía mecánica total. (Yavorski, Detlaf, 2009)

2) Si el sistema es conservativo: $\delta A_{n.p} = 0$ y $\partial E_p / \partial t = 0$, entonces $E_m = \text{const.}$, es válido afirmar que cuando un sistema conservativo se mueve, su energía mecánica no varía. Por lo que para los sistemas conservativos que se mantienen cerrados: “la energía mecánica de un sistema cerrado no varía con el tiempo, si todas las fuerzas internas que actúan en dicho sistema son potenciales o no realizan trabajo”. Todo esto está estrechamente relacionado con la homogeneidad del tiempo. Por lo que se asegura que todas estas afirmaciones no depende del punto de referencia del tiempo que se elija. (Cengel & Boles, 1998)

3) La E_m de un sistema cerrado, no conservativo, varía cuando el trabajo la realizan todas las fuerzas internas no potenciales:

$$dE_m = \delta A_{n.p} \quad [2.5]$$

La acción de fuerzas disipativas, como las fuerzas de rozamiento, ocasionan una disminución progresiva de la energía mecánica. Este proceso se llama disipación de la energía, durante el cual la E_m del sistema se transforma en otras formas de energía (como en energía del movimiento de las moléculas que lo componen). La transformación de la energía mecánica se efectúa de acuerdo con la ley de conservación de la energía.

Enfocando todo este estudio podemos concluir que la energía puede pasar de una forma a otra y redistribuirse dentro del sistema, pero su cantidad total en un sistema cerrado debe permanecer constante. De la ley de conservación y transformación de la energía se deduce que la variación de la energía de un sistema no cerrado que se

produce al interaccionar éste con el medio, y debe ser numéricamente igual y de signo contrario a la variación de la energía del medio exterior. (Yavorski, Detlaf, 2009)

2.2. Estática

2.2.1. Vigas – efectos externos

Los miembros estructurales que ofrecen resistencia a la flexión originada por cargas aplicadas reciben el nombre de vigas. La viga es el más importante de todos los miembros estructurales y es de vital importancia entender la teoría que fundamenta su diseño.

El estudio de las capacidades de soporte de las vigas consiste, en establecer los requisitos de equilibrio de una parte cualquiera de ella considerada por separado y de la viga en conjunto, todo esto aplicando los principios de la estática. Después se establecen las relaciones entre las fuerzas resultantes y la correspondiente resistencia interna de la viga para soportar esas fuerzas, sabiendo las características mecánicas del material. (Meriam & Kraige, 1999)

2.2.2. Tipos de vigas

Las reacciones de la viga que se encuentran soportadas de tal forma que los apoyos pueden calcularse mediante el uso de los conceptos básicos de la estática, se las denomina isostáticas. Mientras que para una que presenta más apoyos de los necesarios para estar en equilibrio, hiperestática. Para determinar el valor de sus apoyos es necesario emplear ecuaciones de equilibrio, tomando en cuenta sus propiedades bajo deformación. (Meriam & Kraige, 1999)

También se las clasifica de acuerdo al tipo de carga exterior que se les aplique. Pudiendo ser estas concentradas y distribuidas.

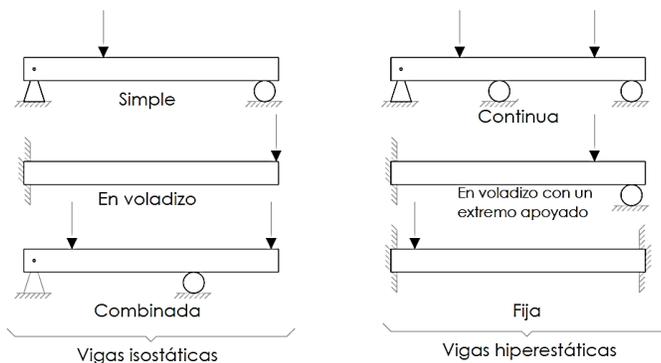


Figura 1 Vigas isostáticas e hiperestáticas

Fuente: (Meriam & Kraige, 1999)

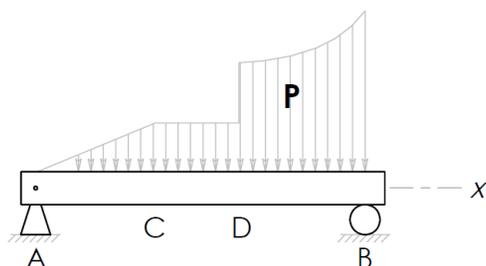


Figura 2 Viga sometida a carga distribuida

Fuente: (Meriam & Kraige, 1999)

2.2.3. Vigas – efectos internos

Se describe cómo proceder en el análisis de una viga sometida a una carga distribuida o más fuerzas concentradas equivalentes para lograr determinar las reacciones actuantes. También se introducen los efectos internos y los conceptos para fuerza cortante y momento flector, como funciones de la posición. (Meriam & Kraige, 1999)

2.2.3.1. Cortadura y flexión

Las vigas presentan resistencia también a la cortadura y a la flexión, los cuales son producidos por fuerzas aplicadas a la viga, y se encuentran contenidos en un único plano, por lo que se debe tener en cuenta los convenios de signos a aplicarse.

La variación de estas a lo largo de la viga da un análisis, necesario para su diseño. Tomando muy en cuenta el valor máximo del momento flector. Estas variaciones se representan mediante los llamados diagramas de fuerza cortante y momento flector, en función de las distancias a lo largo de toda la longitud de la viga. (Meriam & Kraige, 1999)

2.2.3.2. Relaciones entre carga, fuerza cortante y momento flector

Se recomienda aislar un tramo infinitesimal de longitud dx , de una parte de la viga. La fuerza por unidad de longitud es representada por la intensidad de la carga p aplicada y podemos considerarla constante de un extremo al otro.

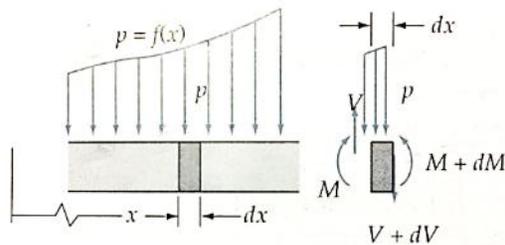


Figura 3 Viga cargada con un tramo elemental dx con posición x y $x+dx$.

Para que se encuentre en equilibrio, las fuerzas verticales del elemento deben ser cero.

$$V - p \cdot dx - (V + dV) = 0$$

$$p = -\frac{dV}{dx} \quad [2.6]$$

Por lo que integrando se encuentra la fuerza cortante V , en función de la distribución de carga.

$$\int_{V_0}^V dV = \int_{x_0}^x p \cdot dx \quad [2.7]$$

$$V = V_0 - (\text{Área delimitada por la curva de la carga entre } x_0 \text{ y } x)$$

En donde:

- V_0 : Fuerza cortante en X_0 . [N]
- V : es la fuerza cortante en X . [N]

Mientras que en la figura 3, considerando que se encuentra en equilibrio también, y que la suma de momentos sea cero.

$$M + p \cdot dx \cdot \frac{dx}{2} + (V + dV)dx - (M + dM) = 0$$

Como: dx y $(dx)^2$ son infinitésimos de orden superior

$$V = -\frac{dM}{dx} \quad [2.8]$$

Entonces se integra y obtiene el momento M , en función de la fuerza cortante. (Meriam & Kraige, 1999)

$$\int_{M_0}^M dM = -\int_{x_0}^x V \cdot dx \quad [2.9]$$

$$M = M_0 - (\text{Área delimitada por la curva de cortantes entre } x_0 \text{ y } x)$$

En donde:

- M_0 : Momento flector en X_0 . [N.m]
- M : es el momento flector en X . [N.m]

2.3. Dinámica

2.3.1. Generalidades de la fuerza de impacto

Para este análisis se exige procedimiento de cálculos distintos a los de otras solicitantes dinámicas más comunes en la dinámica estructural. Es usual un

comportamiento no lineal de los materiales que se ensayan a grandes velocidades, con bastos desplazamientos y deformaciones, con posible ruptura local, y efectos en los apoyos. Los fenómenos de transmisión de ondas de tensión o incluso de ondas de choque van ganando importancia cuando empezamos a aumentar la velocidad del impacto. Se considera adecuado primero discutir los fenómenos dinámicos impulsivos para analizar sus distintos tipos de impacto. (Giocolea J. M., 2000)

2.3.2. Teoría de impulsiones

Se tiene algunos procedimientos para los estudios de la mecánica clásica de sistemas rígidos, el impacto será estudiado mediante esta teoría.

2.3.2.1. Impulsión sobre una partícula

Se idealiza una partícula de determinada masa, que viaja a una velocidad inicial v_1 constante, en línea recta y después de la impulsión cambia su velocidad a v_2 . Por lo que el sistema tendría un solo grado de libertad y en un determinado instante de tiempo provoca una fuerza impulsiva. (Giocolea J. , 2011)

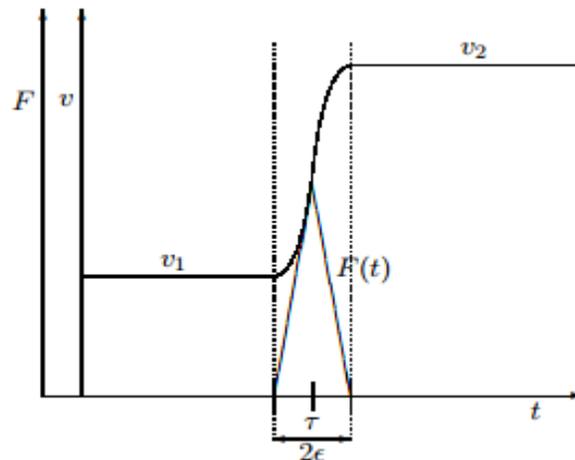


Figura 4 Comportamiento dinámico partícula durante impulsión.

Fuente: (Giocolea J. , 2011)

El incremento de la cantidad de movimiento es el impulso de la partícula:

$$I = mv_2 - mv_1 = \int_{\tau-\varepsilon}^{\tau+\varepsilon} F dt \quad [2.10]$$

Donde:

- I: Impulso. [N.s]
- m: masa de la partícula. [Kg]
- v_1 y v_2 : Velocidades antes y después del impacto [m/s]

Si se utiliza un intervalo de tiempo 2ε , es muy breve, por lo que se puede considerar el fenómeno como momentáneo. (Chopra, 2014)

$$\varepsilon \rightarrow 0$$

$$F \rightarrow \infty$$

2.3.2.2. Coeficiente de restitución

Determina el grado de conservación de la energía cinética, este puede variar de 0 a 1 y ser mayor cuando los choques son a nivel molecular.

$$e = -\frac{v_{2f} - v_{1f}}{v_{1i} - v_{2i}} \quad [2.11]$$

Donde:

- e: Coeficiente de restitución.
- v_{2f} y v_{1f} : Velocidades finales de las partículas después del impacto. [m/s]
- v_{1i} y v_{2i} : Velocidades iniciales de las partículas antes. [m/s]

2.4. Mecánica de materiales

2.4.1. Propiedades Mecánicas

Dependiendo de los materiales de los que esté formada una pieza u componente, la cual se encuentra sometida a fuerzas externas durante su uso, esta presenta propiedades específicas. El momento de diseñar un elemento mecánico se vuelve muy necesario conocer dichas características pues con esto se asegura que los esfuerzos a

los que vaya a esta sometido el elemento no superen a su resistencia y falle. Las propiedades mecánicas de un material relacionan su deformación ante una carga aplicada.

El comportamiento mecánico puede dividirse de la siguiente manera:

- ***Propiedades Estáticas del material***

Cuando las fuerzas aplicadas son muy lentas o casi no tienen movimiento, son constantes, se puede decir que el elemento está siendo sometido a una carga estática. (Medina, 2000)

- ***Propiedades Dinámicas del material***

Cuando un elemento se le someta a una fuerza de intensidad variable, a una carga o descarga repentina, o que soporte diferentes modo de carga (flexión, compresión, tracción, torsión, etc.), se puede afirmar que soporta cargas dinámicas. (Medina, 2000)

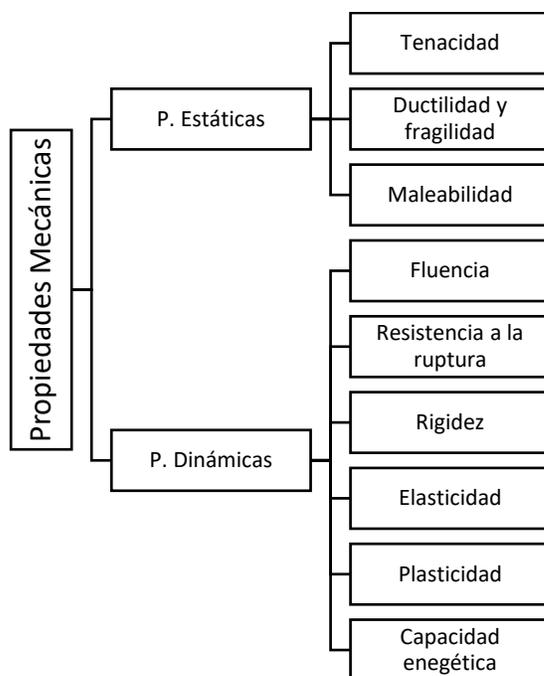


Figura 5 Propiedades mecánicas de los materiales

2.4.1.1. Ductilidad

Es determinada por cálculo de porcentaje de elongación del material después de aplicarle un ensayo. Es una propiedad que define el comportamiento del material cuando este es doblado, ensanchado, formado, estirado, etc. sin que exista falla o ruptura. La fragilidad es la propiedad contraria a la ductilidad. (Medina, 2000)

$$\%e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \cdot 100\% \quad [2.12]$$

Donde:

- %e: Porcentaje de elongación.
- L_o : Longitud original de la garganta. [mm]
- L_f : Longitud final después del ensayo. [mm]

2.4.1.2. Tenacidad

Es el trabajo por unidad de volumen necesario para que un material se fracture, por lo que según la curva tensión - deformación hallando el área bajo la curva se puede encontrar la energía necesaria para producir su falla. (Medina, 2000)

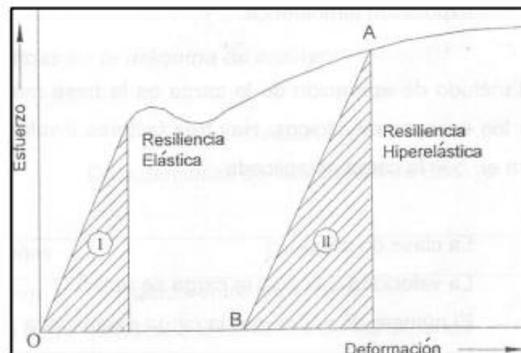


Figura 6 Diagrama esfuerzo-deformación.

Fuente: (H.Avner, 1981)

2.4.1.3. Fluencia

La propiedad de resistencia a la fluencia es la que mide esta variable, representada en el diagrama esfuerzo – deformación unitaria donde con el aumento del esfuerzo la deformación sufre una gran variación. (Medina, 2000)

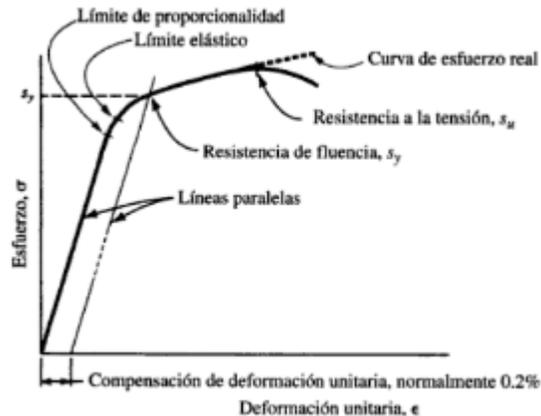


Figura 7 Diagrama esfuerzo-deformación unitaria, materiales sin punto de fluencia.

Fuente: (Mott & P.E., 2006)

2.4.1.4. Resistencia a la ruptura

Oposición que presenta un determinado material a ser dividido en dos o más partes al aplicarle cualquier tipo de esfuerzos externos. (Medina, 2000)

Para el presente análisis se define la resistencia a la ruptura transversal. El cuál es el valor de resistencia derivada, y la formula se define:

$$TRS = \frac{1.5 F \cdot L}{b t^2} \quad [2.13]$$

Donde:

- TRS: Resistencia a la ruptura. [Mpa]
- F: Fuerza aplicada a la fractura. [N]
- L: Longitud de la probeta entre los soportes. [mm]
- b: Base de la sección. [mm]
- t: Altura de la sección. [mm]

2.4.1.5. Rigidez

Es la magnitud de deformación que ocurre bajo la acción de una fuerza dentro del comportamiento elástico del material. (Medina, 2000)

2.4.1.6. Elasticidad

Se la conoce como una deformación elástica reversible, para su entendimiento se definen varios parámetros como son el esfuerzo a la tracción y el cortante.

Esfuerzo a la tracción:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{F}{A} \quad [2.14]$$

Donde:

- σ : Esfuerzo (tracción o compresión). [MPa]
- E : Es el módulo de elasticidad. [MPa]
- F : Fuerza axial. [N]
- ε : Deformación unitaria.
- A : Área transversal. [mm²]

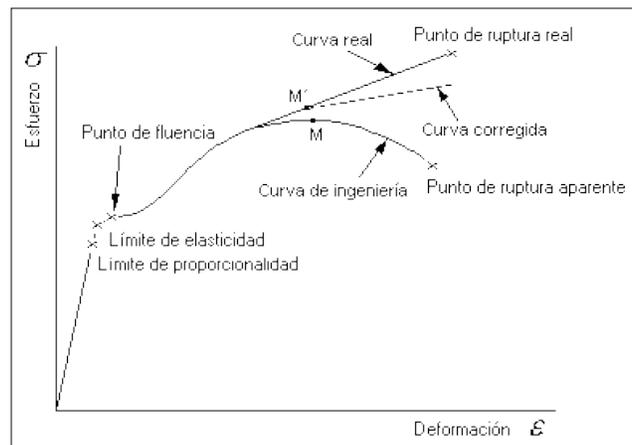


Figura 8 Diagrama esfuerzo-deformación del acero

Fuente: (Askeland & Phulé, 2004)

2.4.1.7. Plasticidad

Cuando el esfuerzo producido por la carga rebasa un valor límite en la mayoría de los materiales se produce un cambio de forma permanente, denominado plasticidad. (Velázquez, 2004)

Analizando el caso de que sea deformación plástica, se tiene que coincide con la deformación total.

2.4.1.8. Capacidad Energética

Se basa en el principio físico en el que el trabajo es igual a la fuerza por la distancia recorrida, es decir que un material para poder absorber energía el momento en que se le aplica una fuerza externa, lo hará en diferentes grados dependiendo de su capacidad y estructura atómica, también se encuentra relacionada con la resistencia a una carga por impacto. “La energía almacenada por unidad de volumen en el límite elástico es el módulo de resiliencia.” (H.Avner, 1981)

2.4.1.9. Tipos de ensayos de materiales.

Tienen como finalidad determinar las características de los materiales y los que se utilizarán para este proyecto:

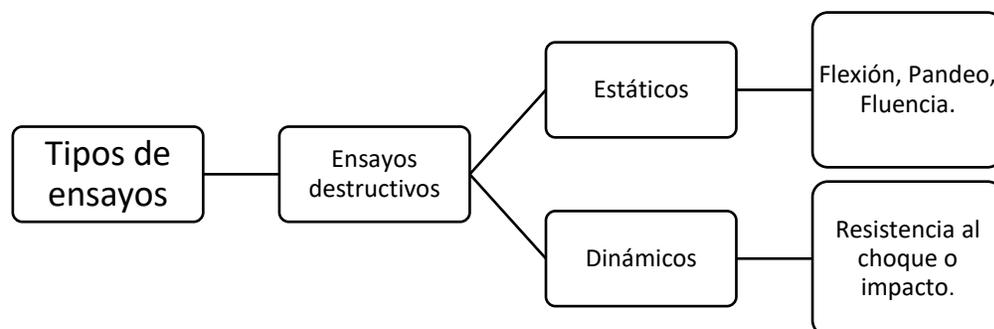


Figura 9 Ensayos de materiales que se aplicarán en el proyecto.

2.5. Estudios energéticos sobre la deformación de vigas de acero

2.5.1. Deformaciones unitarias longitudinales en vigas

Pueden encontrarse estudiando la curva de la viga y las deformaciones asociadas. Para este análisis se considera una sección AB de una viga a flexión pura, sometida a momentos flexionantes positivos M e inicialmente un eje longitudinal recto (eje x) y su sección transversal es simétrica respecto al eje y . (Gere, 2003)

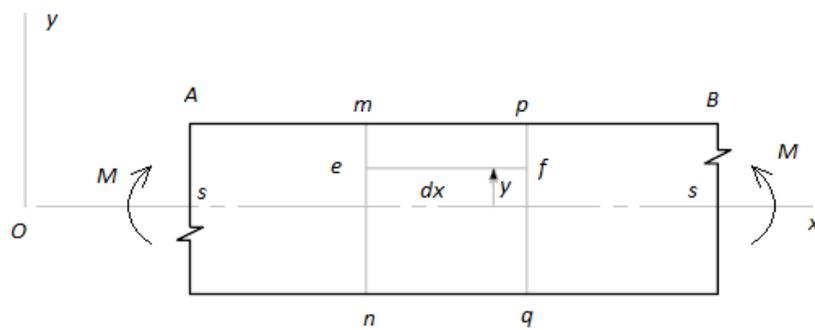


Figura 10 Deformaciones de una viga en flexión pura: elevación de la viga.

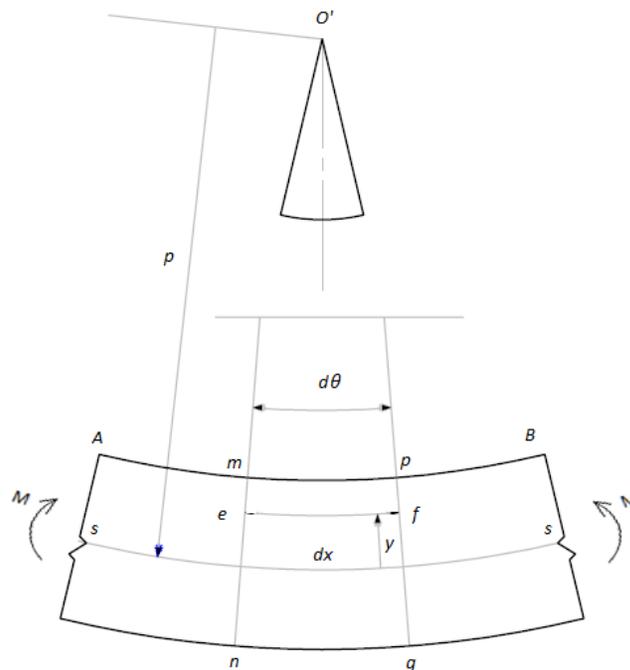


Figura 11 Viga deformada.

La distancia inicial de O' a la línea ss es el radio de curvatura ρ , mientras que la distancia inicial dx entre las dos figuras 15 y 16 (planos) no cambia en la superficie neutra por lo que:

$$dx = \rho \cdot d\theta \quad [2.15]$$

Sin embargo el resto de las líneas longitudinales se acortan o se alargan, con lo cual se generan deformaciones unitarias normales ϵ_x .

Para obtener la línea ef se evalúan estas deformaciones, localizada dentro de la viga entre los planos mn y pq . El elemento $mnpq$ se deforma de manera idéntica, solo si sus secciones transversales permanecen planas durante la flexión. Se identifica la línea ef , por su distancia desde la superficie neutra en la viga inicialmente recta. (Gere, 2003)

Suponiendo que el eje x se encuentra a lo largo de la superficie neutra de la viga no deformada. La línea longitudinal ef en la viga flexionada permanece a la misma distancia y . La longitud L_1 de la línea ef :

$$L_1 = (\rho - y)d\theta \quad [2.16]$$

$$\text{Sabido: } d\theta = \frac{dx}{\rho}$$

$$L_1 - dx = -\frac{y}{\rho}dx \quad [2.17]$$

Puesto que la longitud original de la línea ef es dx , se infiere que su alargamiento δ_x es $(L_1 - dx)$ ó $(-y dx/\rho)$.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad [2.18]$$

Donde:

- δ : alargamiento. [mm]
- L : longitud inicial. [mm]

Y derivando con respecto al eje x :

$$\epsilon_x = \frac{\delta_x}{dx}$$

$$\epsilon_x = \frac{-y \frac{dx}{\rho}}{dx}$$

$$\epsilon_x = -\frac{y}{\rho} \quad [2.19]$$

2.5.2. Materiales elásticos lineales

2.5.2.1. Esfuerzos normales en vigas

Los esfuerzos actúan sobre toda la sección transversal de la viga y varían de intensidad dependiendo de la forma del diagrama esfuerzo – deformación unitaria del material y de las dimensiones de la sección transversal. Puesto que para un material elástico se utiliza la Ley de Hooke, para un esfuerzo uniaxial ($\sigma = E\epsilon$) (Gere, 2003) y tomando en cuenta la ecuación [2.19] tenemos:

$$\sigma_x = E\epsilon_x = -\frac{E y}{\rho} = -Eky \quad [2.20]$$

Esto muestra que los esfuerzos normales que actúan sobre la sección transversal varían linealmente con la distancia y desde la superficie neutra. (Meriam & Kraige, 1999) Dicha distribución se muestra en la figura 12.

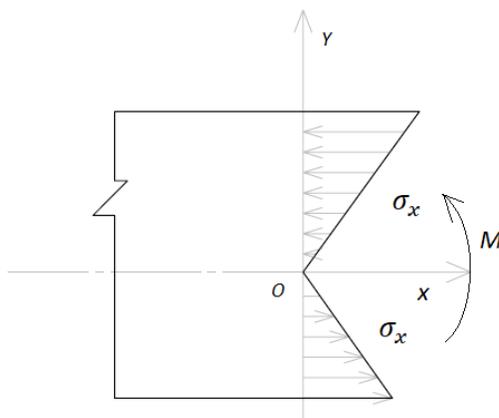


Figura 12 Distribución de esfuerzos.

Comúnmente, la resultante de los esfuerzos normales consiste en dos resultantes de esfuerzo:

- 1) Una fuerza que actúa en la dirección x
- 2) Un par de flexión que actúa alrededor del eje z .

Sin embargo, la fuerza axial es cero cuando una viga está sometida a flexión pura, por lo que se puede escribir las siguientes consideraciones para las ecuaciones de estática:

- 1) La fuerza resultante en la dirección x es igual a cero. Para la ecuación que da la posición de del eje neutro.
- 2) El momento resultante es igual al momento flexionante M . para la relación momento-curvatura. (Chopra, 2014)

2.5.2.2. Localización del eje neutro

Se considera un elemento de área dA en la sección transversal, localizado a una distancia y del eje neutro. Garantizando la validez de la ecuación [2.20] al momento de aplicar las siguientes consideraciones.

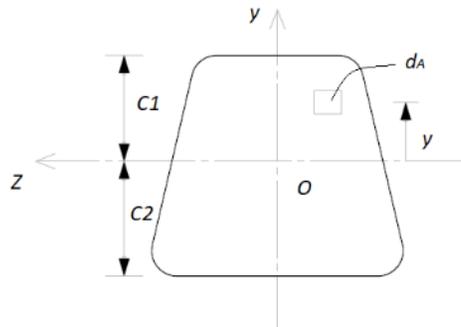


Figura 13 Sección transversal de la viga.

Por lo que la fuerza es igual a: $\sigma_x d_A$ y es de compresión cuando y es positiva, como no hay fuerza resultante en acción sobre la sección transversal, la integral sobre el área A de toda la sección transversal debe ser igual a cero. (Gere, 2003)

$$\int_A dF = \int_A \sigma_x d_A = - \int_A E k y d_A = 0 \quad [2.21]$$

2.5.2.3. Relación momento-curvatura

Como el elemento dA está arriba del eje neutro, el esfuerzo positivo que actúa sobre este elemento produce un momento igual a $\sigma_x y d_A$. Este momento actúa en sentido opuesto al momento flexionante M . (Gere, 2003)

$$dM = -\sigma_x y d_A \quad [2.22]$$

$$M = - \int_A \sigma_x y d_A = \int_A kE y^2 d_A = kE \int_A y^2 d_A$$

$$\text{sabemos que: } I = \int_A y^2 d_A$$

$$\therefore M = k E I \quad [2.23]$$

Donde:

- M : Momento flexionante [Nm].
- k : Curvatura [m^{-1}].
- E : Módulo de Young del material [MPa]
- I : Inercia de un cuerpo [m^4]

2.5.3. Energía de deformación

Los principios de la energía de deformación se usan ampliamente para establecer las respuestas de máquinas y estructuras frente a cargas estáticas y dinámicas. El trabajo externo aplicado a un elemento elástico para deformarlo se transforma en energía de deformación o potencial. Un diagrama fuerza – desplazamiento, muestra como la fuerza varía y la forma de la curva depende de las propiedades del material. (Paz, 1992)

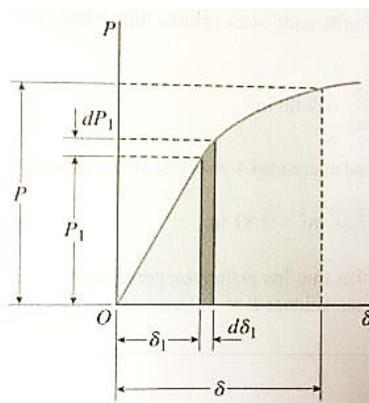


Figura 14 Diagrama carga-desplazamiento.

Fuente: (Gere, 2003)

El trabajo realizado por la carga durante este alargamiento es el producto de la carga y la distancia por la cual se mueve; es decir, el trabajo (energía empleada en la deformación) es igual a $P_1 d \delta_1$ (Gere, 2003). En la figura 14, el área bajo la curva representa el trabajo. El trabajo total hecho por la carga al pasar de cero al valor máximo es la suma de todas las franjas elementales:

$$W = \int_0^{\delta} P_1 d\delta_1$$

La presencia de deformaciones unitarias incrementa el nivel de energía del elemento mismo, por lo que podemos definir a la energía de deformación como la energía absorbida por el elemento durante el proceso de carga. Por el principio de conservación de la energía sabemos que esta energía de deformación es igual al trabajo hecho por la carga, siempre que no se agregue o reste energía en forma de calor. (Gere, 2003)

$$U = W = \int_0^{\delta} P_1 d \delta_1 \quad [2.24]$$

2.5.3.1. Comportamiento elástico lineal

Si el material del elemento obedece a la ley de Hooke, la curva carga desplazamiento es una línea recta. Si el elemento se deforma a una distancia y , esta energía es igual al producto de la fuerza promedio y la deflexión. (Gere, 2003)

$$U = W = \frac{P}{2} y \quad [2.25]$$

2.5.3.2. Energía de deformación por flexión para cargas estáticas

Se tiene una viga simple AB en flexión pura, sostenida a la acción de dos pares, cada uno de momento M.

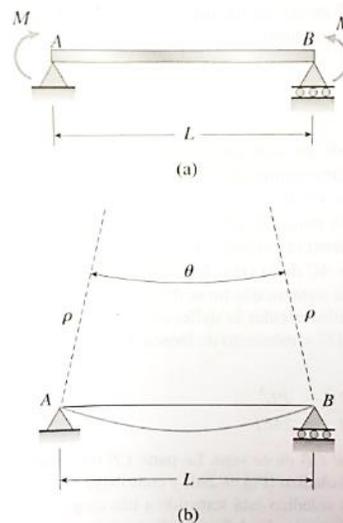


Figura 15 Viga en flexión pura por pares de momento.

Fuente: (Gere, 2003)

Al saber que el ángulo θ es muy pequeño y que la deflexión v de una viga describe su forma una vez aplicada la carga.

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{dv}{dx}$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad [2.26]$$

La curva de deflexión es un arco circular casi plano de curvatura constante. En donde el ángulo θ subtendido por ese arco:

$$L = \theta \cdot \rho \quad [2.27]$$

Donde:

- L : Longitud de arco subtendido [m]. Varía a lo largo de la viga.
- θ : Ángulo subtendido [°].
- ρ : Radio de curvatura [m]. Constante.

En donde k es la curvatura (igual al recíproco del radio de curvatura: ρ).

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad [2.28]$$

Reemplazando las ecuaciones [2.26] y [2.27].

$$k = \frac{\theta}{L}$$

$$k = \frac{d\theta}{dx} = \frac{dv^2}{dx^2} \quad [2.29]$$

Al decir que el material de la viga es elástico lineal y obedece a la ley de Hooke, partimos de la ecuación [2.23] despejando k y reemplazando [2.28]:

$$\rho = \frac{EI}{M} \quad [2.30]$$

Mientras que para el caso de la deflexión tenemos la ecuación [2.23] y reemplazando [2.21]:

$$M = \left(\frac{dv^2}{dx^2} \right) EI \quad [2.31]$$

El ángulo θ subtendido por este arco es igual a L/ρ , donde L es la longitud de la viga. Por lo que al reemplazar la ecuación [2.27] con la [2.28]:

$$\theta = \frac{ML}{EI} \quad [2.32]$$

Se presenta en la figura 16, la gráfica que relaciona momento y el ángulo subtendido que varía:

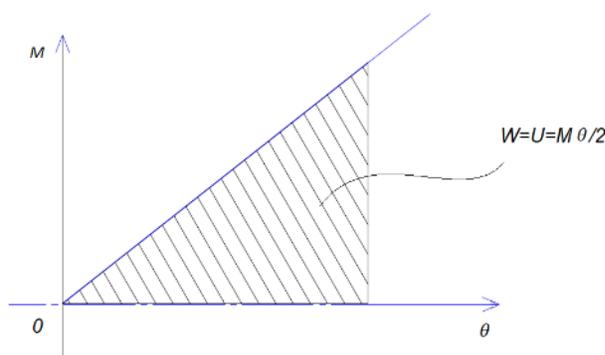


Figura 16 Momento vs. Ángulo subtendido

El área bajo la curva es el trabajo realizado, conforme la magnitud de los pares de flexión incrementa de cero a sus valores máximos, ellos efectúan el trabajo W . Este trabajo es igual a la energía de deformación U almacenada, y se lo puede expresar:

$$dU = \frac{M}{2} d\theta \quad [2.33]$$

Y se reemplazan las ecuaciones [2.15] y [2.30], e integrando.

$$\begin{aligned} dU &= \frac{M^2}{2EI} dx \\ \therefore U &= \int \frac{M^2}{2EI} dx \end{aligned} \quad [2.34]$$

Por otra parte, si se conoce la ecuación de la curva de deflexión, reemplazamos el momento M por la ecuación [2.31].

$$\begin{aligned} U &= \int \frac{\left[\left(\frac{dv^2}{dx^2} \right) EI \right]^2}{2EI} dx \\ U &= \int \frac{EI}{2} \left(\frac{dv^2}{dx^2} \right)^2 dx \end{aligned} \quad [2.35]$$

Únicamente se ha considerado los efectos de los momentos flexionantes; pero se debe tener en cuenta que también suelen presentarse fuerzas cortantes, las cuales se almacenarán como una energía de deformación adicional en la viga. A pesar de que muchas veces dicha energía de deformación es relativamente pequeña, en

comparación con la de flexión, para vigas de proporciones usuales (donde las longitudes son mucho mayores que las alturas, $L/d > 8$). (Gere, 2003)

Para vigas muy cortas la energía de deformación tiene una buena aproximación a través de uso de la ecuación para cortante directo:

$$U_c = \frac{PL}{2AG} \quad [2.36]$$

Con un factor C, cuyo valor depende de la forma de la sección transversal. Teniendo a V como la fuerza cortante, la energía de deformación causada por cortante por flexión es la integral.

$$U_c = \int \frac{C V^2}{2AG} dx \quad [2.37]$$

Siendo los valores de C enlistados en la siguiente tabla:

Tabla 1

Factores de corrección de energía de deformación por cortante

Forma de la sección transversal de la viga	Factor C
Rectangular	1.50
Circular	1.33
Tubular, circular	2.00
Secciones en caja +	1.00
Perfiles estructurales +	1.00

+use solo el área del alma.

Fuente: (Boresi, Schmidt, Sidebottom, & Seely, 1993)

2.5.3.3. Energía de deformación por flexión producida por impacto

Las consideraciones para casos específicos, y así lograr garantizar la validez de los análisis, se presentan a continuación:

- 1) El peso del objeto que cae se queda pegado a la viga y se mueve con ella.
- 2) No aparecen pérdidas de energía por calor, sonido, vibraciones, etc.
- 3) La viga se comporta de manera elástica lineal.
- 4) La forma deflexionada de la viga es la misma bajo carga estática que bajo carga dinámica.

5) La energía potencial de la viga debido a su cambio de posición es relativamente pequeña.

Y también se debe tener en cuenta que la masa del objeto que cae es muy grande en comparación con la masa de la viga.

$$\text{Energía potencial} = W (h + \delta_{max}) \quad [2.38]$$

Se toma de tablas, (Shigley & Mischke, 2002), la curva de deflexión para el caso de una viga simplemente apoyada sometida a una carga concentrada.

Teniendo:

$$y_{AB} = \frac{P_x}{48EI} (4x^2 - 3L^2) \quad \left(0 \leq x \leq \frac{L}{2}\right) \quad [2.39]$$

$$y = \frac{PL^3}{48EI} = \delta_{max} \quad [2.40]$$

Reemplazando y derivando respecto al eje en cual varia.

$$\begin{aligned} y &= -\frac{\delta_{max} x}{L^3} (3L^2 - 4x^2) \\ \frac{dy}{dx} &= -\frac{\delta_{max} x}{L^3} (-8x) \\ \frac{d^2y}{dx^2} &= \frac{24 \delta_{max}}{L^3} x \end{aligned} \quad [2.41]$$

Por lo que al introducirlo sobre la ecuación [2.35] y se integra con los límites aplicables para el caso específico.

$$\begin{aligned} U &= EI \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{24\delta_{max}}{L^3} x\right)^2 dx \\ U &= \frac{24EI\delta_{max}^2}{L^3} \end{aligned} \quad [2.42]$$

Al igualar la energía potencial perdida por la masa que cae con la energía de deformación absorbida por la viga.

$$W(h + \delta_{max}) = \frac{24EI\delta_{max}^2}{L^3}$$

$$(24EI)\delta_{max}^2 - (L^3W)\delta_{max} - L^3Wh = 0$$

Se resuelve la ecuación cuadrática y se toma la raíz positiva.

$$\delta_{max} = \frac{WL^3}{48EI} + \sqrt{\left(\frac{WL^3}{48EI}\right)^2 + 2h\left(\frac{WL^3}{48EI}\right)} \quad [2.43]$$

En el análisis de la ecuación [2.43] se tiene que disminuye si la rigidez (EI/L^3) aumenta, mientras que aumenta si el peso W o la altura h disminuyen. (Gere, 2003)

Teniendo la deflexión debido al peso W :

$$\delta_{est} = \frac{WL^3}{48EI} \quad [2.44]$$

Se denota la ecuación [2.43] en función de [2.44].

$$\therefore \delta_{max} = \delta_{est} + \sqrt{\delta_{est}^2 + 2h\delta_{est}} \quad [2.45]$$

Se deduce que la deflexión dinámica siempre es mayor que la estática. Y por otro lado si la altura es muy grande se considera únicamente:

$$\delta_{max} = \sqrt{2h\delta_{est}} \quad [2.46]$$

2.6. Ensayos destructivos sobre vigas normalizados

2.6.1. Ensayo de flexión

Las vigas forman parte de sistemas estructurales como en armaduras de puentes, pórticos y otros, al aplicarles cargas externas sobre ellas se producen esfuerzos de flexión, cortante y en algunos casos torsión.

Un esfuerzo de flexión puro o simple se presenta cuando se aplica sobre un elemento pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, de modo que se provoque el giro de las secciones transversales con respecto a sus secciones inmediatas. (Fuentes Espinoza, 1982)

Un concepto importante a tomar en cuenta es la fibra neutra, en donde la distancia a lo largo de la misma no varía con respecto al valor antes de la deformación (Meriam & Kraige, 1999). Las fibras que se encuentren sobre o debajo, dependiendo del signo del momento equivalente que se tome, estarán sometidas a tracción y las del lado contrario a compresión.

Las vigas que presentan una relación de 10 o más entre su longitud, sus deflexiones por corte son suficientemente pequeñas comparadas con las de flexión pura.

2.6.1.1. Probetas para ensayos de flexión

Para determinar el módulo de rotura para un material dado, la viga bajo este tipo de ensayo debe colocarse de tal forma que no falle por otros fenómenos como deflexión lateral o corte, antes de superar su resistencia a la flexión y empezar a provocar su fractura y posterior falla (Shigley & Mischke, 2002). La probeta no debe ser demasiado corta con respecto a las dimensiones de su ancho y altura.

$$L = 6. a \quad [2.47]$$

Donde:

- L: largo de la viga. [mm]
- A: altura de la viga. [mm]

2.6.1.2. Equipos para los ensayo de flexión

Los principales requerimientos tanto para los bloques o yunques de apoyo como para la carga son los siguientes:

- Las áreas de contacto del elemento con sus apoyos, deben ser y ubicarse, de manera que las concentraciones de esfuerzo no causen aplastamiento localizado.
- Se debe tener notoriamente definida la distancia entre apoyos.
- Dejar un margen para el ajuste longitudinal de la posición de los apoyos de modo que la restricción longitudinal no pueda aparecer a medida que la carga aumente.

Muchos ensayos de flexión se realizan en máquinas de ensayo universales, con los apoyos colocados sobre la base o una extensión de ella, y el percutor o bloque de carga sujeto al cabezal móvil. (Fuentes Espinoza, 1982)

Los aparatos para medir la deflexión deben diseñarse y construirse de tal forma que el aplastamiento en los apoyos no sea considerable. Una técnica para que no se presenten este tipo de fenómenos es medir las deflexiones con referencia a puntos sobre el eje neutro arriba de los apoyos.

Las deflexiones dentro del límite proporcional deben medirse hasta cuando menos una centésima de la deflexión en el límite proporcional; para deflexiones mayores ser tomadas hasta cuando menos una milésima de la deflexión al ocurrir la ruptura. (Fuentes Espinoza, 1982)

2.6.1.3. Puesta en marcha de los ensayos de flexión

Las pruebas son sencillas, cuando se requiere únicamente el módulo de ruptura, aunque cuando se requiere de observaciones de carga y deflexión, como para determinar el módulo de elasticidad, se deben llevar a cabo consideraciones adicionales.

El montaje de apoyos y probeta, por lo general, es central (que se encuentren alineados) para proceder adecuadamente y se pueda repetir las condiciones. Al registrar los datos de carga y deflexión para determinar el módulo de elasticidad el método más sencillo consiste en trazar un diagrama de fuerza- deflexión. “En los ensayos de vigas que no fallan por ruptura súbita, las indicaciones de falla inminente como grietas, cedencia localizada, etc. deben observarse detalladamente. La forma de la sección transversal de la viga afecta directamente a la resistencia de la misma.” (Fuentes Espinoza, 1982)

2.6.2. Ensayos de impacto

Al aplicarle una carga violenta y repentina a un elemento, en el que la deformación es súbita, este puede comportarse de una forma más frágil que la que se observa en otro tipo de ensayos más estáticos.

En este tipo de ensayos se determinan la fragilidad del material bajo determinadas condiciones, considerando también que la deformación unitaria es mucho más grande para este tipo de pruebas.

El ensayo de impacto consiste en dejar caer un péndulo pesado, sobre una probeta de determinada geometría, ubicada en los soportes base. Al liberar el péndulo desde el ángulo especificado $\alpha = +/ - [90^\circ - 150^\circ]$, para que la velocidad en el momento del impacto se encuentre entre 3 y 6 m/s y de esta manera logre cumplir los requerimientos de la norma especificada.

La probeta deberá poseer una muesca para ayudar a que el fallo se de en una determinada sección de su longitud, generalmente en el centro. Una vez que el péndulo ha impactado con la probeta sigue su camino hasta alcanzar cierta altura, la cual depende de la cantidad de energía de deformación absorbida por la probeta. Las probetas que poseen mayor ductilidad se doblan sin romperse mientras que las que fallan de forma frágil se rompen en dos mitades. (Garavito, 2008)

2.6.3. Propiedades de impacto

2.6.3.1. Sensibilidad de la muesca

Pueden presentarse muescas maquinadas, de fabricación deficiente o diseñada, y su objetivo principal es reducir la resistencia de los materiales, que los esfuerzos aplicados no sean muy grandes hasta alcanzar un fallo. La sensibilidad de la muesca, depende del tipo y de sus dimensiones, se presenta en ensayos de impacto como tenacidad o viga a fatiga, y también puede ser aplicada para ensayos estáticos en donde se

requiera la falla en un punto específico (Garavito, 2008). La energía absorbida por probeta con muesca es menor.

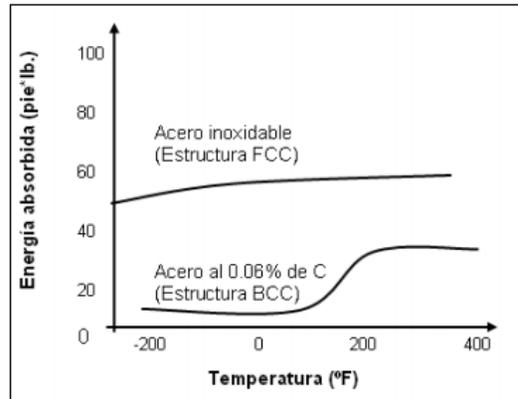


Figura 17 Sensibilidad de un entalle en V en ensayo Charpy.

Fuente: (Garavito, 2008)

2.6.3.2. Relación con el diagrama esfuerzo - deformación

En general, los materiales que tienen alta resistencia y gran ductilidad son los metales, poseen una buena tenacidad a la tensión, por lo que la energía necesaria para romper un material durante un ensayo de impacto, no siempre se la relaciona con la resistencia a la tensión. A pesar de aquello a velocidades de deformación demasiado altas este comportamiento cambia, pudiendo darse así un cambio de dúctil a frágil.

2.6.3.3. Designación de eje de la probeta

La orientación la que las probetas son cortadas de los lingotes de las laminaciones de acero, si este fuera el caso, es de vital importancia para este análisis, pues esto permite que adquieran mayor o menor resistencia a la falla por impacto. (Garavito, 2008)

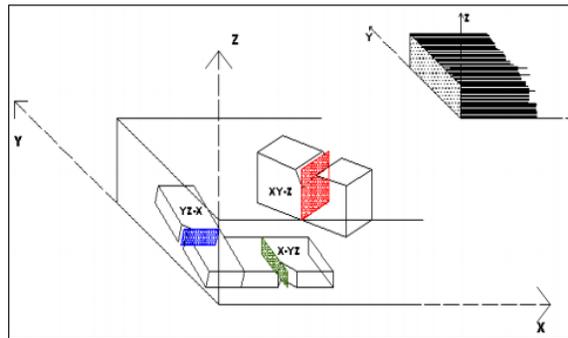


Figura 18 Designación del eje de la probeta.

Fuente: (Garavito, 2008)

Cuando el plano del entalle es diagonal a la dirección de las fibras del espécimen, la probeta puede tener mayor resistencia al impacto que la que tendría una cortada en la dirección $yz-x$, fracturándose esta más fácilmente y presentando una menor resistencia al impacto, por último tenemos a la que la muesca está cortada en la dirección $x-yz$, esta es la que presenta la mayor resistencia, pues es transversal a la dirección de las fibras. (Garavito, 2008)

2.6.4. Ensayo de impacto tipo Charpy

El percutor montado en el martillo golpea la probeta simplemente apoyada en su punto medio y en dirección opuesta a la muesca, previamente realizada. Con ayuda de la instrumentación con la que cuenta el equipo utilizado, se procede a conocer los ángulos de salida y llegada para establecer la energía de deformación que absorbe la probeta una vez realizado el ensayo. (Garavito, 2008)

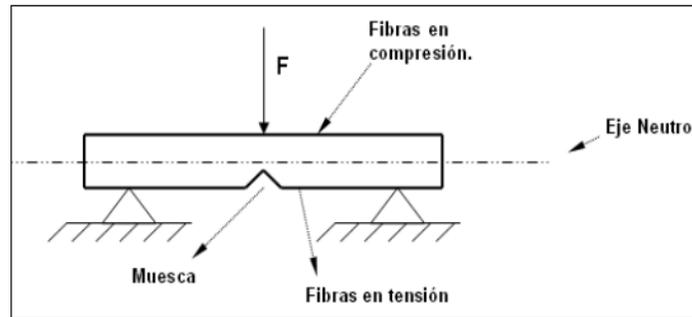


Figura 19 Posición de la probeta en ensayo Charpy.

Fuente: (Garavito, 2008)



Figura 20 Forma y posición de la probeta para ensayo Charpy.

2.6.4.1. Alcance y aplicabilidad de los ensayos de impacto

Circunstancias como el impacto de vehículos de transporte de personas, impacto sobre edificios o estructuras metálicas, la balística y explosiones, equipos de seguridad como cascos, botas con punta de acero, etc. llevan a que cada vez sea asignado más importancia a un diseño adecuado y la evaluación de la seguridad de los componentes mecánicos. Constituyéndose esto en un aspecto clave para garantizar la funcionalidad y si un posible fallo llegase a ocurrir, garantizar la integridad física de las personas que pudiesen verse afectadas. Se considera en todo momento que los objetos involucrados en dichos eventos absorben energía de deformación.

2.6.4.2. Clasificación según su velocidad

- ($v < 50$ m/s) Baja velocidad: Deformación plástica localizada, o efectos elásticos.

2.6.5. Norma E23-07a

La norma es exclusivamente para la evaluación de ensayos de impacto Charpy e Izod por lo que también en ella constan estatutos, en donde se especifican características de los equipos, diseño y construcción de probetas. Las unidades de medida que se deben utilizar y los requerimientos como las condiciones que se deben cumplir.

2.6.5.1. Diseño de las probetas para ensayos

La geometría de las probetas depende exclusivamente del tipo de material y de los factores como peso y diseño del martillo. Algunas dimensiones especificadas en la norma:

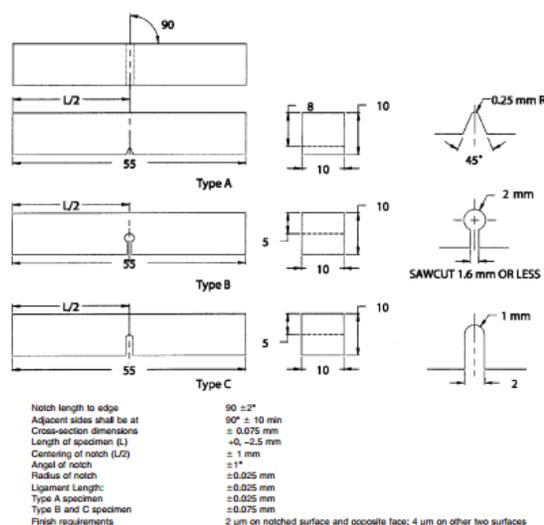


Figura 21 Geometrías de las probetas, ensayos Charpy

Fuente: (American Society of Testing Materials - ASTM, 2017)

2.6.5.2. Preparación de probetas

Por cuestiones de repetitividad de condiciones durante los ensayos en las diferentes máquinas a utilizarse, se debe tomar otros valores en la geometría de la probeta, los cuales no están especificados por la norma. Para estos casos se utiliza la corrección de tamaño, que se basa en un factor de normalización.

La geometría de una probeta tipo Charpy se muestra a continuación:

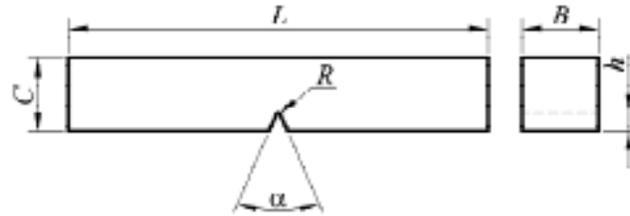


Figura 22 Geometría de una probeta tipo Charpy.

Fuente: (Matusevich, Mancini, & Giudici, 2017)

Por lo que los factores de normalización de la probeta estándar con la probeta no estándar se igualan.

$$E_{estandar} = \frac{L_{estandar}}{L_{no-estandar}} E_{no-estandar} \quad [2.48]$$

CAPÍTULO III

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ACCESORIOS

3.1. Diseño Mecánico

Los accesorios deben cumplir con los requerimientos tanto geométricos como mecánicos para poder acoplarse a la máquina y en el momento que entren en funcionamiento durante los ensayos, estos garanticen seguridad y repetitividad bajo las mismas condiciones. Los diferentes sistemas constarán de los siguientes elementos:

- Base soporte
- Conector Cilíndrico-Máquina
- Conector Punzón-Cilindro
- Eje pasado
- Percutor
- Tubo conductor

3.1.1. Consideraciones de diseño

- Resistencia
- Fricción o rozamiento
- Confiabilidad y seguridad
- Condiciones térmicas
- Forma
- Rigidez
- Mantenimiento
- Peso

3.1.2. Parámetros de diseño

- Los accesorios deberán ser construidos de una forma tal que las pérdidas de energía debido a vibraciones y efectos no-deseados como deformaciones plásticas, excesiva fricción y temperatura, etc. sobre dichos los elementos sean despreciables durante los ensayos y no afecten a la toma de datos.
- La energía de la máquina utilizada para los ensayos tendrán que ser de más de 294J según la norma NTE INEN-ISO 148-1.
- El centro de impacto entre la probeta y el percutor será en la mitad de los dos elementos.

- Las dimensiones de las vigas tipo probeta no son estándar debido al diseño de las estructura de la máquinas y de la base soporte. Por lo que debe compensarse mediante la ecuación de ajuste.

3.1.3. Dimensionamiento, diseño de piezas y selección de materiales

3.1.3.1. Cálculo de fuerzas y reacciones en la probeta de ensayos

El elemento sobre el cual se someterá los ensayos de impacto y estáticos es diseñado según (American Society of Testing Materials - ASTM, 2017) por lo que mediante la ecuación [2.48]:

$$E_{estandar} = \frac{L_{estandar}}{L_{no-estandar}} E_{no-estandar}$$

$$E_{estandar} = \frac{55 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} E_{no-estandar}$$

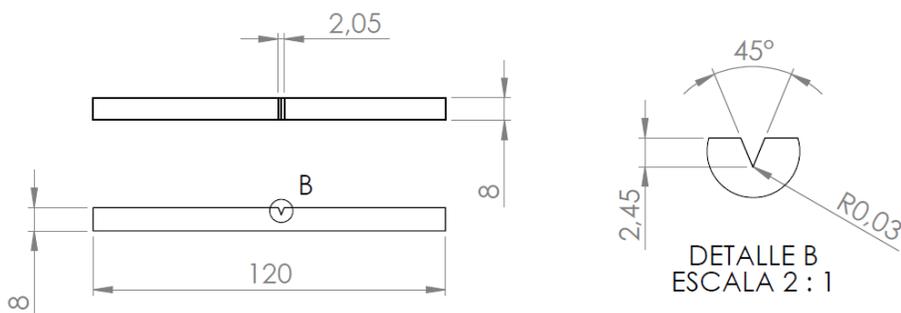


Figura 23 Probeta tipo "V" acero ASTM A 36 para ensayos

Tabla 2

Dimensiones de probetas para los ensayos.

Probetas para ensayos de impacto y estáticos	
Longitud [mm]	120
Base [mm]	8
Altura [mm]	8
Entalle de penetración [mm]	>2
Área transversal [mm²]	64

La fuerza a considerarse para el análisis teórico es la de impacto, debido a que los materiales reaccionan de una forma más crítica ante esta. Dicha fuerza es la que resiste tanto la probeta o la que se genera por el martillo de la máquina al caer. Para su cálculo (Stiopin, 1968), la fuerza de impacto antes del choque en el percutor de un péndulo:

$$F_d = K_d \cdot W \quad [3.1]$$

Donde:

- F_d : Fuerza dinámica de impacto. [N]
- K_d : Factor dinámico.
- W : Peso del péndulo. [N]

Sabiendo que el coeficiente dinámico está dado por:

$$K_d = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{Y_s}} \quad [3.2]$$

Donde:

- K_d : Factor dinámico.
- Y_s : Deformación elástica.
- h : altura de caída del péndulo.

El límite de fluencia se lo determina mediante la ecuación:

$$Y_s = \frac{W \cdot L^3}{48 E \cdot I} \quad [3.3]$$

Donde:

- W : Peso. [N]
- L : Longitud de la probeta. [mm]
- E : Coeficiente de elasticidad del material. [GPa]
- I : Momento de inercia en el área de la sección transversal. [mm⁴]

Y el momento de inercia para la sección transversal de la probeta:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad [3.4]$$

Donde:

- b : Base de la sección. [mm]
- h : Altura de la sección. [mm]

Con las dimensiones de la probeta escogida:

$$I = \frac{0.008 \times 0.006^3}{12} = 144 \text{ [mm}^4\text{]}$$

Siguiendo a la norma INEN 130, se procede a reemplazar los datos en la ecuación [3.3]. Dado que el material de las probetas es ASTM A36 se tiene que (módulo de Young) $E=207$ [GPa] y la longitud de la probeta es 120mm. Y según el peso del péndulo de máquina de impacto el cual es de 26.285 [Kg].

$$Y_s = \frac{(26.285 \times 9.81) \times 0.12^3}{48 (207 \times 10^9)(1.44 \times 10^{-10})}$$

$$Y_s = 3.11 \times 10^{-4} \text{ [m]}$$

Y al analizar con estos datos la ecuación [3.2], si la altura varía de 0 a 100[cm]:

$$K_d = \sqrt{\frac{2(1.00)}{3.11 \times 10^{-4}}}$$

$$K_d = 80.13$$

Por lo que según la ecuación [3.1] la fuerza de impacto que genera el péndulo debido a su peso:

$$F_d = 80.13 \times (26.285 \times 9.81) \text{ [N]} = 20664.2 \text{ [N]}$$

Para calcular la fuerza máxima en la probeta, comenzamos con conceptos de estática. El material de la probeta es acero ASTM A36, cuya resistencia última varía entre: $S_{ut} = 400 - 550$ [MPa], por lo se considera la mayor.

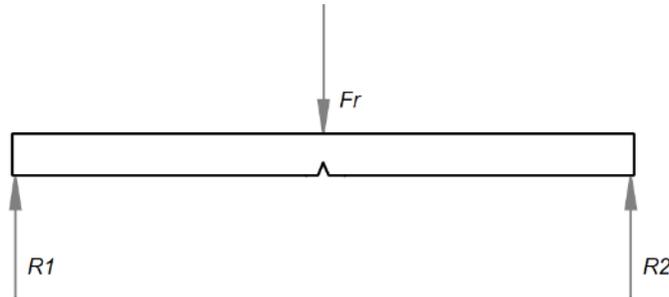


Figura 24 Reacciones en la probeta

Se realiza la sumatoria de fuerzas en el eje Y.

$$R1 = R2 = \frac{F_r}{2}$$

Mientras que el momento máximo se calcula mediante:

$$M_{max} = Z \cdot \frac{S_{ut}}{2} \quad [3.5]$$

Donde:

- M_{max} : Momento Flector máximo. [Nm]
- z : Módulo de sección rectangular. [m³]
- S_{ut} : Resistencia ultima. [MPa]

El módulo de sección para una base rectangular como la del análisis:

$$Z = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad [3.6]$$

Donde:

- b y h : Son las dimensiones de la sección rectangular. [mm]

El momento que se analiza la sumatoria de momentos en el punto de impacto de la probeta, se tiene:

$$M_{max} = F_r \times \frac{L}{4}$$

Se reemplaza con la longitud de la probeta, en este análisis 120 [mm].

$$M_{max} = F_r \times \frac{0.12}{4}$$

$$M_{max} = 0.03 F_r$$

Se define los siguientes valores de $b=0.008\text{m}$ y $h=0.005\text{m}$, y reemplazando las ecuaciones [3.5] y [3.6]:

$$Z \cdot \frac{S_y}{2} = 0.03 F_r$$

$$F_r = \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{S_y}{2} \cdot \frac{1}{0.03}$$

$$F_r = \frac{0.008 \times 0.006^2}{6} \cdot \frac{550 \times 10^6}{2} \cdot \frac{1}{0.03}$$

$$F_r = 440 [N]$$

3.1.3.2. Diseño del percutor de ataque

El percutor constituye el principal elemento para este tipo de ensayos, debido a que es este el que resiste todo el golpe generado por el péndulo sobre la probeta o si es el caso toda la presión generada por la máquina para los ensayos estáticos. Por lo que dependiendo de los requerimientos debe cumplir con propiedades mecánicas como la resistencia a la fractura por impacto. Garantizando que el elemento no cause ningún inconveniente debido a que este debe quedar bien sujeto para ambos casos. Se tiene el siguiente diseño acoplable tanto como para la cabeza del martillo de impacto como para el accesorio de sujeción para la máquina de ensayos universales.

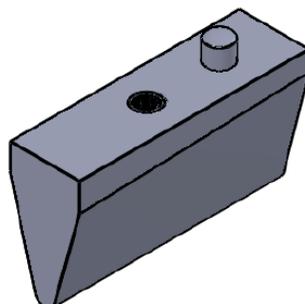


Figura 25 Dimensionamiento del percutor.

El material debido a las características mecánicas requeridas para el trabajo debe ser capaz de resistir elevadas cargas, por lo el acero K100 es adecuado.

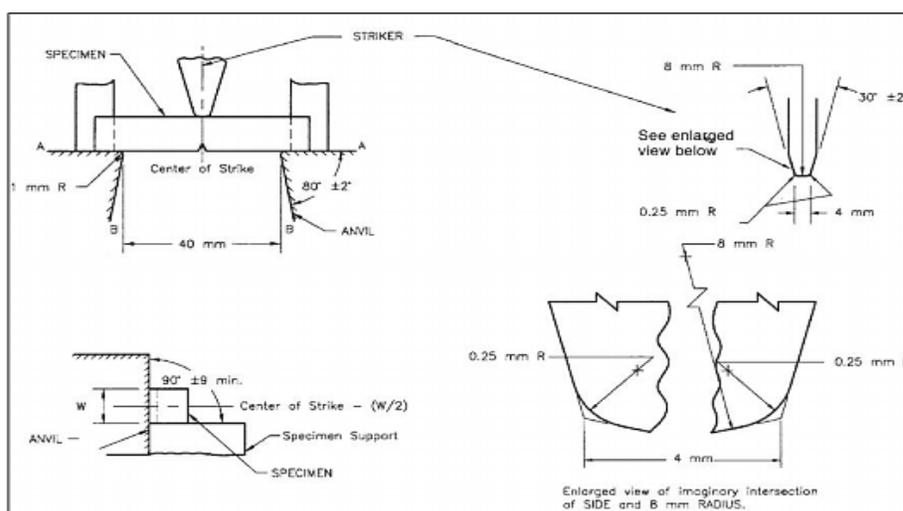


Figura 26 Diseño del percutor

Fuente: (American Society of Testing Materials - ASTM, 2017)

El diseño geométrico es realizado para que pueda ser extraíble tanto del martillo como del accesorio de sujeción estático, con una guía cilíndrica para alinearlos y un agujero roscado para acoplarlo con un perno de 1/5 de pulgada.

Sobre el percutor se puede presentar esfuerzos a lo largo de los puntos B-B', al igual que a lo largo de los puntos A-A', para ambos casos se tiene un esfuerzo transversal.

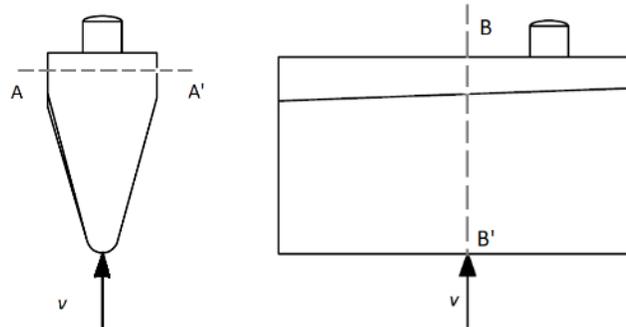


Figura 27 Análisis de esfuerzos en el percutor.

3.1.3.2.1. Análisis de esfuerzos a lo largo de los puntos AA' Y BB'

Primero se calcula el momento de inercia de la sección transversal del corte A-A', con los datos del área correspondiente, mediante la ecuación [3.4]:

$$I = \frac{0.04605 \times (0.01309)^3}{12} = 8.607 \times 10^{-9} [m^4]$$

Para el cálculo del esfuerzo cortante máximo (Hall, Holowenko, & Laughlin, 1971) con la ecuación [3.6], se tiene:

$$\tau_{max} = \frac{M \cdot C}{2 \cdot I} \quad [3.7]$$

Donde:

- I : Momento de inercia. [m^4]
- M : Momento de la fuerza resistente. [Nm]
- C : Distancia desde la línea neutra al punto más lejano de máximo esfuerzo. [m]

Como se trata de un esfuerzo cortante transversal según (Hall, Holowenko, & Laughlin, 1971), y usando la ecuación [3.7], y puesto que el análisis se lo hace donde el esfuerzo es máximo para B-B'.

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot V}{2 \cdot A} \quad [3.8]$$

Donde:

- τ_{max} : Esfuerzo cortante transversal. [MPa]
- V : Es la fuerza cortante. [N]
- A : Área de la sección transversal. [m²]

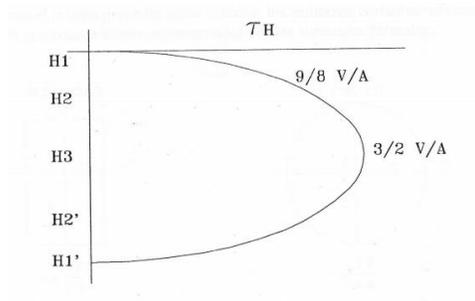


Figura 28 Relación de esfuerzo cortante en vigas y la distancia a la línea neutra

Fuente: (Pérez, 2011)

Tomada el área del corte B-B' de la geometría propuesta se procede a reemplazar los resultados de la fuerza crítica.

$$\tau_{max} = \frac{3 (440)}{2 (2.4176 \times 10^{-4})} = 27299.8 [KPa]$$

En teoría de impacto cuando este se da súbitamente se debe considerar un factor dinámico de 2, por lo que los esfuerzos y deformaciones en el momento del impacto dinámico serán dos veces mayores en comparación si se aplicaran cargas estáticas, considerando previamente que el esfuerzo cortante estático es máximo.

El esfuerzo cortante máximo dinámico en la sección de análisis durante el impacto según (Stiopin, 1968):

$$\tau_{maxd} = Kd \cdot \tau_{max} \quad [3.9]$$

Donde:

- τ_{max} : Esfuerzo cortante estático máximo. [MPa]
- Kd : Factor dinámico de carga igual a 2.

Se tiene:

$$\tau_{maxd} = 2 \times 27299.8 [KPa] = 54599.6 [KPa]$$

La falla del material se produce cuando el esfuerzo cortante máximo según (Budynas, R.G., 2008) supera al límite de la fluencia en:

$$\tau_{maxd} = 0.577 \frac{S_y}{n} \quad [3.10]$$

Donde:

- S_y : Límite de fluencia. [MPa]
- n : Factor de seguridad.

Se considera el límite de fluencia del acero K100 igual a 450 [MPa] e igualando con los resultados obtenidos por la ecuación [3.9], calculamos el factor de seguridad con el que nuestro percutor cuenta para resistir el impacto de los ensayos posteriores.

$$\tau_{maxd} = 0.577 \times \frac{450\,000 [KPa]}{n} = 54599.6 [KPa]$$

$$n = 4.75$$

Como el factor dinámico de carga (igual a 2) ya entró en el análisis, pues se tendría un factor de seguridad final de 9.5, se asegura que cada impacto no afectará significativamente a la integridad del percutor y se garantiza una vida útil larga.

Se realiza un análisis estático por elementos finitos en el percutor con la fuerza máxima de impacto que es de 440 [N], aplicando un mallado fino y teniendo como restricciones de movimiento toda la cara superior, las paredes del cilindro conductor y la entrada del tornillo, se calcula los esfuerzos mínimos y máximos así como las deflexiones, en el momento del impacto.

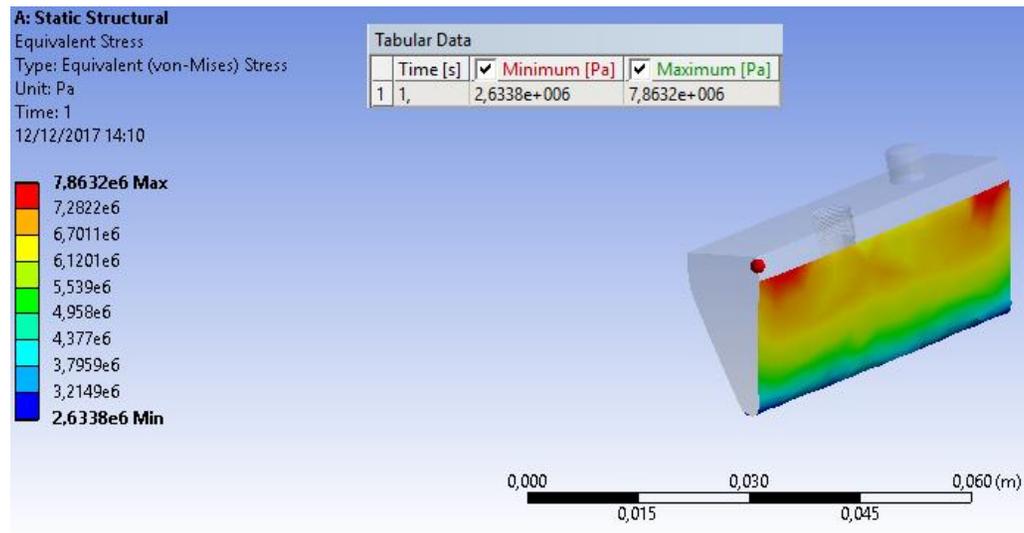


Figura 29 Análisis estático de VonMises - Percutor

Se estudia los desplazamientos y la deformación unitaria en el momento del impacto.

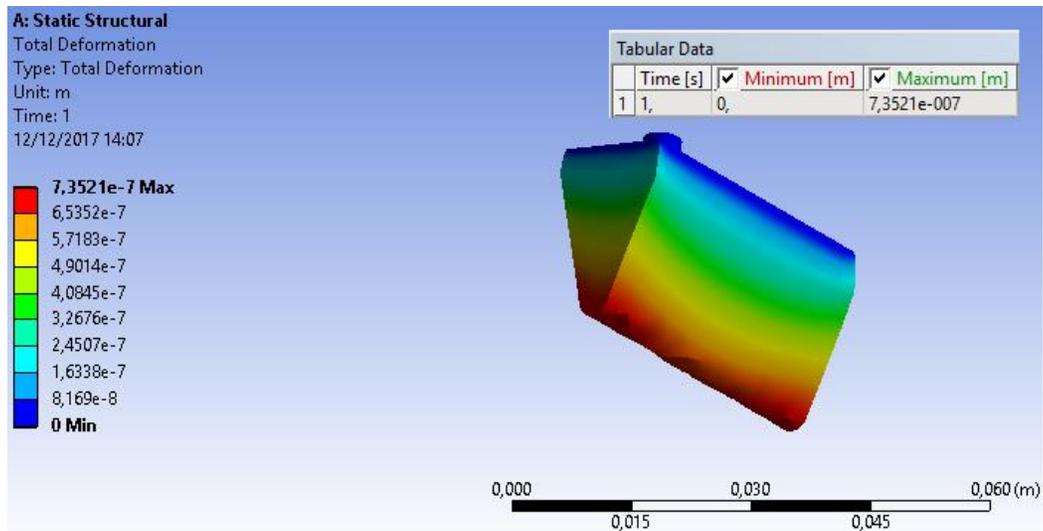


Figura 30 Análisis de desplazamientos –Percutor.

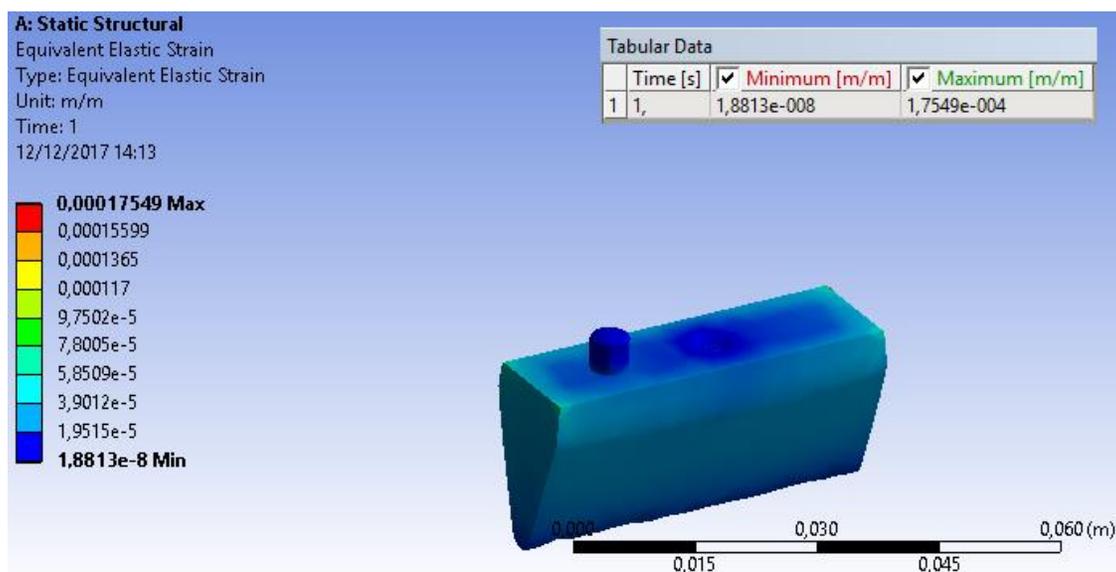


Figura 31 Análisis de deformación unitaria - Percutor.

Por último se verifica el valor del factor de seguridad que debe tener el percutor.

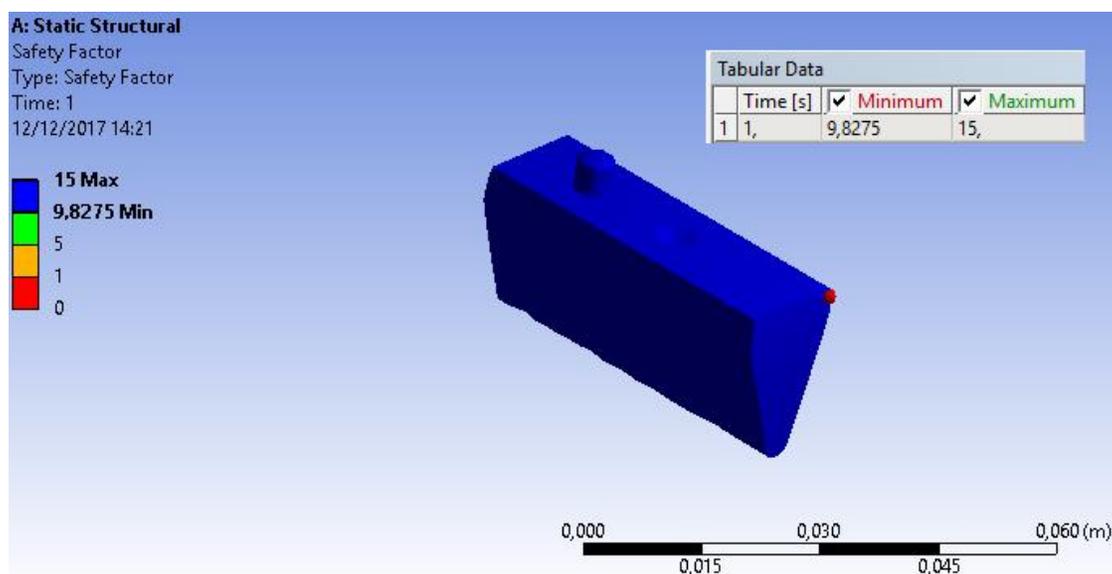


Figura 32 Análisis de factor de seguridad - Percutor.

Las propiedades del percutor quedan definidas en la tabla 3:

Tabla 3
Propiedades Mecánicas Percutor

Propiedad	Valor
Material	Acero K100
Densidad	7850 Kg/m ³
Volumen	11.079 cm ³
Área de la superficie	38.708 cm ²
Masa	0.0869 Kg
Peso	0.83 N
Fds-Max	15
Fds-Min	9.82
VonMises-Max	7.86 [MPa]

3.1.3.3. Diseño accesorio de sujeción punzón-acoplado

Estableciendo como parámetro de diseño los valores de fuerza máximo dados por la máxima resistencia que las probetas grandes pueden soportar hasta que se produzca el fallo, los valores que máquina de ensayos universales puede brindar y considerando el análisis de diseño del percutor.

Dentro de un análisis estático para la resistencia de las probetas ASTM A36 según (Shigley & Mischke, 2002), para el caso de apoyos simples con una carga central el momento flector máximo viene dado por la siguiente expresión:

$$M = \frac{F \cdot x}{2} \quad [3.11]$$

Donde:

- M : Momento flector máximo a lo largo de la viga. [Nm]
- F : Fuerza aplicada. [N]
- x : Distancia desde el punto de referencia para el análisis hasta el punto donde se aplica la fuerza. [m]

El esfuerzo sobre las vigas tipo probeta debido al momento flector se calcula según (Shigley & Mischke, 2002) mediante:

$$\sigma_f = \frac{M \cdot y}{I} \quad [3.12]$$

Donde:

- σ_f : Esfuerzo debido al momento flector. [MPa]
- M : Momento flector. [Nm]
- y : Distancia medida desde la línea neutra a la periferia. [m]
- I : Momento de área de la sección transversal. [m⁴]

Igualando la ecuación [3.11] con [3.12] y reemplazando las propiedades mecánicas y geométricas de las vigas tipo probeta.

$$\therefore M = \frac{(250 \times 10^6 [Pa]) \left(\frac{0.008 \times 0.006^3}{12} [m^4] \right)}{0.001} = \frac{F \cdot (0.06)}{2}$$

$$F = 1200 [N]$$

La cual es la fuerza para realizar el diseño, se propone una geometría respecto al acople cilíndrico con el que cuenta el laboratorio para la máquina, sin olvidar las consideraciones de seguridad indicadas para el percutor y teniendo en cuenta que este se pondrá en uso únicamente para pruebas estáticas.

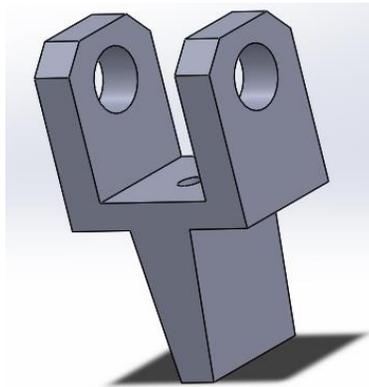


Figura 33 Dimensionamiento accesorio de sujeción.

Sobre este diseño la zona de mayor esfuerzo se encuentra sometida a un esfuerzo flexionante en la sección central de 10 x 46 [mm]. Según (Shigley & Mischke, 2002) para el caso de apoyos simples con carga distribuida.

$$M = \frac{q}{2}(Lx - x^2) \quad [3.13]$$

Donde:

- M : Momento flector para cargas distribuidas. [Nm]
- q : Carga distribuida. [N/m]
- L : Longitud da la viga. [m]
- x : Distancia a la que está aplicada la fuerza en la viga, [m]

Se determina la carga distribuida.

$$Q = q \times a \quad [3.14]$$

Donde:

- Q : Es la fuerza equivalente de la carga distribuida en un punto. [N]
- a : La distancia sobre la cual se encuentra aplicada la carga. [m]

$$q = \frac{1200[N]}{0.026 [m]} = 46153.84 \left[\frac{N}{m} \right]$$

Y sobre la ecuación [3.13].

$$M = \frac{46153.84}{2} ((0.12) \times 0.0305 - (0.0305)^2) = 63 [Nm]$$

Con la ecuación [3.12] determinamos el esfuerzo al que se encuentra sujeta esta sección.

$$\sigma_f = \frac{63 \times 0.005}{\frac{0.046 \times 0.01^3}{12}} = 82173913.04 [Pa]$$

Se escoge el acero ASTM A131 con una resistencia a la fluencia de 32 ksi (220[MPa]), teniendo un factor de seguridad calculado según el criterio de diseño:

$$\text{esfuerzo admisible} = \frac{\text{limite de fluencia}}{\text{factor de seguridad}}$$

$$\sigma_{admi} = \frac{S_y}{n} \quad [3.15]$$

$$n = \frac{220}{82.173} = 2.67 \approx 3$$

El análisis de este acople se realizará mediante un mallado fino y las restricciones de movimiento en las paredes de los dos agujeros cilíndricos, para determinar los esfuerzo y deformaciones a la mayor carga aplicada de 1200 [N] en la parte inferior donde se une el percutor de ataque.

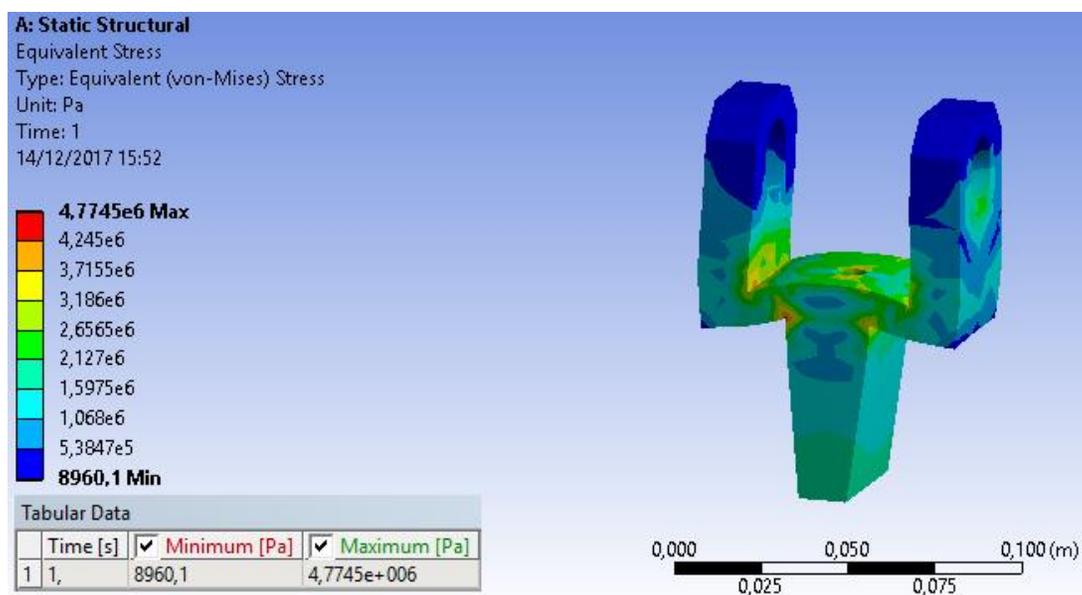


Figura 34 Análisis estático de VonMises - Acople.

Se analiza los desplazamientos y la deformación unitaria en el momento que se aplica la carga.

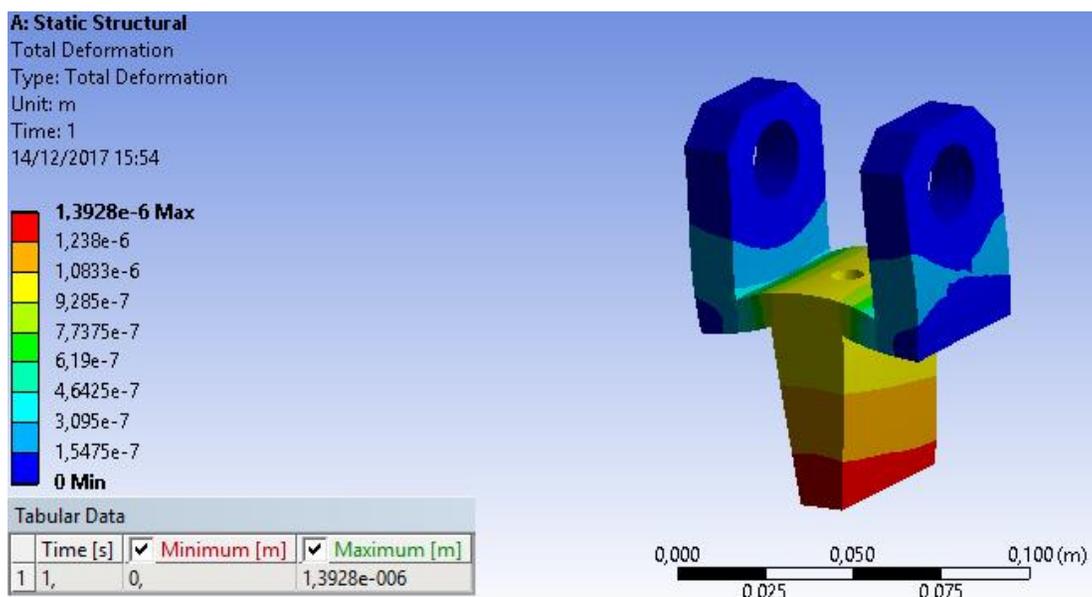


Figura 35 Análisis de desplazamientos - Acople.

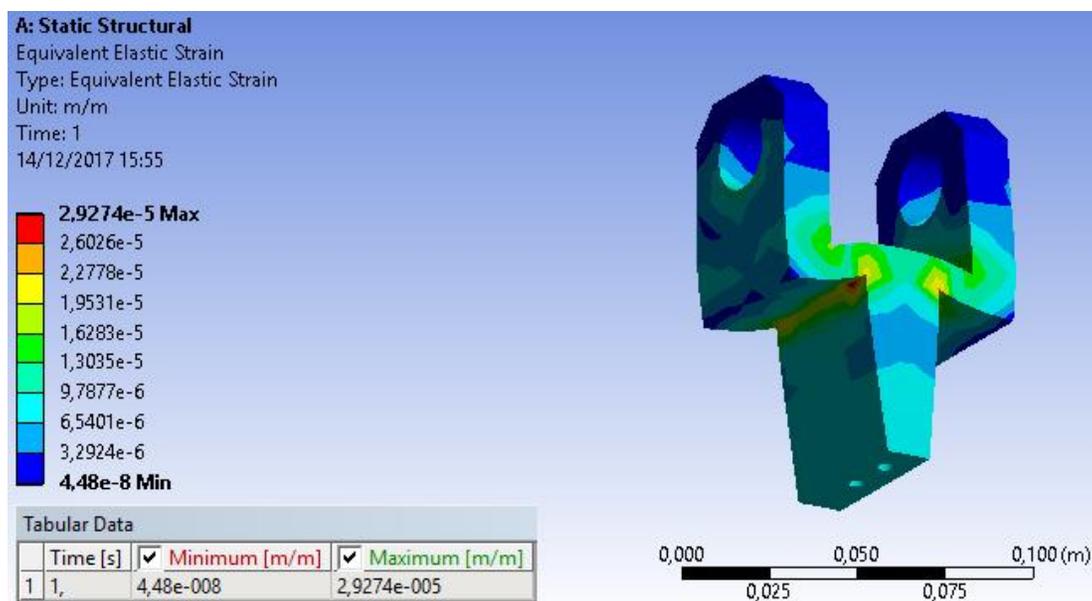


Figura 36 Análisis de deformación unitaria - Acople.

Las propiedades del acople quedan definidas:

Tabla 4
Propiedades Mecánicas de accesorio de sujeción.

Propiedad	Valor
Material	Acero ASTM A131
Densidad	7850 Kg/m ³
Volumen	143.0683 cm ³
Área de la superficie	309.6346 cm ²
Masa	1.123 Kg
Peso	11.017 N
Fds-Min	3
VonMises-Max	4.77 [MPa]
VonMises-Min	8960.1 [Pa]

3.1.3.4. Diseño del eje sostenedor del punzón cilíndrico

Se plantea una geometría adecuada para los accesorios previamente diseñados y que estos no presenten vibraciones o se salgan de su posición durante la puesta en marcha de los ensayos.

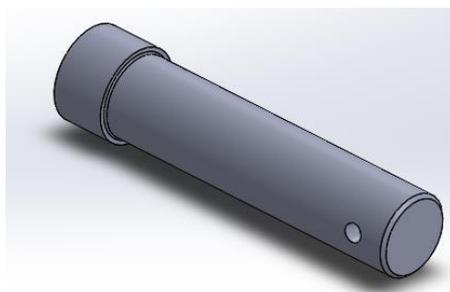


Figura 37 Dimensionamiento de eje sostenedor.

A continuación un diagrama de cuerpo libre sobre el eje para determinar los apoyos y la distribución de fuerzas que este debe soportar durante la máxima carga.

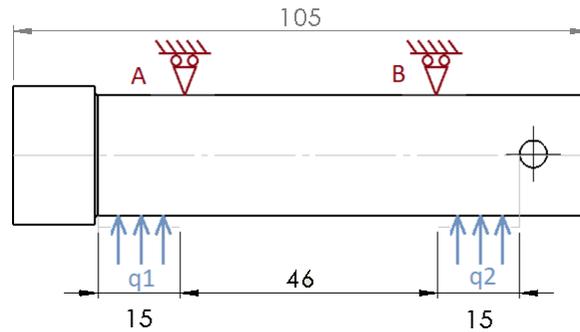


Figura 38 Diagrama de cuerpo libre eje sostenedor.

Donde las medidas están en milímetros, el diámetro del eje es de 22 mm y ambas cargas q son de 46153.84 [N/m]. La inercia de la sección se calcula con la siguiente expresión:

$$I_c = \frac{\pi}{4} r^4 \quad [3.16]$$

$$I_c = \frac{\pi}{4} * (2.2)^4 = 18.3984 [cm^4]$$

Y las reacciones sobre los apoyos A y B:

$$\sum M_A = 0$$

$$q_1 * 0.015 * 0.0075 + R_B * 0.046 - q_2 * 0.015 * 0.0535 = 0$$

$$R_B = 698.58 [N]$$

$$\sum F_y = 0$$

$$46153.84 * 0.015 + 46153.84 * 0.015 - R_A - R_B = 0$$

$$R_A = 686.027 [N]$$

Realiza la simulación en MDSolids 3.5 con los datos.

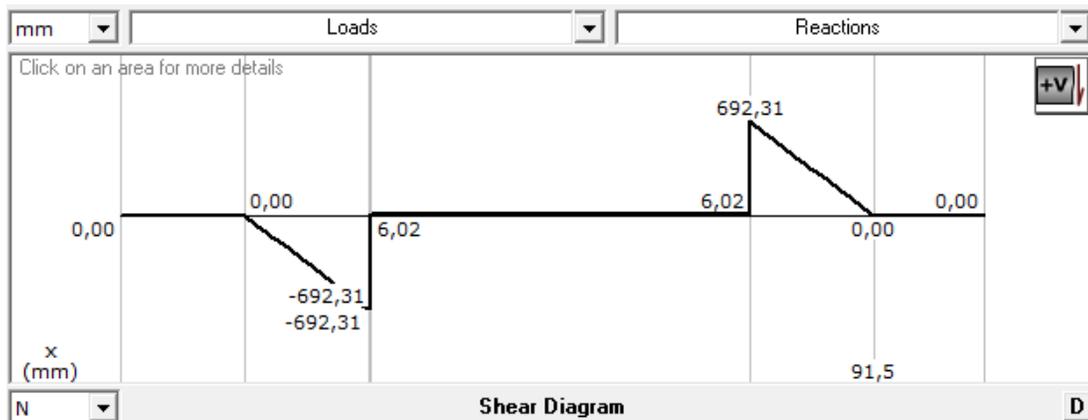


Figura 39 Diagrama de fuerza cortante de eje.

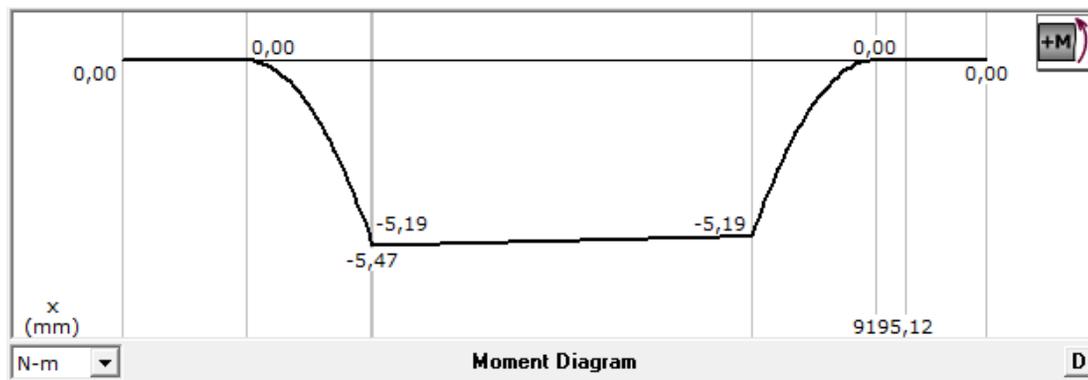


Figura 40 Diagrama de Momento Flector de eje.

Las características del acero de transmisión AISI 1018, el cual es el que se utilizara para la construcción del eje, son: resistencia a la fluencia: $S_y = 370$ [MPa] y resistencia última a la tensión: $S_{ut} = 440$ [MPa]

Según (Shigley & Mischke, 2002) para calcular el estudio del esfuerzo normal máximo de un elemento de sección circular:

$$\sigma_{max} = \frac{32M}{\pi \cdot d^3} \quad [3.17]$$

Del diagrama de momento flector se tiene que su máximo valor es de 5.47 [Nm].

$$\sigma_{max} = \frac{32(5.47)}{\pi \cdot 0.022^3} = 5232622.321 \text{ [Pa]}$$

Se utiliza el criterio de diseño de la ecuación [3.15] para evaluar el factor de seguridad del eje:

$$5232622.321 [Pa] = \frac{370 \times 10^6 [Pa]}{n}$$

$$n \approx 70$$

Para la simulación en el proceso CAE se utiliza un mallado fino y una restricción de movimiento en toda la sección central, donde se especificó los apoyos en la figura 38, para poder definir el análisis de los esfuerzos de VonMises y los desplazamientos correspondientes.

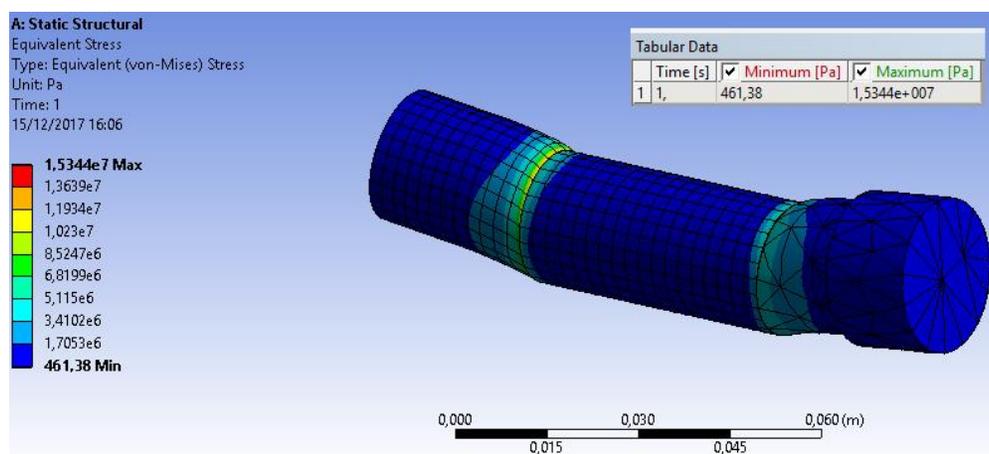


Figura 41 Análisis de VonMises eje.

Se analiza los desplazamientos y la deformación unitaria en el momento que se aplica la carga estática.

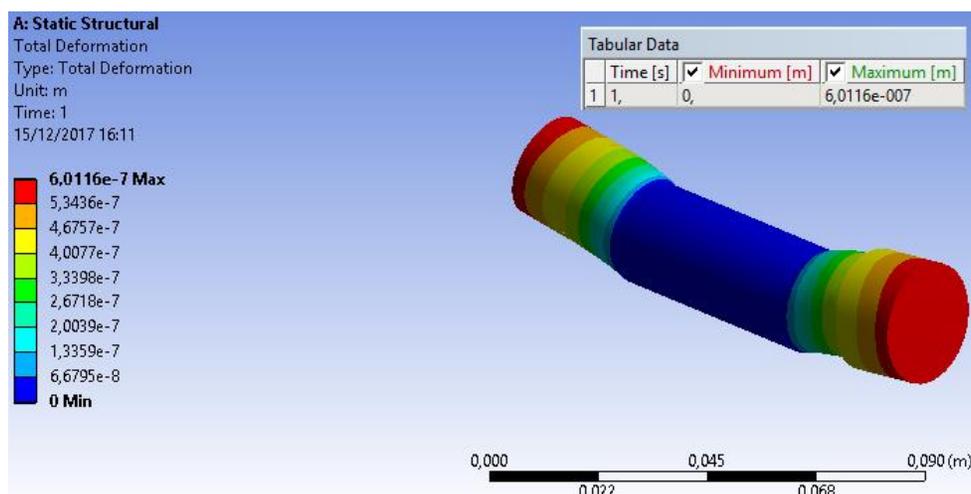


Figura 42 Análisis de desplazamientos en el eje.

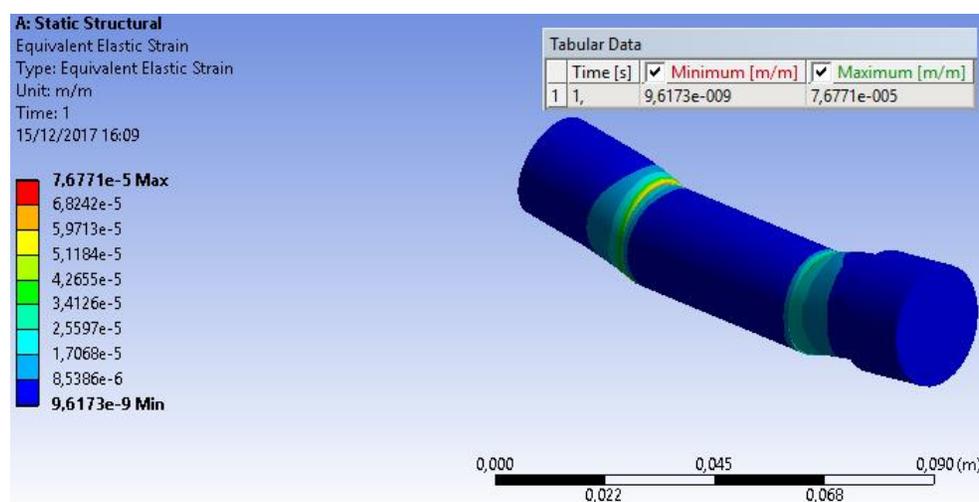


Figura 43 Análisis de deformación unitaria del eje.

Para verificar los altos valores del factor de seguridad debido al dimensionamiento ajustado a los demás accesorios y asegurar que el eje no presente ningún inconveniente al momento de los ensayos.

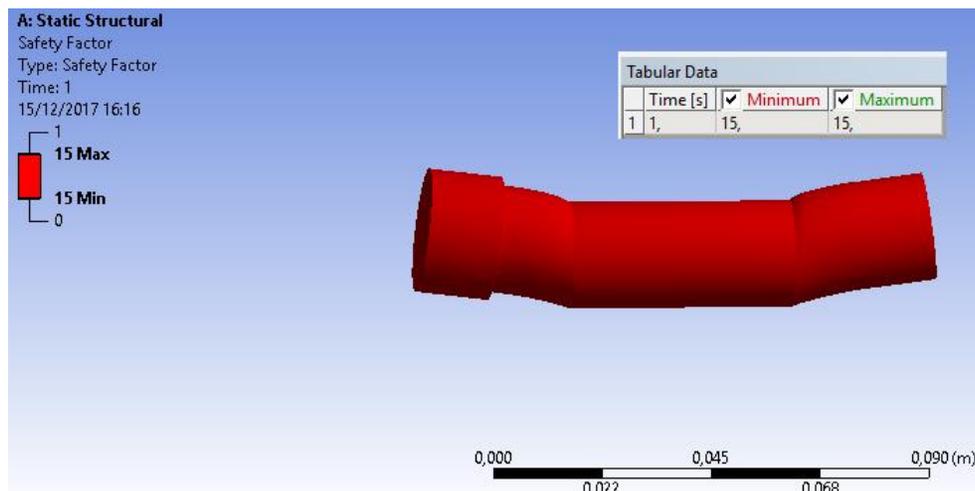


Figura 44 Análisis del factor de seguridad eje.

Se observa que tanto los valores máximos como mínimos marcan 15, esto es debido a que dentro del código del programa únicamente se considera como valor tope este, se tiene que el factor de seguridad se encuentra en valores mucho más altos.

3.1.3.5. Diseño de tubo conductor para pruebas de caída libre

Para la evitar que las masas se desvíen durante la caída libre y a demás controlar la altura a la que se realizará los diferentes ensayos se plantea utilizar un tubo PVC de 1 ½" de diámetro y 125 [cm] de longitud, 1.5 [mm] de espesor, graduado a una escala de 1 a 110 [cm] y con agujeros pasantes de 3/8" cada 10 [cm]. Y una hendidura de 4 [cm] de altura y 1 [cm] de ancho para la salida del cable de conexión.

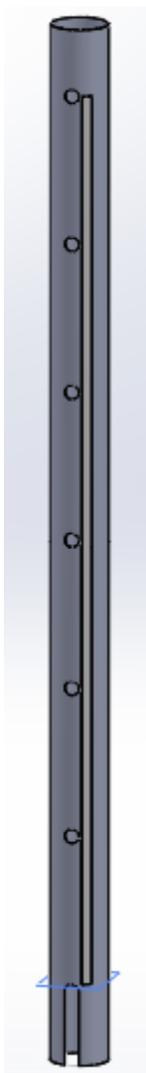


Figura 45 Dimensionamiento de tubo conductor.

3.1.3.6. Diseño amortiguadores de impacto para celda de carga

Para evitar que la celda de carga del equipo Quantrol “Advanced Forcé& Torque Indicador-AFTI” sufra deformaciones ante la caída de las masas de prueba durante los ensayos se opta por una geometría parecida a la misma, un cilindro de diámetro de 35 [mm] con tres agujeros de 1/8” separados 120° para sujetarlos mediante pernos a ambos lados.

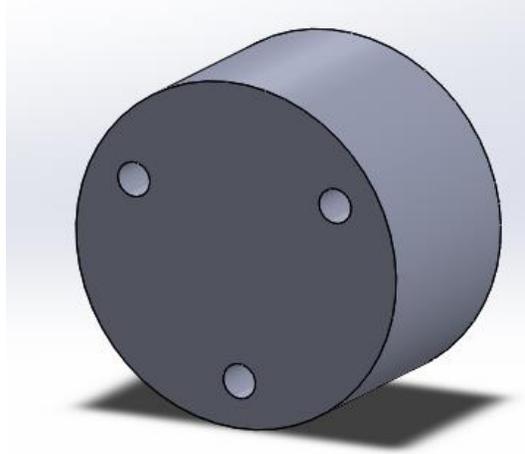


Figura 46 Dimensionamiento de amortiguadores.

Se considera la mayor fuerza con la que puede llegar la masa más grande al impactar desde una altura de 1 [m]. Dado que el trabajo de estos amortiguadores es evitar que la celda de carga se deforme el material elegido es el nylon.

Utilizando la ecuación [2.2]

$$E_p = (0.679[Kg]) \times 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times 1[m] = 6.66[J]$$

Según (G. Ayala, 2011) el principio de la conservación de la energía para choques inelásticos se utilizan las siguientes ecuaciones. Antes del impacto:

$$v_{fa} = \sqrt{2 \times a \times h} \quad [3.18]$$

Donde:

- v_{fa} : Velocidad final antes del impacto. [m/s]
- a : Aceleración, para caída libre 9.81 [m/s²]
- h : Distancia recorrida. [m]

$$v_{fa} = \sqrt{2 \times 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times 1[m]} = 4.43 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Y para la fuerza de impacto para una masa de 0.679 [kg]:

$$F_I = \frac{1}{2} \times m \times \frac{(v_{fa})^2}{D} \quad [3.19]$$

Donde:

- m : Masa de objeto en caída. [Kg]
- D : Distancia de frenado del objeto en movimiento después del impacto. [m]

$$F_I = \frac{1}{2} \times (0.679[\text{Kg}]) \times \frac{(4.43 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right])^2}{(0.035[\text{m}])} = 190.32 [\text{N}]$$

Para la simulación de un análisis dinámico se debe definir los dos cuerpos que colisionarán y la velocidad antes del impacto, para ambos se considera un mallado fino y las propiedades mecánicas del nylon.

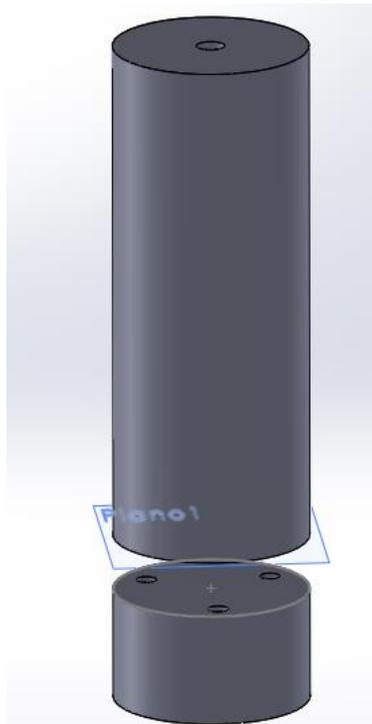


Figura 47 Masa de prueba grande y amortiguador de nylon.

Se tiene primero el análisis de VonMises para verificar que el material no sufre una deformación considerable. Para ambos elementos justo 0.04 [s] después del choque se tiene:

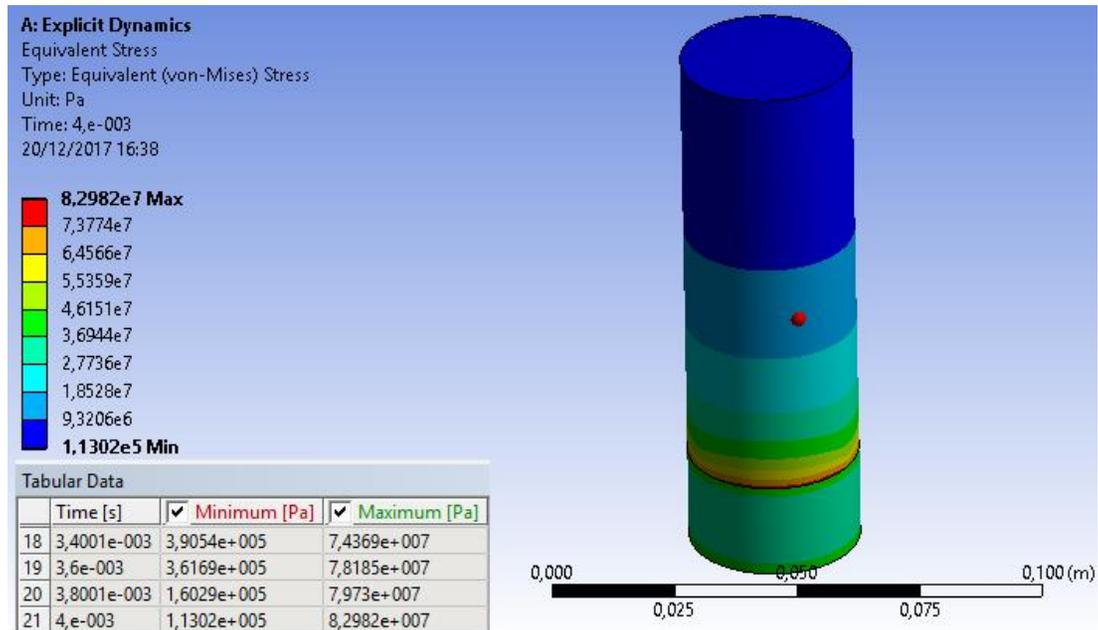


Figura 48 Análisis de VonMises impacto amortiguador y cilindro de prueba.

Por lo que para el elemento de diseño.

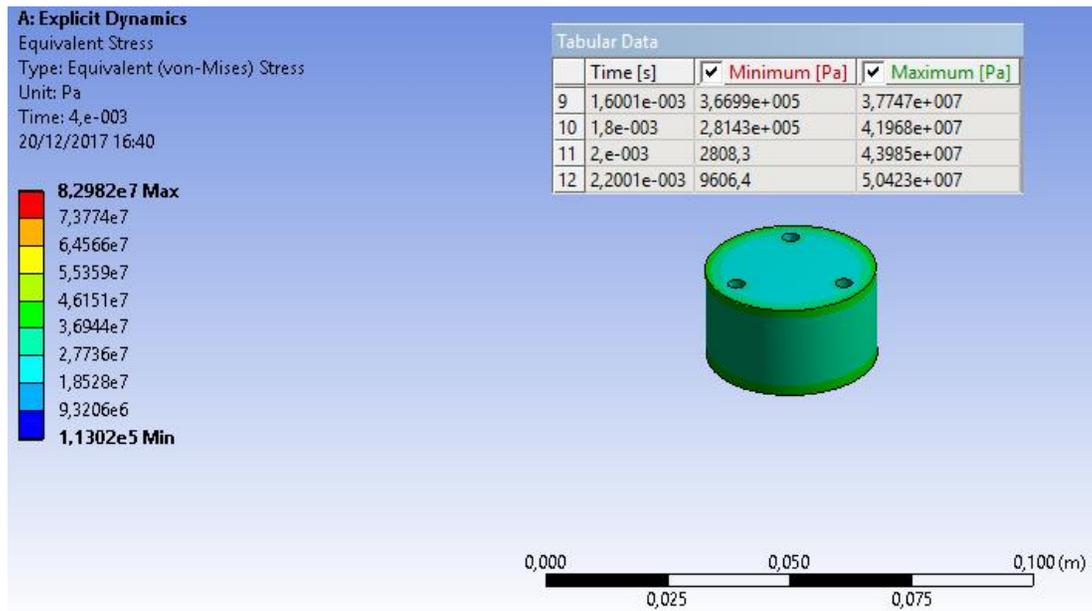


Figura 49 Análisis de VonMises Amortiguador de Nylon.

Se analiza los desplazamientos y la deformación unitaria en el momento del impacto.

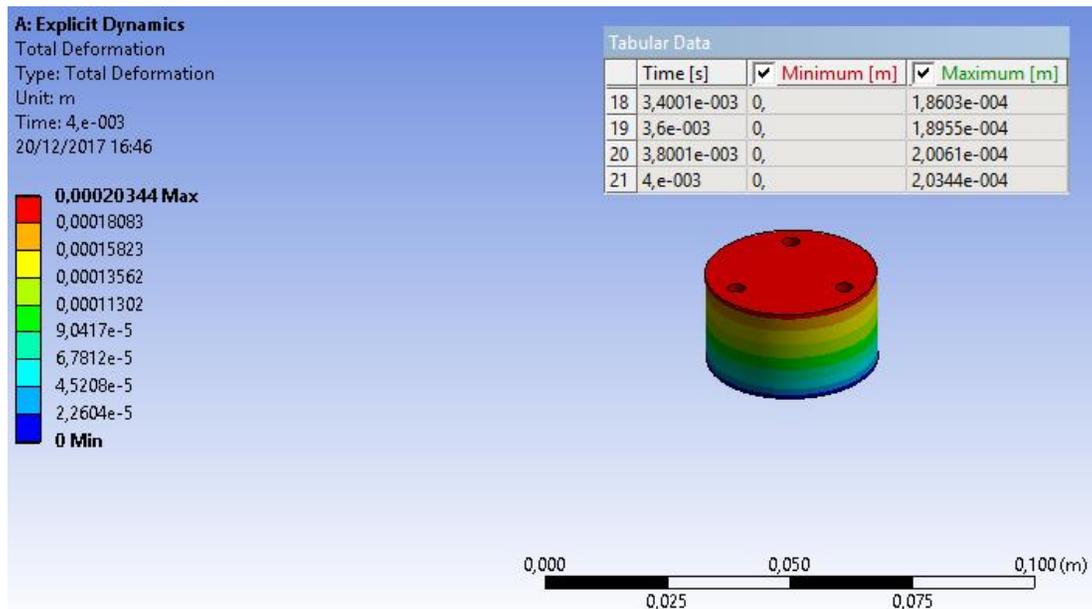


Figura 50 Análisis de desplazamiento de amortiguador de nylon.

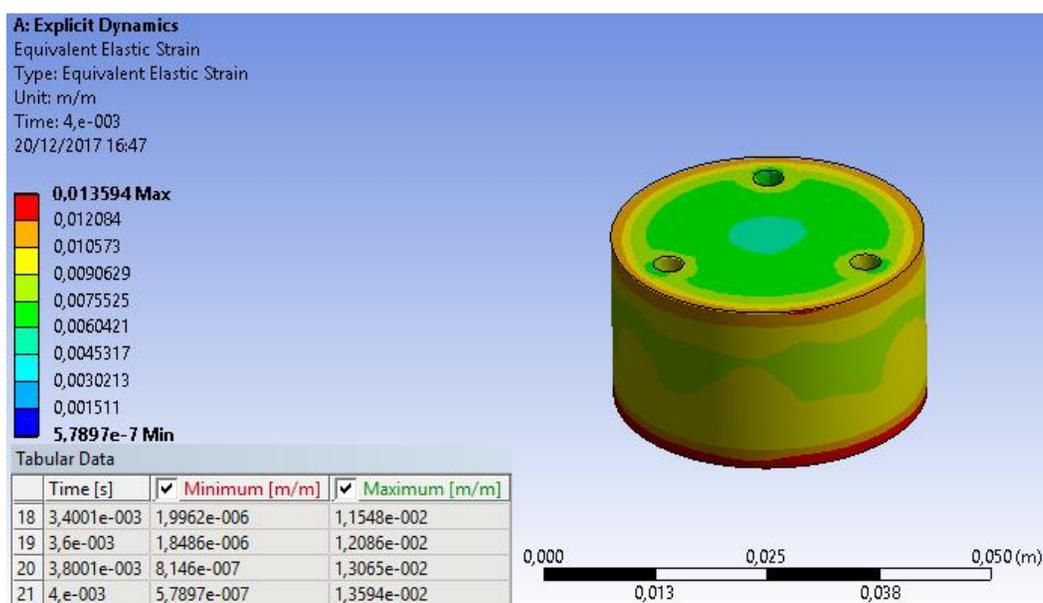


Figura 51 Análisis de deformación unitaria de amortiguador de nylon.

Por lo que las propiedades quedan definidas:

Tabla 5

Propiedades Mecánicas de amortiguador de nylon

Propiedad	Valor
Material	Nylon
Densidad	1150 Kg/m ³
Volumen	18.665 cm ³
Área de la superficie	47.2535 cm ²
Masa	0.0214 Kg
Peso	0.21 N
VonMises-Max	50.423 [MPa]
VonMises-Min	9606.4 [Pa]

3.2. Fabricación de Probetas y Cilindros de prueba

3.2.1. Probetas

Se define los Aceros ASTM A36 y SAE 1040, como materiales para las probetas. Según un análisis estadístico para el tamaño de la muestra desconociendo el tamaño

de la población, se determina cuantas probetas se deben ensayar para poder asegurar que los resultados obtenidos sean confiables:

$$n_{opt} = \frac{Z^2 \times p \times q}{d^2} \quad [3.20]$$

Donde:

- n_{opt} : Tamaño de la muestra.
- Z : Nivel de confianza.
- p : Probabilidad de éxito o proporción esperada.
- q : Probabilidad de fracaso.
- d^2 : Precisión (error máximo admisible en términos de proporción).

Se tiene una distribución normal bilateral con una confiabilidad del 95%. Según el nivel de significación: $\alpha = 5\%$ y al ser bilateral $\alpha / 2 = 2.5\%$, mediante tablas se determina el valor: $Z = \pm 1.962$. Se asume una precisión: $d = 10\%$ y una probabilidad de éxito: $p = 4\%$. Y se tiene:

$$n_{opt} = \frac{(1.962)^2 \times (0.04) \times (0.96)}{(0.1)^2} \approx 14$$

En total se deberían construir 28 probetas para los dos tipos de ensayos, sin contar con las muescas que se realizarán posteriormente. Pero por cuestiones de errores sistemáticos u aleatorios en la medición que puedan presentarse o fallas en los equipos durante la prueba que alteren la adquisición de datos y se deba desechar los resultados, se construyen 40 probetas, es decir, se tiene:

Tabla 6
Número y tipo de probetas a construirse

Número de probetas	Material	Dimensiones [mm]	Profundidad de la Muesca [mm]
14	SAE 1040	5x5x120	2
4		5x5x120	3
22	ASTM A 36	8x8x120	2

Todas son cortadas mediante sierra semiautomática y pasadas por una rectificadora de planicidad, para luego utilizando una fresa de disco M310 para devastar las ranuras de la muescas exactamente en la mitad de las misma.

3.2.2. Cilindros de Prueba

Para el caso de los cilindros de prueba se opta por tres cilindros de diferentes alturas para variar considerablemente las masas. Todos torneados a partir de un eje de transmisión sólido AISI 1018 de 1 ½ " y refrentados para mantener planos los lados, dado que se necesita fijar el contra punto se realiza un vaciado cilíndrico primero de diámetro 5 [mm] y a una profundidad aproximada de 6 [mm] justo en el centro de una de las cara previamente rectificadas.

El primero es un cilindro pequeño al cual se tornea hasta llegar a un diámetro de 35 [mm] y una altura de 50 [mm].

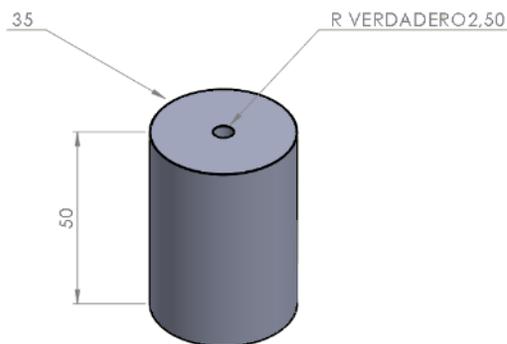


Figura 52 Dimensiones cilindro de prueba pequeño.

El segundo cilindro se tornea a un diámetro igual de 35 [mm] hasta la altura de 70 [mm].

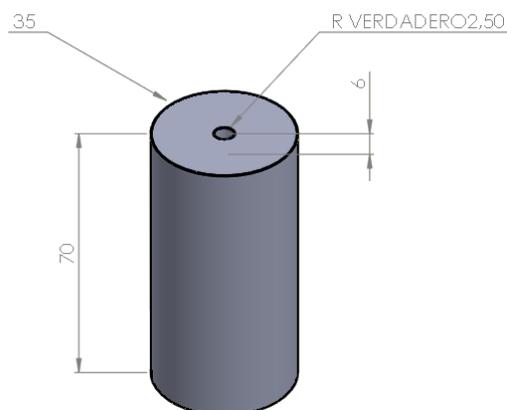


Figura 53 Dimensiones cilindro mediano.

Por último el cilindro de prueba más grande al mismo diámetro 35 [mm] pero a una altura de 90 [mm].

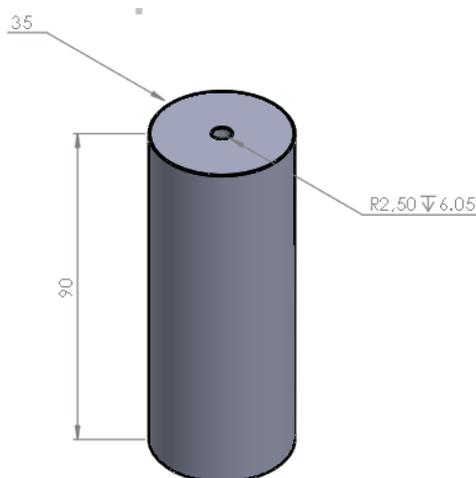


Figura 54 Dimensiones cilindro grande.

Considerando que los materiales fueron adquiridos en los mercados locales, las geometrías y la importancia de las tolerancias en la fabricación exigidas para los ensayos. Se puede asegurar que todos los elementos cumplan durante y después de la puesta en marcha de las máquinas, cautelando siempre la seguridad del operario y la fácil medición de los instrumentos.

CAPÍTULO IV

4. PROTOCOLO DE PRUEBAS

4.1. Plan de pruebas

Antes de la puesta en marcha de los ensayos, primero se plantea un diagnóstico de las condiciones de los componentes, accesorios e instrumentos para cada una de las máquinas que se utilizarán.

4.1.1. Equipos a utilizarse

4.1.1.1. Ensayos universales: MTS TK/T5002 y AMSLER RM-09

La Universidad de la Fuerzas Armadas – ESPE adquirió las máquinas de ensayos universales cuando su tecnología era considerada una de las mejores para su tiempo. Debido al transcurso del tiempo estos equipos han ido quedando obsoletos debido al avance tecnológico actual.

La MTS TK/T5002 con una capacidad de 500 [kgf] dispone de accesorios para realizar ensayos de tracción, compresión y flexión y también el software para el análisis de los mismos, además su celda de carga tipo “C” ha sido reemplazada por una tipo “S” en el 2006 por lo cual utiliza dos softwares diferentes, una para la nueva celda y otra para los equipos de control y monitoreo de la máquina. La S se la utiliza para graficar la curva fuerza-tiempo mediante un display instalado para optimizar los ensayos.



Figura 55 Máquina: MTS TK/T5002

La máquina cuenta con un accesorio acoplable, el cual sirve como soporte para las probetas y controla la separación entre apoyos. Por lo que se recomienda revisar principalmente la correcta adquisición de datos y es necesario borrar el archivo entre pruebas, ya que el software de la máquina graba automáticamente los datos en un formato .csv en el dispositivo de almacenamiento conectado en su puerto USB.



Figura 56 Máquina: AMSLER RM-09

También se ve la necesidad de utilizar el equipo AMSLER RM-09 por lo que sobre este se montarán los accesorios ya diseñados:

- Percutor de ataque para pruebas de impacto y estáticas.
- Accesorio de sujeción punzón- acoplado al cilíndrico.
- Eje sostenedor del punzón cilíndrico.

Y para asegurar la repetitividad de los ensayos se utilizará el mismo soporte que en la máquina MTS TK/T5002.

4.1.1.2. Quantrol “Advanced Force & Torque Indicador-AFTI”

El equipo que se utiliza en la medición de la fuerza de impacto es el mismo que antes se empleaba en la máquina MTS TK/T5002 para medir la fuerza aplicada sobre los especímenes a analizarse y con él se la calibra actualmente. De la serie T (507) 238 – 4461 y F (507) 238 – 8258, y cuenta con un controlador de 1000 Armstrong.



Figura 57 Equipo: Quantrol “Advanced Force & Torque Indicador-AFTI”

Para su correcto uso se recomienda únicamente utilizar tornillos de una longitud máxima de 5.5 [mm] o 0.200 [in], revisar el cable de alimentación así como también el adaptador para tener la corriente adecuada, primario en AC: 120 [v] ~ 60[Hz] y 25 [mA] y secundario DC: 9 [V] \cong 100 [mA], y por último los pines del puerto paralelo, en donde se conecta la celda de carga.

La celda de carga que se utilizará es redonda, con un diámetro en el centro de \approx 8 [mm] y para la estructura \approx 31 [mm], con tres agujeros de diámetro \approx 7 [mm] pasantes, a 15.2 [mm] del centro y con una separación de 120° el uno del otro. El adaptador para el puerto paralelo es un Smart Load Button con una capacidad de 5000 [N] o 1100 [lb], de la serie DMLC1360004.

4.1.1.3. Equipo medidor de fuerza de impacto, con sistema de elevación, frenado y HMI.

Es un trabajo de grado presentado el año 2017 en el mes de marzo por Nelson O. y Rene P., el cual permite obtener datos del ensayo de impacto sobre probetas tipo Charpy e Izod, especificados en la Norma E23-7a, como fuerza de impacto, energía de ruptura y velocidad antes del choque con la probeta. También cuenta con una rampa inclinada, sobre la cual un móvil de prueba impacta sobre una celda de carga para medir la fuerza de impacto desde una determinada altura.



Figura 58 Equipo de fuerza de impacto, con sistema de elevación, frenado y HMI.

Para los ensayos en los cuales se utilizará esta máquina, únicamente se recomienda revisar el estado de la celda de carga para el impacto en la rampa inclinada, verificar antes de cada ensayo el nivel de referencia mínima al que el centro de masa del objeto puede llegar e igualmente la altura desde la que se lo deja libre para que recorra una determinada distancia. Asegurarse que el pasador encargado de regular el ángulo de elevación se encuentre fijo y sin ninguna posibilidad de fallar o que se salga de su posición, evitando así posibles accidentes sobre la integridad del operario antes, durante y después de la prueba, o en el momento de la toma de datos.



Figura 59 Posicionamiento de la altura de la rampa.

4.1.1.4. Péndulo Charpy resistencia al impacto en polímeros.

El péndulo Charpy destinado a realizar ensayos de impacto en polímeros, fue diseñado por la norma ASTM D6110 – 02, el cual incluye un análisis estático y de fatiga de los componentes mecánicos más importante que lo conforman. Cuenta con un sistema electrónico – informático el cual permite el posicionamiento automático del péndulo y el manejo e interpretación de datos mediante un HMI, contando con todos los sensores necesarios.



Figura 60 Equipo de ensayo tipo Charpy.

Los breakers tanto para el sistema de posicionamiento como para el HMI y el display se encuentran dentro del cajetín de control, por lo que se debe contar con la llave del mismo para lograr activarlos, también el equipo cuenta con un botón de anclaje ubicado en la parte superior, la posición de este deberá ser verificada si el equipo presenta problemas para encenderse. Se comprueba la ubicación del martillo de impacto mediante su sensor de posicionamiento para comprobar que este no presente una desalineación horizontal respecto al eje superior. Considerando que la probeta debe estar correctamente centrada, el sensor de temperatura debe mantenerse funcional pues cada uno de los pasos en el programa cuenta con condiciones y preguntas de verificación para cada paso. Para la energía perdida del péndulo después de un ensayo se basa en la posición antes y después según el ángulo del brazo:

$$E_B = m \times g \times c_g (\cos(\alpha) - \cos(\beta)) \quad [4.1]$$

Donde:

- m : Masa del péndulo 0.9033 [Kg]
- g : Aceleración gravitacional 9.81 [m/s²]
- c_g : Centro de gravedad del péndulo 0.320 [m]
- α : Posición angular final [°]
- β : Posición angular inicial [°]

4.1.1.5. “Amsler Pendulum Impact Testing Machine”

Usado para determinar la fuerza de impacto de especímenes con o sin muesca de diferentes diámetro y tamaños, de acuerdo al método de los ensayos Charpy o Izod. El equipo consiste en un bloque de base fundido con dos vigas montantes en los que está anclado el péndulo, formado por el martillo y la varilla del mismo. Sobre la base se encuentran dos yunques regulables sobre el cual las probetas se apoyarán durante las pruebas. El borde de impacto del martillo está ubicado de tal forma que coincide con el del percutor, por lo que prácticamente se garantiza que no existirá vibración en el péndulo cuando este golpee la probeta. El principio del péndulo consiste en elevar y dejar caer el martillo desde una determinada altura hasta que el mismo impacte con la probeta causando su falla. Parte de la energía de la caída será absorbida durante la ruptura del espécimen, mientras que la energía residual del péndulo hará que este vuelva a subir para el lado contrario hasta llegar a otra determinada altura. La capacidad máxima de la máquina es de 30 [kgm] o 240 [ft.lb] medida de energía dentro se los sistemas correspondientes para lograr causar la ruptura.



Figura 61 Máquina: Amsler Pendulum Impact Testing Machine

Para este equipo primero se debe revisar el estado del percutor en el martillo, que se encuentre centrado y no deformado por previos ensayos. La escala para medir la energía de impacto, que se encuentra paralela a las vigas alzadas desde la base, debe ser revisada después de cada ensayo, pues manualmente se la devuelve a cero. Verificar la caída del martillo desde una altura conocida y sin colocar ningún objeto que impida su trayectoria, comprobar que este llegue a una altura aproximada o casi igual en el lado contrario. Tener muy en cuenta las distancias entre los yunques de la base en donde descansarán los especímenes, pues dicha distancia es importante para los análisis posteriores. Revisar y engrasar el eje y rodamientos sobre los cuales descansa el martillo y la varilla.

4.2. Puesta en marcha, recolección de datos y condiciones a considerar

Siempre se debe tener en cuenta que la integridad física del operario y de las personas que puedan encontrarse alrededor es lo primero a considerarse, una vez que se comience los ensayos o inclusive antes de que las máquinas entren en operación. Para que los ensayos puedan realizarse bajo condiciones controladas, el laboratorio

debe mantenerse de preferencia a una temperatura ambiente de 20 [°C] y con una baja humedad.

4.2.1. Ensayos de caída libre

Para comenzar con el plano inclinado se toma la referencia del centro de masa del móvil de prueba o de la esfera sólida en la posición final, es decir sobre el sensor y se debe tener en cuenta que esta referencia es la que debe considerarse también para la altura inicial desde la que caerá, la medida de interés para el caso a analizarse es la variación de estas. Las fuerzas son determinadas con la celda de carga del equipo Quantrol “Advanced Force & Torque Indicador-AFTI”, entonces se colocará un amortiguador de nylon entre la masa de impacto y la misma, por lo que se recomienda realizar por lo menos tres ensayos para cada altura. Se anotan y calculan sobre la tabla 7 los siguientes datos, para cada una de los cuerpos:

Tabla 7

Datos a anotarse durante el ensayo de caída por el plano inclinado - protocolo de pruebas.

Masa:									[Kg]
Peso:									[N]
Prueba número #	Altura de referencia h0 [cm]	de	Altura inicial de caída h1 [cm]	Variación de altura $\Delta h = h1 - h0$ [cm]	F1 [N]	F2 [N]	F3 [N]	Fprom = (F1+F2+F3)/3 [N]	
1									
2									
3									
4									
...									

Mientras que para los ensayos en caída libre sobre el tubo conductor graduado, se tiene primero que asegurar la integridad de la celda de carga para el equipo Quantrol “Advanced Force & Torque Indicador-AFTI” con la ayuda de los amortiguadores cilíndricos de nylon y los tres agujeros para los pernos, de tal forma que al sensor no tenga contacto directo con el impacto de la masa de prueba o con el piso. Al tubo se lo coloca verticalmente sobre la celda de carga ya protegida, haciendo coincidir el cable

de conexión a través la hendidura de 4 [cm], para que no tenga ningún desvío y no se genere una fricción considerable al momento de la caída de la masa debido a una inclinación. Después se procede a colocar el pasador por lo agujeros realizados sobre el tubo a la altura deseada, mientras que para el ingreso de las masas de prueba se lo realiza desde la parte superior. Las masas de prueba deben ser previamente pesadas por lo menos tres veces y tomadas sus dimensiones geométricas, se anotan sobre la tabla 8.

Tabla 8

Masa y dimensiones geométricas de los cilindros de prueba-Protocolo de pruebas.

Cilindro	Masa [gr]			Masa Prom [gr]	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Diam. Agujero [mm]	Altura agujero [mm]
	Medida 1	Medida 2	Medida 3					
Pequeño								
Mediano								
Grande								

Una vez verificadas todas estas condiciones, únicamente se retira rápidamente el pasador para liberar la masa de prueba, y se anota los datos en la tabla 9, se recomienda realizar tres ensayos bajo condiciones similares para asegurar la validez de los datos.

Tabla 9

Datos a anotarse durante el ensayo de caída libre por tubo conductor-Protocolo de pruebas.

Peso:	[N]				
Prueba #	Altura h [cm]	F1 [N]	F2 [N]	F3 [N]	Fprom= (F1+F2+F3)/3 [N]
1					
2					
3					
4					
..					

Una vez que se tiene las magnitudes de altura y fuerza promedio, para cualquiera de los dos casos anteriores, se procede a llenar la siguiente tabla para la energía potencial mediante la ecuación [2.2]:

$$E = m \times g \times h \text{ [Ncm]}$$

Y su comparación con la fuerza de impacto.

Tabla 10

Datos a calcularse después de las pruebas de caída por plano inclinado o por tubo conductor-Protocolo de pruebas.

Energía potencial [N.cm]	Fuerza/ Peso (incremento de la fuerza) [N/N]	(Fuerza/Peso)/Energía [N ⁻¹ .cm ⁻¹]	Energía/(Fuerza/Peso) [N.cm]

Se arma las gráficas de Fuerza [N] vs. Energía [N.cm] y la de (Fuerza/Peso) [N/N] vs. Energía [N.cm], para todos los puntos a una escala adecuada, y se procede al ajuste por mínimos cuadrados y el coeficiente de correlación lineal.

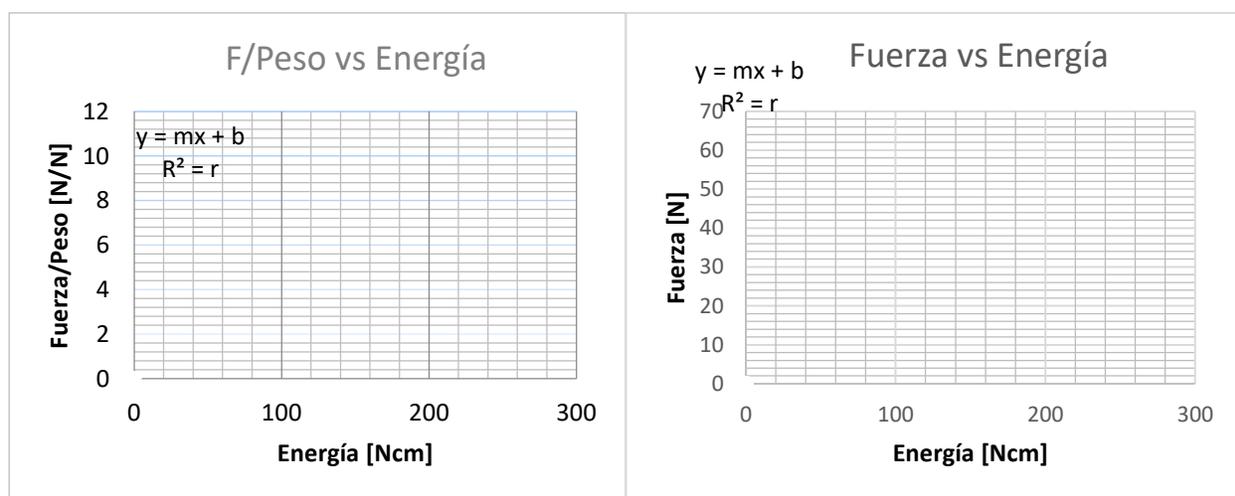


Figura 62 Caracterización de curvas: a) F/Peso vs. Energía; b) Fuerza vs. Energía – Protocolo de pruebas

Se debe realizar ambas tablas y gráficos para cada uno de los objetos ensayados, para la construcción de las curvas características, primero se anota las ecuaciones de ajuste para cada cuerpo:

Tabla 11

Recopilación de ecuaciones características, ensayos de caída -Protocolo de pruebas.

Ecuación de la forma: $y=m_p \cdot x + b$				
	<ul style="list-style-type: none"> • m_p=Pendiente. • b=Punto donde la ecuación corta con el eje y. 			
Cuerpo	Fuerza [N] vs. Energía [N.cm]		(Fuerza/Peso) [N/N] vs. Energía [N.cm]	
1	Fuerza=	* Energía +	Fuerza/Peso=	* Energía +
2	Fuerza=	* Energía +	Fuerza/Peso=	* Energía +
3	Fuerza=	* Energía +	Fuerza/Peso=	* Energía +
...	Fuerza=	* Energía +	Fuerza/Peso=	* Energía +
n	Fuerza=	* Energía +	Fuerza/Peso=	* Energía +

$$m_p = \sum_{i=1}^n \frac{m_{pi}}{n}$$

A continuación se calcula una constante C1 mediante comparación de los datos de Energía/ (Fuerza/Peso) entre dos distintos cuerpos:

$$C1 = \frac{\left(\frac{E}{F}\right)_1}{\left(\frac{E}{F}\right)_2}$$

Considerando que el objeto de mayor masa (1) siempre irá en la parte de arriba de la ecuación. Entonces para cada comparación, se tiene una relación directa de pesos, una de pendientes (para las ecuaciones (Fuerza/Peso) [N/N] vs. Energía [N.cm]) y una tabla de C1:

$$C = \frac{W_1}{W_2}$$

$$C0 = \frac{m_1}{m_2}$$

Tabla 12

Cálculo de la relación C1 para ensayos caída -Protocolo de pruebas

Energía/(Fuerza/Peso) Masa 1	Energía/(Fuerza/Peso) Masa 2	C1
Promedio		

Se verifica y calcula el error entre los valores de C, C0 y C1.

$$\%error = \frac{|\Delta x|}{x_v} \times 100\% = \frac{|x_i - x_v|}{x_v} \times 100\% \quad [4.2]$$

Donde:

- x_i : Valor experimental.
- x_v : Valor real.

Tabla 13

Error porcentual entre constantes-Protocolo de pruebas.

Entre	Error
C y C0	%error=
C y C1	%error=

Y por último ya conocido m_p , se escribe la ecuación característica para la fuerza de impacto dependiendo de la energía inicial que el cuerpo posea:

$$F = m_p \times E + W$$

Donde:

- F : Fuerza de impacto. [N]
- m_p : Pendiente de la función lineal. [cm^{-1}]
- E : Energía potencial. [N.cm]

$$F = \quad \times E + W$$

O dependiendo únicamente de la altura de caída, se sabe que:

$$F = mg [m_p x + 1]$$

Donde:

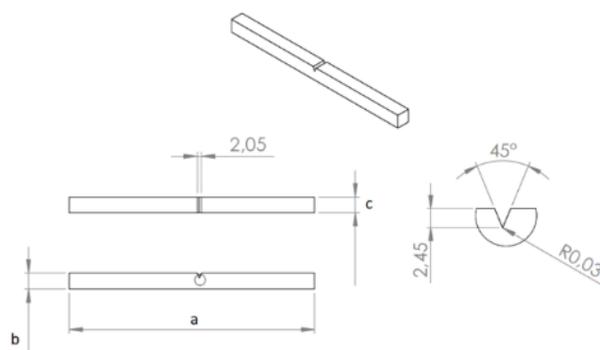
- m : Masa del objeto en caída libre. [Kg]
- g : Gravedad. 9.81 [m/s²]
- x : Variación de la altura. [cm]

4.2.2. Ensayos de impacto

Las probetas recomendadas para estos ensayos son de forma cuadrada y de una longitud superior a 100 [mm] para evitar cualquier otro tipo de fallos que no sean causados por flexión, como el cortante puro, sobre la misma debido al impacto. Como mínimo tres probetas para cada material ensayado, todas con muesca, con la forma que se muestra en la figura y se anota sus dimensiones según la siguiente tabla:

Tabla 14

Dimensiones geométricas de las probetas, ensayos de impacto-Protocolo de pruebas.



Probeta	Número #	a [mm]	b [mm]	c [mm]
ASTM A36	1			
	2			
	3			
SAE 1040	1			
	2			
	4			

La preparación de la máquina, se revisa los seguros para controlar la altura del péndulo así como también que el tornillo que sujeta el percutor al martillo se encuentre fijo y bien apretado. Elevando un poco el brazo y con la ayuda de una llave inglesa se aflojan los tornillos de los yunque en la base, guiándose por unas pequeñas marcas que se encuentran en ambos, se procede a moverlos a la distancia deseada de ≈ 96 [mm], teniendo en cuenta que se encuentren equidistantes del centro donde golpeará el percutor.

Para comprobar que el equipo se encuentra en buen estado y funcional, se eleva el péndulo hasta una determinada altura, se verifica que la escala situada a un lado de las vigas se encuentre encerrada y sin colocar ningún objeto en su camino, se lo deja caer libremente. Este debe marcar 0 [Kg.m] o [ft.lb] en la escala y llegar hasta aproximadamente la misma altura al lado contrario.

A continuación de este punto, todos los ensayos serán realizados desde la misma altura de la prueba al vacío y tratando siempre de repetir las condiciones del medio. Se recomienda verificar la posición de las probetas, que se encuentren centradas y que el lado de la muesca esté contrario a donde se producirá el impacto. No se debe olvidar volver la escala manualmente a 0 entre pruebas. Se anota directamente el valor de la energía en la siguiente tabla y se transforma a Joule multiplicando por la gravedad 9.81 [m/s^2].

Tabla 15

Resultados energía de deformación absorbida por impacto-Protocolo de pruebas.

	Número de la probeta #	Área efectiva [mm ²]	Energía absorbida en:		
			[Kg.m]	[Nm o J]	[J/m]
ASTM A36	1				
	2				
	3				
SAE 1040	1				
	2				
	3				

4.2.3. Ensayos estáticos

Las probetas para estas pruebas deben ser por lo menos aproximadamente iguales en dimensiones y número, que las de los ensayos de impacto. Por lo que se debe a llenar la tabla 14 nuevamente con sus dimensiones medidas.

Durante la preparación de la máquina lo primero que se hace es montar los accesorios adecuados, el percutor con la celda de carga tipo “S” para medir la fuerza en determinados lapsos de tiempo y la base con apoyos móviles. La distancia entre apoyos debe ser la misma que para las pruebas de impacto ≈ 96 [mm]. Se procede a encender el equipo y a verificar que todos los sensores se encuentren funcionales con ayuda de las lecturas en el display. Una vez colocada la probeta, la cual debe encontrarse centrada, la prueba puede ser realizada automáticamente al tiempo programado o acelerada aplastando repetidamente la flecha hacia abajo en la pantalla táctil, considerando que en los puntos máximos o de estricción conviene tener medidas más seguidas, por lo que no se recomienda abusar de este recurso. La toma de datos se realiza directamente sobre una tabla y siguiendo los pasos en la pantalla se los guarda directamente en un dispositivo de almacenamiento portátil, mediante un puerto USB. Los datos deben ser transformados y filtrados al ser pasados a un archivo Excel (.xml), separándolos por las comas existentes. Primero se selecciona toda la primera columna y con ayuda de la herramienta “texto en columnas” en la pestaña de datos, la cual se transforma en tres, y después con la opción de reemplazar en la herramienta “buscar” se cambian los puntos (.) por comas (,). A partir de este punto únicamente por análisis se deberá identificar los datos a los que sea necesario multiplicarles por menos uno o dividirlos para menos mil para que se acoplen a la tendencia, para dejarlos en el siguiente formato:

Tabla 16

Ejemplo formato para los datos de los ensayos estáticos - Protocolo de pruebas

#	Desplazamiento [mm]	Fuerza [N]
1		
2		
...		

A continuación se traza la gráfica Fuerza vs. Desplazamiento, con su respectiva curva de ajuste:

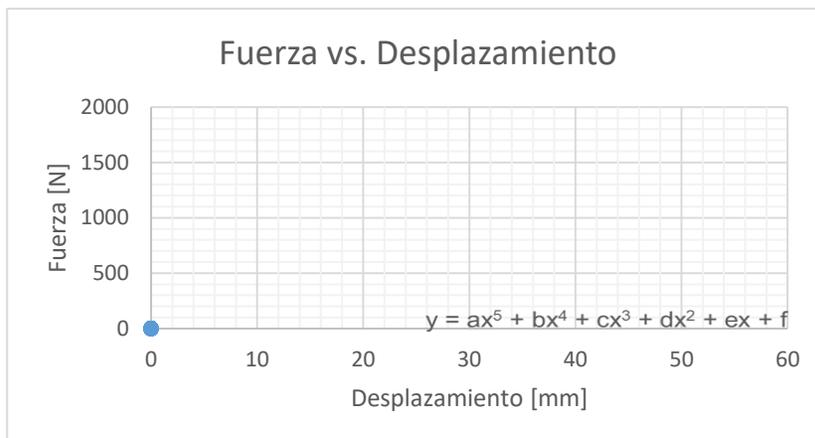


Figura 63 Fuerza vs. Desplazamiento en Flexión – Protocolo de Pruebas

Para el análisis se sabe que el área debajo de la curva de Fuerza vs. Desplazamiento es la energía de deformación absorbida por la probeta.

$$\text{Energía: } A_b = \int_{x_i}^{x_f} f(x) dx$$

En donde los límites x_i y x_f son definidos por el tramo de desplazamiento a analizarse. La función $f(x)$ que más se asemeje, puede ser dividida por tramos y considerados ajustes exponenciales, logarítmicos, polinómica, potencial, etc. para tener una mejor aproximación al valor real.

Si la curva es suave y no presenta picos considerables, ni cambios de tendencia bruscos, con un ajuste polinómico es suficiente para tener un valor representativo y parecido a la realidad. A su vez se puede usar el método del trapecio para sumar las áreas entre todos los puntos.

También para realizar un análisis teórico según las propiedades mecánicas y la resistencia de materiales, se puede utilizar el ajuste por la fórmula de endurecimiento por deformación también puede ser usada en el ajuste de la curva:

$$\sigma = K * \varepsilon^n$$

En donde:

- σ : Esfuerzo [MPa]
- K : Constante de deformación [MPa]
- ε : Deformación unitaria

Y al pasarlo a la forma:

$$F = K * \delta^n$$

- δ : Desplazamiento [mm]

$$\ln F = \ln K + n \ln \delta$$

Se grafica en escala logarítmica y se realiza un ajuste lineal por mínimos cuadrados para sacar la curva de tendencia:

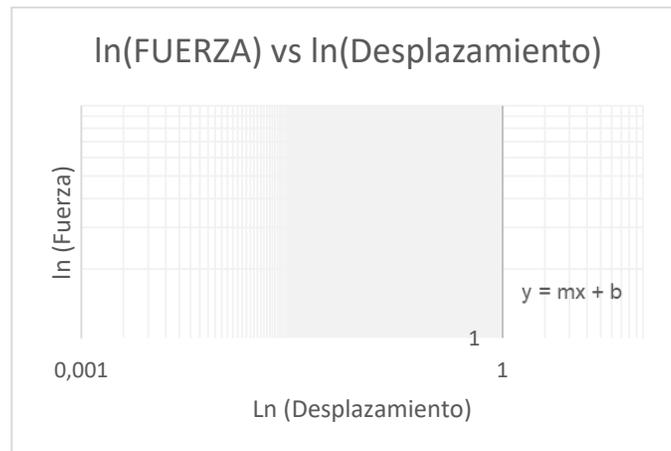


Figura 64 ln (Fuerza) vs. ln (Desplazamiento) en escala – Protocolo de Pruebas

Se compara la ecuación del ajuste lineal con la logarítmica, para determinar K y n .

$$b = \ln K \rightarrow K = e^b$$

$$n = m$$

Se reemplaza en:

$$f(x) = K x^n$$

4.2.4. Análisis y comparación de resultados energía de deformación

Se llena la siguiente tabla con los resultados recopilados después de todos los ensayos:

Tabla 17

Resultados energía de deformación absorbida en ensayos de impacto y estáticos - Protocolo de pruebas

Probeta#	Ensayo de Impacto Charpy		Ensayo flexión con carga estática		Relación Energía de deformación: Impacto/ Estático [J/J]	Error % $= \frac{x_i - x_v}{x_v} \times 100\%$
	Área efectiva [mm ²]	Energía de deformación absorbida [J]	Área efectiva [mm ²]	Energía de deformación absorbida [J]		
ASTM A36	1					
	2					
	3					
SAE 1040	1					
	2					
	3					

Por último se escribe las conclusiones y recomendaciones, analizando los resultados tanto en la determinación de las curvas características para la fuerza impacto en caída libre como para la energía de deformación absorbida en ensayos de impacto y ensayos estáticos.

Todo con el fin que en los ensayos se optimice y mejore el sistema tanto para la fabricación de la probetas como para la adecuación y puesta a punto de las máquinas a utilizarse, encaminado a la realización de un protocolo de pruebas confiable y lo más didáctico posible para cada ensayo.

CAPÍTULO V

5. ENSAYOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Ensayo de impacto

5.1.1. Sobre rampa inclinada

5.1.1.1. Ensayo caída móvil de prueba

Se verifica el peso del móvil así como la altura referencial sobre la que se ubica su centro de masa sobre la rampa inclinada y la posición de la celda carga sobre la base de apoyo. Obteniendo los siguientes datos para el análisis:

$$m_{movil} = 0.636 [kg]$$

$$h_o = 5.8 [cm]$$

Por lo que la fuerza a considerarse sería el peso:

$$\therefore W = 6.239 [N]$$

Moviendo la rampa móvil se procede a realizar las pruebas a las alturas especificadas, las cuales se presentan en la siguiente tabla conjuntamente con los datos medidos con el equipo Quantrol “Advanced Force & Torque Indicador-AFTI” y su celda de carga.

Tabla 18

Datos del Ensayo de Caída libre 1-Móvil de prueba.

h0 [cm]	h1 [cm]	Δh [cm]	E [Nm]	F1 [N]	F2 [N]	F3 [N]	F [N]	F/ Peso	(F/peso) /E	E/ (F/peso)
5,8	5,8	0	0,00	6,2	6,2	6,2	6,2	1,0		
5,8	22,5	16,7	104,19	31	31	26	29,3	4,7	0,05	22,16
5,8	30,7	24,9	155,36	41	40	40	40,3	6,5	0,04	24,03
5,8	37,6	31,8	198,72	50	49	50	49,7	8,0	0,04	24,96
5,8	43,4	37,6	234,59	54	50	51	51,7	8,3	0,04	28,33
5,8	48,2	42,4	264,54	60	59	54	57,7	9,2	0,03	28,62

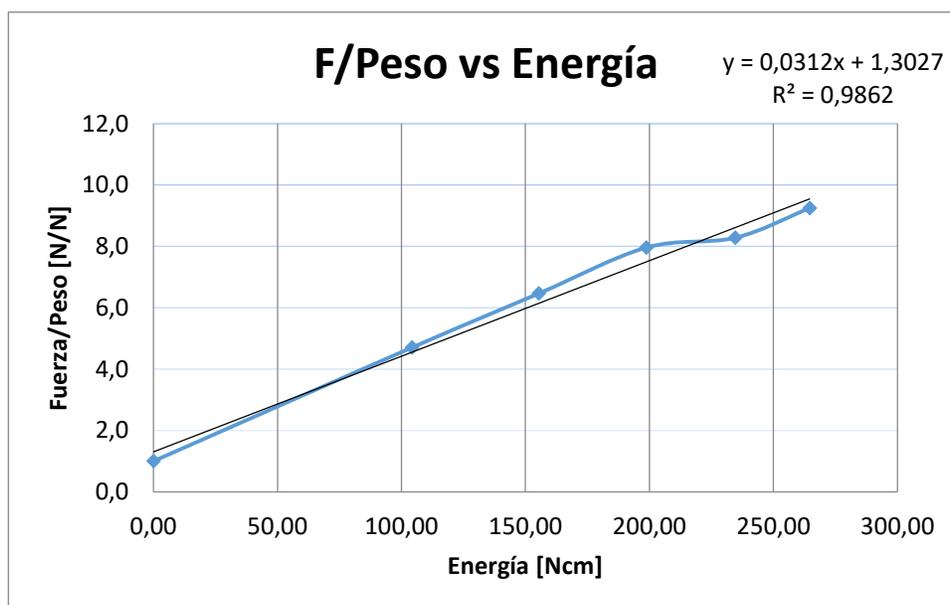


Figura 65 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de móvil de prueba.

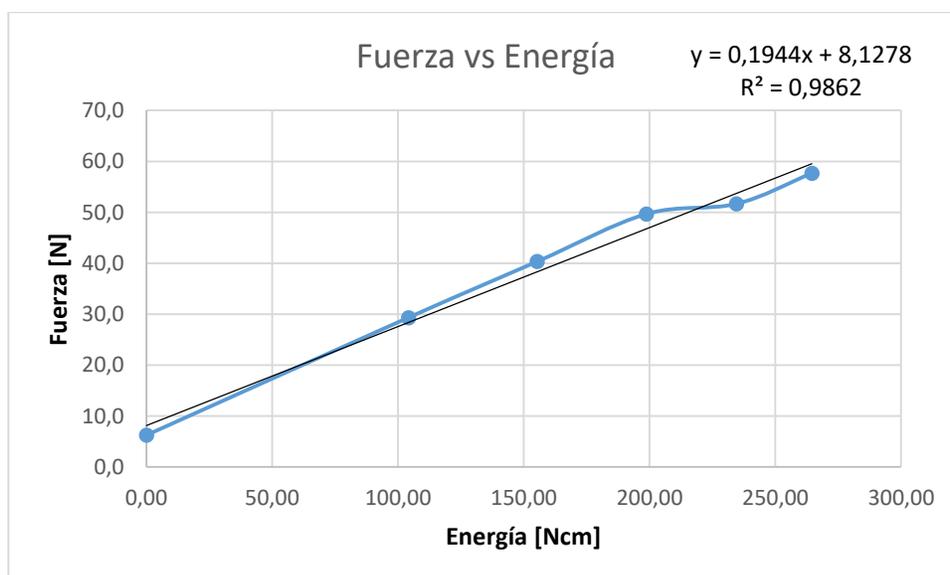


Figura 66 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de móvil de prueba.

Se presenta una función lineal el momento de graficar la Fuerza vs. Energía, por lo que claramente manifiestan una relación directamente proporcional y la cual al conocer únicamente una de las variables ya se puede anticipar el resultado de la otra. Es prudente realizar también una gráfica que relacione la fuerza potencial con la fuerza de

impacto del móvil y la altura que recorre durante el cambio de dichas fuerzas y se obtiene la misma grafica de crecimiento lineal.

5.1.1.2. Ensayo caída masa esférica

Se toman las mismas consideraciones que las indicadas para el móvil de prueba. Por lo que para este caso tenemos:

$$m_{esf} = 287 \text{ [kg]}$$

$$h_o = 5.8 \text{ [cm]}$$

Por lo tanto la fuerza a considerarse seria el peso:

$$\therefore W = 2.815 \text{ [N]}$$

Se obtiene los siguientes datos:

Tabla 19
Datos del Ensayo de caída libre 2-Esfera

h0 [cm]	h1 [cm]	Δh [cm]	E [Ncm]	F1 [N]	F2 [N]	F3 [N]	F [N]	F/ Peso	(F/peso)/ E	E/(F/peso) Esfera
5,8	5,8	0	0,00	2,82	2,82	2,82	2,8	1,0		
5,8	22,5	16,7	47,02	15	13	14	14,0	5,0	0,11	9,46
5,8	30,7	24,9	70,11	23	23	25	23,7	8,4	0,12	8,34
5,8	43,4	37,6	105,86	25	25	25	25,0	8,9	0,08	11,92
5,8	50	44,2	124,44	28	27	29	28,0	9,9	0,08	12,51

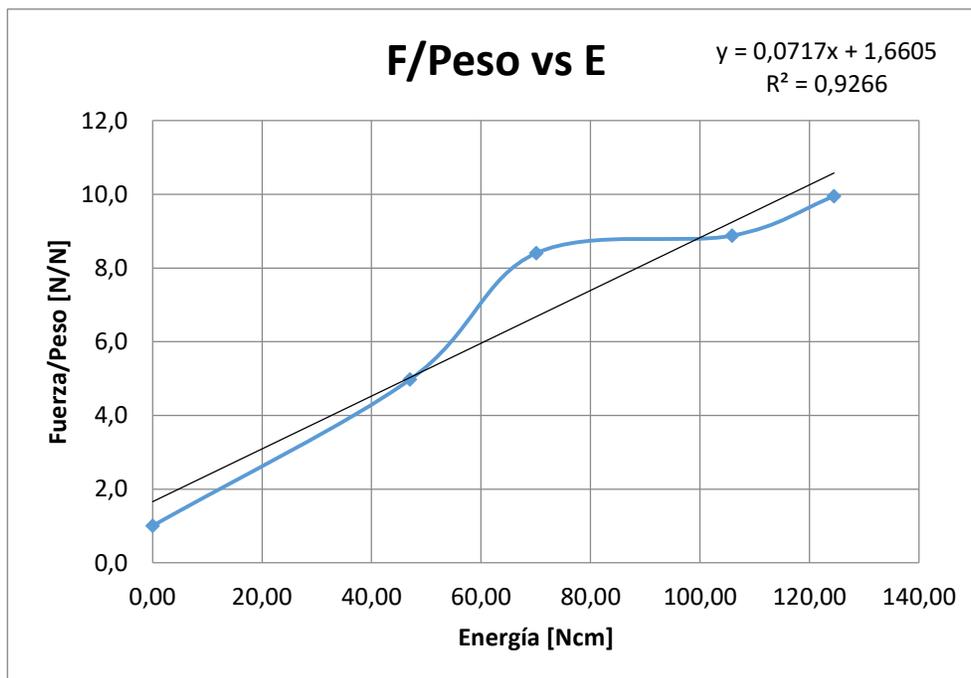


Figura 67 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de esfera.

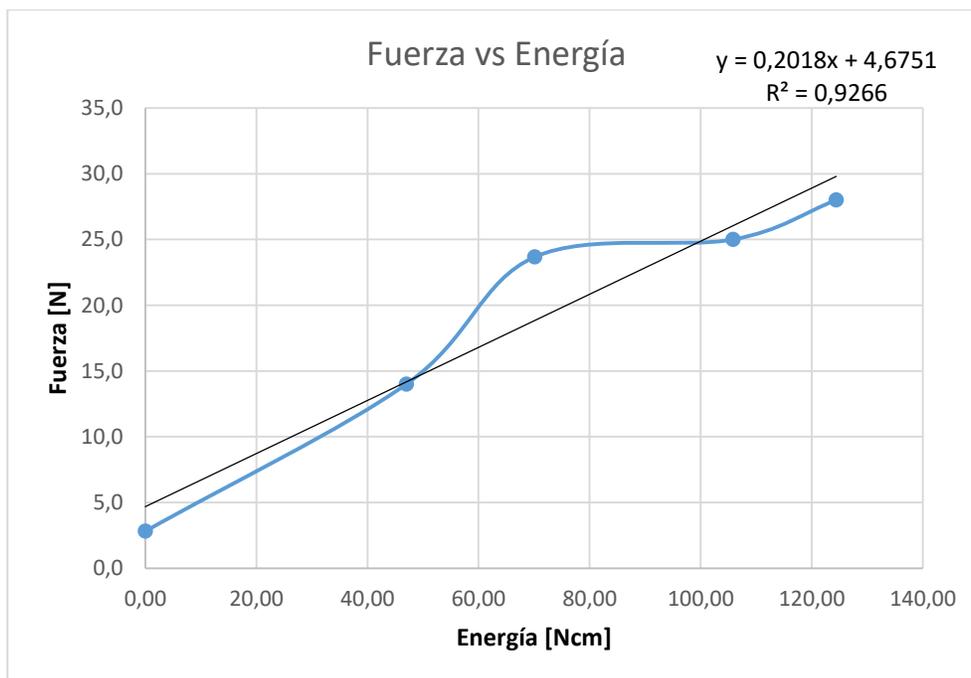


Figura 68 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de esfera.

5.1.1.3. Análisis ensayos de caída libre sobre rampa inclinada

Comparando las magnitudes de la Energía sobre la constante que representa la fuerza sobre el peso de cada uno de los objetos, armamos la siguiente tabla:

Tabla 20

Constante de comparación Energía-Peso sobre fuerza entre carrito móvil y esfera.

E/(F/peso)	E/(F/peso)	C1
Esfera	Carrito	
9,46	22,16	2,344
8,34	24,03	2,882
11,92	28,33	2,376
12,51	28,62	2,287
		Prom: 2,472

En donde se observa que ambas guardan una relación C1 la cual varía levemente para cada altura. Por lo que se asume esta deberá mantenerse así si se sigue aumentando. Dicha relación también se presenta al comparar directamente los pesos de los objetos:

$$\frac{\text{Peso carrito}}{\text{Peso de la esfera}} = \frac{6.23916}{2.81547} = 2.216$$

A continuación se toma como punto de referencia la curva de ajuste para las gráficas (F/Peso) Vs. E de las figuras 62 y 64, para ambos casos.

$$y = 0.0717x + 1.6605 \text{ (Esfera de peso 2.81547 [N])}$$

$$y = 0.0312x + 1.3027 \text{ (Carrito de peso 6.23916 [N])}$$

Donde:

- y : Fuerza de impacto sobre el peso de objeto en caída libre. [N/N]
- x : Energía potencial antes de la caída. [J]

Igualmente para el caso de las figuras 63 y 65, de Fuerza vs. Energía.

$$y = 0.2018x + 4.675 \text{ (Esfera de peso 2.81547 [N])}$$

$$y = 0.1944x + 8.127 \text{ (Carrito de peso 6.23916 [N])}$$

Donde:

- y : Fuerza de impacto. [N]
- x : Energía potencial antes de la caída. [J]

Para relacionar las pendientes, se parte de la ecuación base para una forma lineal.

$$y = m_p x + b \quad [5.1]$$

Donde:

- y : Ordenada, variable dependiente.
- x : Abscisa, variable independiente.
- m_p : Pendiente.
- b : Punto donde la ecuación corta con el eje y .

Entonces, para el carrito con la esfera se tiene que:

$$C = \frac{0.0717}{0.0312} = 2.298$$

Se observa por la tabla 20 de resultados prácticos, la relación entre pesos y pendientes (para las ecuaciones de F/Peso vs. E) teóricos que existe una constante que varía levemente para cada caso, por lo que se tomará muy en cuenta para próximos análisis.

Mientras que el análisis de las pendientes para las ecuaciones Fuerza vs. Energía se tiene que la pendiente se mantiene constantes ($m=0.2 \text{ cm}^{-1}$) para ambos casos, y el corte con las ordenadas depende del peso del objeto de análisis, por lo que:

$$F = m_p \times E + W \quad [5.2]$$

Donde:

- F : Fuerza de impacto. [N]
- m_p : Pendiente de la función lineal. [cm^{-1}]
- E : Energía potencial. [N.cm]
- W : Peso del objeto. [N]

Por tanto se considerarán estos valores para el análisis en los siguientes capítulos.

Realizando las siguientes sustituciones de la ecuación [2.2] y sabiendo que el peso es igual a su masa por la gravedad, sobre la ecuación [5.2].

$$F = m_p (m \times g \times h) + m \times g$$

$$F = mg [m_p x + 1] \quad [5.3]$$

Donde:

- m : Masa del objeto en caída libre. [Kg]
- g : Gravedad. $9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- x : Variación de la altura. [cm]

5.1.2. Caída libre a través de tubo de pruebas

Se realiza primero el aceitado y enceramiento de la balanza para medir las masas exactas de los cilindros de prueba.



Figura 69 Aceitado y enceramiento balanza.

Para proceder tomar tres medidas por cada uno, así como también su diámetro, altura y dimensiones de los pequeños agujeros de presentan con la ayuda de un calibrador digital.



Figura 70 Verificación de medidas de masa cilíndricas de prueba.

Con lo cual se verifica la validez de los datos presentados a continuación. Y se los puede comparar teóricamente calculando el volumen de cuerpo y considerando que la densidad del acero es de 7850 [Kg/m³], con las siguientes fórmulas:

$$m = \rho \times V \quad [5.4]$$

Donde:

- m : Masa del cuerpo. [Kg]
- ρ : Densidad del cuerpo. [Kg/m³]
- V : es el volumen. [m³]

5.1.2.1. Cilindro pequeño (CilindroP)

Para la masa se tiene:

Tabla 21

Propiedades físicas y geométricas del cilindro de pruebas pequeño

Masa [gr]			Masa Prom [gr]	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Diám. Agujero [mm]	Altura agujero [mm]
Medida 1	Medida 2	Medida 3					
357	356	356	356	35.00	47.40	5	6.05

Se verifica con la ecuación [5.4] teóricamente

$$m_{cpequeño} = 7850 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * \frac{\pi}{4} \{ (0.035)^2 [m^2] * 0.0474 [m] - (0.005)^2 [m^2] * 0.00605 [m] \}$$

$$m_{cpequeño} = 0.357 [Kg]$$

Por tanto, para el análisis se utilizará 0.356 [Kg] y la fuerza a considerarse sería su peso:

$$\therefore W = 3.492 [N]$$



Figura 71 Ubicación cilindros, pasador-tubo, amortiguadores e instrumentación.

Colocando el pasador a través de los agujeros realizados a diferentes alturas sobre el tubo, como se muestra en la figura 71, distancias que se presentan en la siguiente tabla conjuntamente con las mediciones del equipo Quantrol “Advanced Forcé& Torque Indicador-AFTI” y su celda de carga. Procedimiento que se repite para cada uno de los ensayos sobre distintos cilindros.

Tabla 22
 Datos del ensayo de caída libre 3-Cilindro pequeño

h [cm]	E [Ncm]	F1[N]	F2[N]	F3[N]	F[N]	F/Peso	(F/peso)/E	E/(F/peso) CilindroP
0	0,00	3,49	3,49	3,49	3,5	1,0		
10	34,92	19	19	21	19,7	5,6	0,16	6,20
20	69,85	29	28	29	28,7	8,2	0,12	8,51
30	104,77	40	44	43	42,3	12,1	0,12	8,64
40	139,69	52	50	53	51,7	14,8	0,11	9,44
50	174,62	61	60	63	61,3	17,6	0,10	9,94

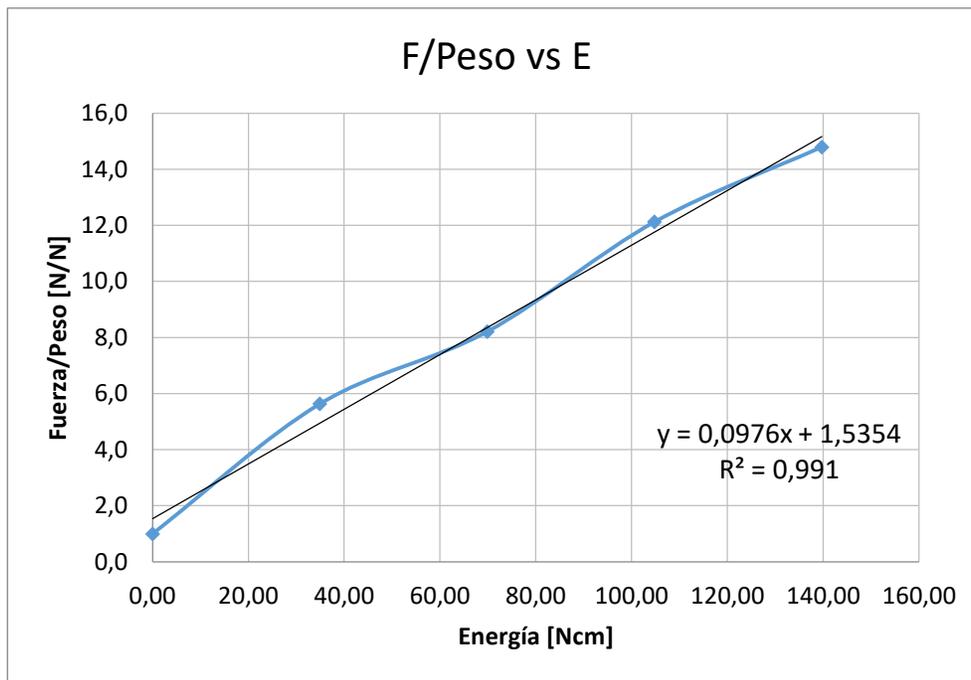


Figura 72 Caracterización curva (F/Peso) vs. E-cilindro pequeño.

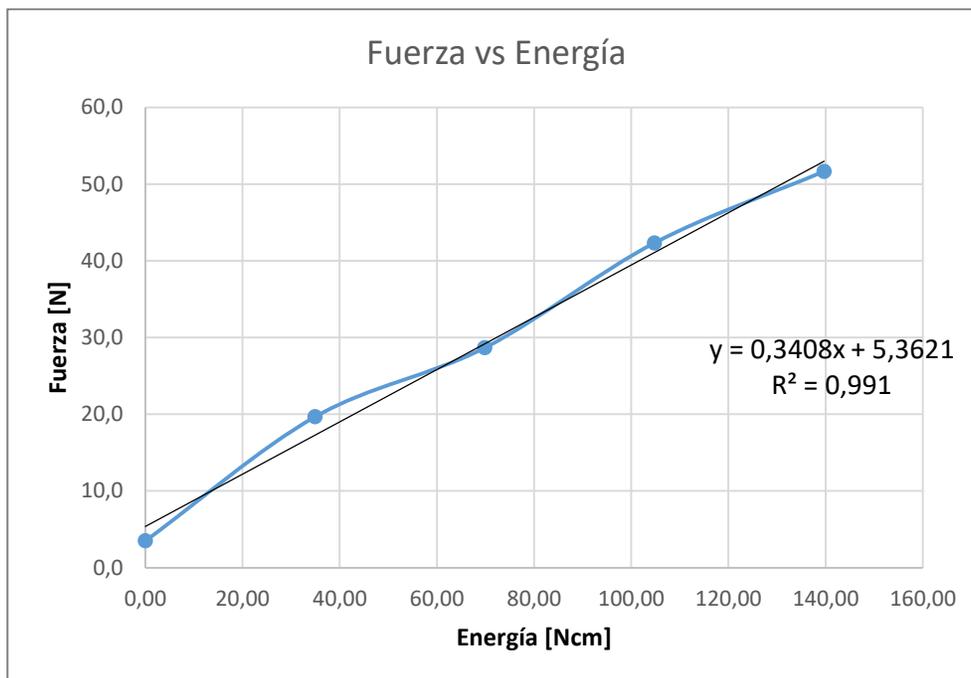


Figura 73 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de cilindro pequeño.

5.1.2.2. Cilindro mediano (Cilindrom)

Para la masa se tiene:

Tabla 23

Propiedades físicas y geométricas del cilindro de pruebas mediano

Masa [gr]			Masa	Diámetro	Altura	Diám.	Altura
Medida	Medida	Medida	Prom	[mm]	[mm]	Agujero	agujero
1	2	3	[gr]			[mm]	[mm]
519	521	319	520	35.00	69.30	5	6.1

Se verifica con la fórmula teóricamente

$$m_{Cmediano} = 7850 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * \frac{\pi}{4} \{ (0.035)^2 [m^2] * 0.0693 [m] - (0.005)^2 [m^2] * 0.0061 [m] \}$$

$$m_{Cmediano} = 0.520 [Kg]$$

Por lo que para el análisis se utilizara 0.520 [Kg] y la fuerza a considerarse seria su peso:

$$\therefore W = 5.101 [N]$$

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 24
Datos del ensayo de caída libre 3-Cilindro mediano

h [cm]	E [Ncm]	F1[N]	F2[N]	F3[N]	F[N]	F/Peso	(F/peso)/E	E/(F/peso) CilindroM
0	0,00	5,10	5,10	5,10	5,1	1,0		
10	51,01	31	31	32	31,3	6,1	0,12	8,30
20	102,02	46	47	45	46,0	9,0	0,09	11,31
30	153,04	70	66	68	68,0	13,3	0,09	11,48
40	204,05	78	80	82	80,0	15,7	0,08	13,01
50	255,06	94	92	93	93,0	18,2	0,07	13,99

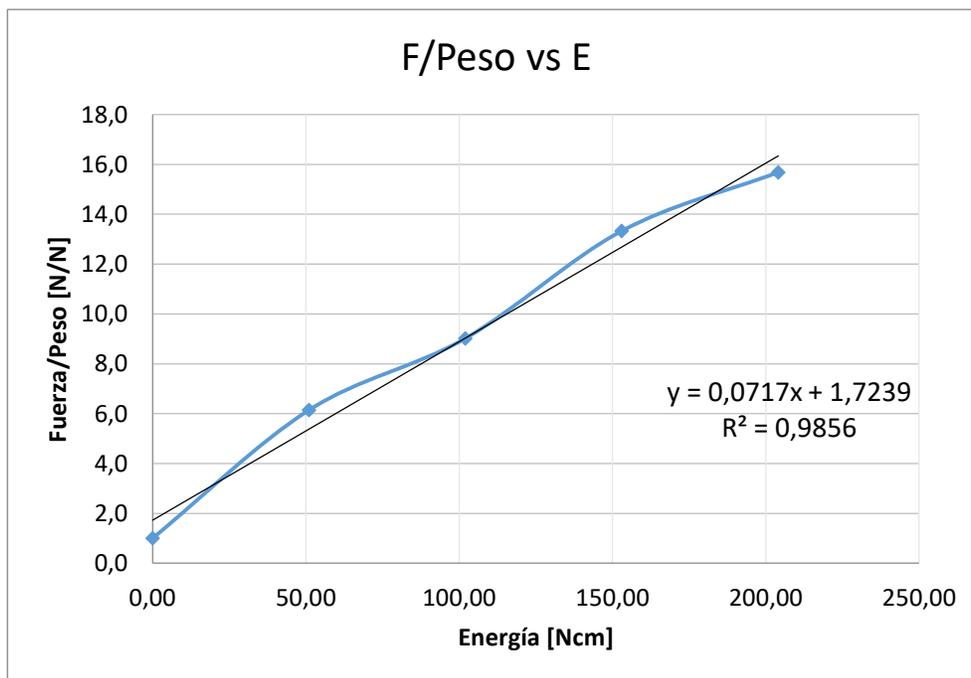


Figura 74 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de cilindro mediano.

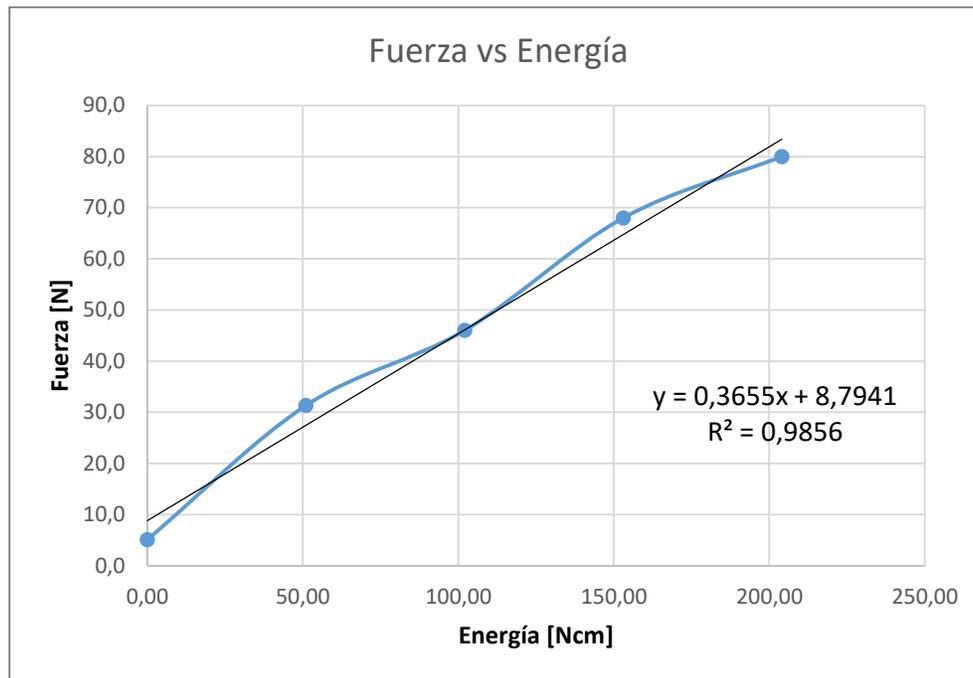


Figura 75 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de cilindro mediano.

5.1.2.3. Cilindro grande (CilindroG)

Para la masa se tiene:

Tabla 25

Propiedades físicas y geométricas del cilindro de pruebas grande

Masa [gr]			Masa	Diámetro	Altura	Diam.	Altura
Medida	Medida	Medida	Prom	[mm]	[mm]	Agujero	agujero
1	2	3	[gr]			[mm]	[mm]
577	679	678	678	34.84	90.87	5	6.1

Se verifica con la fórmula teóricamente

$$m_{Cgrande} = 7850 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * \frac{\pi}{4} \{ (0.03484)^2 [m^2] * 0.09087 [m] - (0.005)^2 [m^2] * 0.0061 [m] \}$$

$$m_{Cgrande} = 0.679 [Kg]$$

Por lo tanto para el análisis se utilizará 0.678 [Kg] y la fuerza a considerarse sería su peso:

$$\therefore W = 6.651[N]$$

Se anotaron los siguientes resultados:

Tabla 26
Datos del ensayo de caída libre 3-Cilindro grande

h [cm]	E[Ncm]	F1[N]	F2[N]	F3[N]	F[N]	F/Peso	E/(F/peso) CilindroG
0	0,00	6,65	6,65	6,65	6,7	1,0	
10	66,51	42	42	44	42,7	6,4	10,37
20	133,02	64	62	63	63,0	9,5	14,04
30	199,54	93	94	94	93,7	14,1	14,17
40	266,05	106	108	105	106,3	16,0	16,64
50	332,56	118	120	118	118,7	17,8	18,64

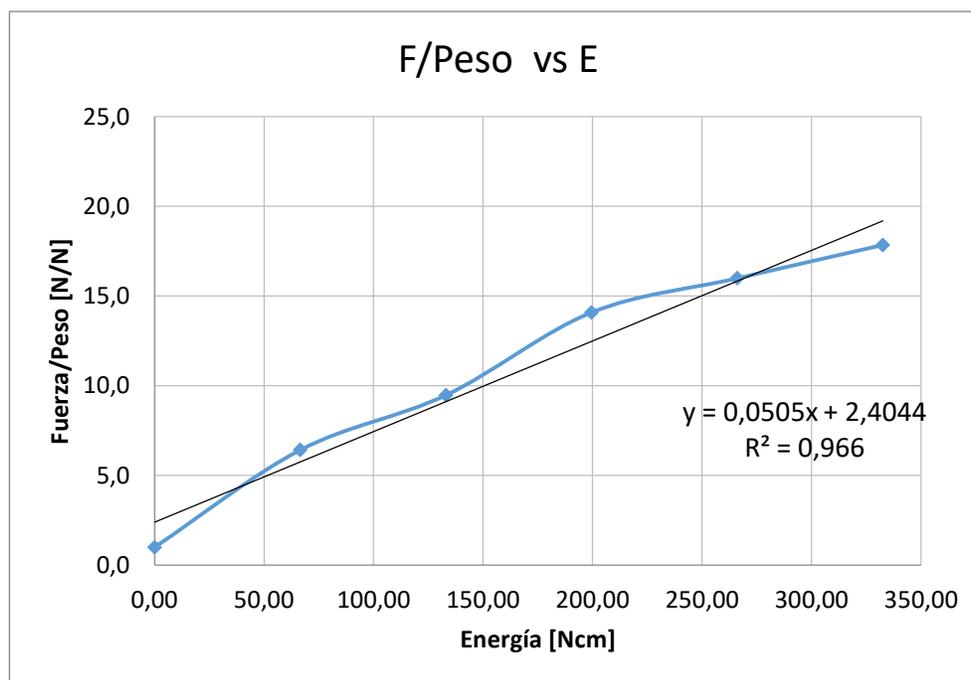


Figura 76 Caracterización curva (F/Peso) vs. E de cilindro grande.

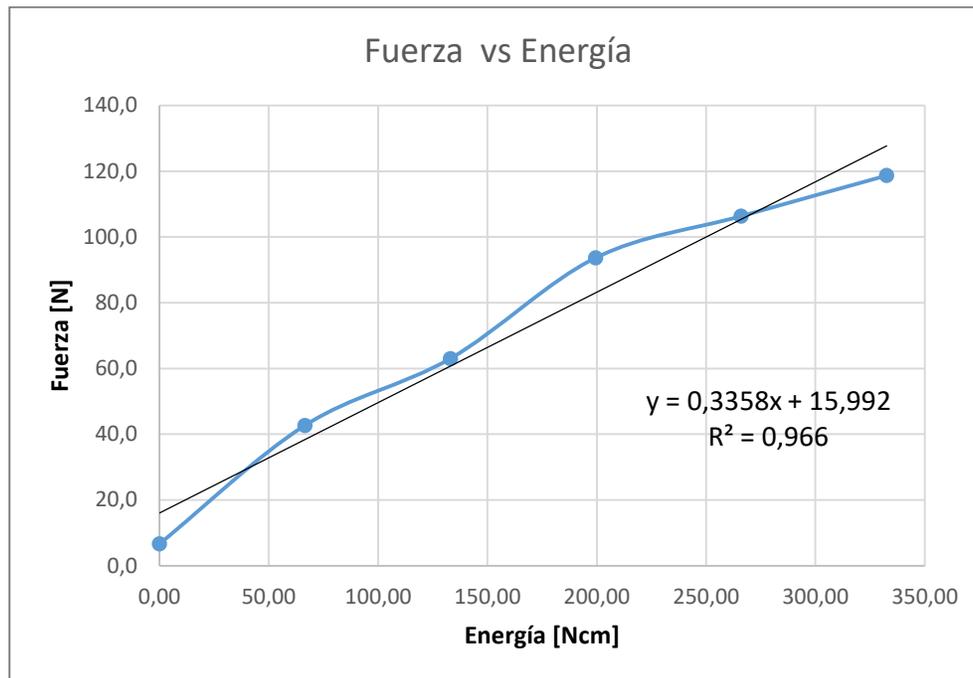


Figura 77 Caracterización curva Fuerza vs. Energía de cilindro mediano.

5.1.2.4. Análisis de los ensayos de caída libre de cilindros a través de tubo de pruebas

Comparando las magnitudes de la Energía sobre la constante que representa la fuerza sobre el peso de cada uno de los objetos, armamos la siguiente tabla comparativa entre los diferentes cilindros dividiendo sus valores:

Tabla 27

Constante de comparación Energía-Peso sobre fuerza entre cilindros pequeño y grande

E/(F/peso) CilindroP	E/(F/peso) CilindroG	C1
6,20	10,37	1,672
8,51	14,04	1,650
8,64	14,17	1,639
9,44	16,64	1,762
9,94	18,64	1,681
	prom	1,681

Tabla 28

Constante de comparación Energía-Peso sobre fuerza entre cilindros mediano y pequeño

E/(F/peso) CilindroM	E/(F/peso) CilindroP	C1
8,30	6,20	1,339
11,31	8,51	1,330
11,48	8,64	1,328
13,01	9,44	1,378
13,99	9,94	1,407
	prom	1,356

Tabla 29

Constante de comparación Energía-Peso sobre fuerza entre cilindros grande y mediano

E/(F/peso) CilindroG	E/(F/peso) CilindroM	C1
10,37	8,30	1,248
14,04	11,31	1,241
14,17	11,31	1,252
16,64	12,96	1,284
18,64	13,99	1,332
	prom	1,272

Sobre las cuales se observa que ambas magnitudes guardan una relación C1 la cual varía levemente para cada altura. Asumiéndose que esta deberá mantenerse así si se sigue aumentando. Dicha relación también se presenta al comparar directamente los pesos de los objetos, teniendo siempre al de mayor peso en la parte de arriba:

$$\frac{\text{Peso CilindroG}}{\text{Peso CilindroP}} = \frac{6.651}{3.492} = 1.905$$

$$\frac{\text{Peso CilindroM}}{\text{Peso CilindroP}} = \frac{5.101}{3.492} = 1.461$$

$$\frac{\text{Peso CilindroG}}{\text{Peso CilindroM}} = \frac{6.651}{5.101} = 1.303$$

A continuación se toma como punto de referencia la curva de ajuste para las gráficas (F/Peso) Vs. E, de la figuras 69, 71 y 73, para cada caso.

$$y = 0.0976x + 1.5354 \text{ (Cilindro de peso 3.491 [N])}$$

$$y = 0.0717x + 1.7239 \text{ (Cilindro de peso 5.101 [N])}$$

$$y = 0.0505x + 2.4044 \text{ (Cilindro de peso 6.651 [N])}$$

Donde:

- y : Fuerza de impacto sobre el peso del objeto. [N/N]
- x : Energía potencial antes de la caída. [J]

Igualmente para el caso de las figuras 70, 71 y 74, de Fuerza vs. Energía.

$$y = 0.34x + 5.36 \text{ (Cilindro de peso 3.491 [N])}$$

$$y = 0.36x + 8.79 \text{ (Cilindro de peso 5.101 [N])}$$

$$y = 0.33x + 15.99 \text{ (Cilindro de peso 6.651 [N])}$$

Donde:

- y : Fuerza de impacto. [N]
- x : Energía potencial antes de la caída. [J]

Partiendo de la ecuación [5.2] se relacionan las pendientes.

Para el cilindro grande con el pequeño:

$$C = \frac{0.0976}{0.0505} = 1.932$$

Para el cilindro grande con el mediano:

$$C = \frac{0.0717}{0.0505} = 1.41$$

Para el cilindro mediano con el pequeño:

$$C = \frac{0.0976}{0.0717} = 1.361$$

Como los valores para C1 de las tablas 27, 28 y 29 de resultados prácticos se asemejan a los resultados teóricos obtenidos en la relación entre pesos y pendientes C de las figuras 69, 71 y 73, para todos los casos posibles de los cilindros de prueba, se puede establecer que esta se mantendrá constante para cualquier otro objeto de diferente masa y geometría, por lo que su ecuación característica (F/Peso) Vs. E será determinable conociendo únicamente su altura de caída y siempre que las pruebas sean realizadas a una gravedad ≈ 9.8 [m/s²].

En el análisis de las pendientes para las ecuaciones Fuerza vs. Energía se ve que se mantienen constantes ($m=0.34$ cm⁻¹) para los tres casos, mientras que el corte con las ordenadas depende del peso del objeto de análisis, reemplazando en las ecuaciones [5.2] y [5.3].

$$F = 0.34 \text{ cm}^{-1} \times E + W \tag{5.5}$$

$$F = mg[0.34 x + 1]$$

Para garantizar que cuando el cuerpo se encuentra a una altura de 0 [cm] la fuerza que ejerce el cuerpo sobre el piso, sobre el que se encuentra apoyado sea la de su propio peso.

5.1.3. Fuerza de impacto teoría de caída de un cuerpo-persona

Se toma como referencia los resultados antes expuestos, se procede a suponer un caso real para una persona que cae de determinada altura.

Como la curva con menos dispersión es la del cilindro pequeño y dados los siguientes datos para el análisis comparativo de una caída para una persona de 68 [Kg]. Se sabe que la pendiente de la curva característica (F/Peso) Vs. E es una constante que puede ser determinada con ensayos prácticos o mediante comparaciones como se explica en el capítulo 5.1.2.4. Se tiene:

$$C = \frac{\text{Peso de la persona}}{\text{Peso cilindroP}} = \frac{68 \times 9.81}{3.491} = 191.085$$

Por tanto este valor se deberá mantener constante, dado el análisis antes expuesto. Para determinar la pendiente de la curva de la persona se sabe:

$$C = \frac{m_c}{m_{per}}$$

Donde:

- m_c : Pendiente del cilindro escogido para el análisis (cilindro pequeño, figura 69).
- m_{per} : Pendiente de la curva para la persona.

Y despejamos:

$$m_{per} = \frac{m_c}{C} = \frac{0.0976}{191.085} = 5.107 \times 10^{-4}$$

Para el valor b del corte con la ordenada se sabe que la fuerza de impacto sobre el peso del objeto en caída libre teóricamente a una altura de ≈ 0.01 [m] es aproximadamente igual, por lo que $b = 1$.

Entonces conocida la pendiente la curva característica (F/Peso) Vs. E según la ecuación [5.1] para la persona de 68 [Kg].

$$y = 5.107 \times 10^{-4} x + 1 \quad [5.6]$$

Para este caso:

- y : Fuerza de impacto sobre el peso del objeto. [N/N]
- x : Energía potencial antes de la caída. [Ncm]

Con una caída de 1 [m] la energía potencia que acumularía:

$$E_p = 68 [Kg] \times 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times 100 [cm] = 66708 [Ncm]$$

Se reemplaza en la ecuación [5.6].

$$\frac{Fuerza_I}{W} = (5.107 \times 10^{-4})(66708) + 1$$

$$\frac{Fuerza_I}{667.08} = 35.06$$

$$Fuerza_I = 23.287 [KN]$$

Mientras que según la ecuación [5.3], la cual relaciona la fuerza de impacto directamente con la altura de caída, para este caso de 1 [m] se tiene:

$$F = mg [0.34 \text{ cm}^{-1} x + 1] = 667.08[N] \times [0.34 \text{ cm}^{-1} (100 \text{ cm}) + 1]$$

$$F = 23.347 [KN]$$

Se observa que para ambos análisis se llega a una aproximación casi igual por lo que se comprueba que son aceptables para cualquier cuerpo de diferente masa y geometría.

Según la ecuación [4.2] el error porcentual entre estas dos fuerzas es:

$$error\% = \frac{|23.347 - 23.287|}{23.287} \times 100\% = 0.25\%$$

En la siguiente tabla se muestra la fuerza de impacto siguiendo el mismo análisis para diferentes alturas propuestas y su incremento.

Tabla 30

Fuerza de impacto hombre de 68 [Kg] a diferentes alturas

Altura [cm]	Fuerza de impacto hombre [N]	Incremento [N/N]
0	667,08	
10	2935,15	4,4

Continúa

20	5203,22	7,8
30	7471,30	11,2
40	9739,37	14,6
50	12007,44	18
60	14275,51	21,4
100	23347,80	35
150	34688,16	52
200	46028,52	69

5.1.4. Ensayos Charpy

5.1.4.1. “Amsler Pendulum Impact Testing Machine”

En las pruebas se utiliza dos tipos de materiales para las vigas tipo probeta, un acero ASTM A36 y un de acero endurecido SAE 1040, con muescas de 2 [mm] de ancho, 2.45 [mm] de profundidad y un ángulo de 45° de abertura, por lo que las áreas efectivas correspondientes debido a cada una de las geometrías de las probetas son conocidas. La cantidad de probetas es de 14 unidades en total, lo cual se justificó en el capítulo 3.2.1. con la ecuación [3.20] para la fabricación de las Probetas. Las medidas de cada una se muestra a continuación:

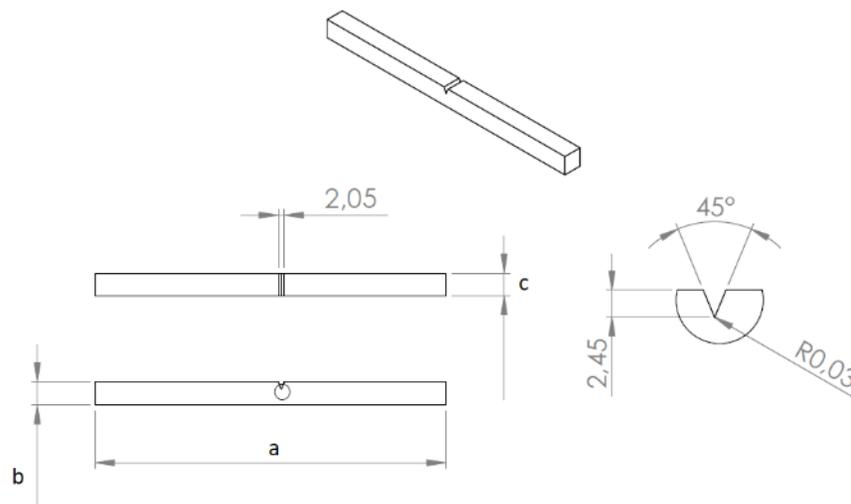


Figura 78 Geometría de las probetas de Acero ASTM A36 y SAE 1040.

Tabla 31
Geometrías de las probetas para ensayos de impacto

Probeta	Número #	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Alt. Efectiva [mm]
ASTM A36	1	120.80	7.88	7.66	5.40
	2	120.85	7.73	7.90	5.25
	3	120.75	8.08	7.75	5.60
	4	120.95	7.83	7.71	5.35
	5	120.99	7.70	7.90	5.22
	6	121.05	7.80	7.68	5.32
	7	120.90	7.90	7.65	5.42
	8	120.74	7.93	7.70	5.45
	9	121.00	7.74	7.75	5.26
SAE 1040	10	120.80	5.26	4.95	2.78
	11	120.96	5.28	4.95	2.80
	12	120.78	5.75	5.00	3.27
	13*	121.00	5.35	5.00	2.07
	14	120.70	5.73	4.95	3.25

(*) Probeta con muesca de 0.8 [mm] más de profundidad.

La distancia entre los apoyos para ambas máquinas fue de ≈ 96 mm.

Para el ensayo Charpy en la máquina Amsler del laboratorio, primero se realiza una prueba sin colocar ninguna probeta, para verificar su funcionamiento y calibración, en donde la energía de referencia con la que inicia debe ser prácticamente la misma con la que llega el péndulo al lado contrario en su punto máximo, es decir en la escala marca ≈ 0 [Kg.m].

A continuación, se coloca la probeta, centrada y con el lado de la muesca correcto, como se muestra en la figura 79.



Figura 79 Colocación de la probeta.



Figura 80 Altura de caída del martillo-Ensayo Charpy.

Puesto en marcha los ensayos bajo las condiciones especificadas, se obtiene los siguientes resultados para cada una de las probetas.

Tabla 32
 Datos del ensayo Charpy 1-Probetas acero ASTM A36 (8x8) y SAE 1040 (5x5)

	Número de la probeta	Área efectiva [mm ²]	Energía absorbida		
			[Kg . m]	[Nm o J]	[KJ/m]
ASTM A36	1	41.364	5.6	54.936	1328.2
	2	41.475	5.7	55.917	1348.2
	3	43.400	6.2	60.822	1401.4
	4	41.248	5.7	55.917	1355.6
	5	41.238	5.8	56.898	1379.7
	6	40.857	5.7	55.917	1368.6
	7	41.463	5.9	57.879	1395.9
	8	41.965	6.1	59.841	1425.9
	9	40.765	5.8	56.898	1395.7
SAE 1040	10	13.761	0.7	6.867	499.0
	11	13.860	0.8	7.848	587.2
	12	16.350	0.9	8.829	540.0
	13*	10.350	0.3	2.943	284.3
	14	16.087	0.8	7.848	487.8



Figura 81 Probetas ASTM A 36 luego del ensayo Charpy.

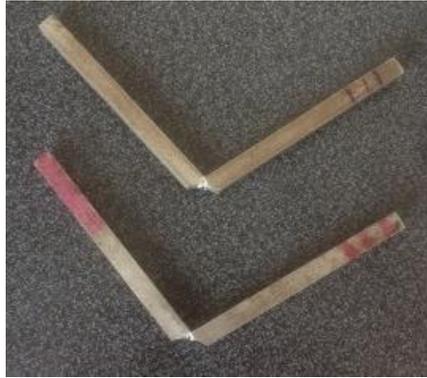


Figura 82 Probetas SAE 1040 luego del ensayo Charpy.

5.1.4.2. Péndulo Charpy – Resistencia al impacto instrumentado.

Después se procede a la máquina de ensayos Charpy instrumentada para medir los ángulos inicial y final después de una prueba de impacto para dos de SAE 1040, cable de cobre y de acero inoxidable. Obteniendo los siguientes resultados:

5.1.4.2.1. Probetas de acero SAE 1040



Figura 83 Ensayo Charpy instrumentado-Probeta acero SAE 1040(5x5)

Datos geométricos de la probeta a prueba 1:

- $L_0=120$ [mm]
- Espesor=4.95 [mm]
- Altura efectiva en la muesca=2.92 [mm]

Datos geométricos de la probeta a prueba 2:

- $L_0=120.71$ [mm]
- Espesor=4.95 [mm]
- Altura efectiva en la muesca=2.05 [mm]

Se ensayó con un ángulo inicial de 150° el péndulo no pudo atravesar y dar una medida adecuada, dado que la capacidad máxima de la máquina es de 5.80 [J], comparando con la energía promedio de ≈ 7 [J] obtenida en los primeros ensayos para una probeta similar. Por esto y el hecho del efecto del impacto sobre la probeta comprobamos que la máquina se encuentra calibrada y midiendo datos consistentes.



Figura 84 Probetas después del ensayo Charpy fallido.

5.1.4.2.2. Cable de cobre

Con una geometría de definida por:

- Diámetro=2.02 [mm]

- $L_0 = 130$ [mm]

Preparada la máquina con un ángulo inicial de 150°



Figura 85 Alambre de cobre luego del ensayo Charpy.

Una vez ensayada la probeta se obtuvo los siguientes resultados:

- Ángulo final = 91°
- Energía del péndulo = 5.29 [J]
- Fuerza de impacto = 172.18 [N]
- Energía de rotura = 0.123 [J]
- Velocidad de impacto = 3.45 [N]

5.1.4.2.3. Cable de acero inoxidable

Se anota los siguientes datos para su geometría:

- Diámetro = 2.10 [mm]
- $L_0 = 130$ [mm]

Con un ángulo de elevación del brazo inicial de 150° para la máquina.



Figura 86 Cable de acero inoxidable después del ensayo Charpy.

Una vez ensayada la probeta se obtuvo los siguientes resultados:

- Ángulo final=76°
- Energía del péndulo= 5.29 [J]
- Fuerza de impacto=172.18 [N]
- Energía de rotura= 0.858 [J]
- Velocidad de impacto=3.45 [N]

Con estos datos se viabiliza los ensayos y las máquinas que se utilizarán durante los próximos ensayos, como también las dimensiones geométricas y materiales de las que se encuentren compuestas.

5.2. Ensayos con cargas estáticas

Para este tipo de ensayos se utiliza la máquina MTS TK/T5002 la cual se encuentra automatizada, calibrada y totalmente funcional. Esta obtiene de forma digital los datos en una tabla en Excel, a los cuales hay que adecuarlos a la nomenclatura manejada por el software para su uso.

Con un total de 14 probetas entre ambos materiales, dato calculado en el capítulo 3.2.1. con la ecuación [3.20], para así poder completar el análisis y comparación con los resultados con carga de impacto. Se acopla los apoyos para que se encuentren a aproximadamente ≈ 96 [mm] de separación y la probeta quede simplemente apoyada.

5.2.1. Probetas de acero ASTM A36

La prueba sobre las probetas para el acero ASTM A 36, según la Figura 78 de dimensiones:

Tabla 33

Dimensiones de probetas ASTM A36 para ensayos estáticos.

Probeta	Número #	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Altura efectiva [mm]
ASTM A36	1	120.80	7.73	7.90	5.25
	2	120.85	7.88	7.60	5.40
	3	120.90	8.08	7.80	5.60
	4	121.03	7.71	7.75	5.23
	5	120.80	7.78	7.60	5.30
	6	120.95	7.80	7.81	5.20
	7	120.88	7.93	7.70	5.45
	8	120.94	7.86	7.68	5.38
	9	120.95	7.85	7.66	5.37

5.2.1.1. Probeta #1



Figura 87 Ubicación probeta ASTM A36, percutor y soportes-MTS TK/T5002.

Se obtiene un total de 376 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 34
Datos del ensayo estático de Flexión 1-acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0,000	0,1660	26	1,691	861,7	209	16,826	1465
5	0,251	0,4990	27	1,748	863,9	220	18,900	1480
7	0,409	9,6450	28	1,801	866,0	226	19,995	1486
9	0,569	30,431	29	1,859	871,7	227	20,183	1485
10	0,647	47,725	30	1,910	876,5	238	22,261	1475
11	0,725	73,666	31	1,966	882,5	252	24,938	1451
12	0,793	87,468	32	2,026	887,3	266	27,584	1402
13	0,871	143,30	33	2,082	898,0	282	30,615	1301
14	0,947	195,90	34	2,136	903,5	290	32,161	1245
15	1,019	248,80	41	2,521	949,0	296	33,344	1207
16	1,088	368,30	51	3,063	1002	306	35,267	1150
17	1,156	451,50	63	3,707	1052	313	36,667	1098
18	1,222	534,30	76	4,438	1103	320	38,049	1051
19	1,293	609,50	89	5,238	1152	327	39,429	1002
20	1,353	683,50	107	6,322	1204	337	41,436	902,5
21	1,410	775,70	126	7,426	1250	348	43,666	809,8
22	1,468	815,50	144	8,786	1303	358	45,696	749,3
23	1,523	846,40	166	10,416	1349	364	46,957	698,3
24	1,58	866,70	181	12,416	1401	371	47,377	624,6
25	1,637	860,40	202	15,488	1451	376	47,377	618,8

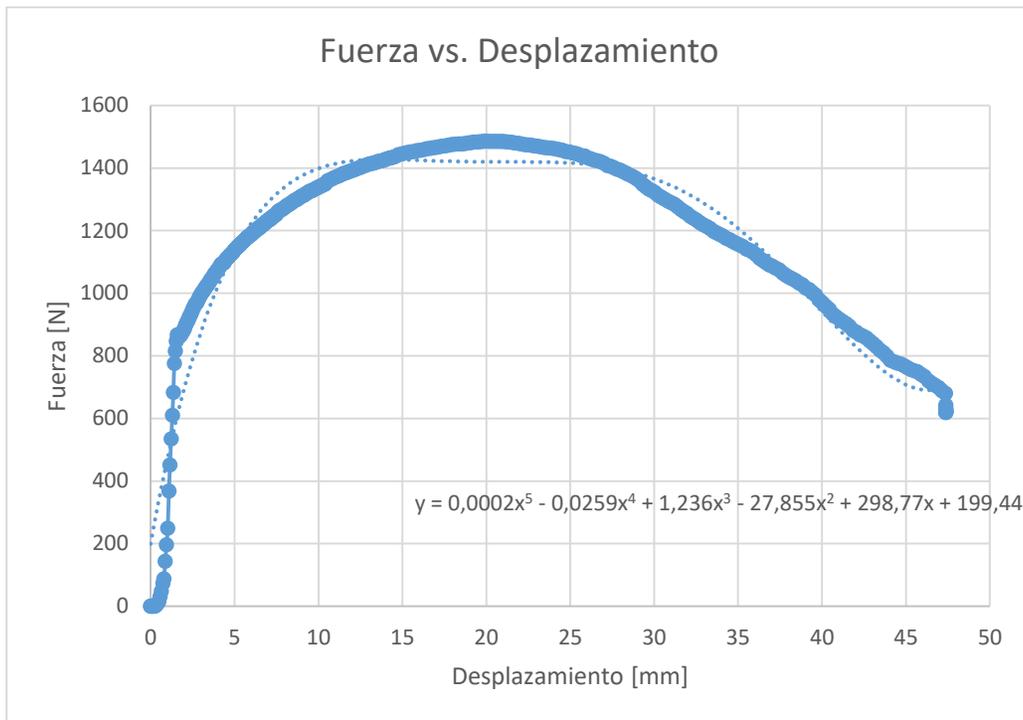


Figura 88 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 1, ASTM A36



Figura 89 Probeta de Acero ASTM A36 después del ensayo estático.

Análisis de datos – Probeta #1

Para el análisis de la gráfica obtenida Fuerza vs. Desplazamiento se sabe que el área bajo la curva de dicha gráfica es la energía de ruptura, por lo que con la aproximación de una función polinómica de quinto grado obtenemos el valor de A_{g1} :

$$A_{g1.1} = \int_0^{47.377} (0.0002x^5 - 0.0259x^4 + 1.236x^3 - 27.855x^2 + 298.77x + 199.44)dx$$

$$A_{g1.1} = 54686.1 [N \cdot mm] = 54.686 [J]$$

Consideraciones adicionales como la utilización del ajuste por la fórmula de endurecimiento por deformación en el ajuste de la curva, se presenta la forma siguiente forma.

$$\sigma = \frac{F}{A} = K * \varepsilon^n \quad [5.3]$$

En donde:

- σ : Esfuerzo [MPa]
- F : carga aplicada [N]
- A : Área de la sección [mm²]
- K : Constante de deformación [MPa]
- ε : Deformación unitaria

Y al pasarlo a la forma:

$$F = K * \delta^n \quad [5.4]$$

- δ : Desplazamiento [mm]

Según (Askeland & Phulé, 2004) la ecuación [5.3] al momento de aplicarle una linealización logarítmica se puede encontrar los valores de K y n para ajustar la curva característica del material.

$$\ln F = \ln K + n \ln \delta \quad [5.5]$$

Por tanto se realiza este análisis para los datos hasta antes del punto máximo de fuerza de la tabla 34 y a escala logarítmica se obtiene:

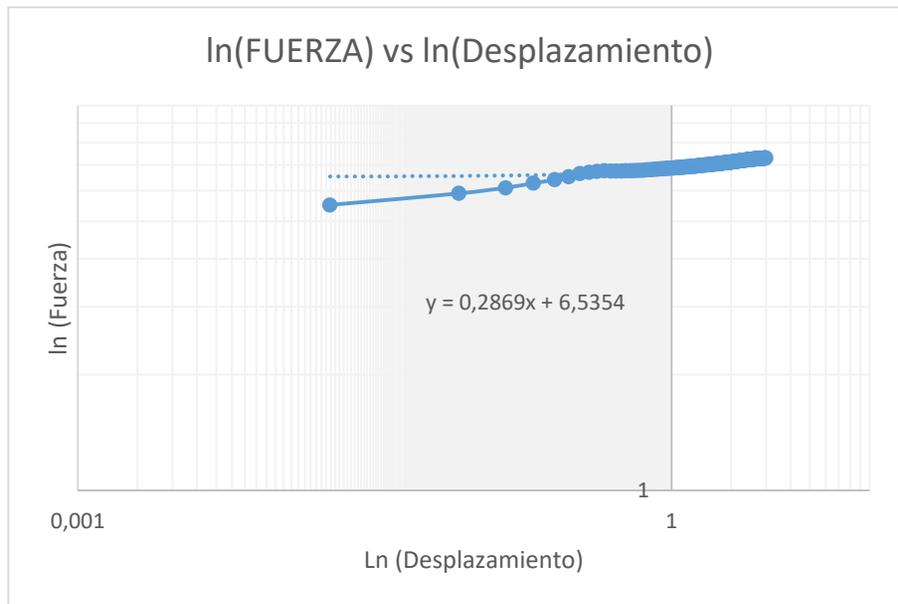


Figura 90 $\ln(\text{Fuerza})$ vs. $\ln(\text{Desplazamiento})$ ASTM A36-Ensayo Flexión.

Se realiza una analogía entre las fórmulas de la ecuación [5.4] y el ajuste lineal por mínimos cuadrados de la figura 87, los siguientes valores para las variables.

$$6.5354 = \ln K$$

$$K = 689.109$$

$$n = 0.2869$$

Reemplazando:

$$y = 689.109 x^{0.2869}$$

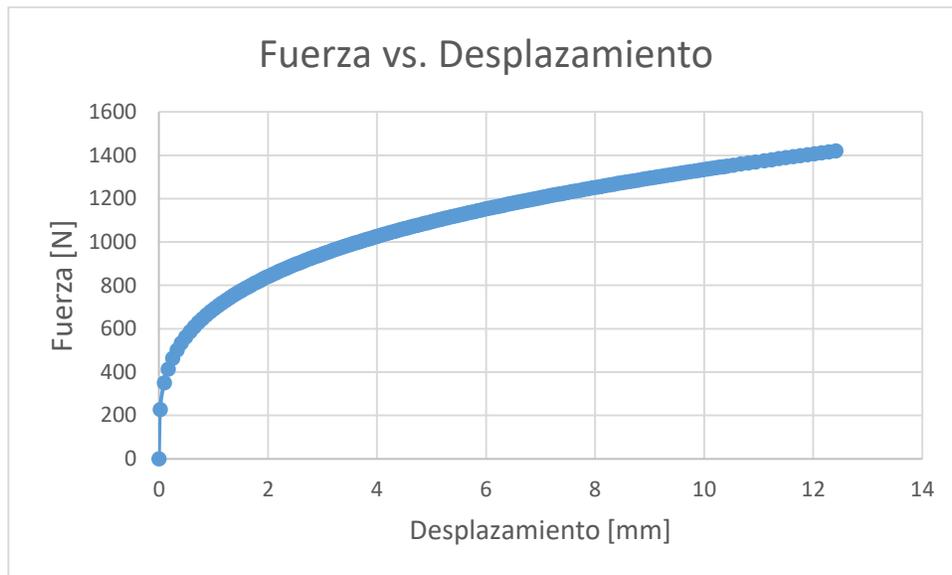


Figura 91 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 1.1.

Como el análisis se realiza hasta el punto de fuerza máxima, antes del punto de la zona de estricción, la gráfica queda partida en dos partes.

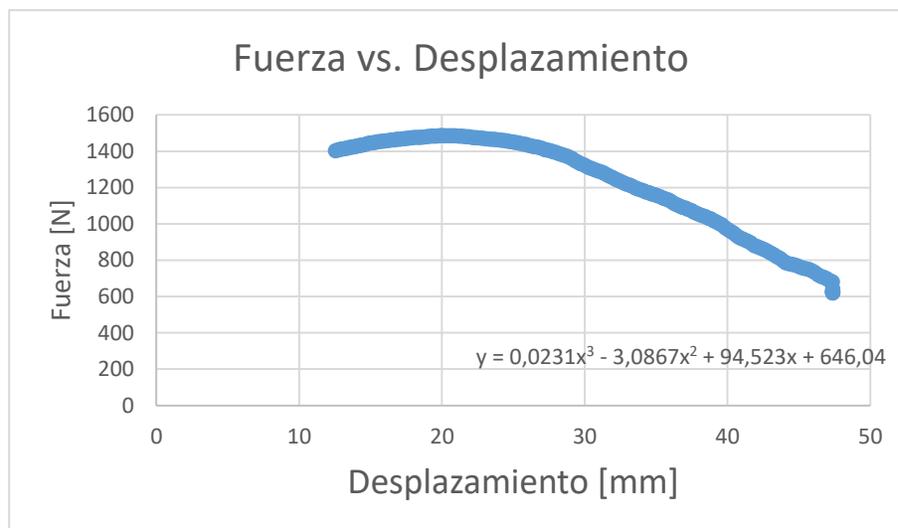


Figura 92 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 2.2.

Y se realiza la integración correspondiente para hallar el área bajo las dos curvas A_{g2} con los límites establecidos.

$$A_{g1.2} = \int_0^{12.416} 689.109 x^{0.2869} dx + \int_{12.416}^{47.377} 0.0231x^3 - 3.0867x^2 + 94.523x + 646.04$$

$$A_{g1.2} = 13695.8 [Nmm] + 42895.3 [Nmm]$$

$$A_{g1.2} = 56591.1 [Nmm] = 56.59 [J]$$

También se determinó el área total por la regla de los trapecios, en el Anexo 1 se detalla paso a paso y cada área por puntos, así como la sumatoria final.

Analizando los resultados para $A_{g1.1}$ y $A_{g1.2}$ obtenidos se decide tomar el primer análisis, la aproximación polinómica de quinto grado, como válido para comparar con futuros datos obtenidos en ensayos bajo las mismas condiciones. Es decir:

$$A_{g1} = 54.686 [J]$$

5.2.1.2. Probeta #2

Se obtiene un total de 493 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 35

Datos del ensayo estático de Flexión 2- acero ASTM A36 (8x8)

#	Despl. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0,000	0,000	63	1,825	952,5	368	25,030	1493
2	0,023	1,185	68	1,984	969,8	375	26,135	1473
8	0,285	48,259	74	2,175	989,9	382	27,165	1435
10	0,362	119,00	76	2,241	996,0	387	28,091	1414
11	0,404	150,70	77	2,277	1001	392	29,072	1386
13	0,480	221,30	96	2,864	1049	397	30,001	1347
14	0,515	260,80	117	3,493	1099	403	31,166	1309
15	0,550	302,80	143	4,406	1161	408	32,115	1274
16	0,581	345,10	159	5,146	1200	413	33,062	1239
18	0,639	440,80	175	6,182	1255	418	34,065	1207

Continúa

19	0,668	477,70	182	6,685	1274	423	35,017	1180
21	0,725	549,10	190	7,277	1300	428	36,017	1151
22	0,749	583,50	199	7,939	1325	434	37,186	1107
24	0,798	665,50	208	8,580	1350	439	38,185	1071
25	0,821	692,10	218	9,276	1375	444	39,176	1037
26	0,842	720,00	229	10,055	1398	449	40,176	988,3
27	0,864	746,2	245	11,178	1425	454	41,173	936,8
29	0,903	796,5	263	12,485	1450	458	42,001	901,2
30	0,922	815,0	276	13,683	1470	464	43,186	858,8
33	0,975	849,0	290	15,054	1485	468	44,002	818,5
37	1,049	881,7	299	15,990	1490	473	45,028	788,9
41	1,121	870,2	307	16,89	1496	478	46,039	761,5
43	1,184	880,0	315	17,936	1505	479	46,248	754,0
45	1,246	884,8	316	18,068	1507	480	46,487	739,5
46	1,279	887,5	323	18,974	1531	481	46,692	731,4
47	1,310	889,3	324	19,100	1533	482	46,895	725,1
48	1,343	895,1	331	20,009	1539	483	46,895	718,3
49	1,380	899,3	339	21,071	1538	484	46,895	708,3
50	1,409	902,5	347	22,086	1530	485	46,895	700,5
53	1,507	914,6	354	23,015	1520	486	46,895	662,4
57	1,632	930,1	362	24,113	1507	487	46,895	653,4

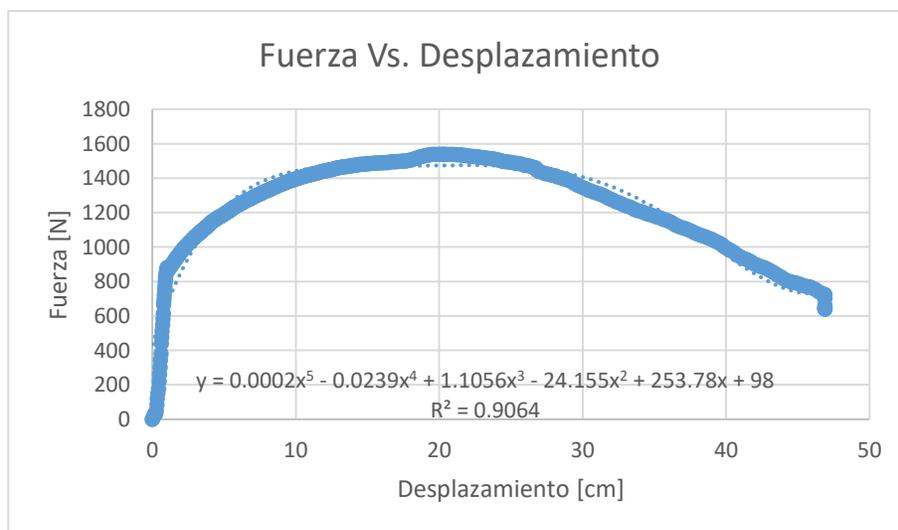


Figura 93 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 2, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #2

El mismo análisis que para la probeta #1 en flexión, se escoge la curva que más se ajusta a la obtenida por los datos y se procede con el cálculo para la energía de deformación.

$$A_{g2} = \int_0^{46.895} (0.0002x^5 - 0.0239x^4 + 1.1056x^3 - 24.155x^2 + 253.78x + 98.37) dx$$

$$A_{g2} = 60475.1 [Nmm] = 60.47 [J]$$

5.2.1.3. Probeta #3

Se obtiene un total de 436 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 36

Datos del ensayo estático de Flexión 3- acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0,000	0,000	126	6,2740	1406	308	24,009	1682
2	0,190	2,032	135	7,1560	1451	316	25,014	1669
15	0,518	85,851	146	8,2330	1501	324	26,018	1652
16	0,541	107,4	160	9,5540	1549	332	27,015	1638
22	0,668	213,2	168	10,317	1575	338	28,140	1598
26	0,743	309,7	176	11,072	1601	343	29,124	1574
30	0,811	394,7	187	12,072	1627	348	30,053	1555
32	0,871	497,2	200	13,253	1651	353	31,030	1535
35	0,961	618,9	209	14,063	1662	359	32,161	1495
37	1,010	711,2	223	15,306	1678	364	33,148	1459
40	1,079	812,4	234	16,313	1686	369	34,121	1431
44	1,160	916,2	235	16,402	1686	374	35,072	1392
49	1,252	985,8	236	16,488	1686	379	36,079	1360
52	1,304	1001	237	16,575	1686	384	37,050	1329
55	1,357	999,9	241	16,934	1687	389	38,049	1302
58	1,483	1010	248	17,574	1690	394	39,040	1270
65	1,836	1056	261	18,841	1697	399	40,040	1234
71	2,144	1099	269	19,602	1700	404	41,037	1198

Continúa

80	2,580	1154	278	20,479	1704	409	42,063	1164
89	3,048	1200	287	21,362	1706	414	43,050	1115,3
99	3,797	1252	291	21,863	1701	419	44,071	1063,8
107	4,482	1301	295	22,359	1699	424	45,093	1022,2
116	5,291	1352	300	23,006	1694	436	47,377	923,40

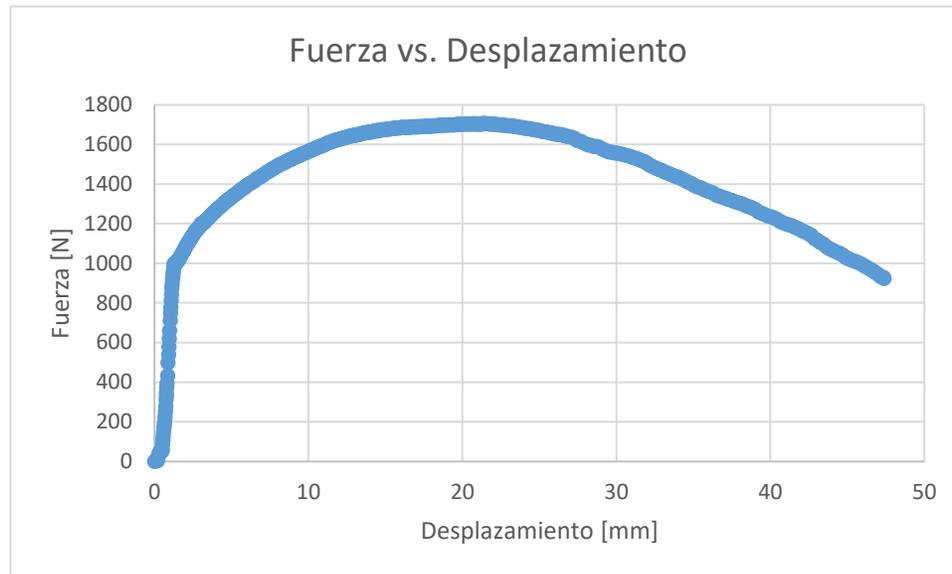


Figura 94 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 3, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #3

Para evitar errores generados en el archivo .xlm y en el ajuste de la curva, se opta por dividir en dos partes a la gráfica.

Para el primer tramo desde un desplazamiento de 0 [mm] hasta los 15.579 [mm] con una fuerza de 1680 [N], es decir antes de que se presente el punto de estricción.

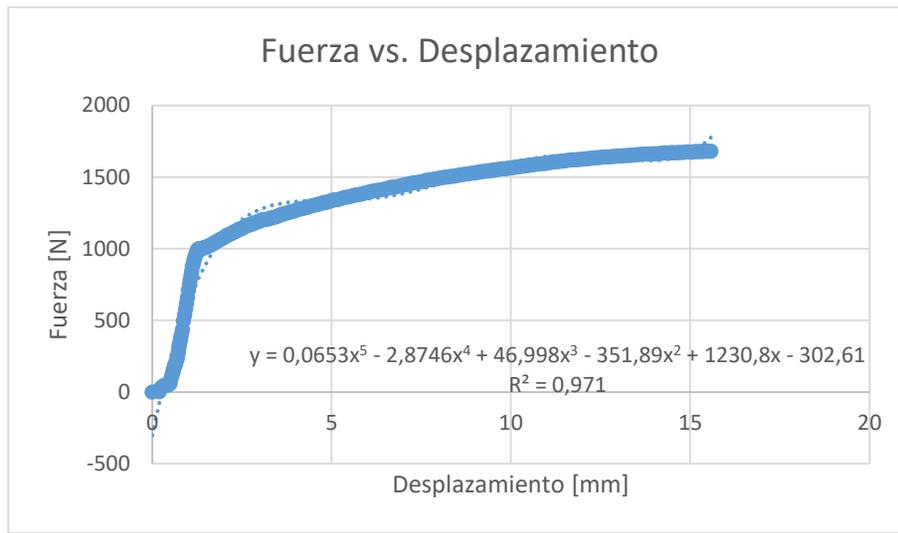


Figura 95 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 3.1.

$$A_{g3.1} = \int_0^{15.579} (0.0653x^5 - 2.8746x^4 + 46.998x^3 - 351.89x^2 + 1230.8x - 302.61) dx$$

$$A_{g3.1} = 21245.3 \text{ [Nmm]}$$

Mientras que para el segundo tramo desde 15.579 [mm] a 47.377 [mm], se tiene:

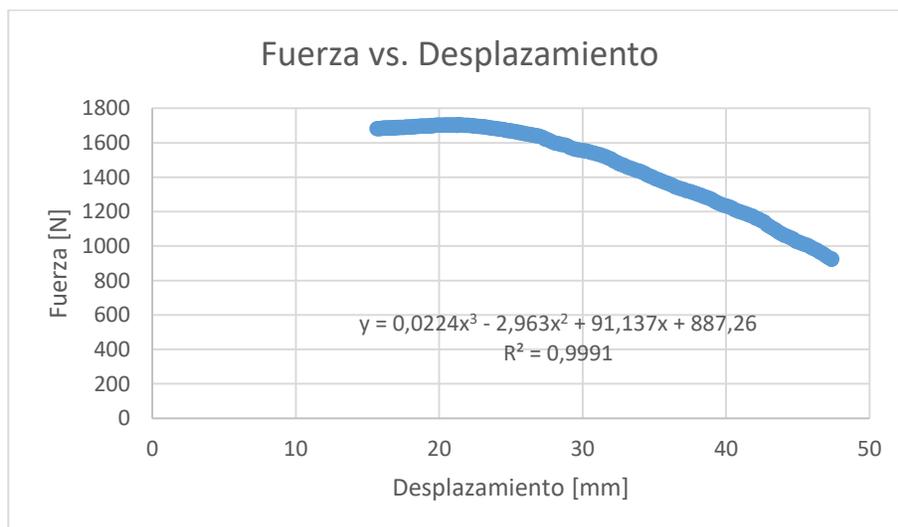


Figura 96 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 3.2.

$$A_{g3.2} = \int_{15.579}^{47.377} (0.0224x^3 - 2.963x^2 + 91.137x + 887.26)dx$$

$$A_{g3.2} = 39372.6 [Nmm]$$

Se suma ambas partes para obtener la energía de deformación total:

$$A_{g3} = 21245.3 [Nmm] + 39372.6 [Nmm]$$

$$A_{g3} = 60617.9 [Nmm] = 60.61 [J]$$

5.2.1.4. Probeta #4

Se obtiene un total de 337 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 37

Datos del ensayo estático de Flexión 4-acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	45	1,425	893,5	202	11,561	1412
2	0,047	1,185	54	1,872	945,5	208	12,01	1422
3	0,124	20,48	55	1,904	951,1	209	12,085	1424
5	0,343	102,7	56	1,937	953,5	229	13,916	1453
6	0,372	134,4	57	2,039	963,1	238	14,816	1466
7	0,401	160,0	58	2,104	970,6	244	15,954	1472
9	0,457	244,5	69	2,472	1006	247	16,780	1476
10	0,487	286,5	82	2,988	1049	251	17,936	1481
11	0,511	328,8	83	3,050	1053	255	18,974	1488
14	0,583	461,4	93	3,400	1077	262	19,884	1502
15	0,604	496,8	106	3,853	1106	267	20,943	1504
21	0,719	703,7	108	3,942	1113	273	23,015	1491
22	0,737	729,9	110	4,031	1119	283	25,979	1452
23	0,757	753,1	127	4,999	1174	288	27,720	1405
25	0,792	798,7	128	5,134	1179	294	30,001	1344
26	0,811	810,5	140	6,017	1220	297	31,166	1297
29	0,864	845,8	152	6,894	1258	304	33,872	1204

Continúa

30	0,912	861,2	153	6,968	1262	309	35,819	1145
31	0,946	865,4	165	7,844	1297	313	37,374	1090
33	1,008	860,0	166	7,915	1303	320	40,176	996,0
35	1,072	853,9	167	7,986	1304	325	42,199	894,3
36	1,105	857,6	180	8,903	1339	331	44,635	794,5
37	1,142	863,7	189	9,955	1374	336	46,248	740,8
38	1,171	862,5	197	10,94	1399	337	46,487	736,7

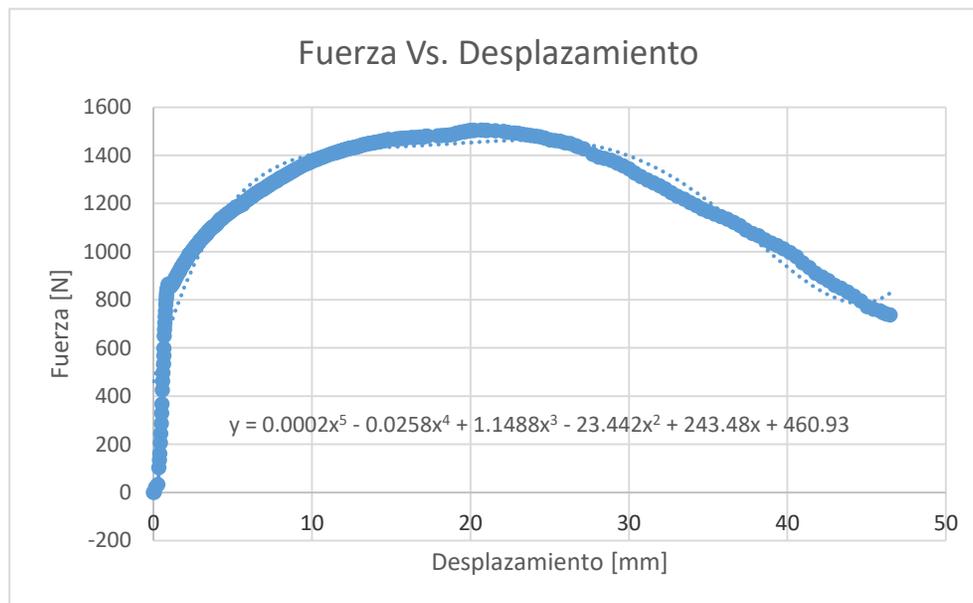


Figura 97 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 4, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #4

$$A = \int_0^{46.845} (0.0002x^5 - 0.0258x^4 + 1.1488x^3 - 23.442x^2 + 243.48x + 460.93)dx$$

$$A = 56741.8 [Nmm] = 56.742 [J]$$

5.2.1.5. Probeta #5

Se obtiene un total de 373 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 38
Datos del ensayo estático de Flexión 5-acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	83	5,319	1123	266	28,039	1403
3	0,05	0,379	90	5,751	1149	273	29,391	1369
7	0,364	3,206	98	6,239	1173	282	31,07	1304
9	0,524	11,846	108	6,838	1201	287	32,057	1273
10	0,602	27,644	117	7,365	1225	290	32,616	1251
11	0,68	44,938	128	8,024	1248	297	33,997	1204
12	0,748	70,879	135	8,562	1273	302	34,956	1172
13	0,826	84,681	146	9,401	1302	306	35,722	1152
14	0,902	140,5	156	10,13	1324	310	36,534	1128
15	0,974	193,1	168	11,125	1356	314	37,314	1095
16	1,043	246	174	11,953	1376	317	37,919	1078
17	1,111	365,5	182	13,005	1398	320	38,504	1054
18	1,177	448,7	194	14,629	1425	325	39,495	1024
19	1,248	531,5	205	16,508	1453	327	39,884	1008
20	1,508	606,7	218	18,981	1474	332	40,889	954,8
21	1,665	680,7	226	20,45	1482	337	41,891	906,6
22	1,823	772,9	227	20,638	1483	344	43,309	853,6
23	1,978	812,7	228	20,848	1482	349	44,321	806,8
24	2,035	843,6	229	21,034	1482	357	45,952	753,1
33	2,537	884,5	234	21,977	1480	364	47,412	702,1
35	2,648	900,7	235	22,165	1479	365	47,61	695,3
43	3,086	951,5	240	23,121	1471	366	47,812	685,3
47	3,306	972,3	241	23,307	1470	367	48,273	677,5
51	3,518	994,8	245	24,063	1463	368	48,734	639,4
59	3,954	1029	249	24,813	1458	369	49,195	630,4
64	4,214	1049	250	24,996	1456	370	49,656	626,4
70	4,524	1073	251	25,178	1454	371	50,117	623,6
77	4,957	1100	260	26,899	1426	373	51,039	619,6

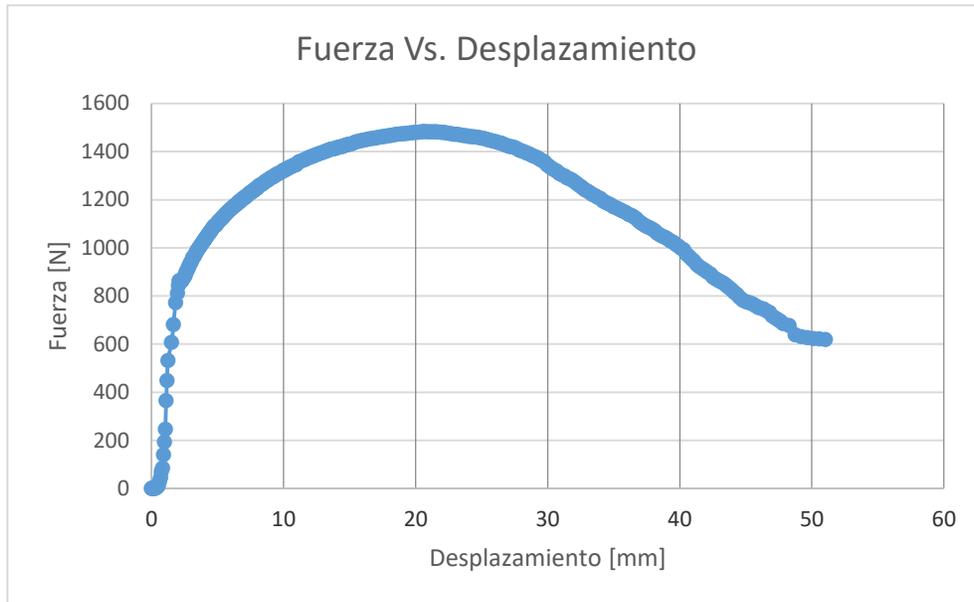


Figura 98 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 5, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #5

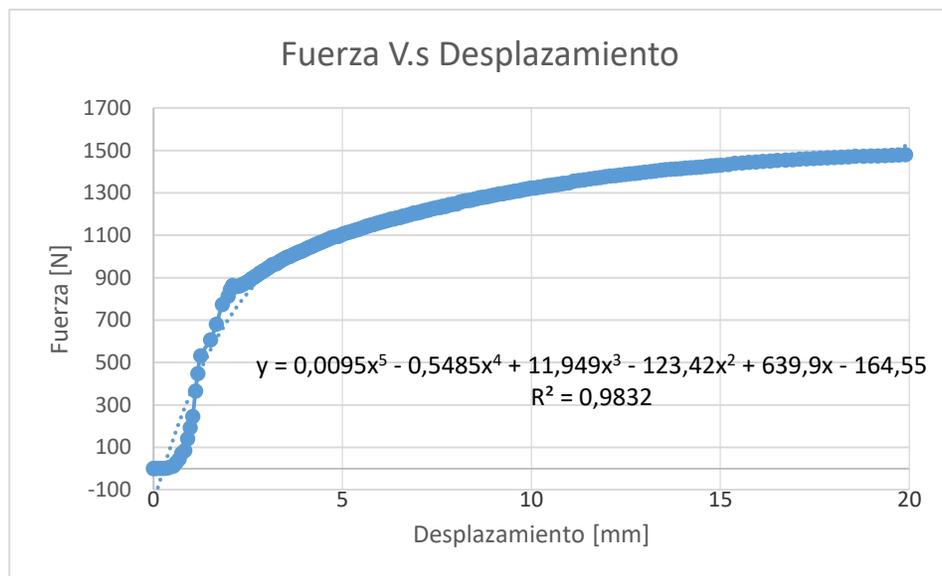


Figura 99 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 5.1.

$$A_{g5.1} = \int_0^{19.904} (0.0095x^5 - 0.5485x^4 + 11.949x^3 - 123.42x^2 + 639.9x - 164.55)dx$$

$$A_{g5.1} = 23679 \text{ [Nmm]}$$

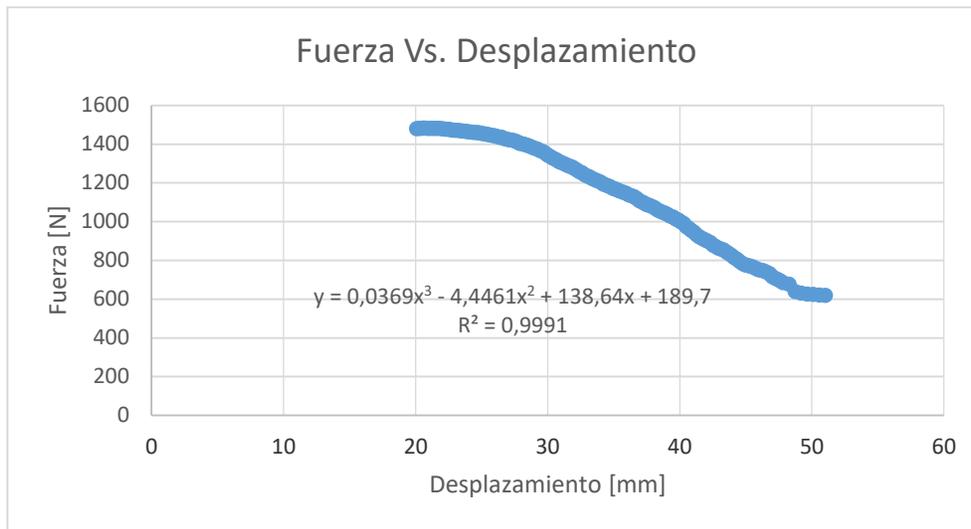


Figura 100 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 5.2.

$$A_{g5.2} = \int_{19.904}^{51.039} (0.0369x^3 - 4.461x^2 + 138.64x + 189.7)dx$$

$$A_{g5.2} = 34815.1 [Nmm]$$

$$A_{g5} = 23679 [Nmm] + 34815.1 [Nmm] = 58494.1 [Nmm] = 58.494 [J]$$

5.2.1.6. Probeta #6

Se obtiene un total de 314 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 39

Datos del ensayo estático de Flexión 6-acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	84	7,271	1282	240	22,958	1492
5	0,207	17,141	95	8,651	1334	242	23,359	1489
6	0,301	35,259	100	9,001	1347	243	23,489	1487
7	0,385	106	108	9,552	1367	250	24,9	1466
8	0,462	164,5	114	9,986	1379	255	25,873	1447
9	0,545	249	123	10,614	1397	261	26,993	1407
10	0,615	333,3	128	10,978	1406	264	27,743	1389

Continúa

11	0,681	429	138	11,656	1420	268	28,873	1364
12	0,739	501,3	150	12,533	1437	271	29,657	1325
13	0,795	571,7	162	13,595	1455	274	30,773	1286
14	0,849	653,7	167	14,079	1462	277	31,948	1246
15	0,898	708,2	182	15,587	1488	279	32,697	1217
16	0,942	757,6	186	15,996	1491	282	33,888	1179
17	0,984	803,2	191	16,52	1492	284	34,659	1157
19	1,167	850,3	195	16,975	1497	287	35,837	1123
28	1,619	898	200	17,612	1500	289	36,622	1090
29	1,689	907,7	207	18,542	1508	292	37,81	1049
34	1,998	943,1	211	19,056	1517	297	39,775	970,1
39	2,32	978,1	215	19,581	1523	302	41,782	873,4
45	2,699	1011	218	19,965	1524	306	43,396	810,8
54	3,318	1060	223	20,605	1511	307	43,806	790,7
58	3,79	1096	226	21,021	1510	309	44,646	766,1
64	4,661	1156	230	21,537	1508	310	45,043	754,1
69	5,259	1183	234	22,041	1503	312	45,843	733,7
78	6,392	1244	237	22,445	1498	314	46,697	697,3

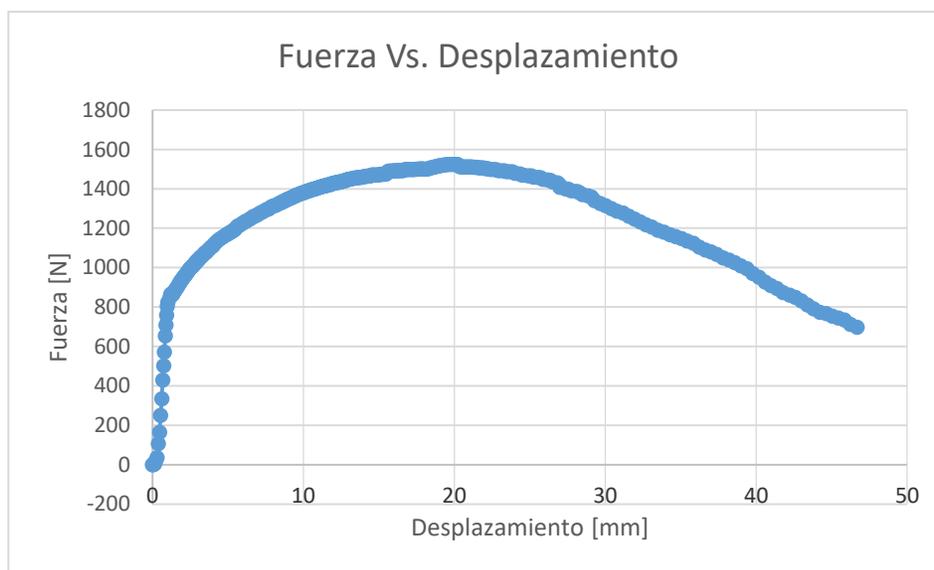


Figura 101 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 6, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #6

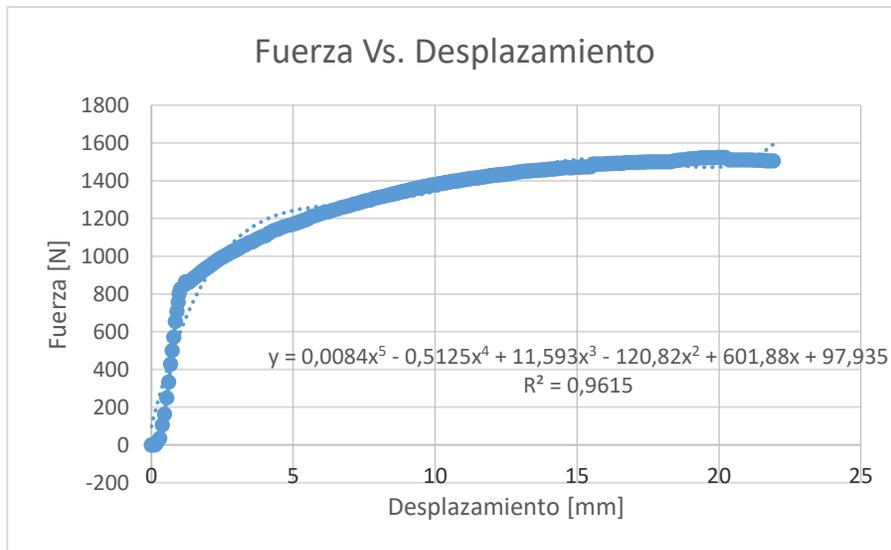


Figura 102 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 6.1.

$$A_{g6.1} = \int_0^{21.915} (0.0084x^5 - 0.5125x^4 + 11.593x^3 - 120.82x^2 + 601.88x + 97.935)dx$$

$$A_{g6.1} = 28265.8 [Nmm]$$

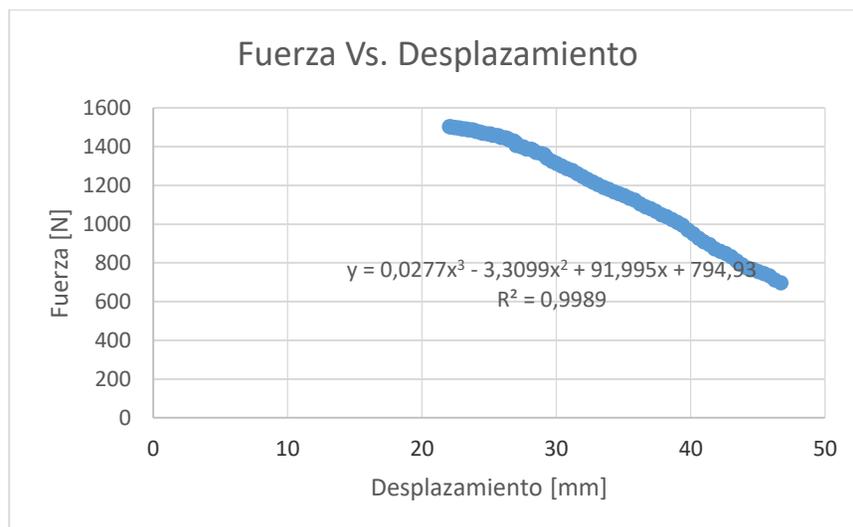


Figura 103 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 6.2.

$$A_{g6.2} = \int_{21.915}^{46.697} (00.0277x^3 - 3.3099x^2 + 91.995x + 794.93)dx$$

$$A_{g6.2} = 28508.5 [Nmm]$$

$$A_{g6} = 28265.8 [Nmm] + 28508.5 [Nmm] = 56774.3 [Nmm] = 56.77 [J]$$

5.2.1.7. Probeta #7

Se obtiene un total de 353 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 40

Datos del ensayo estático de Flexión 7-acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	152	8,1300	1358	327	36,327	1170
2	0,030	5,1850	170	9,3960	1403	330	37,516	1126
3	0,065	31,940	195	10,876	1449	332	38,306	1102
4	0,100	52,259	229	13,840	1498	333	38,700	1085
5	0,131	89,004	257	17,725	1531	334	39,089	1074
6	0,160	123,00	263	19,279	1553	335	39,506	1060
7	0,189	136,70	264	19,533	1559	336	39,898	1045
8	0,218	162,3	265	19,789	1562	337	40,289	1030
10	0,275	246,8	266	20,051	1569	338	40,697	1015,9
12	0,327	331,1	267	20,335	1570	339	41,096	995,8
14	0,371	426,8	268	20,595	1571	340	41,525	972,4
17	0,434	535,1	269	20,851	1570	341	41,917	954,8
20	0,489	651,5	270	21,104	1569	342	42,313	940,5
24	0,564	755,4	271	21,355	1569	343	42,710	919,2
28	0,634	823,2	282	24,214	1520	344	43,120	905,5
34	0,796	877,2	291	25,659	1498	345	43,526	894,6
57	1,692	947,8	302	27,430	1455	346	43,960	876,8
63	2,072	990,0	309	29,340	1406	347	44,357	856,6
75	2,806	1051	310	29,713	1394	348	44,753	836,5
87	3,510	1103	313	30,882	1349	349	45,157	818,6
104	4,740	1171	318	32,808	1282	350	45,563	811,9
117	5,569	1208	321	33,973	1241	351	46,216	794,1
131	6,611	1256	323	34,732	1215	352	46,419	790,0
141	7,329	1296	326	35,936	1183	353	46,895	756,0

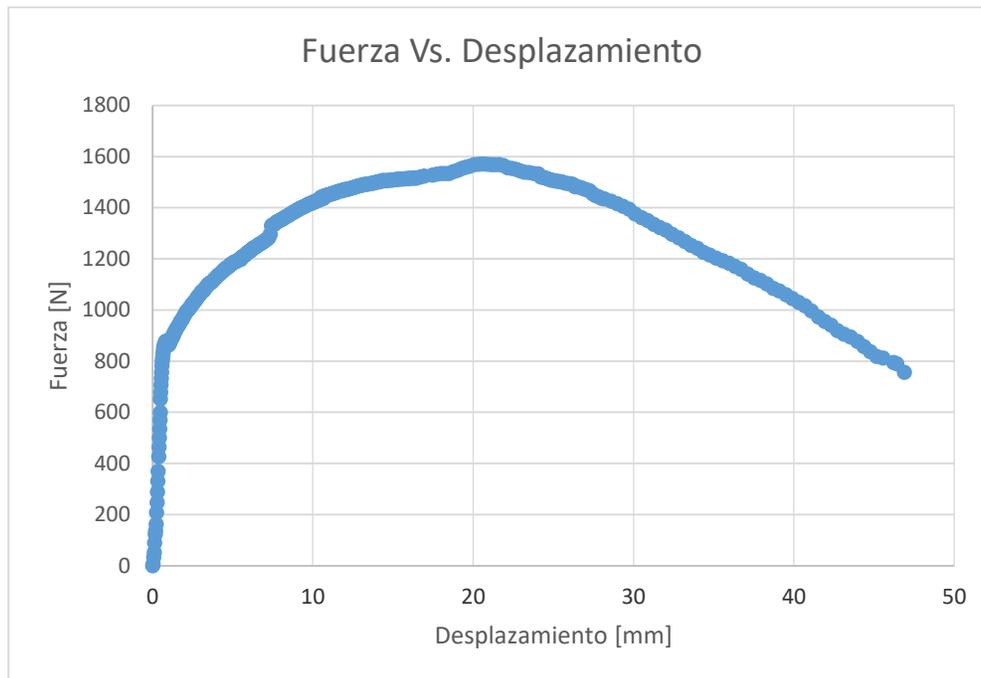


Figura 104 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 7, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #7

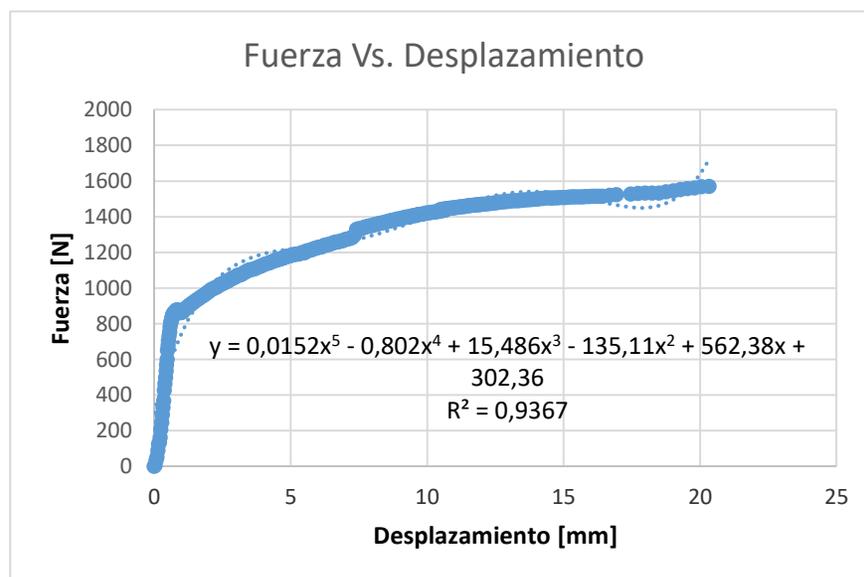


Figura 105 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 7.1.

$$A_{g7.1} = \int_0^{20.335} (0.0152x^5 - 0.802x^4 + 15.486x^3 - 135.11x^2 + 562.38x + 302.36) dx$$

$$A_{g7.1} = 27111.8 \text{ [Nmm]}$$

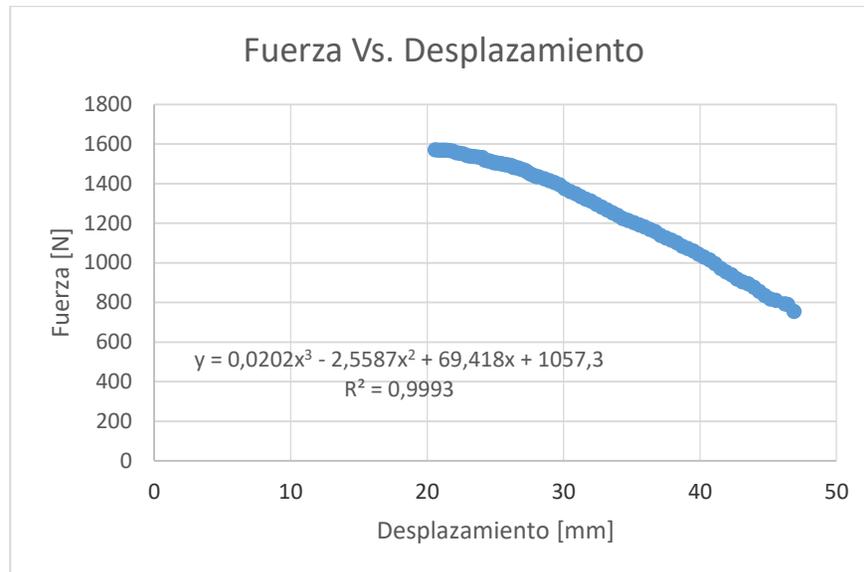


Figura 106 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 7.2.

$$A_{g7.2} = \int_{20.335}^{46.895} (0.0202x^3 - 2.5587x^2 + 69.418x + 1057.3) dx$$

$$A_{g7.2} = 32832 \text{ [Nmm]}$$

$$A_{g7} = 27111.8 \text{ [Nmm]} + 32832 \text{ [Nmm]} = 59943.8 \text{ [Nmm]} = 59.94 \text{ [J]}$$

5.2.1.8. Probeta #8

Se obtiene un total de 329 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 41

Datos del ensayo estático de Flexión 8-acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	101	4,760	1178	232	24,078	1551
3	0,084	16,03	105	5,126	1198	236	25,176	1539
5	0,244	25,69	114	6,413	1258	239	26,139	1524

Continúa

6	0,314	43,80	119	7,152	1290	243	27,423	1503
7	0,380	114,6	130	8,738	1351	246	28,332	1470
8	0,438	171,9	133	9,141	1366	248	29,075	1452
9	0,494	256,4	141	10,273	1412	251	30,246	1422
10	0,548	340,7	145	11,252	1445	254	31,176	1383
11	0,597	436,4	160	12,598	1482	258	31,965	1357
12	0,641	508,7	165	12,972	1489	261	32,537	1339
13	0,683	579,1	172	13,517	1499	263	32,914	1326
14	0,721	661,1	183	14,576	1516	264	33,096	1318
15	0,756	715,6	187	14,953	1520	268	33,861	1289
16	0,794	765,0	193	15,553	1531	273	34,864	1257
17	0,829	810,6	202	16,484	1536	278	35,816	1225
21	1,012	866,8	205	17,109	1539	283	36,816	1200
28	1,462	905,4	207	17,564	1538	289	37,985	1155
34	1,847	950,5	209	18,074	1543	294	38,984	1124
39	2,170	985,5	211	18,581	1547	299	39,975	1090
50	2,694	1040	213	19,131	1550	304	40,975	1052
59	2,962	1061	215	19,645	1558	309	41,972	998,4
64	3,113	1074	217	20,170	1562	314	42,998	952,5
71	3,321	1088	219	20,683	1567	319	43,985	912,7
76	3,466	1101	220	20,935	1569	323	44,801	879,5
81	3,615	1108	225	22,253	1568	328	45,827	830,6
96	4,297	1153	228	23,034	1563	329	46,028	826,4

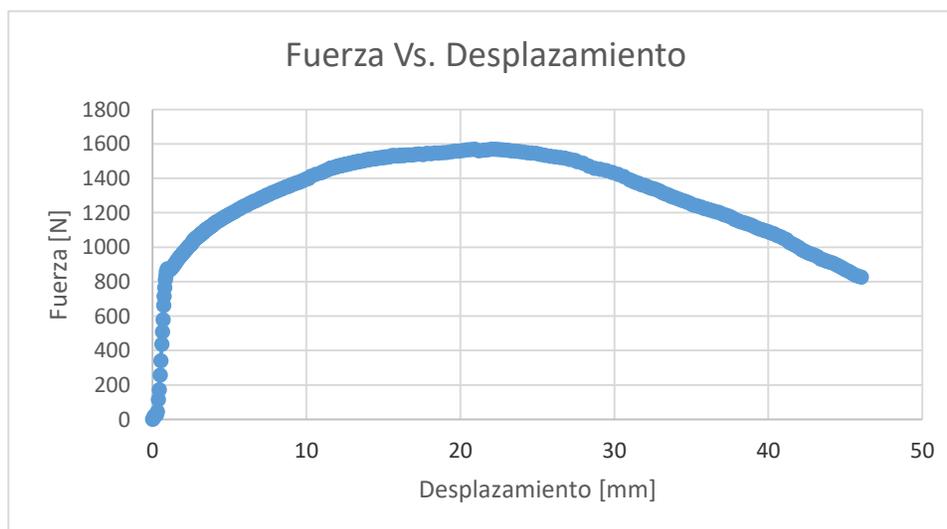


Figura 107 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 8, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #8

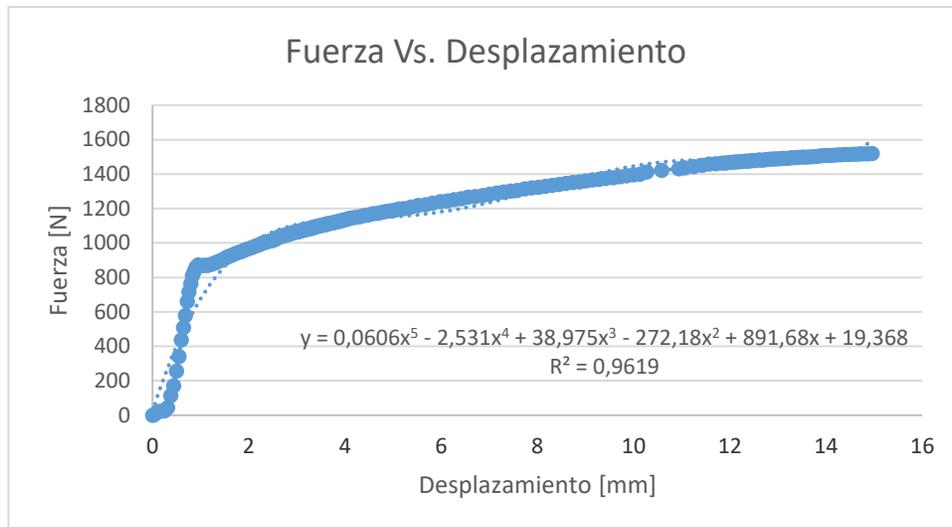


Figura 108 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 8.1.

$$A_{g8.1} = \int_0^{14.953} (0.0606x^5 - 2.531x^4 + 38.975x^3 - 272.18x^2 + 891.68x + 19.368)dx$$

$$A_{g8.1} = 18255 \text{ [Nmm]}$$

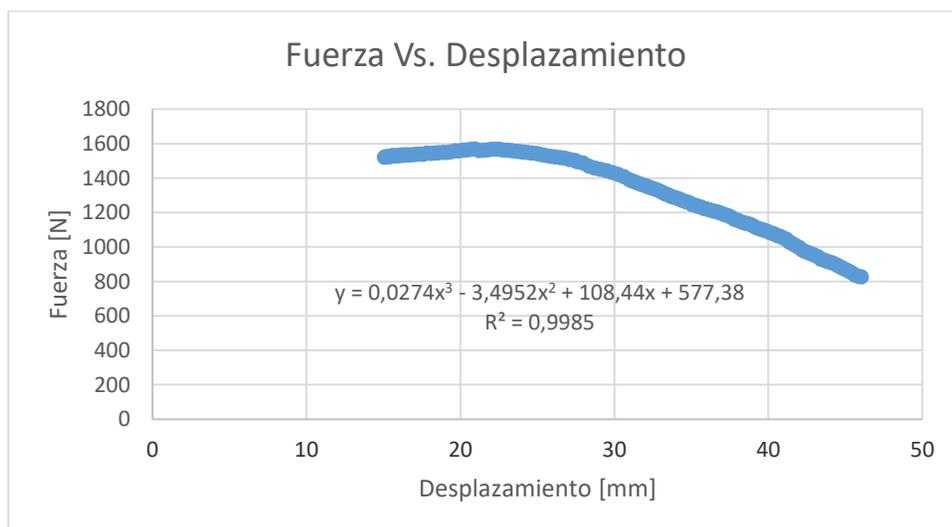


Figura 109 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 8.2.

$$A_{g8.2} = \int_{14.953}^{46.028} (0.0274x^3 - 3.4952x^2 + 108.44x + 577.38) dx$$

$$A_{g8.2} = 41376.1 [Nmm]$$

$$A_{g8} = 18255 [Nmm] + 41376.1 [Nmm] = 59631.1 [Nmm] = 59.63 [J]$$

5.2.1.9. Probeta #9

Se obtiene un total de 346 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 42

Datos del ensayo estático de Flexión 9-acero ASTM A36 (8x8)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	52	1,987	891,2	287	25	1488
2	0,17	1,42	53	2,017	896,8	288	25,313	1485
4	0,347	20,72	54	2,048	898,5	290	25,963	1472
6	0,400	52,24	60	2,369	946,6	293	26,914	1460
8	0,466	102,9	66	2,662	976,1	296	27,788	1444
10	0,524	160,8	70	2,845	997,7	298	28,714	1413
11	0,553	205,8	88	3,493	1050	301	29,883	1387
12	0,580	245,3	104	4,082	1096	303	30,624	1365
14	0,634	329,6	124	4,883	1149	305	31,374	1334
15	0,662	369,0	138	5,812	1197	307	32,171	1305
16	0,683	427,3	153	6,927	1245	310	33,303	1269
17	0,706	464,2	179	8,826	1325	314	34,88	1212
18	0,727	499,6	188	9,459	1349	315	35,26	1200
19	0,749	531,6	195	10,302	1379	319	36,838	1153
21	0,788	596,2	203	11,153	1401	320	37,232	1143
22	0,807	648,0	211	12,184	1425	321	37,618	1130
23	0,824	674,6	229	13,674	1452	323	38,419	1098
24	0,842	708,7	241	14,835	1469	326	39,603	1057
26	0,880	758,1	253	16,577	1485	328	40,379	1033
27	0,899	785,2	264	19,597	1501	330	41,193	1004
28	0,915	803,7	271	20,507	1525	333	42,397	941

Continúa

30	0,949	825,9	281	23,371	1504	335	43,214	902
32	0,987	850,8	283	23,902	1499	337	44,011	868
36	1,194	876,2	284	24,163	1496	340	45,258	822
41	1,562	880,7	286	24,736	1490	346	47,110	749

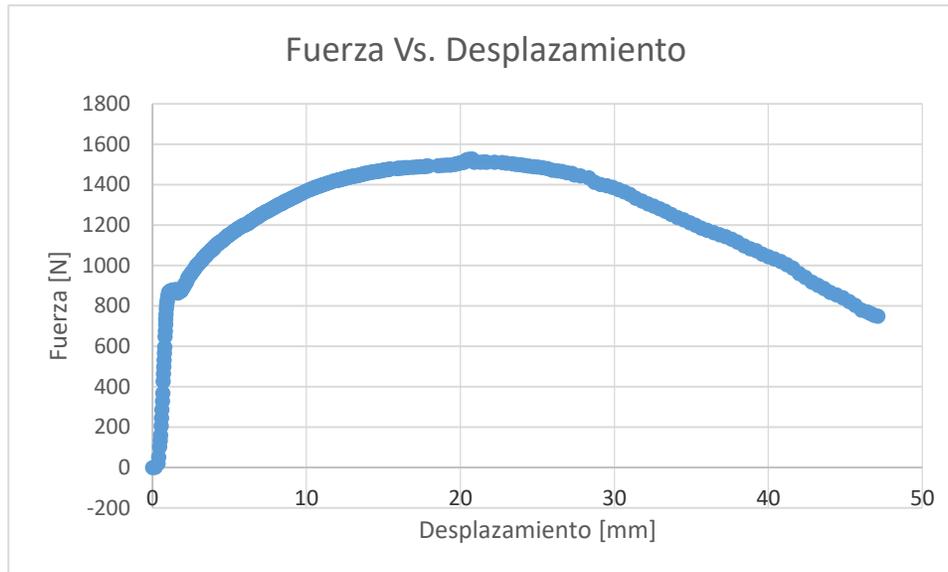


Figura 110 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 9, ASTM A36

Análisis de datos – Probeta #9

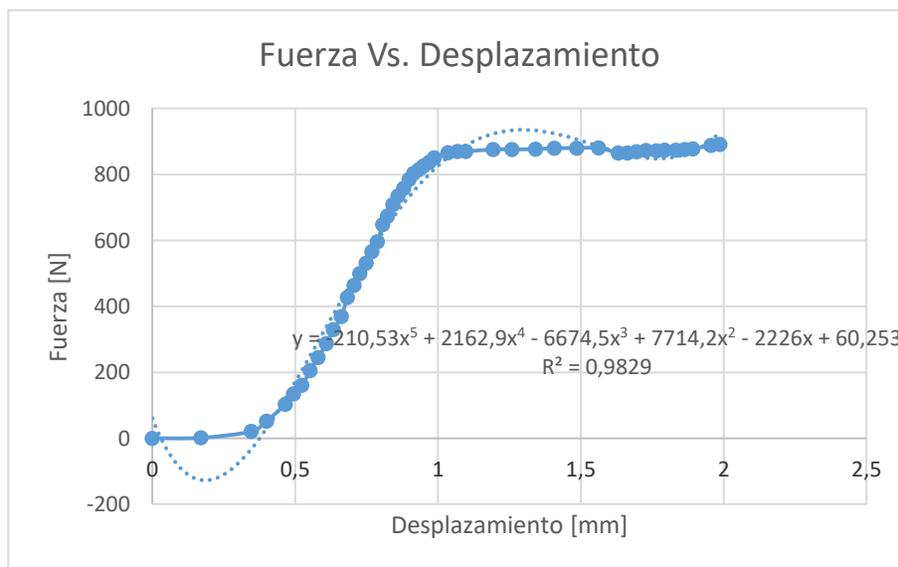


Figura 111 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 9.1.

$$A_{g9.1} = \int_0^{1.987} (-210.53x^5 + 2162.9x^4 - 6674.5x^3 + 7714.2x^2 - 2226x + 60.253)dx$$

$$A_{g9.1} = 1126.49 [Nmm]$$

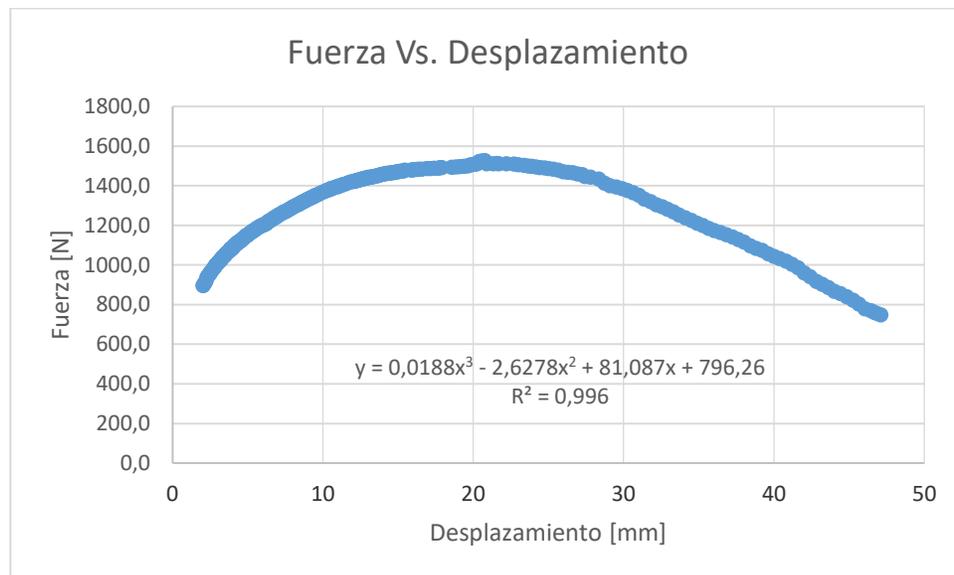


Figura 112 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 9.2.

$$A_{g9.2} = \int_{1.987}^{47.11} (0.0188x^3 - 2.6278x^2 + 81.087x + 796.26)dx$$

$$A_{g9.1} = 58451.09 [Nmm]$$

$$A_{g9} = 1126.49 [Nmm] + 58451.09 [Nmm] = 58451.09 [Nmm] = 58.45 [J]$$

5.2.2. Probetas de acero SAE 1040

La segunda parte para los ensayos sobre las probetas para el acero SAE 1040 presenta algunos errores en la adquisición de datos, procediéndose a repetir el ensayo con el número de probetas que sea necesario para el análisis, por lo que las que se consideraron como resultados válidos presentaron siguientes dimensiones:

Tabla 43

Dimensiones de probetas SAE 1040 para ensayos estáticos.

Probeta	Número #	a [mm]	b [mm]	c [mm]	Altura efectiva [mm]
SAE 1040	10	120.80	5.40	4.95	2.92
	11	120.85	5.73	5.00	3.25
	12	121.00	5.77	5.00	3.29
	13*	120.90	5.48	4.96	2.20
	14	120.80	5.53	4.95	3.05

(*) Probeta con muesca de 0.8 [mm] más de profundidad.

5.2.2.1. Probeta #10



Figura 113 Ubicación probeta SAE 1040, percutor y soportes-MTS TK/T5002.

Obteniendo un total de 217 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 44

Datos del ensayo estático de Flexión 10-Probeta acero SAE (5x5)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
2	0,000	0,000	45	2,67	377,0	126	8,2230	409,10
3	0,034	0,166	46	2,728	379,0	127	8,5550	404,70
4	0,106	6,818	49	2,899	384,0	128	8,8830	394,40
5	0,179	17,793	50	2,966	385,8	130	9,5510	353,50
7	0,318	35,586	53	3,135	389,5	133	10,578	291,70
8	0,383	44,732	61	3,596	396,3	136	11,636	255,30

Continúa

9	0,450	62,858	67	3,943	400,1	140	13,003	207,40
12	0,652	95,284	74	4,354	401,9	148	16,166	151,80
13	0,718	112,10	81	4,750	404,1	155	19,441	120,20
15	0,845	153,30	87	5,112	405,4	161	22,252	100,30
19	1,098	208,50	95	5,569	407,4	173	27,840	73,500
23	1,340	255,90	96	5,628	408,2	182	31,965	60,363
28	1,656	303,80	101	5,910	409,4	190	35,719	50,386
36	2,127	350,70	107	6,252	410,6	202	41,296	39,078
42	2,492	370,80	124	7,499	412,6	211	45,038	29,600
44	2,609	375,00	125	7,835	411,9	217	45,038	28,103

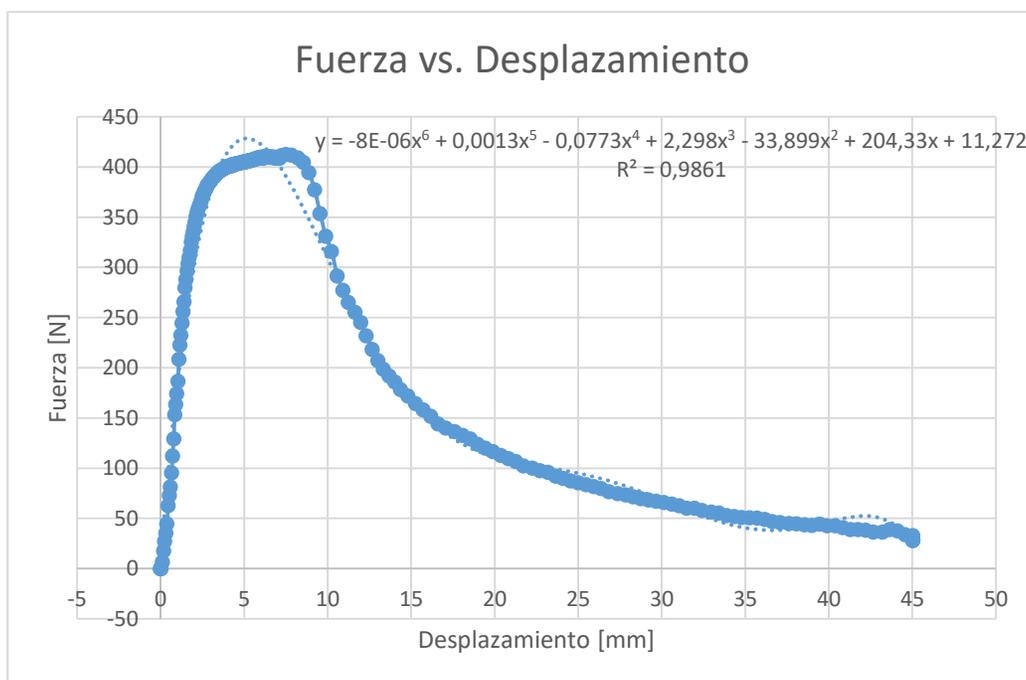


Figura 114 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 10, SAE 1040

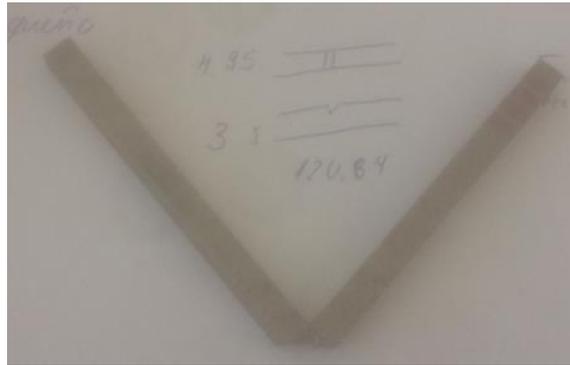


Figura 115 Probeta de Acero SAE 1040 después del ensayo de carga estática.

Análisis de datos – Probeta #10

En este análisis para una mejor aproximación se procedió a dividir a la función por partes. La primera desde el valor de 0 hasta un desplazamiento de 394.4 [mm] o punto de estricción, obteniendo la siguiente función.

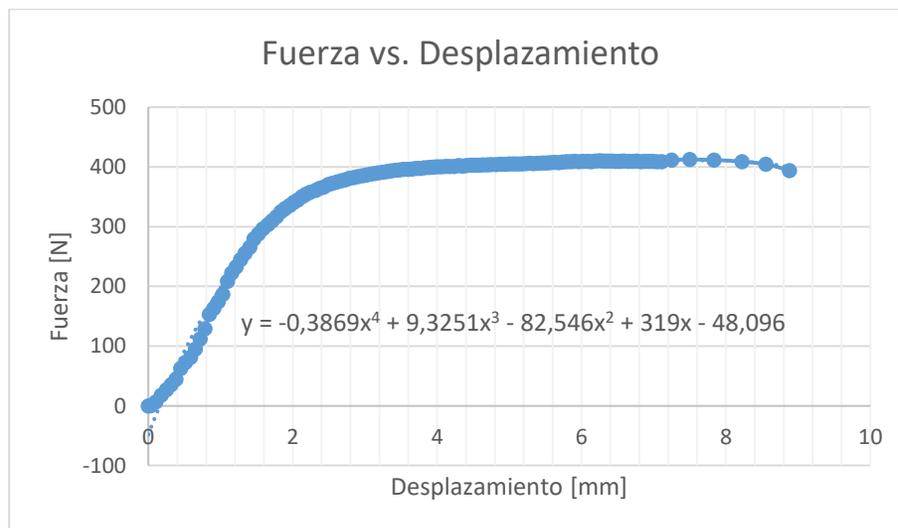


Figura 116 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 10.1.

Entonces el área bajo la curva $A_{p10.1}$ para este tramo.

$$A_{p10.1} = \int_0^{9.217} (-0.3869x^4 + 9.3251x^3 - 82.546x^2 + 319x - 48.096) dx$$

$$A_{p10.1a} = 3233.83 \text{ [Nmm]}$$

También se considera utilizar una aproximación con la fórmula de endurecimiento por deformación ecuación [5.4].

$$\ln F = \ln K + n \ln \delta$$

Pasando los datos por este análisis y a escala logarítmica se obtiene.

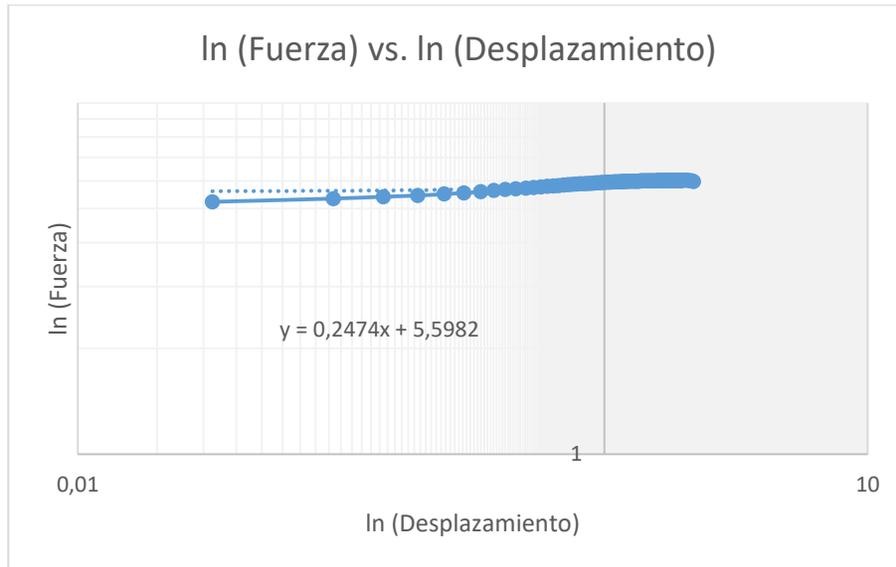


Figura 117 ln(Fuerza) vs. ln(Desplazamiento) Ensayo Flexión- SAE 1040.

Y al hacer la analogía entre las fórmulas se obtiene los siguientes valores para las variables.

$$5.5982 = \ln K$$

$$K = 269.94$$

$$n = 0.2474$$

Por lo que reemplazando:

$$y = 269.94x^{0.2474}$$

E integramos dentro del tramo de análisis.

$$A_{p10.1b} = \int_0^{9.217} 269.94x^{0.2474} dx$$

$$A_{p10.1b} = 3455.34 \text{ [Nmm]}$$

Comparando los resultados entre $A_{p10.1a}$ y $A_{p10.1b}$, la función que más se acopla a la curva original para este primer tramo es la polinómica (10.1a), por lo que este es el valor de A_{p10} , y el que se toma para la suma del área total.

Mientras que para el segundo tramo a partir de la fuerza de 377.5 [N] se considera adecuada una aproximación potencial, dada que una polinómica ni exponencial se adecuaron para dichas condiciones, como se muestra a continuación.

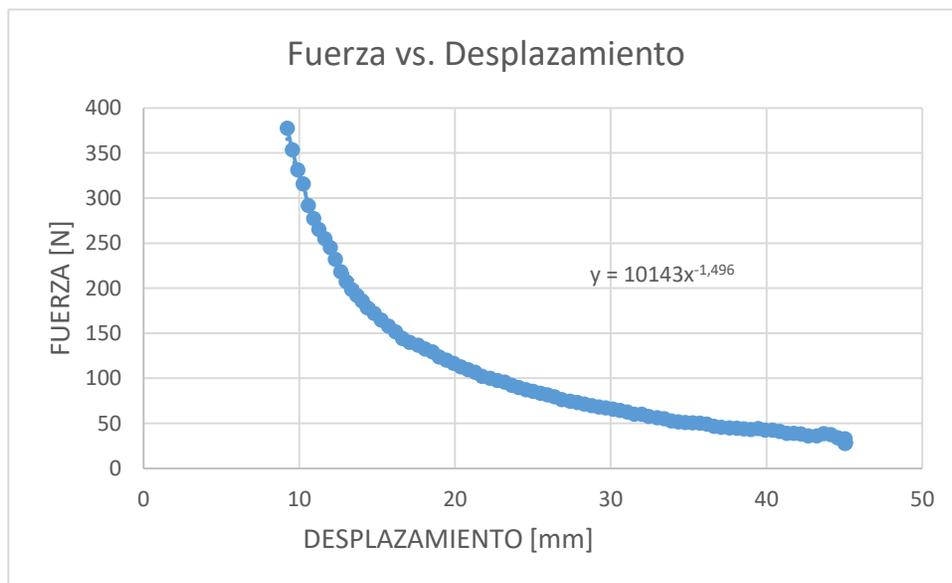


Figura 118 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 10.2.

El área bajo la curva:

$$A_{p10.2} = \int_{9.217}^{45.038} 10143 x^{-1.496} dx$$

$$A_{p10.2} = 3702 \text{ [Nmm]}$$

Por lo que la energía total para la probeta #10 de acero SAE 1040 es la suma de sus partes.

$$A_{p10} = A_{p10.1} + A_{p10.2}$$

$$A_{p10} = 3233.83[Nmm] + 3702[Nmm] = 6935.83 [Nmm]$$

$$A_{p10} = 6.935[J]$$

También se determinó el área total por la regla de los trapecios, en el Anexo 2 se detalla paso a paso y cada área por puntos, así como la sumatoria final, dándonos resultados muy cercanos.

5.2.2.2. Probeta #11

Se obtiene un total de 310 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 45
Datos del ensayo estático de Flexión 11-Probeta acero SAE (5x5)

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0,000	0,000	62	2,6	424,2	176	12,407	299,7
2	0,010	1,185	71	3,204	446,0	183	13,305	276,7
4	0,035	5,080	86	4,226	459,7	189	14,083	251,5
8	0,102	15,24	96	4,909	463,8	194	14,721	225,2
9	0,116	17,61	103	5,382	465,8	201	15,644	200,1
16	0,226	30,649	107	5,644	466,5	211	16,943	176,1
22	0,386	46,058	108	5,723	467,0	224	18,642	151,2
25	0,512	77,215	111	5,917	467,2	237	20,347	131,7
27	0,593	99,059	119	6,451	466,7	249	21,907	119,9
29	0,677	126,50	125	6,849	465,8	259	23,236	110,1
31	0,758	150,00	132	7,482	465,2	266	23,756	99,963
34	0,883	173,90	139	8,139	462,1	275	27,971	81,671
38	1,037	213,70	147	8,933	455,2	283	31,635	70,363
41	1,164	248,20	155	9,763	439,4	291	35,389	60,386
45	1,411	300,20	160	10,402	413,3	303	40,966	49,078
50	1,764	355,60	163	10,768	379,3	306	42,338	46,417
56	2,187	398,40	169	11,527	330,0	310	44,245	44,089

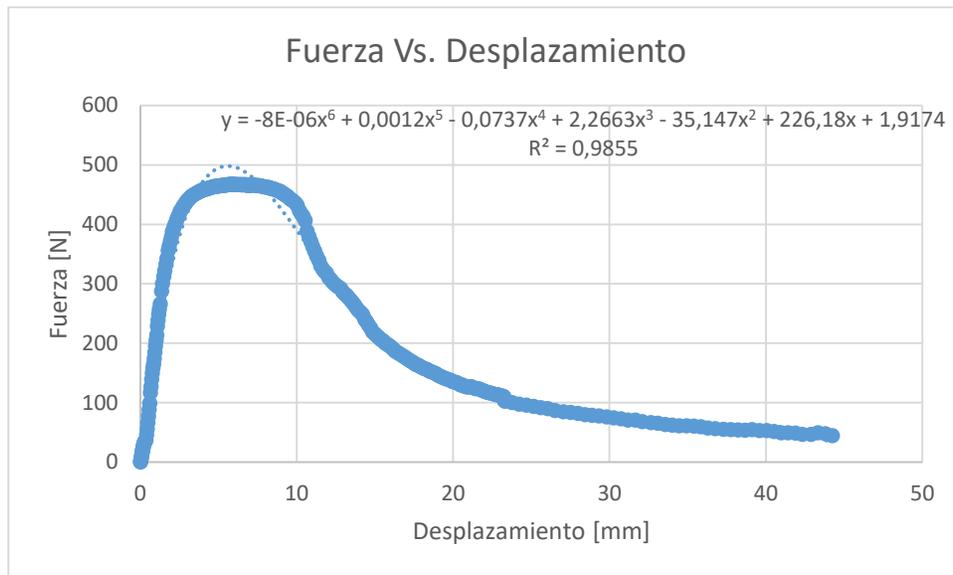


Figura 119 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 11, SAE 1040

Análisis de datos – Probeta #11

Al igual que en el análisis de la probeta #11 se opta por dividir la curva en dos tramos para un mejor ajuste y que el proceso de integración sea más confiable, considerando el punto de estricción como divisorio, es decir de 0 a 9.889 [mm] en el desplazamiento.

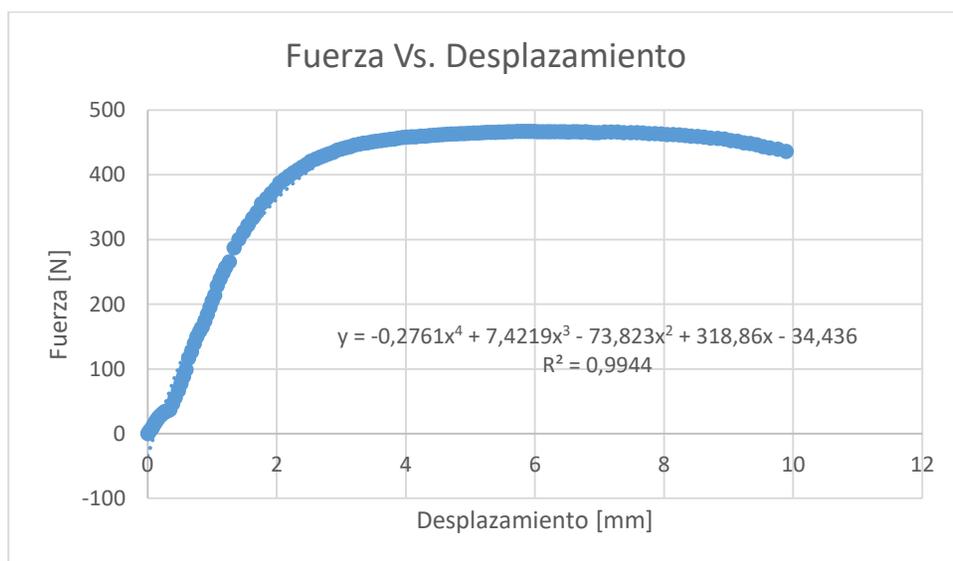


Figura 120 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 11.1.

Se calcula el área bajo la curva:

$$A_{p11.1} = \int_0^{9.889} (-0.2761x^4 + 7.4219x^3 - 73.823x^2 + 318.86x - 34.436)dx$$

$$A_{p11.1} = 3975.48 \text{ [Nmm]}$$

Y para el tramo después de 9.889 [mm] hasta 44.245 [mm] se tiene:

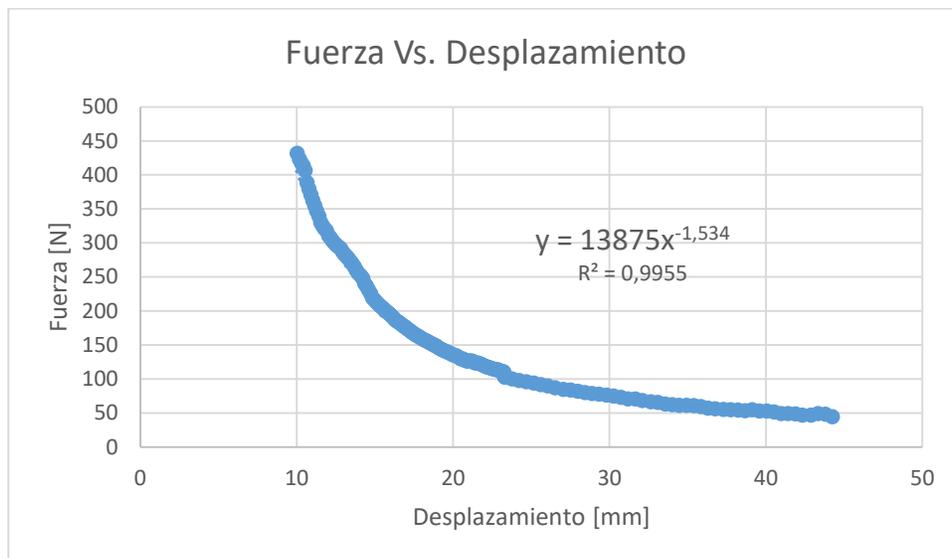


Figura 121 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 11.2.

$$A_{p11.2} = \int_{9.889}^{44.245} (13875 * x^{-1.534})dx$$

$$A_{p11.2} = 4209.29 \text{ [Nmm]}$$

Para la energía de deformación total absorbida por la probeta #11 se procede a la suma de las áreas:

$$A_{p11} = 3975.48 \text{ [Nmm]} + 4209.29 \text{ [Nmm]}$$

$$A_{p11} = 8184.77 \text{ [Nmm]} = 8.18 \text{ [J]}$$

5.2.2.3. Probeta #12

Se obtiene un total de 228 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 46

Datos del ensayo estático de Flexión 12-Prueba acero SAE (5x5).

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	57	2,548	403,2	194	19,246	135,5
5	0,115	5,112	67	3,23	426,5	197	20,308	124,1
7	0,168	9,153	88	4,659	442,3	199	21,077	117,2
11	0,258	21,738	94	5,064	443,8	202	22,127	109,4
12	0,284	28,125	101	5,536	445,7	205	23,201	99,1
13	0,311	32,342	129	7,572	443,6	209	24,765	88,46
15	0,362	41,051	134	8,135	440,6	210	25,688	85,3
17	0,418	52,058	137	8,506	437,4	211	26,597	81,642
19	0,479	67,178	141	9,023	430,6	212	27,6	79,147
21	0,563	88,221	145	9,521	420,6	213	28,514	76,32
22	0,602	99,059	148	9,979	402	214	29,42	72,163
23	0,644	112,5	151	10,492	377	215	30,353	69,669
24	0,683	124,5	154	10,979	351,5	216	31,262	67,174
25	0,724	136	160	11,991	302	217	32,176	63,682
26	0,767	147,9	163	12,497	283,9	218	33,186	62,685
27	0,809	158,5	166	13,026	270	219	34,09	61,022
28	0,848	167,8	169	13,521	253,3	220	35,013	57,696
29	0,893	179,9	172	14,023	236,4	221	35,933	56,532
30	0,932	188,6	175	14,552	222	222	36,842	55,035
31	0,973	199,4	178	15,07	205,8	223	37,843	54,536
32	1,013	209,9	180	15,461	196,9	224	38,75	52,874
37	1,212	256,7	183	15,992	187,3	225	39,665	50,878
41	1,427	294,1	186	16,63	172,9	226	40,604	48,217
44	1,642	324,6	189	17,558	156,3	227	41,509	50,712
47	1,854	350,2	191	18,205	148	228	42,428	45,889

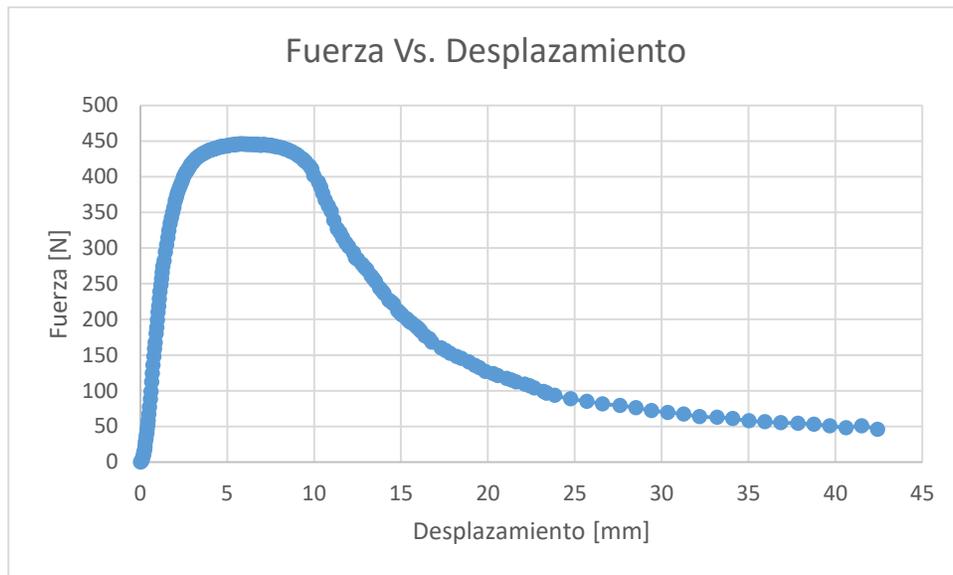


Figura 122 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 12, SAE 1040 (5x5)

Análisis de datos – Probeta #12

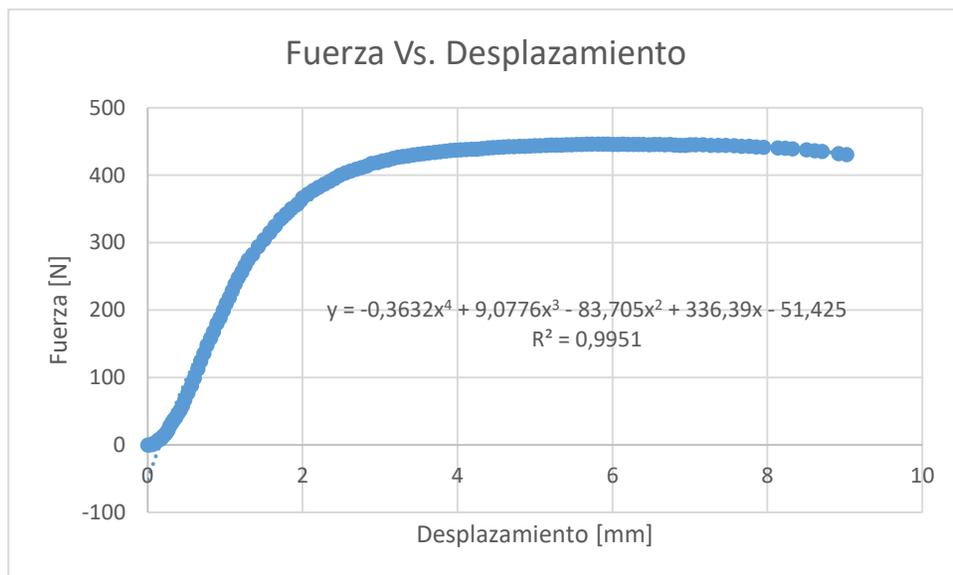


Figura 123 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 12.1.

$$A_{p12.1} = \int_0^{9.023} (-0.3632x^4 + 9.0776x^3 - 83.705x^2 + 336.39x - 51.425)dx$$

$$A_{p12.1} = 3430.77 [Nmm]$$

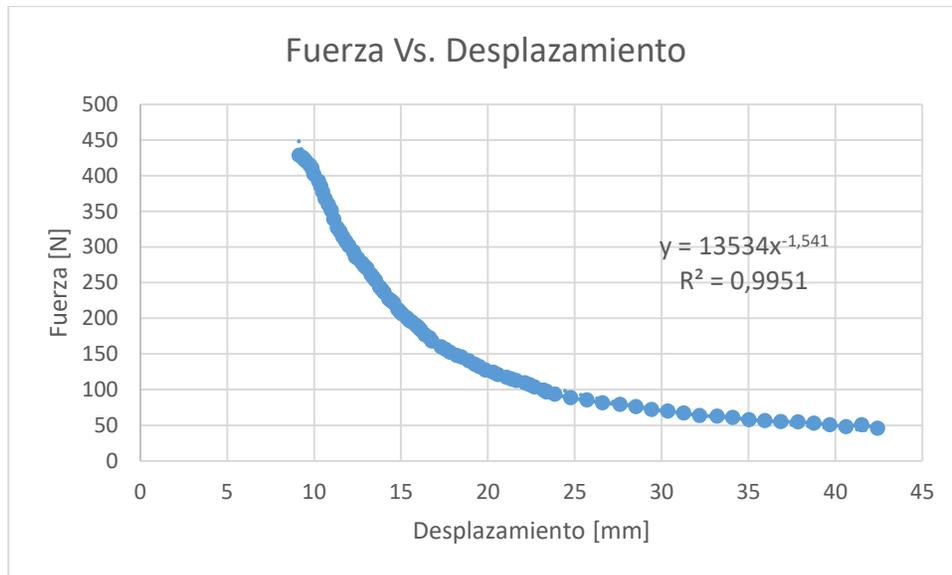


Figura 124 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 12.2.

$$A_{p12.2} = \int_{9.023}^{42,428} (13534x^{-1.541}) dx$$

$$A_{p12.2} = 4316.4 [Nmm]$$

$$A_{p12} = 3430.77 [Nmm] + 4316.4 [Nmm] = 8647.17 [Nmm] = 8.647 [J]$$

5.2.2.4. Probeta #13

Se obtiene un total de 126 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 47

Datos del ensayo estático de Flexión 13-Probeta acero SAE (5x5).

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0,000	0,000	65	10,996	170,87	100	17,363	76,721
3	0,369	8,29700	67	11,441	160,76	101	17,535	75,972
5	0,528	31,1570	68	11,702	156,04	102	17,701	73,292
7	0,711	54,1860	69	11,929	152,55	103	17,866	71,050
9	0,926	73,6270	70	12,155	149,17	104	18,030	70,122
11	1,135	103,006	71	12,38	144,59	105	18,192	68,802
12	1,238	123,341	72	12,613	140,26	106	18,356	67,346
15	1,607	155,329	75	13,295	130,86	107	18,520	64,229
18	2,001	176,494	78	13,760	121,19	108	18,680	63,857
22	2,530	191,467	81	14,172	116,91	109	18,846	61,498
25	3,020	200,102	84	14,663	109,54	112	19,441	56,983
30	3,972	205,597	86	15,006	106,39	114	20,363	49,385
34	4,743	207,395	88	15,334	100,47	116	21,272	43,559
40	5,943	208,242	90	15,691	95,405	118	22,252	36,568
44	6,709	208,785	92	16,015	90,099	120	23,185	34,264
48	7,494	206,280	95	16,506	85,301	122	24,086	33,658
52	8,271	204,776	96	16,673	83,421	123	24,546	33,673
56	9,064	199,105	97	16,837	81,556	124	25,005	34,392
60	9,864	190,661	98	16,999	79,038	125	25,470	34,499
63	10,541	179,903	99	17,163	78,761	126	25,928	33,810

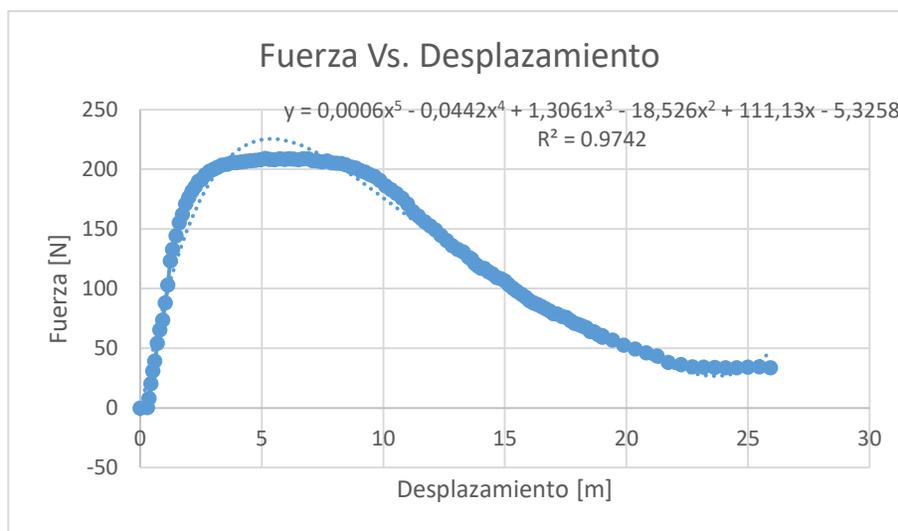


Figura 125 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 13, SAE 1040 (5x5)

Análisis de datos – Probeta #13

Como en los dos análisis anteriores, se divide la curva en dos tramos para un mejor ajuste y que el proceso ajuste sea más confiable, considerando el punto de estricción como divisorio, es decir de 0 a 9.864 [mm] en el desplazamiento.

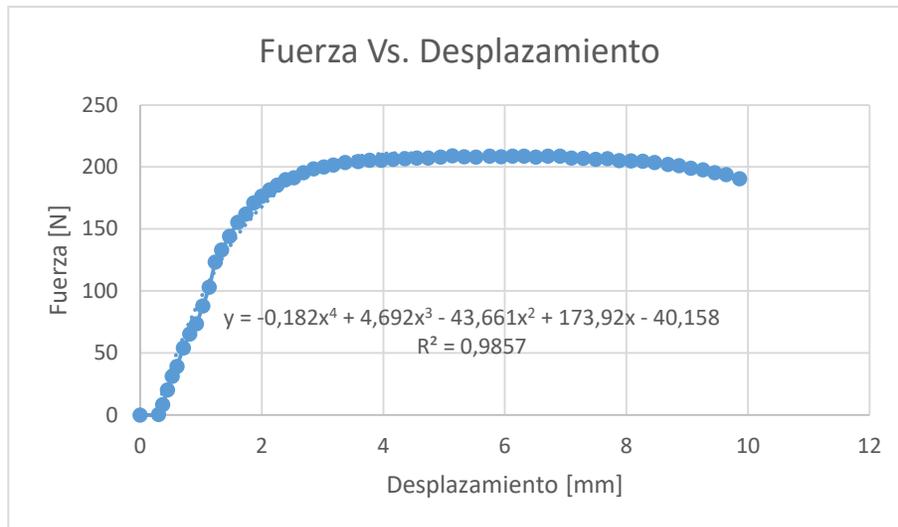


Figura 126 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 13.1.

Se integra para determinar la energía de deformación:

$$A_{p13.1} = \int_0^{9.864} (-0.182x^4 + 4.692x^3 - 43.661x^2 + 173.92x - 40.158)dx$$

$$A_{p13.1} = 1802.71 [Nmm]$$

Mientras que para el tramo de 9.864 [mm] a 25.928 [mm], el mejor ajuste fue una curva exponencial:

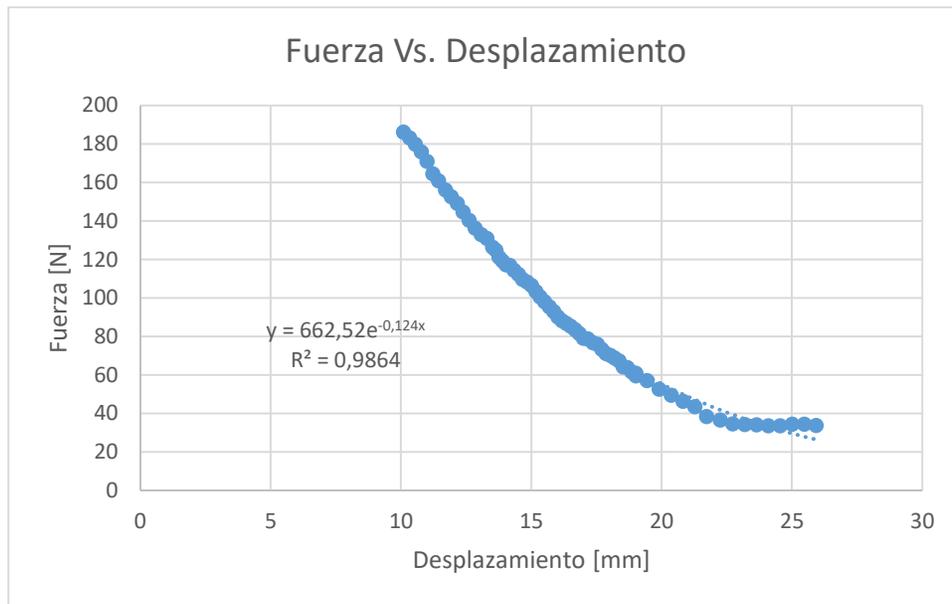


Figura 127 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 13.2.

$$A_{p13.2} = \int_{9.864}^{25.928} (662 * e^{-0.124*x}) dx$$

$$A_{p13.2} = 1356.85 [Nmm]$$

Se procede a realizar la suma de las energías de deformación para cada tramo:

$$A_{p13} = 1802.71 [Nmm] + 1356.85 [Nmm]$$

$$A_{p13} = 3159.56 [Nmm] = 3.159 [J]$$

5.2.2.5. Probeta #14

Se obtiene un total de 213 datos para la fuerza [N] y desplazamiento [mm]. A continuación, se muestran algunos puntos más relevantes.

Tabla 48*Datos del ensayo estático de Flexión 14-Probeta acero SAE (5x5)*

#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]	#	Desp. [mm]	Fuerza [N]
1	0	0	117	7,549	407,9	148	13,902	210,5
2	0,289	0,721	118	7,607	407,7	149	14,241	201,8
6	1,01	51,077	119	7,672	407,5	152	15,353	181,5
10	1,278	101,62	120	7,811	407,2	153	15,816	175,2
13	1,467	151,6	121	8,059	408,0	154	16,278	167,7
17	1,716	206,8	122	8,395	408,9	155	16,726	161,1
21	1,964	254,2	123	8,783	408,2	156	17,180	154,9
26	2,275	302,1	124	9,115	405,4	157	17,633	147,4
34	2,747	349,0	125	9,443	401,0	158	18,173	143,1
43	3,288	375,3	126	9,777	390,7	159	18,639	139,8
54	3,923	390,7	127	10,111	379,3	160	19,095	135,8
60	4,274	395,4	128	10,253	372,0	161	19,539	132,5
71	4,914	400,9	129	10,361	365,9	163	20,455	123,3
87	5,841	404,2	130	10,491	360,2	164	20,923	119,7
101	6,648	408,2	131	10,528	358,0	169	23,281	103,4
102	6,700	408,0	132	10,555	352,4	170	23,745	100,71
103	6,754	407,2	133	10,581	345,8	174	25,565	90,568
104	6,812	408,4	134	10,603	341,3	178	27,397	82,919
105	6,866	408,9	135	10,797	336,8	185	30,690	70,447
106	6,922	408,4	136	10,882	330,7	191	33,525	60,969
107	6,979	408,4	137	11,138	318,9	202	38,643	48,165
108	7,037	408,5	138	11,276	306,4	207	40,938	45,836
109	7,088	408,2	139	11,472	294,8	208	41,404	45,836
114	7,381	408,4	142	11,889	282,7	209	41,856	44,174
115	7,439	407,5	144	12,534	258,4	210	42,309	42,178
116	7,494	407,7	147	13,563	221,6	213	43,772	39,517

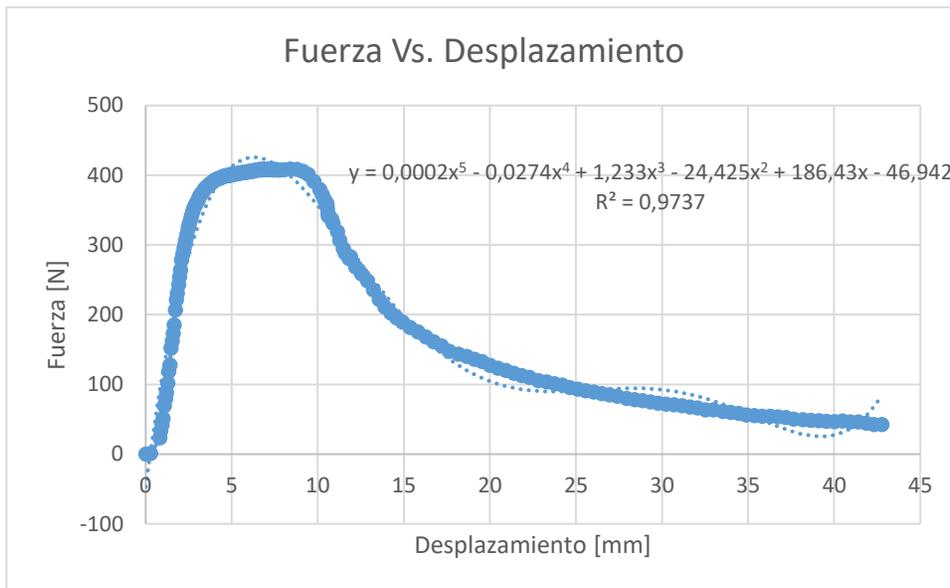


Figura 128 Fuerza vs. Desplazamiento- Flexión 14, SAE 1040 (5x5)

5.2.2.6. Análisis de datos – Probeta #14

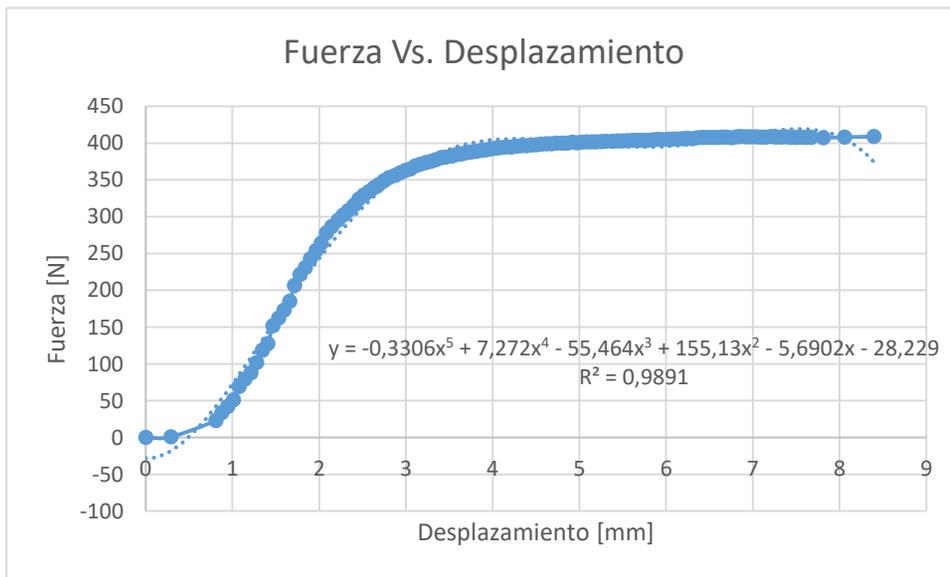


Figura 129 Antes punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 14.1.

$$A_{p14.1} = \int_0^{8.395} (-0.3306x^5 + 7.272x^4 - 55.464x^3 + 155.13x^2 - 5.6902x - 28.229) dx$$

$$A_{p14.1} = 2642.35 \text{ [Nmm]}$$

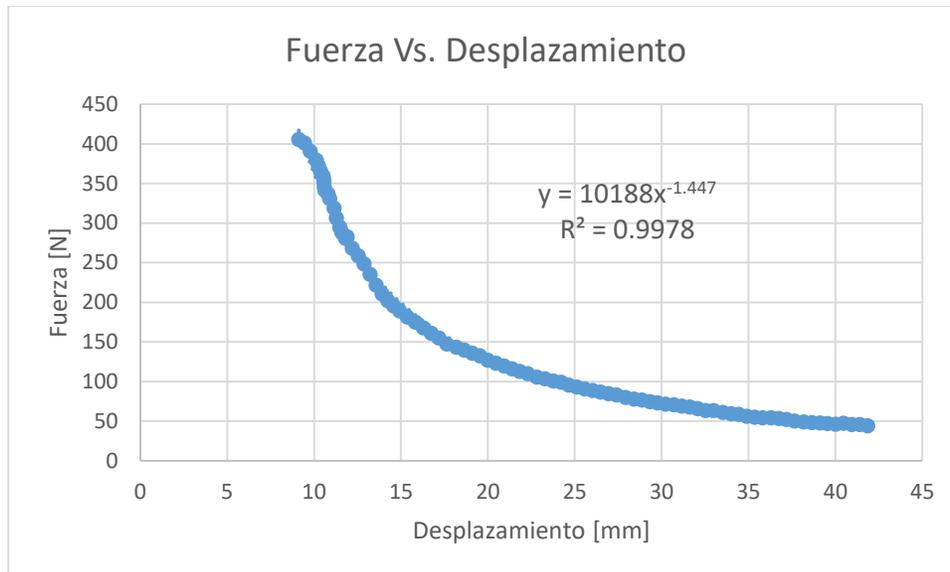


Figura 130 Después punto de estricción, Fuerza vs. Desplazamiento 14.2.

$$A_{p14.2} = \int_{8.395}^{43.772} (10188x^{-1.447})dx$$

$$A_{p14.2} = 4596.42 \text{ [Nmm]}$$

$$A_{14} = 2642.35 + 4596.42 = 7138.77 \text{ [Nmm]} = 7.138 \text{ [J]}$$

5.3. Resultados

5.3.1. Análisis y comparación

Para comprobar que energía de deformación obtenida en el péndulo AMSLER para ensayos de impacto Charpy y en la máquina MTS TK/T5002 para ensayos de flexión, con las probetas de acero ASTM A36 y SAE 1040, se debe verificar que las condiciones para ambos ensayos hayan sido similares. Con los datos obtenidos y presentados en la tabla 49, según su análisis y posterior comparación de errores porcentuales para cada caso.

Tabla 49

Resultados de la energía de deformación para los ensayos dinámicos y estáticos.

Material	Probeta #	Ensayo de Impacto Charpy		Ensayo flexión con carga estática	
		Área efectiva [mm ²]	Energía de deformación absorbida [J]	Área efectiva [mm ²]	Energía de deformación absorbida [J]
ASTM A36	1	41.36	54.936	41.47	54.68
	2	41.27	55.917	41.04	60.47
	3	43.40	60.822	43.68	60.61
	4	41.24	55.917	40.53	56.74
	5	41.23	56.898	40.28	58.49
	6	40.85	55.917	40.61	56.77
	7	41.46	57.979	41.96	59.94
	8	41.96	59.841	41.31	59.63
	9	40.76	56.898	41.13	58.45
SAE 1040	10	13.76	6.867	14.45	6.935
	11	13.86	7.848	16.25	8.18
	12	16.35	8.829	16.45	8.647
	13*	10.35	2.943	10.91	3.16
	14	16.08	7.848	15.09	7.13

(*) Probeta con muesca de 0.8 [mm] más de profundidad

Se procede a realizar el estudio tanto para la relación de energías como para de errores usando la ecuación [4.2].

$$error\% = \frac{x_i - x_v}{x_v} \times 100\%$$

Tabla 50

Relación de la energía de deformación para cargas de impacto con cargas estáticas.

	Probetas #	Relación Energía de deformación: Impacto/Estático [J/J]	Error%
ASTM A36	1	1.005	0.47%
	2	0.925	7.53%
	3	1.003	0.35%
	4	0.985	1.45%
	5	0.973	2.74%
	6	0.985	1.50%
	7	0.974	2.62%
	8	1.004	0.35%
	9	0.975	5.49%
SAE 1040	10	0.990	0.98%
	11	0.959	4.06%
	12	1.021	2.10%
	13*	0.931	6.87%
	14	1.101	10.07%

(*) Probeta con muesca de 0.8 [mm] más de profundidad

Se observa que para las vigas tipo probeta de acero ASTM A36 la relación es aproximadamente uno y por ende el error porcentual es menor, se asume que esto es debido a que se trata de un acero más dúctil que el SAE 1040, también debido a que este tipo de probetas son de dimensiones más pequeñas, por lo que la muesca realizada afecta más al comportamiento mecánico del elemento durante cualquiera de los dos ensayos.

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

Los costos en general del proyecto se detallan a continuación:

6.1. Costos directos

6.1.1. Materiales

En la tabla se detallan los gastos correspondientes a materiales para la construcción de accesorios, elementos de prueba y probetas, necesarios llevar a cabo todos los ensayos. Garantizar su repetitividad y la seguridad del operario.

Tabla 51
Costos de Materiales

Ítem	Cant.	Descripción	Valor Unitario (USD)	Valor total (USD)
1	1	Percutor de ataque pruebas de impacto y estáticas	12	12
2	2	Accesorio de sujeción punzón - acoplado al cilindro	45	90
3	1	Eje sostenedor del punzón cilíndrico	20	20
4	1	Tubo conductor - caída libre	6	6
5	3	Amortiguadores de impacto para celda de carga	6	18
6	3	Cilindros de prueba para caída	8	24
7	9	Pernos de 1/8"	0.6	5.4
8	1	Esfera de metal sólida	12	12
9	2	Pasadores - caída libre	5	10
10	12	Probetas para ensayos de impacto	3	36
11	12	Probetas para ensayos con carga estática	4.5	54
Subtotal 1				\$287.40

6.1.2. Remuneraciones

Las tablas 52 y 53 reflejan únicamente las remuneraciones supuestas para un trabajo profesional, teniendo en cuenta la responsabilidad y acciones que este conlleva.

Tabla 52
Remuneración a profesionales

Nombre	Cargo	Tiempo Horas	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Ing. José Pérez	Tutor	70	20	1400
			Subtotal	\$1.400.00

Tabla 53
Remuneración a estudiante

Nombre	Cargo	Tiempo Horas	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Sr. Juan Paredes	Responsable del Proyecto	576	8	4608
			Subtotal	\$4.608.00

6.1.3. Costos mano de obra

Algunos detalles de la construcción mecánica de los accesorios, elementos de prueba y probetas, como el uso de máquinas industriales e implementos instrumentales, se reflejan en la tabla 54.

Tabla 54
Costos mano de obra

Descripción	Tiempo Horas	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Mano de obra mecánico y mecanizado	80	5	400
		Subtotal 2	\$400.00

Por lo tanto se tiene como total de costos directos:

Tabla 55
Total costos directos

Descripción	Valor
Materiales	\$287.40
Mano de obra mecánico	\$400.00
Total	\$687.40

6.2. Costos indirectos

Se detalla a continuación los costos en pruebas y mantenimiento de los equipos, así como su transporte y adecuación si es necesario.

Tabla 56
Costos indirectos

Ítem	Descripción	Valor
1	Combustible - transporte	\$250.00
2	Material de Oficina	\$350.00
3	Energía Eléctrica	\$20.00
4	Agua potable	\$18.00
5	Comunicación	\$80.00
	Total	\$718.00

6.3. Costo total

La suma de los costos directos más los costos indirectos representa el costo total empleado para este proyecto, y se presentan en la tabla 57.

Tabla 57
Costo total

Item	Descripción	Valor
1	Costos directos	\$687.40
2	Costos Indirectos	\$718.00
	Total	\$1.405.40

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Se determinó que la relación entre energía de deformación plástica por carga de impacto con respecto a una carga estática en la falla de vigas de acero ASTM A36 y SAE 1040 es aproximadamente uno, los errores para las primeras varían entre el 0.35% y el 7.53%, mientras que para las segundas entre el 0.98% y el 10.07%, los cuales son aceptables para su estudio. Es decir que la energía absorbida por la probeta es igual para ambos ensayos, cuando se trate de elementos geoméricamente iguales bajo las mismas condiciones ambientales y de las máquinas, percutores de ataque y apoyos.
- La fuerza de impacto estudiada en este proyecto se relaciona directamente con la fuerza gravedad presente, la masa del objeto y su altura de caída, es decir la energía potencial, por lo que se presentó dos ecuaciones: $F = m_p \times E + W$; $F = mg [m_p x + 1]$ y también la caracterización de la curva, calculando su pendiente con la ayuda de una constante "C" la cual se encontró presente en las comparaciones. Los métodos fueron determinados de formas distintas y relacionan las variables físicas propuestas, comprobándolos con un ejemplo real de una persona en donde el error porcentual del 0.25%.
- El estado del arte planteado ayuda a enfocar el estudio en la fuerza de impacto y en la energía de deformación que absorben las vigas durante distintos tipos de ensayos para producir su falla. Así como también se presentan las relaciones matemáticas que ya han sido previamente estudiadas y las que actualmente se encuentran en estudio, siempre teniendo en cuenta las normas que rijan su análisis.
- Se planteó un protocolo de pruebas detallado paso a paso para cada ensayo, enfocado en cautelar la integridad física del operario y de las personas que se encuentren alrededor. Primero revisando los componentes más importantes y peligrosos de los equipos, dando mantenimiento si es necesario, y así también

comprobar el estado de su instrumentación y consideraciones que se deben tomar durante sus mediciones, para después proceder a anotarlos en las tablas que se proporciona como ejemplo y por último los análisis necesarios para comprobar las hipótesis previamente planteadas.

- Se diseñó cada uno de los accesorios necesarios tanto para la correcta sujeción, ataque y apoyo de las probetas sobre los equipos, así como los que controlan la trayectoria de la caída e impacto de las masas cilíndricas de prueba, de una forma muy eficiente mediante el diseño mecánico y el uso de una ingeniería concurrente, los cuales sirvieron para una correcta construcción y montaje.
- Se realizó la caracterización de curvas para cada uno de los objetos ensayados, una vez comprobada la validez de los datos obtenidos. Para su posterior análisis y así poder afirmar la hipótesis inicial “La energía de deformación en impacto es igual a la energía de deformación con carga estática”.

7.2. Recomendaciones

- Se recomienda dar seguimiento a este tipo de análisis con un proyecto que involucre la fuerza de impacto con energía cinética en un movimiento horizontal, en donde se involucre cantidad de movimiento lineal.
- Se recomienda revisar primero la hipótesis en la que se basó el presente proyecto y su posterior sustentación teórica, para poder pasar al protocolo de pruebas y todas sus recomendaciones tanto para el mantenimiento y revisión de las máquinas, como en la toma de datos.
- Revisar el correcto funcionamiento los elementos mecánicos, instrumentación y software, si posee, del equipo antes de poner en marcha cualquier ensayo.
- Adquirir cualquier documento que acredite la calidad del material utilizado tanto para los accesorios como para las probetas.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Testing Materials - ASTM. (2017, Febrero 08). *mhriau*. Recuperado de [http://mhriau.ac.ir/_DouranPortal/Documents/ASTM%20E23%20\(impact%20test\)_20160406_233024.pdf](http://mhriau.ac.ir/_DouranPortal/Documents/ASTM%20E23%20(impact%20test)_20160406_233024.pdf)
- Askeland, D. R., & Phulé, P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Madrid: Thomson Editores.
- Ayala, G. (2011). *Física I*. Quito.
- Boresi, A., Schmidt, R. J., Sidebottom, O., & Seely, F. (1993). *Advanced mechanics of Materials, 6th Edition*. Carolina del Norte: John Wiley and Sons (WIE).
- Budynas, R.G. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México D.F. : McGraw-Hill.
- Cengel, Y., & Boles, M. (1998). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras*. México D.F.: Pearson Educación.
- F.R. Morral & J. E. (2004). *Metalurgia General - Tomo II*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Fuentes Espinoza, F. (1982). *Ensayos mecánicos en metales*. Monterrey: Universidad Autonoma de Nuevo Leon.
- Garavito, J. (2008). *Máquina de Impacto - Protocolo, Curso de Materiales*. Bogotá: ECI: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Gere, J. M. (2003). *Mecánica de Materiales, Quinta edición*. México D.F.: Thomson Editores, S.A.
- Giocolea, J. (2011). *Mecánica 2do Curso: Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Madrid: Escuela de Ingenieros.
- Giocolea, J. M. (2000). *Estructuras sometidas a Impacto*. Madrid: Reverté, S.A.
- H.Avner, S. (1981). *Introducción a la Metalurgia Física*. México D.F.: Castillo.
- Hall, A., Holowenko, A., & Laughlin, H. (1971). *Diseño de Máquinas*. México D.F.: McGraw-Hill.
- Matusevich, A., Mancini, R., & Giudici, A. (2017, Febrero 09). *REV.LATINAM.METAL.MAT*. Recuperado de [REV.LATINAM.METAL.MAT.: www.rlmm.org](http://REV.LATINAM.METAL.MAT.:www.rlmm.org)
- Medina, I. (2000). *Procesos de Manufactura para el Administrador*. México D.F.: Spanta.

- Meriam, J., & Kraige, G. (1999). *Mecánica para ingenieros: Estática. Tercera Edición*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Michinel, J., & Martínez, D. (1994). El concepto de la energía en los libros de texto: De las concepciones previas de un nuevo sublenguaje. In *Enseñanza de las ciencias* (pp. 369-380). España: Reverté, S.A.
- Mott, R., & P.E. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México D.F.: Pearson Educación.
- Paz, M. (1992). *Dinámica estructural*. España: Reverté, S.A.
- Pérez, J. E. (2011). *Mecánica de Materiales II*. Sangolquí: ESPE.
- Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2002). *Diseño en ingeniería Mecánica*. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Stiopin, P. (1968). *Resistencia de Materiales*. Moscú: MIR:Moscú.
- Velázquez, G. (2004). *Mecánica de la fractura*. México D.F.: Limusa Noriega Editores.
- Yavorski, Detlaf. (2009, Julio 04). *FISICA.RU*. Recuperado de http://www.fisica.ru/theory/pdfarchives/mec_I_3_reverso.pdf