



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE
FALLA EN EL ACERO DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: NIXON ANTONIO CARRIÓN HINOJOSA

JHÓSSELYN VALERIA OLMEDO JUMBO

DIRECTOR: Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes

Riobamba - Ecuador

2020

©2020, Nixon Antonio Carrión Hinojosa, Jhósselyn Valeria Olmedo Jumbo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Nixon Antonio Carrión Hinojosa y Jhósselyn Valeria Olmedo Jumbo declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 03 de septiembre de 2020



Nixon Antonio Carrión Hinojosa
0302338041



Jhósselyn Valeria Olmedo Jumbo
060551329-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: proyecto técnico, **CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS MECANISMOS DE FALLA EN EL ACERO DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS**, realizado por los señores: **NIXON ANTONIO CARRIÓN HINOJOSA Y JHÓSSELYN VALERIA OLMEDO JUMBO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2020-09-03
Ing. Jorge Isafías Caicedo Reyes DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2020-09-03
Ing. John Germán Vera Luzuriaga MIEMBRO DE TRIBUNAL	_____	2020-09-03

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico a Dios por darme la vida, la sabiduría y fortaleza, a mis queridos Padres: Manuel Carrión y Susana Hinojosa, quienes con su infinito amor, paciencia e incomparable esfuerzo han hecho realidad mi sueño de ser un profesional. A mis hermanas Carina, Deisy y Heydi por su apoyo moral e incondicional en el transcurso de la carrera Universitaria. A Verito Tandazo quién diariamente ha estado motivándome para culminar esta etapa de mi vida. A la memoria de mi abuelita Mariana de Jesús que estuvo siempre apoyándome desde un inicio hasta el último momento de su existir. A demás familiares y amigos que con consejos y palabras de aliento me han dado ánimos para salir adelante.

Nixon

A mis padres Manuel Olmedo y Esther Jumbo por haberme formado con reglas y con algunas libertades, que me hicieron la persona que soy en la actualidad. Este logro es para ustedes que han sido el apoyo constante en la construcción de mi vida profesional. A mis hermanos Pamela y Javier por ser inspiración en mis deseos de superación, en ellos tengo el espejo en el cual me quiero reflejar pues su responsabilidad hace que los admire cada día. A Jhony, a quién Dios le dio alas para ir junto a él, y en su recuerdo encontré fortaleza para lograr esta meta. A mi familia en general por cada consejo y apoyo brindado. A mis amigos que se convirtieron en otra familia en el transitar de mi vida.

Valeria

AGRADECIMIENTO

Agradezco primordialmente a Dios por todas sus bondades y bendiciones, a mis padres Manuel y Susana, que con su ejemplo han sido el pilar fundamental en la formación de mi vida. A mis hermanas por estar pendientes en todo momento. A Verito que con su afecto y cariño me acompañó en los momentos difíciles. A mis tíos que desde un principio me brindaron todo su apoyo absoluto como son: Patricio, Carlos, Marcelo, Verónica, a todos ellos muchas gracias.

Mi sincero agradecimiento a la ESPOCH, que en el transcurso de la carrera universitaria por medio de los docentes me han brindado sus conocimientos necesarios para formarme como profesional.

Un especial agradecimiento a CELEC EP por la acogida en las instalaciones del CIRT; así como a sus trabajadores, quienes me ayudaron a concluir mi trabajo de titulación como son: Ing. Marcelo Toapanta, Ing. Carlos Guerra, Ing. Klever Shagñay, Ing. Omar Tenorio, Don Paul Moreno, Marcelo, Edwin Velasco, César Cárdenas, Marcelo Luna, Óscar Cruz, Stalin Chicaiza, César Martillo, Patricio Acosta, entre otros colaboradores, quienes con su paciencia compartieron sus experiencias y conocimientos.

Agradezco a mi compañera de tesis Valeria Olmedo, que con su perseverancia y dedicación ha hecho posible el trabajo mutuo para salir adelante como profesionales.

Nixon

Agradezco a Dios, quién ha sido fuente de fortaleza y luz en mis momentos difíciles, gracias por tanta bondad y las bendiciones recibidas en mi vida. Gracias a mis padres por su esfuerzo diario, y ser ejemplo de constancia y perseverancia aun cuando las cosas se han tornado poco difíciles. A mis hermanos que me han brindado su apoyo. A mi familia, en especial a mis tíos, Albino y Martha, gracias por el apoyo brindado. A mis amigos que hicieron que el camino universitario sea más grato.

Un punto aparte merece la ESPOCH, gracias a sus docentes que han transmitido sus conocimientos y me han dado herramientas para el campo profesional. Gracias a todos los colaboradores del CIRT por compartir sus conocimientos y amistad durante el desarrollo de este trabajo. Gracias a Nixon, mi compañero, a quién propuse hacer juntos este trabajo y decidió aventurarse en este camino, gracias por ser un apoyo durante nuestra estadía en el cantón Baños.

Valeria

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	Xvii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xxii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxiv
RESUMEN.....	xxv
ABSTRACT.....	xxvi
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.3.1 <i>Justificación teórica</i>	4
1.3.2 <i>Justificación metodológica</i>	4
1.3.3 <i>Justificación práctica</i>	5
1.4 Alcance.....	5
1.5 Objetivos.....	5
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	5
1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.1 Máquinas para ensayos de fatiga.....	7
2.2 Máquinas para ensayos de torsión.....	9
2.3 Consideraciones teóricas para el diseño.....	13
2.3.1 <i>Metodología, fases y etapas del diseño</i>	13
2.3.2 <i>Herramientas para el diseño concurrente- Casa de calidad</i>	14
2.4 Vibraciones Mecánicas.....	16
2.4.1 <i>Partes elementales de sistemas vibratorios</i>	16

2.4.1.1	<i>Elemento de resorte</i>	16
2.4.1.2	<i>Elemento de masa</i>	17
2.4.1.3	<i>Elemento de amortiguamiento</i>	17
2.4.2	<i>Ecuación de movimiento</i>	19
2.5	Criterios del diseño mecánico	19
2.5.1	<i>Fatiga</i>	19
2.5.1.1	<i>Fenómeno de la fatiga en metales</i>	19
2.5.1.2	<i>Diagramas S-N</i>	20
2.5.1.3	<i>Límite de resistencia a la fatiga o endurencia</i>	21
2.5.1.4	<i>Resistencia a la fatiga</i>	22
2.5.1.5	<i>Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga</i>	24
2.5.2	<i>Torsión</i>	30
2.5.2.1	<i>Definición de torsión</i>	30
2.5.2.2	<i>Momento torsor</i>	31
2.5.2.3	<i>Diagrama de momento torsor versus ángulo de torsión</i>	32
2.5.2.4	<i>Momento polar de inercia</i>	32
2.5.2.5	<i>Esfuerzo cortante de torsión</i>	33
2.5.2.6	<i>Deformación por cortante</i>	33
2.5.2.7	<i>Módulo de elasticidad en corte</i>	34
2.5.2.8	<i>Ángulo de torsión</i>	34
2.5.2.9	<i>Resistencia máxima a corte</i>	35
2.6	Sistema eléctrico y electrónico	36
2.6.1	<i>Controlador programable S7-1200 (PLC)</i>	36
2.6.2	<i>Variador de frecuencia (Convertidor SINAMICS G120C)</i>	36
2.6.3	<i>Encóder rotatorio</i>	37
2.7	Procesos de mecanizado y geometría de las probetas de ensayo	37
2.7.1	<i>Refrentado</i>	37
2.7.2	<i>Cilindrado</i>	38
2.7.3	<i>Geometría de la probeta para el ensayo de torsión</i>	39
2.7.4	<i>Geometría de la probeta para el ensayo de tracción</i>	39
2.7.5	<i>Geometría de la probeta para el ensayo de impacto</i>	39
2.8	Ensayos Mecánicos	40
2.8.1	<i>Descripción del ensayo de torsión</i>	40

2.8.2	<i>Tracción</i>	40
2.8.2.1	<i>Gráfica esfuerzo- deformación</i>	41
2.8.2.2	<i>Propiedades obtenidas del ensayo de tracción</i>	41
2.8.2.3	<i>Descripción del ensayo</i>	44
2.8.3	<i>Impacto</i>	44
2.8.3.1	<i>Propiedades obtenidas en el ensayo de impacto</i>	45
2.8.3.2	<i>Descripción del ensayo de impacto</i>	45
2.9	Material de las probetas de ensayo	46
2.10	Caracterización de los mecanismos de falla	47
2.10.1	<i>Mecánica de fractura</i>	47
2.10.2	<i>Fallas y su clasificación</i>	48
2.10.3	<i>Modo de falla y mecanismo de falla</i>	50
2.10.4	<i>Fallas por fractura y Fractografía</i>	52
2.10.4.1	<i>Clasificación general de las fracturas</i>	53
2.10.4.2	<i>Fractografía</i>	54
2.10.5	<i>Textura de las superficies de fractura</i>	58
2.10.6	<i>Modos de falla por fracturas súbitas más comunes en materiales metálicos</i>	60
2.10.7	<i>Fractura súbita frágil por clivaje</i>	61
2.10.8	<i>Fractura súbita frágil intergranular</i>	64
2.10.9	<i>Fractografía de la fractura súbita frágil</i>	68
2.10.10	<i>Fractura súbita dúctil</i>	73
2.10.10.1	<i>Fractografía de la fractura súbita dúctil</i>	77
2.10.11	<i>Fractografía de las fracturas súbitas mixtas</i>	82
CAPÍTULO III		
3.	MARCO METODOLÓGICO	85
3.1	Propuesta de diseño del banco para ensayos de fatiga por flexión rotativa	85
3.1.1	<i>Definición del producto</i>	85
3.1.1.1	<i>Proceso de despliegue de la función de la calidad (QFD)</i>	85
3.1.1.2	<i>Matriz QFD</i>	86
3.1.2	<i>Diseño conceptual</i>	87
3.1.2.1	<i>Análisis funcional- modular</i>	87
3.1.3	<i>Selección de alternativas</i>	88
3.1.3.1	<i>Matriz morfológica</i>	88

3.1.3.2	<i>Análisis de alternativas</i>	90
3.1.3.3	<i>Selección de la mejor alternativa para cada módulo</i>	91
3.1.4	<i>Características del banco de flexión rotativa</i>	96
3.2	<i>Diseño del banco de flexión rotativa</i>	97
3.2.1	<i>Cálculo de la capacidad máxima de carga</i>	97
3.2.2	<i>Diseño del eje de transmisión motriz y eje conducido</i>	98
3.2.2.1	<i>Análisis estático</i>	100
3.2.2.2	<i>Análisis dinámico</i>	101
3.2.2.3	<i>Análisis de rigidez de los ejes</i>	106
3.2.2.4	<i>Velocidades críticas de los ejes</i>	108
3.2.3	<i>Cálculo de la potencia del motor</i>	111
3.2.4	<i>Selección de rodamientos</i>	112
3.2.5	<i>Selección del acople</i>	115
3.2.6	<i>Selección de mandriles</i>	116
3.2.7	<i>Diseño de la barra de carga</i>	116
3.2.8	<i>Diseño de la placa de fuerza</i>	118
3.2.8.1	<i>Análisis de rigidez de la placa de fuerza</i>	121
3.2.9	<i>Diseño de la placa principal</i>	122
3.2.9.1	<i>Análisis de rigidez de la placa principal</i>	128
3.2.10	<i>Diseño de la estructura del banco de ensayos</i>	129
3.2.11	<i>Análisis vibracional del banco de ensayos de fatiga por flexión rotativa</i>	130
3.2.11.1	<i>Análisis del sistema giratorio</i>	130
3.2.11.2	<i>Análisis de la parte fija (estructura)</i>	132
3.2.11.3	<i>Análisis total del banco de ensayos de flexión rotativa</i>	133
3.2.11.4	<i>Función de transferencia de todo el sistema del banco de ensayo</i>	133
3.2.11.5	<i>Cálculo de las constantes de rigidez</i>	134
3.2.11.6	<i>Cálculo de las constantes de amortiguamiento</i>	136
3.2.11.7	<i>Cálculo de la frecuencia natural y relación de amortiguamiento</i>	138
3.2.11.8	<i>Estabilidad del sistema masa-resorte- amortiguamiento usando el software Matlab</i>	139
3.3	<i>Pre diseño del banco de ensayos de torsión</i>	141
3.3.1	<i>Definición del producto</i>	141
3.3.1.1	<i>Proceso de despliegue de la función de la calidad (QFD)</i>	141
3.3.1.2	<i>Matriz QFD</i>	142

3.3.2	<i>Diseño conceptual</i>	143
3.3.2.1	<i>Análisis funcional- modular</i>	144
3.3.3	<i>Selección de alternativas</i>	144
3.3.3.1	<i>Matriz morfológica</i>	144
3.3.3.2	<i>Análisis de alternativas</i>	146
3.3.3.3	<i>Selección de la mejor alternativa para cada módulo</i>	149
3.3.4	<i>Características del banco de torsión</i>	155
3.4	<i>Diseño del banco de ensayos de torsión</i>	156
3.4.1	<i>Cálculo del momento torsor para la ruptura de la probeta de ensayo</i>	156
3.4.2	<i>Cálculo de la potencia del motor reductor</i>	157
3.4.3	<i>Diseño del eje motriz y del eje fijo</i>	158
3.4.3.1	<i>Análisis estático del eje motriz</i>	159
3.4.3.2	<i>Análisis dinámico del eje motriz</i>	160
3.4.3.3	<i>Análisis de rigidez del eje motriz</i>	162
3.4.3.4	<i>Velocidades críticas del eje motriz</i>	164
3.4.4	<i>Diseño de la placa principal</i>	166
3.4.4.1	<i>Análisis de rigidez de la placa principal</i>	171
3.4.4.2	<i>Diseño de la base fija</i>	172
3.4.4.3	<i>Diseño de la base móvil</i>	173
3.4.4.4	<i>Diseño de la estructura del banco de ensayos</i>	175
3.5	<i>Construcción y montaje del banco de ensayo de torsión</i>	176
3.5.1	<i>Construcción y montaje mecánico</i>	176
3.5.2	<i>Alineación del banco de ensayo</i>	183
3.5.2.1	<i>Alineación del banco de torsión</i>	185
3.6	<i>Programación y control automático</i>	186
3.6.1	<i>Diagrama eléctrico general</i>	186
3.6.2	<i>Adquisición de datos</i>	187
3.7	<i>Caracterización de los materiales a ensayar: ASTM A743 CA-6NM y AISI 1018</i>	190
3.7.1	<i>Espectrometría del material de las turbinas hidráulicas como viene de fábrica</i>	190
3.7.2	<i>Espectrometría de un acero de bajo carbono</i>	191
3.7.3	<i>Metalografía del acero inoxidable ASTM A743 CA-6NM</i>	193
3.7.4	<i>Metalografía del acero AISI 1018</i>	195

3.7.5	<i>Dureza del acero inoxidable ASTM A743 CA-6NM</i>	196
3.7.6	<i>Dureza del acero AISI 1018</i>	197
3.8	Tipo y tamaño de muestra	198
3.8.1	<i>Ensayo de torsión</i>	198
3.8.1.1	<i>Codificación de probetas</i>	199
3.8.2	<i>Ensayo de tracción</i>	199
3.8.2.1	<i>Codificación de probetas</i>	199
3.8.3	<i>Ensayo de impacto</i>	199
3.8.3.1	<i>Codificación de probetas</i>	199
3.9	Procedimiento para la obtención de probetas de ensayo a partir del álabe directriz de acero ASTM A743 CA-6NM	200
3.10	Pruebas y funcionamiento	201
3.10.1	<i>Pruebas en el banco de ensayos de torsión</i>	201
3.10.1.1	<i>Ensayos en el material AISI 1018</i>	202
3.10.1.2	<i>Ensayos en el material A743 CA-6NM</i>	205
3.11	Manual de operación y mantenimiento del banco de ensayos de torsión	209
3.11.1	<i>Manual de operación</i>	209
3.11.1.1	<i>Características principales del banco de ensayos</i>	209
3.11.1.2	<i>Requisitos para el funcionamiento del banco de ensayos</i>	209
3.11.1.3	<i>Puesta en marcha</i>	209
3.11.2	<i>Plan de mantenimiento del banco de ensayos</i>	214
3.12	Análisis de costos del banco de ensayo de torsión	215
3.12.1	<i>Costos directos</i>	215
3.12.1.1	<i>Costos de materia prima</i>	215
3.12.1.2	<i>Costos máquinas o herramientas y mano de obra</i>	216
3.12.1.3	<i>Valor total de los costos directos</i>	217
3.12.2	<i>Costos indirectos</i>	218
3.12.3	<i>Costo total</i>	218
CAPÍTULO IV		
4.	RESULTADOS	219
4.1	Caracterización y análisis por torsión	219
4.1.1	<i>Análisis de los resultados de los ensayos de torsión</i>	219
4.1.2	<i>Caracterización fractográfica de las probetas ensayadas</i>	221

4.2	Caracterización y análisis por tracción	229
4.2.1	<i>Análisis de los resultados de los ensayos de tracción</i>	229
4.2.2	<i>Caracterización fractográfica de las probetas ensayadas</i>	232
4.3	Caracterización y análisis por impacto.....	240
4.3.1	<i>Análisis de los resultados de los ensayos de impacto.....</i>	240
4.3.2	<i>Caracterización fractográfica de las probetas ensayadas</i>	241
	CONCLUSIONES.....	275
	RECOMENDACIONES.....	279
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Valores de a y b para el factor de superficie.....	25
Tabla 2-2: Factores de confiabilidad.....	27
Tabla 3-2: Factores de temperatura.....	28
Tabla 4-2: Propiedades mecánicas y composición del acero AISI 1018	46
Tabla 5-2: Características de la denominación del acero CA-6NM.....	47
Tabla 6-2: Propiedades mecánicas y composición del acero ASTM A743 CA-6NM.....	47
Tabla 1-3: Características técnicas.....	87
Tabla 2-3: Módulo 1 del banco de flexión rotativa.....	88
Tabla 3-3: Módulo 2 del banco de flexión rotativa.....	89
Tabla 4-3: Módulo 3 del banco de flexión rotativa.....	89
Tabla 5-3: Alternativas del módulo 1- banco de flexión rotativa	90
Tabla 6-3: Alternativas del módulo 2- banco de flexión rotativa	91
Tabla 7-3: Alternativas del módulo 3- banco de flexión rotativa	91
Tabla 8-3: Valores para el método de criterios ponderados.....	92
Tabla 9-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 1.....	92
Tabla 10-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo	93
Tabla 11-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio sujeción	93
Tabla 12-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio vibración.....	93
Tabla 13-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio acoplamiento	93
Tabla 14-3: Tabla de conclusiones del módulo 1.....	94
Tabla 15-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 2.....	94
Tabla 16-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo	95
Tabla 17-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio capacidad.....	95
Tabla 18-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio montaje	95
Tabla 19-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio aplicación de carga ...	95
Tabla 20-3: Tabla de conclusiones del módulo 2.....	96
Tabla 21-3: Límites de deformación recomendados.....	106
Tabla 22-3: Características principales del motor eléctrico SUPERLINE	112
Tabla 23-3: Características técnicas.....	143
Tabla 24-3: Módulo 1 del banco de torsión	145
Tabla 25-3: Módulo 2 del banco de torsión	145
Tabla 26-3: Módulo 3 del banco de torsión	145

Tabla 27-3: Alternativas del módulo 1- banco de torsión.....	146
Tabla 28-3: Alternativas del módulo 2- banco de torsión.....	147
Tabla 29-3: Alternativas del módulo 3- banco de torsión.....	148
Tabla 30-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 1.....	149
Tabla 31-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil de construir.....	150
Tabla 32-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil montaje.....	150
Tabla 33-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio tamaño	150
Tabla 34-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo	150
Tabla 35-3: Tabla de conclusiones del módulo 1.....	151
Tabla 36-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 2.....	151
Tabla 37-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio seguridad	152
Tabla 38-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil montaje.....	152
Tabla 39-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio tamaño	152
Tabla 40-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo	152
Tabla 41-3: Tabla de conclusiones del módulo 2.....	153
Tabla 42-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 3.....	154
Tabla 43-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil montaje.....	154
Tabla 44-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio tamaño	154
Tabla 45-3: Evaluación del peso específico al criterio costo	154
Tabla 46-3: Tabla de conclusiones del módulo 3.....	155
Tabla 47-3: Características del motor reductor	158
Tabla 48-3: Procedimiento para la construcción.....	177
Tabla 49-3: Procedimiento para la construcción (continuación)	178
Tabla 50-3: Procedimiento para la construcción (continuación)	179
Tabla 51-3: Procedimiento para la construcción (continuación)	180
Tabla 52-3: Procedimiento para la construcción (continuación)	181
Tabla 53-3: Procedimiento para el montaje	182
Tabla 54-3: Pautas para el nivel, la planitud y la coplanaridad	184
Tabla 55-3: Tolerancias de desviación del eje	184
Tabla 56-3: Espectrometría del álabe directriz	191
Tabla 57-3: Espectrometría de un eje de acero	192
Tabla 58-3: Metalografía del acero ASTM A743 CA-6NM.....	193
Tabla 59-3: Metalografía del acero ASTM A743 CA-6NM (continuación)	194
Tabla 60-3: Metalografía del acero AISI 1018	195
Tabla 61-3: Dureza del acero ASTM A743 CA-6NM.....	196
Tabla 62-3: Dureza del acero AISI 1018	197

Tabla 63-3: Variables para el cálculo del tamaño de muestra	198
Tabla 64-3: Procedimiento para la obtención de probetas de ensayo	200
Tabla 65-3: Tabla de resultados probeta AISI1018_T01	202
Tabla 66-3: Tabla de resultados probeta AISI1018_T02	203
Tabla 67-3: Tabla de resultados probeta AISI1018_T03	204
Tabla 68-3: Propiedades mecánicas en el ensayo de torsión- AISI 1018	205
Tabla 69-3: Tabla de resultados probeta A473_T01	206
Tabla 70-3: Tabla de resultados probeta: A473_T02.....	207
Tabla 71-3: Tabla de resultados probeta: A473_T03.....	208
Tabla 72-3: Propiedades mecánicas en el ensayo de torsión- ASTM A743 CA-6NM.....	208
Tabla 73-3: Características principales del banco de ensayos	209
Tabla 74-3: Plan de mantenimiento del banco de ensayos de torsión.....	214
Tabla 75-3: Costos de materia prima	215
Tabla 76-3: Costos de materia prima (continuación).....	216
Tabla 77-3: Costo por el uso de máquinas o herramientas	216
Tabla 78-3: Costo por el uso de máquinas o herramientas (continuación)	217
Tabla 79-3: Costos de mano de obra.....	217
Tabla 80-3: Valor total de costos directos	217
Tabla 81-3: Costo total.....	218
Tabla 1-4: Reporte del ensayo de torsión.....	219
Tabla 2-4: Reporte fractográfico probeta A743_T01.....	221
Tabla 3-4: Reporte fractográfico probeta A743_T01 (continuación)	222
Tabla 4-4: Reporte fractográfico probeta A743_T01 (continuación)	223
Tabla 5-4: Reporte fractográfico probeta A743_T02.....	224
Tabla 6-4: Reporte fractográfico probeta A743_T02 (continuación)	225
Tabla 7-4: Reporte fractográfico probeta A743_T02 (continuación)	226
Tabla 8-4: Reporte fractográfico probeta A743_T03.....	227
Tabla 9-4: Reporte fractográfico probeta A743_T03 (continuación)	228
Tabla 10-4: Reporte fractográfico probeta A743_T03 (continuación)	229
Tabla 11-4: Reporte del ensayo de tracción.....	230
Tabla 12-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR01	232
Tabla 13-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR01 (continuación).....	233
Tabla 14-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR01 (continuación).....	234
Tabla 15-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR02.....	235
Tabla 16-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR02 (continuación).....	236
Tabla 17-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR02 (continuación).....	237

Tabla 18-4: Reporte fractográfico- probeta A743_TR03.....	238
Tabla 19-4: Reporte fractográfico- probeta A743_TR03 (continuación)	239
Tabla 20-4: Reporte del ensayo de impacto	240
Tabla 21-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM01	242
Tabla 22-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM01 (continuación).....	243
Tabla 23-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM02	244
Tabla 24-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM02 (continuación).....	245
Tabla 25-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM03	246
Tabla 26-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM03 (continuación).....	247

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Máquina en voladizo con un punto de carga.....	8
Figura 2-2. Máquina en voladizo con dos puntos de carga.....	8
Figura 3-2. Máquina con dos soportes principales con dos puntos de carga	9
Figura 4-2. Máquina con dos soportes principales con un punto de carga	9
Figura 5-2. Diseño esquemático de máquinas de prueba de torsión	10
Figura 6-2. Diseño horizontal con cama de máquina torsionalmente rígida.....	11
Figura 7-2. Máquina de torsión para mecánica de precisión	12
Figura 8-2. Máquina de torsión vertical.....	12
Figura 9-2: Fases en el proceso de diseño	13
Figura 10-2: Casa de calidad	15
Figura 11-2. Deformación de un resorte	16
Figura 12-2. Constante de resorte de una viga en voladizo	17
Figura 13-2. Chumacera.....	18
Figura 14-2: Sistema de resorte- masa- amortiguador	19
Figura 15-2. Sección en I.....	27
Figura 16-2. Par de torsión aplicado a una barra circular	31
Figura 17-2. Momento torsor aplicado a una barra circular.....	31
Figura 18-2. Barra circular y barra cuadrada sometidas a torsión	33
Figura 19-2. Deformación a cortante de una barra circular sólida.....	34
Figura 20-2. PLC S7-1200.....	36
Figura 21-2. Convertidor SINAMICS G120C.....	37
Figura 22-2. Encóder rotatorio.....	37
Figura 23-2. Refrentado	38
Figura 24-2. Cilindrado.....	38
Figura 25-2. Muestra para la prueba de torsión	39
Figura 26-2. Muestra de prueba de tracción rectangular.....	39
Figura 27-2. Dimensiones y tolerancias para un espécimen de prueba de impacto	40
Figura 28-2. Diagrama esfuerzo- deformación unitaria: a) material dúctil b) material frágil.....	41
Figura 29-2. Esfuerzo de cedencia superior e inferior que para comportamiento mecánico de un acero al bajo carbono.....	42
Figura 30-2. Deformación localizada durante el ensayo de tracción de un material dúctil	43

Figura 31-2. Mediante un cabezal móvil, en la prueba de tracción se aplica una fuerza unidireccional a una probeta.....	44
Figura 32-2. Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles.....	45
Figura 33-2. Ensayos de impacto: Charpy e Izod	45
Figura 34-2. Clasificación de las fallas	49
Figura 35-2. Relación entre fuente, modos y mecanismo de falla	50
Figura 36-2. Ejemplo de un mecanismo de falla hipotético en la fractura de un cigüeñal	51
Figura 37-2. Fuentes de falla básicas de los elementos mecánicos y estructuras	51
Figura 38-2. Familias de modos de falla básicos de los elementos mecánicos y las estructuras	51
Figura 39-2. Clasificación de los modos de falla por fractura más comunes en metales, de acuerdo con su naturaleza súbita o progresiva.	53
Figura 40-2. Clasificación de las marcas que comúnmente se presentan en las superficies de fractura de los elementos mecánicos	55
Figura 41-2. Marcas que comúnmente se presentan en las superficies de fractura de elementos mecánicos	55
Figura 42-2. Marcas de fractura.....	55
Figura 43-2: Diferentes tipos de marca.....	58
Figura 44-2. Texturas típicas de las superficies de fractura súbitas en materiales.....	59
Figura 45-2. Texturas típicas de las superficies de fractura progresivas en materiales	59
Figura 46-2. Secciones metalográficas transversales a grietas	60
Figura 47-2. Tres mecanismos de fractura en metales: (a) fractura dúctil, (b) fractura frágil por clivaje y (c) fractura frágil intergranular	61
Figura 48-2. Fractura súbita frágil	62
Figura 49-2. Ejemplos de formación de microgrietas a partir de las cuales se nuclea el clivaje en los granos metálicos	63
Figura 50-2. Imágenes de MEB de granos de ferrita clivados en un acero de bajo carbono	64
Figura 51-2. Avance de fractura por clivaje en material policristalino.....	64
Figura 52-2. Fractografía mostrando el fallo preferencial a lo largo de los bordes de grano	65
Figura 53-2. Ejemplos de la descohesión intergranular (microgrietas o microvacíos).....	67
Figura 54-2. Imágenes MEB de fracturas súbitas intergranulares	67
Figura 55-2. Daño intergranular en aceros inoxidable austeníticos	68
Figura 56-2. Superficies de fracturas súbitas frágiles	69
Figura 57-2. Ejemplo de una fractura súbita frágil a torsión de un eje.....	69
Figura 58-2. Ejemplo de fracturas súbitas frágiles con patrón de Chevrón de las marcas radiales	70

Figura 59-2. Rupturas en forma de ríos en un acero (C 0.25 max.; Mn 1.30; Ni 1.00; Mo 0.50) al vacío, templado y revenido.....	70
Figura 60-2. Formación de rupturas con forma de ríos al pasar a través de un límite de grano .	70
Figura 61-2. Fractografía SEM de una fractura iniciado en borde de grano.....	71
Figura 62-2. Orientación de las superficies de fractura súbita frágil en función del tipo de carga aplicada: (a) tracción, (b) flexión, (c) torsión.....	71
Figura 63-2. Direcciones de propagación de grietas preexistentes en fracturas súbitas frágiles y progresivas.....	72
Figura 64-2. Fracturas frágiles	72
Figura 65-2. Fractura súbita dúctil.....	73
Figura 66-2. Ejemplos de formación de microvacíos dentro de un grano metálico.....	74
Figura 67-2. Imágenes de MEB de metales que fallaron por formación y coalescencia de vacíos	74
Figura 68-2. Crecimiento de grietas.....	75
Figura 69-2. Formación de microhuecos <<voids>>.....	75
Figura 70-2. Imágenes MEB de metales fracturados por formación y coalescencia de vacíos ..	76
Figura 71-2. Fractura de copa y cono típica de un ensayo de tracción	76
Figura 72-2. Ensayo de tracción	77
Figura 73-2. Fracturas dúctiles.....	78
Figura 74-2. Fracturas dúctiles por desgarre y torsión.....	79
Figura 75-2. Imágenes de MEB y metalográficas de fracturas súbitas dúctiles.....	80
Figura 76-2. Superficie de fractura dúctil	80
Figura 77-2. Imágenes de MEB de la morfología típica de los microhuecos en las dos superficies de fractura formadas	81
Figura 78-2. Orientación de las superficies de fractura súbita dúctil, en función del tipo de carga aplicada.....	81
Figura 79-2. Fracturas dúctiles a tracción en función del espesor	82
Figura 80-2. Superficie de fractura súbita mixta.....	83
Figura 81-2. Imágenes de MEB de superficies de fractura súbitas mixtas en aceros bonificados.....	84
Figura 1-3. Cada de la Calidad del banco de ensayos de flexión rotativa.....	87
Figura 2-3. Funciones y módulos del banco de flexión rotativa	88
Figura 3-3. Pre diseño del banco de ensayos de flexión rotativa	96
Figura 4-3. Dimensiones de los perfiles nervados	103
Figura 5-3. Rodamientos de rodillos toroidales CARB (SKF pág: 980)	113
Figura 6-3. Soporte de rodamientos SKF (Pág 30).....	114

Figura 7-3. Soporte SNL para rodamientos en un asiento cilíndrico (Pág 120)	115
Figura 8-3. Modelado de la barra de carga	116
Figura 9-3. Aplicación de fuerzas en la barra de carga.....	116
Figura 10-3. Mallado de la barra de carga	117
Figura 11-3. Esfuerzo equivalente de Von Mises	117
Figura 12-3. Deformación máxima en la barra de carga.....	117
Figura 13-3. Dimensiones de la placa de fuerza	118
Figura 14-3. Modelado del eje guía	119
Figura 15-3. Modelado del ángulo de soporte	123
Figura 16-3. Modelado de la placa guía.....	124
Figura 17-3. Modelado del bocín para ejes guía	124
Figura 18-3. Análisis de deformación de la placa principal.....	128
Figura 19-3. Aplicación de cargas en la estructura del banco de ensayos de flexión	129
Figura 20-3. Estructura del banco de flexión: factor demanda/capacidad	130
Figura 21-3. Sistema giratorio	131
Figura 22-3. Sistema masa- resorte- amortiguador de la parte giratoria.....	131
Figura 23-3. Parte fija (estructura).....	132
Figura 24-3. Esquema de la estructura.....	132
Figura 25-3. Sistema total equivalente de masa- resorte- amortiguador.....	133
Figura 26-3. Diagrama de cuerpo libre	134
Figura 27-3. Soporte Anti vibratorio N°. 2	136
Figura 28-3. Estabilidad del sistema masa-resorte-amortiguador.....	140
Figura29-3. Estabilidad del sistema masa- resorte- amortiguador con coeficiente de amortiguamiento bajo.....	140
Figura 30-3. Casa de la calidad del banco de ensayos de torsión	143
Figura 31-3. Funciones y módulos del banco de ensayos para torsión.....	144
Figura 32-3. Pre diseño del banco de ensayos de torsión	155
Figura 33-3. Eje motriz- banco de torsión	167
Figura 34-3. Brida.....	168
Figura 35-3. Eje fijo.....	168
Figura 36-3. Deformación total de la placa principal	171
Figura 37-3. Aplicación de cargas en la base fija	172
Figura 38-3. Configuración del mallado en la base fija	172
Figura 39-3. Esfuerzo máximo de Von-Mises base fija.....	173
Figura 40-3. Deformación máxima de la base fija.....	173
Figura 41-3. Aplicación de cargas en la base móvil	173

Figura 42-3. Configuración del mallado en la base móvil	174
Figura 43-3. Coeficiente de seguridad de la base móvil	174
Figura 44-3. Deformación de la base móvil.....	174
Figura 45-3. Aplicación de cargas en la estructura del banco de ensayos de torsión	175
Figura 46-3. Estructura del banco de torsión: factor demanda/capacidad	176
Figura 49-3. Método cara y periferia	184
Figura 50-3. Toma de medidas de desviación (a) y (b).....	185
Figura 51-3. Diagrama eléctrico general.....	186
Figura 52-3. Sistema eléctrico	186
Figura 53-3. Pantalla frontal del banco de ensayos de torsión.....	187
Figura 54-3. Comunicación Modbus y valores de registro	188
Figura 55-3. Lectura y procesamiento de señales	188
Figura 56-3. Obtención de las variables del ensayo.....	189
Figura 57-3. Control de pulsadores.....	189
Figura 58-3. Tabla de resultados en la pantalla frontal de Labview	190
Figura 59-3. Obtención de datos en un archivo de ACCESS	190
Figura 60-3. Fractura en la probeta AISI1018_T01 (a) secc longitudinal (b) secc transversal	202
Figura 61-3. Fractura en la probeta AISI1018_T02 (a) secc longitudinal (b) secc transversal	203
Figura 62-3. Fractura en la probeta AISI1018_T03 (a) secc longitudinal (b) secc transversal	204
Figura 63-3. Fractura en la probeta A743_T01 (a) secc longitudinal (b) sección transversal ..	205
Figura 64-3. Fractura en la probeta A743_T02 (a) secc longitudinal (b) sección transversal ..	206
Figura 65-3. Fractura en la probeta A743_T03 (a) secc longitudinal (b) sección transversal ..	207

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2.	Diagrama S-N o diagrama de Wohler.....	20
Gráfico 2-2.	Resistencias a la fatiga representativas	21
Gráfico 3-2.	Límites de resistencia a la fatiga vs tensión de resultados de ensayos reales	22
Gráfico 4-2.	Fracción de resistencia a la fatiga	23
Gráfico 5-2.	Factores de superficie para el acero.....	26
Gráfico 6-2.	Sensibilidad a la muesca vs radio de la muesca para varios materiales.....	29
Gráfico 7-2.	Eje redondo con filete en el hombro en flexión.....	30
Gráfico 8-2.	Eje redondo con filete en el hombro en torsión	30
Gráfico 9-2.	Momento torsor en función del ángulo de torsión	32
Gráfico 10-2.	Determinación del límite elástico convencional al 0.2% de deformación en el acero fundido gris.....	42
Gráfico 1-3.	Diagrama de cuerpo libre.....	98
Gráfico 2-3.	Diagrama de cortante	99
Gráfico 3-3.	Diagrama de momento flector	100
Gráfico 4-3.	Deformación total en el punto B.....	107
Gráfico 5-3.	Deformación total en el punto C.....	107
Gráfico 6-3.	Diagrama de los ejes con los pesos de los elementos	108
Gráfico 7-3.	Diagrama de cuerpo libre de la placa de fuerza.....	119
Gráfico 8-3.	Diagrama de cortante de la placa de fuerza	120
Gráfico 9-3.	Diagrama de momento flector de la placa de fuerza.....	120
Gráfico 10-3.	Deformación máxima de la placa de fuerza.....	121
Gráfico 11-3.	Diagrama de cuerpo libre de la placa principal	125
Gráfico 12-3.	Diagrama de cuerpo libre del tramo AB.....	125
Gráfico 13-3.	Diagrama de cuerpo libre del tramo AC	126
Gráfico 14-3.	Diagrama de cortante de la placa principal.....	127
Gráfico 15-3.	Diagrama de momento flector de la placa principal	127
Gráfico 16-3.	Curvas de soportes de acuerdo al diámetro	137
Gráfico 17-3.	Diagrama de cuerpo libre del eje motriz.....	158
Gráfico 18-3.	Diagrama de cortante del eje motriz	159
Gráfico 19-3.	Diagrama de momento flector del eje motriz	159
Gráfico 20-3.	Diagrama de momento torsor del eje motriz	159
Gráfico 21-3.	Deformación en el punto A.....	163

Gráfico 22-3. Deformación en el punto C.....	164
Gráfico 23-3. Deformación en el punto E.....	164
Gráfico 24-3. Deformación en el punto F.....	164
Gráfico 25-3. Diagrama del eje motriz con los pesos de los elementos.....	165
Gráfico 26-3. Diagrama de cuerpo libre de la placa principal- banco torsión.....	169
Gráfico 27-3. Diagrama de cortante de la placa principal- banco torsión.....	170
Gráfico 28-3. Diagrama de momento flector de la placa principal- banco torsión.....	170
Gráfico 29-3. Diagrama de flujo del proceso de alineación.....	183
Gráfico 30-3. Diagrama de flujo del proceso de alineación (continuación).....	184
Gráfico 31-3. Gráfico de la probeta AISI1018_T01:Torque(Nm)versus ángulo de torsión (°)	202
Gráfico 32-3: Gráfico de la probeta AISI1018_T02:Torque(Nm)versus ángulo de torsión (°)	203
Gráfico 33-3. Gráfico de la probeta AISI1018_T03:Torque(Nm)versus ángulo de torsión (°)	204
Gráfico 34-3. Gráfico de la probeta A473_T01:Torque (Nm) versus ángulo de torsión (°).....	206
Gráfico 35-3. Gráfico de la probeta A473_T02: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (°).....	207
Gráfico 36-3. Gráfico de la probeta A473_T03: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (°).....	208
Gráfico 1-4. Resultados del ensayo de torsión- acero ASTM A743 CA-6NM.....	220
Gráfico 2-4. Resultados del ensayo de tracción- acero ASTM A743 CA-6NM.....	231
Gráfico 3-4. Resultados del ensayo de impacto- acero ASTM A743 CA-6NM.....	241

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: COMPETENCIA 1- MÁQUINA PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN ROTATIVA

ANEXO B: COMPETENCIA 2- MÁQUINA PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN ROTATIVA

ANEXO C: FACTOR DE SEGURIDAD

ANEXO D: CÁLCULO DE L_h (VIDA NOMINAL)

ANEXO E: CÁLCULO DE L_{10h} (VIDA ÚTIL DE ACUERDO AL CATÁLOGO SKF EN HORAS)

ANEXO F: FACTOR DE SERVICIO K

ANEXO G: SELECCIÓN DEL ACOUPLE

ANEXO H: MASAS EQUIVALENTES, RESORTES Y AMORTIGUADORES

ANEXO I: RAZÓN DE AMORTIGUAMIENTO

ANEXO J: RESONANCIA

ANEXO K: COMPETENCIA 1- MÁQUINA PARA ENSAYOS DE TORSIÓN

ANEXO L: COMPETENCIA 2- MÁQUINA PARA ENSAYOS DE TORSIÓN

ANEXO M: PARÁMETROS A, B, C PARA ALINEACIÓN

ANEXO N: FÓRMULAS PARA REALIZAR LOS MOVIMIENTOS DE ALINEACIÓN

ANEXO O: REPORTE DEL ENSAYO DE TRACCIÓN EN EL ACERO AISI 1018

ANEXO P: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN

ANEXO Q: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA PARA ENSAYOS DE IMPACTO

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar y caracterizar los mecanismos de falla por torsión, tracción e impacto en el acero de las turbinas hidráulicas (ASTM A743 CA-6NM) con la finalidad de determinar el tipo de fractura que presenta el material, debido a que el Laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT no posee un registro de fotografías patrones acerca de estos mecanismos. La verificación del acero ASTM A743 CA-6NM se llevó a cabo mediante pruebas de espectrometría, metalografía y dureza. Se mecanizaron especímenes, y posteriormente se realizaron los ensayos de torsión, tracción e impacto de acuerdo a las normas: NTE INEN 140:2013, ASTM E8-E8M-15a y ASTM E23-07A, respectivamente. En base al handbook “ASM INTERNATIONAL FAILURE ANALYSIS AND PREVENTION”, se realizó el análisis fractográfico usando el microscopio electrónico de barrido (MEB) y un estereoscopio; con los cuales se estableció características cualitativas macroscópicas y microscópicas. En el mecanismo de falla por torsión, se encontró macroscópicamente una textura tersa con frotamiento en la periferia y tersa en la zona central, microscópicamente se observaron microvacíos con una geometría elíptica; en tracción, macroscópicamente se presentó una textura fibrosa y se formaron labios de corte con textura tersa, y microscópicamente hubo la presencia de microvacíos de forma circular; en impacto, macroscópicamente se tiene una textura fibrosa, y microscópicamente se observan microvacíos circulares y semielípticos. Estas características permitieron determinar que el material de las turbinas presenta una fractura dúctil en cada mecanismo de falla, con esta investigación se aporta considerablemente en la óptima recuperación de las turbinas hidráulicas reduciendo el tiempo de análisis fractográfico de las fallas. Se recomienda caracterizar fracturas progresivas como la fractura por fatiga, fractura por corrosión bajo esfuerzo y desgaste abrasivo para ampliar el estudio acerca de mecanismos de falla.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <FRACTOGRAFÍA>, <ENSAYO DE TRACCIÓN>, <ENSAYO DE TORSIÓN>, <ENSAYO DE IMPACTO>, <ACERO INOXIDABLE>, <MECANISMOS DE FALLA>.



ABSTRACT

The objective of this study was to analyze and characterize the mechanisms of failure due to torsion, traction and impact in the steel of hydraulic turbines (ASTM A743 CA-6NM) in order to determine the type of fracture that the material presents, due to the CIRT wear and Failure Analysis Laboratory does not have a record of standard photographs of these mechanisms. Verification of ASTM A743 CA-6NM steel was carried out by spectrometric, metallographic and hardness tests. Specimens were machined, and later the torsion, traction and impact tests were carried out according to the standards: NTE INEN 140: 2013, ASTM E8-E8M-15a and ASTM E23-07A, respectively. Based on the “ASM INTERNATIONAL FAILURE ANALYSIS AND PREVENTION” handbook, the fractographic analysis was performed using the scanning electron microscope (SEM) and a stereoscope; with which macroscopic and microscopic qualitative characteristics were established. In the torsion failure mechanism, a smooth texture with rubbing in the periphery and smooth in the central zone was found macroscopically, microscopically micro voids with an elliptical geometry were observed; in traction, macroscopically a fibrous texture was presented and cut lips with a smooth texture were formed, and microscopically there was the presence of circular micro-voids; on impact, macroscopically it has a fibrous texture, and microscopically circular and semi-elliptic micro-voids are observed. These characteristics made it possible to determine that the material of the turbines presents a ductile fracture in each failure mechanism, with this investigation a considerable contribution is made to the optimal recovery of hydraulic turbines, reducing the time of fractographic analysis of the failures. It is recommended to characterize progressive fractures such as fatigue fracture, stress corrosion fracture and abrasive wear to expand the study of failure mechanisms.

Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <FRACTOGRAPHY>, <TRACTION TEST>, <TORQUE TEST>, <IMPACT TEST>, <STAINLESS STEEL>, <FAILURE MECHANISMS>.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata el tema de Fractografía de mecanismos de fallas en metales, que se puede definir como el estudio de las superficies fracturadas. Para este trabajo se considera los mecanismos de falla como: torsión, tracción e impacto. Para analizar esta problemática es necesario mencionar las posibles causas de fractura; como las imperfecciones en los materiales refiriéndose a los defectos de la superficie entre ellos están las esquinas afiladas por un mal diseño o fabricación deficiente, rayaduras o picaduras, inclusiones, concentraciones de dislocaciones. Por estas causas se producen grietas en el material y con el crecimiento de las mismas se generan los mecanismos de fractura más comunes en metales y aleaciones: fractura frágil, fractura dúctil o la combinación de ambas encontrándose estas dentro de las fracturas súbitas, siendo estas fracturas las que se pretende estudiar.

El interés de realizar esta investigación es para analizar las fracturas en el acero de las turbinas hidráulicas ASTM A743 grado CA-6NM, obteniendo características patrones macroscópicas y microscópicas que queden registradas en fotografías que serán usadas por el Laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT para una óptima recuperación de las turbinas hidráulicas, piezas o elementos que lleguen fracturadas a la empresa y disminuir el tiempo de análisis de superficies fracturadas.

El mecanismo de falla de fatiga por flexión rotativa es una fractura de tipo progresiva, importante en la industria, por ello se propone el diseño conceptual de un banco para realizar este tipo de ensayos, quedando como tentativa para estudios futuros de fallas de esta índole. Para continuar con el desarrollo del tema se diseña y construye un banco de ensayos para torsión con su respectivo sistema de adquisición de datos, con el fin de generar el mecanismo de falla y que se use para posteriores ensayos en diferentes materiales que el Laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT desee realizar. Consecutivamente se caracteriza el material a estudiar, por medio de una espectrometría, un análisis metalográfico y por último un ensayo de dureza, todo esto para comprobar que el material de estudio es el acero A743 CA-6NM. Posteriormente se mecanizan especímenes bajo normas para realizar los respectivos ensayos. Es importante señalar que el ensayo de tracción se lleva a cabo en la máquina universal que posee el CIRT, el ensayo de torsión se efectúa en el banco de ensayos que se diseña y construye, el ensayo de impacto se realiza en un laboratorio particular. El material de estudio es el acero de las turbinas hidráulicas, pero para comprobar que el banco de ensayos de torsión genera correctamente el mecanismo de falla se ensaya también el acero AISI 1018 del cual todas sus propiedades son conocidas. El

análisis fractográfico se realiza por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB) con sus siglas en inglés SEM (Scanning Electron Microscope) y un estereoscopio.

En el capítulo I se presenta antecedentes y se realiza la formulación del problema de estudio. En el capítulo II se revisan los fundamentos teóricos que sirven de base para solucionar el problema. En el capítulo III se presenta la propuesta de un diseño conceptual de un banco para ensayos de fatiga por flexión rotativa; se indica la metodología o procesos seguidos para la construcción del banco de pruebas de torsión, y la realización de los ensayos. En el capítulo IV se presenta y discute los resultados de los ensayos y se analizan las fotografías para dar conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

Las turbinas hidráulicas son turbo máquinas motoras hidráulicas, las cuales mediante el uso de la energía de un fluido producen un movimiento de rotación en un eje que mueve un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica. Por ser el elemento principal en una central hidroeléctrica, es fundamental conocer las diferentes formas como pueden fallar sus elementos: rodete y álabes; para ello es importante caracterizar los mecanismos de falla para poder determinar si la misma probablemente se ocasionó por una fuerza de tracción, impacto o torsión, al momento en que la turbo máquina entra en contacto con el flujo de agua y partículas que circulan conjuntamente con el fluido, los cuales son causantes de fallas en los elementos antes mencionados; ocasionando que el rendimiento de la turbina disminuya así como su vida útil.

En Ecuador el 52% de la producción eléctrica total se obtiene a través de la generación hidroeléctrica. La Corporación eléctrica del Ecuador CELEC EP y la unidad de negocio Hidroagoyán han creado el centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales <<CIRT>> con el propósito de prestar servicio técnico, tecnológico de investigación y desarrollo de conocimiento en los procesos de recuperación de piezas y partes asegurándose de cumplir normas y estándares internacionales.

EL CIRT cumple de manera objetiva con el cambio de la matriz energética y productiva, disminuyendo tiempo y costo en la recuperación de piezas o partes sin depender de la tecnología extranjera. Los procesos que se llevan a cabo en este centro son: ingeniería de recuperación, procesos de control de calidad, procesos de manufactura y recuperación donde se realizan actividades de maquinado, soldadura y pulido. Para el proceso de control de calidad el CIRT cuenta con el Laboratorio de Análisis de Falla y Desgaste, en el cual se realizan pruebas como la espectrometría, dureza, análisis metalográfico, ultrasonido, partículas magnéticas y el análisis fractográfico que lo realizan con un estereoscopio y un microscopio electrónico de barrido (MEB). (HIDROAGOYÁN, 2016)

En la recuperación de turbinas se inicia identificando las fallas y sería importante mediante una inspección a través de los equipos que posee el laboratorio, implementar un registro que contenga fotografías patrones de la caracterización de fallas debido a distintos esfuerzos, determinar prontamente cual pudo ser el modo de falla, para tomar las respectivas acciones ingenieriles para una óptima recuperación y aportar a la disminución de tiempo en el proceso de Fractografía que realiza el Laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT.

1.2 Formulación del problema

El CIRT es el ente encargado de dar soporte técnico a las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas del país. A este lugar llegan turbinas con algunas averías, que a simple vista no se podría determinar cuál mecanismo de falla pudo ser la causa.

Debido a que el CIRT no cuenta con un registro que contenga fotografías de las fracturas ocasionadas por los mecanismos de falla, como: tracción, impacto y torsión, por tal razón, se requiere realizar ensayos usando probetas que se obtienen a partir del material de las turbinas que ya han tenido sus años de funcionamiento para posteriormente analizar y caracterizar las superficies fracturadas.

Los ensayos se realizan por medio de las diferentes máquinas que existen como: la máquina universal, el péndulo Charpy, y el banco de torsión; esta última se debe diseñar y construir para generar el mecanismo de falla; posteriormente este banco será usado por el departamento de control de calidad del CIRT para sus continuas investigaciones que realizan en los materiales de las turbinas hidráulicas bajo distintas condiciones.

La caracterización de las fallas del material de las turbinas se hace por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB) y el estereoscopio que son equipos que tiene el laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT, a través de estos equipos se obtienen imágenes para tener un registro de los mecanismos de falla debido a los diferentes esfuerzos que actúan en las probetas.

1.3 Justificación

1.3.1 *Justificación teórica*

Para el diseño y construcción del banco de ensayos de torsión, y para el diseño conceptual del banco de ensayos de fatiga por flexión rotativa se utilizan los conocimientos adquiridos en Resistencia de Materiales, Diseño de Máquinas, Ingeniería de Materiales, Automatización de Procesos Industriales y Estructuras Metálicas, así como también se usan normas y catálogos para la selección de componentes de los bancos.

1.3.2 *Justificación metodológica*

Se realiza investigaciones para el diseño y construcción del banco de ensayos de torsión. Se consultan normas para los ensayos y para la elaboración de especímenes. Para la caracterización de fallas se revisan libros de Mecánica de Fractura.

El ensayo de tracción se realiza con la máquina universal; el ensayo de impacto por medio del péndulo Charpy y el de torsión con el banco de ensayo que se diseña y construye.

Por medio del uso de los equipos del laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT se caracteriza las fallas en las probetas ensayadas.

1.3.3 *Justificación práctica*

EL presente proyecto se realiza para dotar al CIRT de un registro que contenga fotografías patrones de los mecanismos de falla en el acero de las turbinas hidráulicas, para que posteriormente el Laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT haga uso de este registro para confrontar fotografías de piezas o elementos que llegan fracturadas a la empresa y sirva de apoyo para determinar el tipo de fractura; de esta manera se contribuye a la disminución del tiempo en el análisis de superficies fracturadas que realiza el departamento de control de calidad del CIRT.

1.4 Alcance

Caracterización y análisis de los mecanismos de falla en el acero de las turbinas hidráulicas; para esto se realizan los ensayos de tracción, impacto, y torsión; todos estos ensayos se hacen por medio de los respectivos equipos; específicamente para el ensayo de torsión se diseña y se construye un banco de pruebas. Una vez realizados los ensayos, la caracterización de las fallas se hace usando los equipos que posee el departamento de control de calidad del CIRT para finalmente obtener características patrones macroscópicas y microscópicas que queden registradas en fotografías que sean usadas posteriormente por el Laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT para una óptima recuperación de las turbinas hidráulicas, piezas o elementos que lleguen fracturadas a la empresa y disminuir el tiempo de análisis de superficies fracturadas.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo General*

Caracterizar y analizar los mecanismos de falla en el acero de las turbinas hidráulicas.

1.5.2 *Objetivos Específicos*

- Recopilar información acerca del funcionamiento de máquinas para ensayos de fatiga por flexión rotativa y para ensayos de torsión.
- Proponer el diseño y el análisis básico de vibraciones mecánicas de un banco para ensayos de fatiga por flexión rotativa.
- Diseñar y construir un banco para ensayos de torsión.
- Implementar un sistema de adquisición de datos para el banco de ensayos de torsión.
- Mecanizar las probetas para los diferentes ensayos basándose en las respectivas normas.
- Realizar los ensayos de torsión, tracción e impacto usando los respectivos equipos.

- Elaborar un registro de fotografías patrones de los mecanismos de falla en el acero de las turbinas hidráulicas (ASTM A743 CA-6NM).

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Máquinas para ensayos de fatiga

Para realizar ensayos de fatiga la máquina más utilizada es la máquina de flexión rotativa debido a su facilidad de operación, construcción y costos reducidos.(Polanco Pacheco, 2011, p. 26)

Es importante recalcar que las máquinas de flexión rotativa tienen ciertas limitaciones:

- a) Las probetas a ensayarse solo pueden ser de forma cilíndrica.(Polanco Pacheco, 2011, p. 26)
- b) Los esfuerzos aplicados a las probetas solo son de amplitud constante y completamente invertidos.(Polanco Pacheco, 2011, p. 26)

El criterio de clasificación de las máquinas de fatiga es según el tipo de esfuerzo aplicados:

- a) Máquinas de esfuerzos axiales (Tracción- Compresión)
- b) Máquinas de flexión, plana o rotativa
- c) Máquinas de torsión
- d) Máquinas de esfuerzos combinados

El presente trabajo concentra su atención particularmente en la máquina de flexión rotativa y la máquina de torsión, debido a que se propone un diseño conceptual de un banco de flexión rotativa y se diseña y construye el banco para ensayos de torsión y mediante este se realiza el ensayo para generar el mecanismo de falla y caracterizar las fallas que ocurren en el acero de las turbinas hidráulicas ASTM A743 CA- 6NM.

➤ Máquina de flexión rotativa

Desde hace más de 150 años se utilizan las máquinas de flexión rotativa, desde que en 1847 Wöhler desarrolló la primera máquina para ensayar los materiales utilizados en los rieles de las locomotoras, hasta el dispositivo de R.R. Moore siendo esta última la más utilizada por su facilidad de construcción y operación.(Polanco Pacheco, 2011, p. 27)

- *Máquina de viga rotativa en voladizo*

La máquina de viga rotatoria en voladizo es la más sencilla. Un extremo de la probeta se sujeta en un mandril y se aplica la carga a través de un soporte situado en el otro extremo, con pesas o con un muelle. Con este montaje el momento de flexión aumenta linealmente a lo largo de la probeta hasta el mandril y el fallo tiene lugar en la región donde el radio de transición coincide con la porción paralela de la probeta. Para tener un valor constante del esfuerzo a lo largo de toda la probeta, la sección debe ir disminuyendo. La carga puede aplicarse alternativamente en el

extremo (Figura 1-2) o en dos puntos de la probeta (Figura 2-2).(Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008, pp. 5–6)

Después de media vuelta, el material que estaba en tensión, pasará a estar en compresión, y viceversa. De esta manera el esfuerzo en cualquier punto pasa por un ciclo senoidal completo, desde el esfuerzo máximo de tensión hasta el esfuerzo máximo de compresión.(Polanco Pacheco, 2011, p. 28)

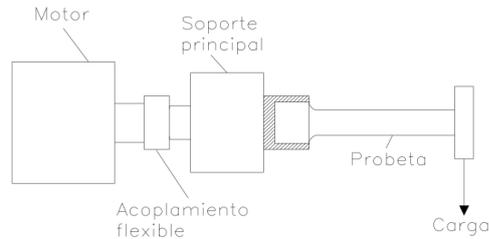


Figura 1-2. Máquina en voladizo con un punto de carga

Fuente: (Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008)

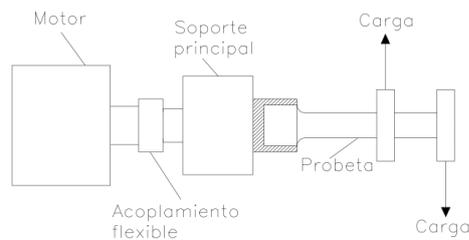


Figura 2-2. Máquina en voladizo con dos puntos de carga

Fuente: (Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008)

- *Máquina de viga rotativa con dos soportes principales*

Esta máquina posee dos soportes principales y dos soportes de la viga rotatoria. La carga puede aplicarse alternativamente en dos puntos de los soportes de la viga (Figura 3-2) o en un punto central entre los extremos de los soportes de la probeta (Figura 4-2). Con este montaje el momento de flexión aumenta linealmente a partir del extremo de la probeta hasta el centro de la misma y el fallo tiene lugar en la región donde se tiene menor diámetro (parte central).(Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008, p. 6)

Si la probeta se rompe en dos piezas iguales, la prueba indica la resistencia a la fatiga del material. Si las piezas son desiguales, un material o un defecto en la superficie han variado los resultados.(Polanco Pacheco, 2011, p. 29)

La prueba en cada probeta se hace a un nivel específico de esfuerzo, hasta que se produzca la falla. Este procedimiento se repite en otras probetas idénticas, disminuyendo gradualmente el nivel del esfuerzo.

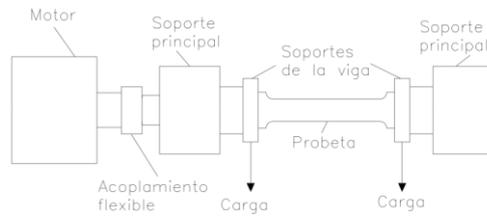


Figura 3-2. Máquina con dos soportes principales con dos puntos de carga

Fuente: (Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008)

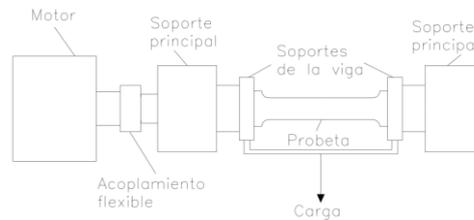


Figura 4-2. Máquina con dos soportes principales con un punto de carga

Fuente: (Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo 2008)

2.2 Máquinas para ensayos de torsión

Las máquinas de prueba de torsión miden pares activos y pasivos en ángulos de rotación predefinidos. El rango de aplicación se extiende desde las pruebas clásicas de materiales de torsión hasta las pruebas de componentes más complejas. (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

Los componentes principales son:

- Transductor de Par. (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)
- Bastidor de la máquina con accionamiento controlado y medición de ángulo. (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)
- Unidad electrónica de medida y control para adquisición de datos de medición. (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)
- Software de prueba y análisis. (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

La determinación del par se realiza por sensores de reacción estática (Modelos 411 / 415) o mediante sensores giratorios (Modelos 421 /422). Además, sensores multicomponentes para la medición de fuerzas de precarga y par disponible en conexiones atornilladas están disponibles. Dependiendo de la aplicación y medición los sensores estarán equipados con rodamientos de apoyo para proteger contra carga transversal. (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

A continuación, se muestra un esquema de la máquina de torsión con sus respectivas partes (Figura 5-2).

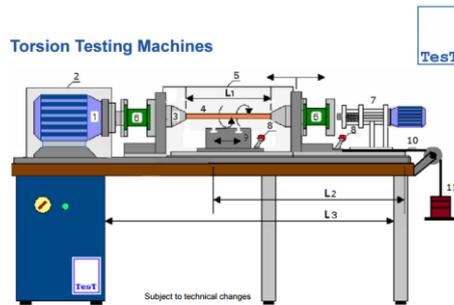


Figura 5-2. Diseño esquemático de máquinas de prueba de torsión

Fuente: (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH 2018)

- L1: Longitud del desplazamiento lineal.
- L2: Longitud total de la mesa de máquina.
- L3: Desplazamiento lineal para los sensores y las posibles muestras.
- 1: Unidad de accionamiento con motor, engranaje y cojinete.
- 2: Cubierta protectora, con interruptor de seguridad integrado.
- 3: Dispositivos de sujeción.
- 4: Probeta.
- 5: Cubierta protectora de policarbonato, movable en eje longitudinal, con interruptor de seguridad.
- 6: Transductor de par giratorio con Acoplamiento al variador y al bloque de rodamientos o versión como sensor de reacción en el rodamiento del mostrador.
- 7: Transmisión motorizada de fuerza axial y medición (opcional).
- 8: Dispositivos de fijación.
- 9: Portaherramientas horizontal con lotes en T de desplazamiento lineal con fijación.
- 10: Mesa de máquinas con armario para electrónica de potencia y cama de máquina torsionalmente rígida.
- 11: Transmisión de fuerza axial debido a masas de peso.

Las máquinas de prueba de torsión se pueden dividir en tres grupos:

- Pruebas bajo influencia de torsión: pruebas de materiales clásicos en metales, cerámicas, plásticos, madera y otros, incluso materiales más nuevos.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)
- Pruebas de componentes bajo influencia de torsión: Pruebas en componentes de cualquier tipo.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

- Pruebas bajo carga simultánea de fuerzas torsionales y de tracción o compresión.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

Modelos de máquinas de torsión existentes en el mercado

- Modelo 210

En la versión estándar, las máquinas de prueba de torsión de TesT se ejecutan como máquinas horizontales con bancada de máquinas torsionalmente rígida (Figura 6-2). Se construyen individualmente como versiones de kit de construcción, siempre de acuerdo con las demandas del cliente. Por lo tanto, es fácilmente posible incorporar preferencias individuales y requisitos específicos del cliente. Las unidades de accionamiento y control, mesas de máquinas, cuadros y adquisición de datos se integrarán como componentes terminados. Todas las máquinas de prueba de torsión están equipadas con el TesTController 850 que es compatible con TEDS.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

El software correspondiente TesTWinner® proporciona al usuario, además de su capacidad de programación gratuita, un inmenso repertorio de posibilidades para procedimientos de prueba estándar y ejecución de pruebas de rutina, evaluación, presentación y procesamiento adicional de resultados, automatización de procesos y mucho más.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

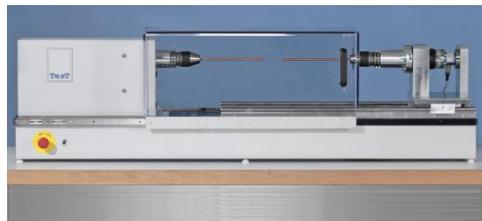


Figura 6-2. Diseño horizontal con cama de máquina torsionalmente rígida

Fuente: (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

- Modelo 215

Las máquinas de prueba de la serie de modelos 215 fueron desarrolladas y construidas para aplicaciones con rangos de medición extremadamente pequeños, por debajo de 0.1 Ncm y la más alta precisión (Figura 7-2). Por ejemplo, se utilizan en la industria relojera o en la tecnología médica.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

Todas las máquinas de prueba de torsión están equipadas con el TesTController 850 que es compatible con TEDS. El software correspondiente TesTWinner® proporciona al usuario, además de su capacidad de programación gratuita, un inmenso repertorio de posibilidades para procedimientos de prueba estándar y ejecución de pruebas de rutina, evaluación, presentación y

procesamiento adicional de resultados, automatización de procesos y mucho más. Un amplio campo de aplicación está garantizado por una amplia gama de accesorios.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)



Figura 7-2. Máquina de torsión para mecánica de precisión

Fuente: (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

- Modelo 220

Para rangos de medición de hasta 600 Nm, las máquinas de prueba de torsión de TesT también están disponibles como máquinas verticales (Figura 8-2), equipadas con una mesa con ranura en T y un accionamiento ajustable en altura. Se construyen individualmente como versiones de kit de construcción, siempre de acuerdo con las demandas del cliente. Por lo tanto, es fácilmente posible incorporar preferencias individuales y requisitos específicos del cliente. Las unidades de accionamiento y control, mesas de máquinas, cuadros y adquisición de datos se integrarán como componentes terminados. Todas las máquinas de prueba de torsión están equipadas con el TesTController 850 que es compatible con TEDS.(Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)



Figura 8-2. Máquina de torsión vertical

Fuente: (Máquina de prueba de torsión 210: TesT GmbH, 2018)

2.3 Consideraciones teóricas para el diseño

2.3.1 Metodología, fases y etapas del diseño

En la ingeniería concurrente intervienen perspectivas desde el punto de vista del producto al considerar su fabricación, requerimientos de la empresa y costes, de recursos humanos referentes al personal participativo en la ejecución del proyecto y de recursos materiales dadas por las herramientas tecnológicas de modelado, ensamble y simulación.(Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 19)

Para Riba, todo producto tiene un ciclo de vida basada en las seis etapas siguientes:

- Decisión y definición.
- Diseño y desarrollo.
- Fabricación.
- Distribución y comercialización.
- Utilización y mantenimiento.
- Fin de vida.

Todas estas etapas van de la mano si se desea lograr un excelente trabajo, un producto que satisfaga una necesidad a bajo costo, fácil utilización y mantenimiento a considerable vida útil.(Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 20)

Shigley en la figura siguiente Figura 9-2 muestra las fases del proceso de diseño, en donde de manera repetitiva estas vuelven a suceder a medida que se vaya presentando el problema.(Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 20)

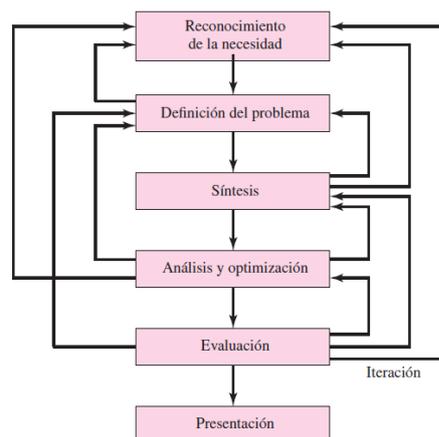


Figura 9-2: Fases en el proceso de diseño

Fuente: (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018)

El reconocimiento de la necesidad es el primer paso para el diseño, seguido por la definición del problema en donde se especifica todos los detalles del objeto que se ha de diseñar, siendo estos

por ejemplo cantidades de entrada y salida, características, propiedades físicas y limitaciones de la misma, estas limitaciones definen el costo, proceso de fabricación, tiempo de vida útil, características de operación y la confiabilidad.(Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 20)

Posteriormente se procede a la síntesis llamado también según Shigley intención del concepto, aquí varios esquemas se proponen, analizan e investigan de acuerdo a la definición del problema que se establece, en el análisis los sistemas se revisan, mejoran o desechan, de tal forma que los esquemas que sobreviven a este análisis deben ser capaces de ser comparados para que así se pueda elegir el camino que conduzca al diseño mecánico más competitivo.(Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 21)

2.3.2 Herramientas para el diseño concurrente- Casa de calidad

La metodología QFD, es la más usada dentro del diseño para la definición del producto, debido a que es una herramienta de planificación que se usa para la selección de la mejor alternativa del diseño, esta técnica se lo conoce también “como la voz del cliente” o “la casa de calidad” según Arturo Ruiz profesor de la Universidad Pontificia de Madrid.(Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 22)

La matriz QFD sirve para:

- Planificación del producto. - traduce las demandas de los clientes en características técnicas del producto.
- Despliegue de componentes. - traduce las especificaciones del producto en características de componentes.
- Planificación del proceso. -traduce las especificaciones de los componentes en características del proceso de fabricación.
- Planificación de la producción. - traduce las especificaciones del proceso en procedimientos de planificación de la producción.

En la Figura 10-2 se muestra el esquema de la casa de calidad en donde se tiene la voz del ingeniero vs la voz del cliente, la misma que mediante un análisis cuantitativo y cualitativo establece la mejor opción de diseño.(Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 22)

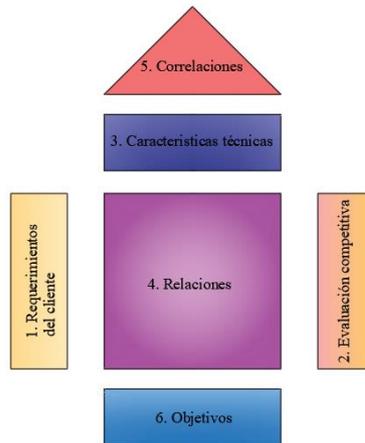


Figura 10-2: Casa de calidad

Fuente: (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018)

A continuación, se detalla las partes que se muestra en la figura anterior:

Requerimientos del cliente: Aquí se detallan las necesidades del cliente, estas constituyen la base del diseño puesto que lo que se buscará es satisfacer esos requerimientos. (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 23)

Evaluación competitiva: se refiere a la evaluación del cliente respecto a los productos o empresas existentes en el mercado en función de sus requerimientos inicialmente impuestos. (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 23)

Características técnicas: Es una respuesta directa a todas las necesidades planteadas por el cliente, constituyen las características técnicas e ingenieriles que busca dar una solución a cada requerimiento dado. (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 23)

Relaciones: relaciona cuantitativamente la voz del cliente vs la voz del ingeniero, mostrando que tan fuertes, medias o bajas son estas características. (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 23)

Correlaciones: En este punto se establece la relación entre la demanda del cliente y la característica técnica del producto, es decir la voz del cliente vs la voz del ingeniero, en donde se pueden presentar tres niveles de relación fuerte, liviana y débil. (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 23)

Responde a la pregunta ¿Hasta qué punto se puede satisfacer la demanda a partir de la característica técnica elegida? si no existe ninguna relación el espacio se dejará en blanco. (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 24)

Objetivos: muestran las metas a lograr en cada característica técnica del producto. (Gusqui Martínez & Rivera Enríquez, 2018, p. 24)

2.4 Vibraciones Mecánicas

Los eruditos antiguos en el campo de la vibración concentraron sus esfuerzos en la comprensión de los fenómenos naturales y el desarrollo de las teorías matemáticas para describir la vibración de sistemas físicos. En años recientes, muchas aplicaciones de la vibración en el campo de la ingeniería han motivado a los investigadores, entre ellas el diseño de máquinas, cimientos, estructuras, motores, turbinas y sistemas de control. (Singiresu S, 2012, p. 10)

Además, la vibración provoca un desgaste más rápido de las partes de la máquina como cojinetes y engranes e incluso produce ruido excesivo. En máquinas, la vibración puede aflojar los sujetadores, como las tuercas. En procesos de corte de metal, la vibración puede provocar rechinos, lo cual conduce a un acabado deficiente de la superficie. (Singiresu S, 2012, p. 11)

Siempre que la frecuencia natural de la vibración de una máquina o de una estructura coincide con la frecuencia de la excitación externa se presenta un fenómeno conocido como resonancia, el cual conduce a deflexiones y fallas excesivas. (Singiresu S, 2012, p. 11)

2.4.1 Partes elementales de sistemas vibratorios

Por lo común un sistema vibratorio incluye un medio para almacenar energía potencial (resorte o elasticidad), un medio para conservar energía cinética (masa o inercia) y un medio por el cual la energía se pierde gradualmente (amortiguador). (Singiresu S, 2012, p. 13)

2.4.1.1 Elemento de resorte

Cualquier cuerpo o miembro deformable, cable, barra, viga, flecha o placa, puede considerarse como un resorte. Un resorte se suele representar como se muestra en la Figura 11-2; cuya constante de rigidez se calcula de acuerdo a las fórmulas establecidas para cada caso. (Singiresu S, 2012, p. 21)

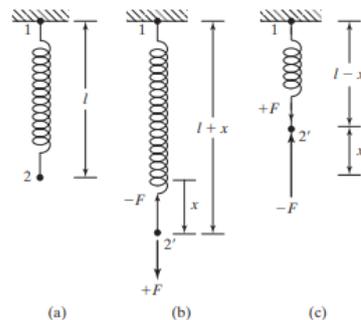


Figura 11-2. Deformación de un resorte

Fuente: (Singiresu S, 2012)

Resortes en paralelo.- Por lo común, si tenemos n resortes en paralelo con constantes k_1, k_2, \dots, k_n , entonces la constante de resorte equivalente k_{eq} se obtiene con la ecuación (1):(Singiresu S, 2012, p. 29)

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + \dots + k_n \quad (1)$$

Resortes en serie.- La constante equivalente de resortes en serie se obtiene con la ecuación (2):

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (2)$$

2.4.1.2 Elemento de masa

Se supone que el elemento de masa o inercia es un cuerpo rígido que puede ganar o perder energía cinética siempre que cambia su velocidad. De acuerdo con la segunda ley del movimiento de Newton, el producto de la masa y su aceleración son iguales a la fuerza aplicada a la masa. El trabajo es igual a la fuerza multiplicada por el desplazamiento en la dirección de la fuerza, y el trabajo realizado en una masa se almacena como energía cinética. En la mayoría de los casos se tiene que utilizar un modelo matemático para representar el sistema vibratorio real, y a menudo hay varios modelos posibles.(Singiresu S, 2012, p. 37)

Por ejemplo, consideremos la viga en voladizo con una masa en el extremo de la Figura 12-2(a). Para un rápido y razonablemente preciso análisis, se desechan la masa y el amortiguamiento de la viga; el sistema se puede modelar como un sistema de resorte y masa, como se muestra en la Figura 12-2(b). La masa m representa el elemento de masa, y la elasticidad de la viga indica la rigidez del resorte.(Singiresu S, 2012, p. 37)

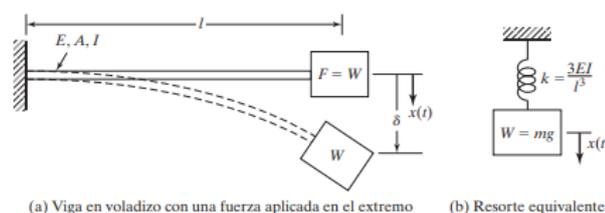


Figura 12-2. Constante de resorte de una viga en voladizo

Fuente: (Singiresu S, 2012)

2.4.1.3 Elemento de amortiguamiento

En muchos sistemas prácticos, la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido. Debido a la reducción de energía, la respuesta, como el desplazamiento del sistema, se reduce gradualmente. El mecanismo mediante el cual la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido se conoce como amortiguamiento. Aun cuando la cantidad de energía convertida

en calor o en sonido es relativamente pequeña, la consideración del amortiguamiento llega a ser importante para predecir con exactitud la respuesta a la vibración de un sistema. Se supone que un amortiguador no tiene masa ni elasticidad, y que la fuerza de amortiguamiento existe sólo si hay una velocidad relativa entre los dos extremos del amortiguador. (Singiresu S, 2012, p. 42)

Una chumacera funciona como un amortiguador. Se utiliza una chumacera como soporte lateral de una flecha rotatoria como se muestra en la Figura 13-2. Si el radio de la flecha es R , su velocidad angular es ω , la holgura radial entre la flecha y el cojinete es d , la viscosidad del fluido (lubricante) es μ , y la longitud del cojinete es l , la expresión para la constante de amortiguamiento rotacional de la chumacera suponiendo insignificante la fuga del fluido es, ecuación (3): (Singiresu S, 2012, p. 47)

$$C_t = \frac{2\pi\mu R^3 l}{d} \quad (3)$$

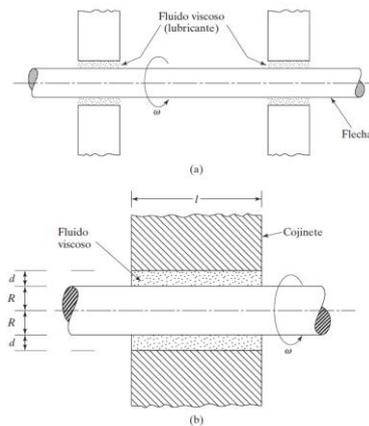


Figura 13-2. Chumacera

Fuente: (Singiresu S, 2012)

Amortiguadores en paralelo.- La constante de amortiguamiento equivalente se puede hallar de la siguiente manera, con la ecuación (4): (Singiresu S, 2012, p. 49)

$$c_{eq} = c_1 + c_2 + \dots + c_n \quad (4)$$

Amortiguadores en serie.- La constante de amortiguamiento equivalente se puede hallar de la siguiente manera, con la ecuación (5): (Singiresu S, 2012, p. 49)

$$\frac{1}{c_{eq}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n} \quad (5)$$

2.4.2 Ecuación de movimiento

Si una fuerza $F(t)$ actúa en un sistema de resorte-masa viscosamente amortiguado como se muestra en la Figura 14-2, la ecuación de movimiento se puede obtener aplicando la segunda ley de Newton mostrada en la ecuación (6):(Singiresu S, 2012, p. 242)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (6)$$

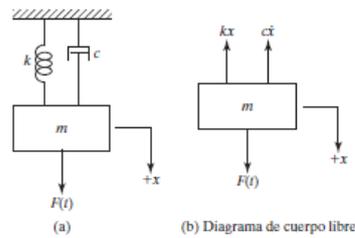


Figura 14-2: Sistema de resorte- masa- amortiguador

Fuente: (Singiresu S, 2012)

La función de transferencia para el sistema es como se muestra en la ecuación (7)

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (7)$$

2.5 Criterios del diseño mecánico

2.5.1 Fatiga

2.5.1.1 Fenómeno de la fatiga en metales

Fatiga es la reducción de la resistencia de un material debido a que sobre él actúan cargas fluctuantes (o cíclicas). Los elementos pueden fallar por acción de tensiones alternativas, aún sin llegar a valores críticos para esfuerzos estáticos, incluso a muy inferiores al límite de fluencia. La falla por fatiga empieza por una pequeña grieta, que se desarrolla por un cambio de sección, un chavetero, un orificio, en las marcas de fábrica e incluso irregularidades originadas por la mecanización. La grieta va aumentando progresivamente hasta que llega un momento en que el área o sección neta de trabajo es tan pequeña que la pieza se rompe repentinamente. (Diseño de elementos de máquinas I, 2013, p. 56,59)

La fatiga constituye la causa individual más grande de falla en los metales, la cual se estima que es el 90% de todas las fallas metálicas. Las fallas por fatiga, especialmente en las estructuras, resultan catastróficas e insidiosas, y ocurren repentinamente, a menudo sin advertencia. Por esa razón los ingenieros deben tener en cuenta el efecto de la fatiga en sus diseños. La falla por fatiga tiene una apariencia quebradiza aun en metales dúctiles; y se nota muy poco si se asocia con una

deformación plástica bruta. La fatiga representa una preocupación en cualquier lugar en el que estén presentes los esfuerzos cíclicos. La vida total de un componente o estructura representa el tiempo que le toma a una grieta para comenzar más el tiempo que necesita para propagarse por la sección transversal. (Jacobson et al, 2000, pp. 259–260)

2.5.1.2 Diagramas S-N

El término fatiga se le denomina a la falla de un material sometido a cargas variables, después de cierto número de repeticiones (ciclos) de carga. Podría decirse que este tipo de falla fue observado por primera vez en el siglo XIX, cuando los ejes de los carros de ferrocarril comenzaron a fallar después de un corto tiempo de servicio. A pesar de haber sido construidos con acero dúctil, se observó una falla súbita de tipo frágil. (Vanegas Useche, 2018, p. 194)

Este ingeniero alemán encontró, además, la existencia de un límite de resistencia a la fatiga (o límite de fatiga) para los aceros. Wohler realizó pruebas sobre probetas de acero sometidas a “flexión giratoria”, denominada así al tipo de carga que se genera en un elemento que gira sometido a un momento flector constante. En dichas pruebas se pretendía relacionar los niveles de esfuerzo a los cuales se sometían las probetas, con el número de ciclos de carga que soportaban hasta la falla. Wohler obtuvo un diagrama como el del Gráfico 1-2, el cual es conocido como diagrama S-N (esfuerzo - número de ciclos) o diagrama de vida-resistencia de Wohler. El esfuerzo (o resistencia) S corresponde al valor del esfuerzo máximo al cual se somete la probeta, y N es el número de ciclos de esfuerzo. Las líneas del diagrama representan aproximaciones a los puntos reales de falla obtenidos en los ensayos. (Vanegas Useche, 2018, pp. 195–196)

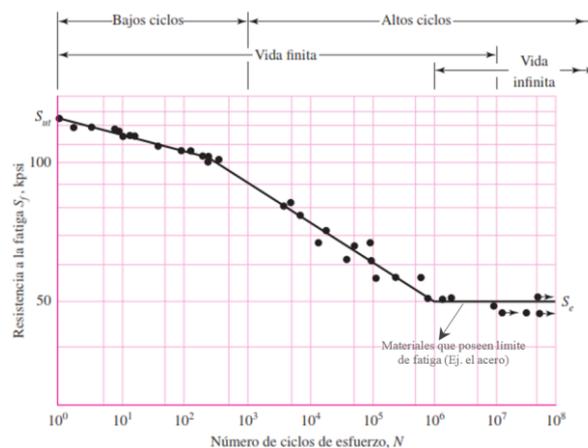


Gráfico 1-2. Diagrama S-N o diagrama de Wohler

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

La información de los experimentos de la flexión alternante se grafican como la resistencia a la fatiga S_f en función del logaritmo del número total de ciclos a la falla N para cada espécimen o probeta. El empleo de escala logarítmica destaca los cambios de pendientes de la curva que no se

manifestaría si se emplearan coordenadas cartesianas. En el Gráfico 1-2 se observa que hay tres rectas que podrían aproximar la nube de puntos experimentales. Estas rectas permiten distinguir entre la fatiga a bajo número de ciclos ($<10^3$) y fatiga de alto número de ciclos ($>10^3$). La recta horizontal define el límite de resistencia a la fatiga (S_e) del material, que constituye el límite de carga por debajo del cual el material no fallará por fatiga. (Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008, p. 17)

En el caso de metales no ferrosos y sus aleaciones (por ejemplo, aluminio, cobre y magnesio) la gráfica nunca llega a ser horizontal y, por tanto, no tienen límite de resistencia a la fatiga. De esta forma, la fatiga ocurre sin importar la amplitud del esfuerzo. La resistencia a la fatiga para estos materiales es el nivel de esfuerzo en el cual se presenta la falla para un número específico de ciclos. (Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008, p. 18)

En este diagrama se distingue entre una región de duración finita y una región de duración infinita. El límite entre tales regiones no puede definirse con claridad, excepto en el caso de un material específico; pero se localiza entre 10^6 y 10^7 ciclos para los aceros. (Cuichán Simba & Deuñas Jaramillo, 2008, p. 18)

2.5.1.3 Límite de resistencia a la fatiga o endurancia

La resistencia a la fatiga de un material es su capacidad de resistir cargas de fatiga. En general es el esfuerzo que puede resistir una probeta normalizada y pulimentada girando durante una cantidad de ciclos de carga. Si la cantidad de ciclos es infinita, sin que se produzca falla o rotura, el valor del esfuerzo se llama límite de resistencia a la fatiga (S_e'). (Mott, 2006, p. 172)

Las curvas A, B y D del Gráfico 2-2 representan un material que tiene un límite de resistencia a la fatiga, como puede ser el acero al carbono simple. La curva C es característica de la mayor parte de los metales no ferrosos, como el aluminio, que no tienen un límite de resistencia a la fatiga. (Mott, 2006, p. 172)

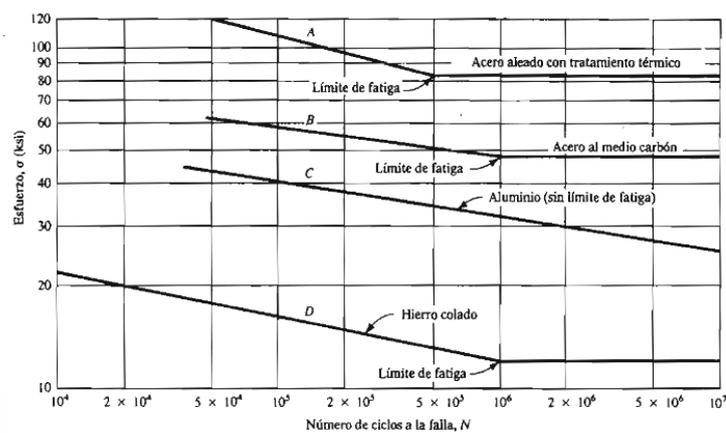


Gráfico 2-2. Resistencias a la fatiga representativas

Fuente: (Mott, 2006)

Existen grandes cantidades de datos en la literatura técnica sobre resultados de ensayos con viga rotativa y de ensayos a la tensión simple de muestras tomadas de la misma barra o lingote. Basados en el Gráfico 3-2, el límite de resistencia a la fatiga para los aceros, varía aproximadamente desde 40 hasta 60% de la resistencia a la tensión (S_{ut}). Comenzando en alrededor de $S_{ut} = 210 \text{ kpsi}$ (1450 MPa), la dispersión parece aumentar, aparentemente la tendencia se nivela, como lo sugiere la línea horizontal discontinua en $S_e' = 105 \text{ kpsi}$. (Nisbett & Budynas, 2008, p. 274)

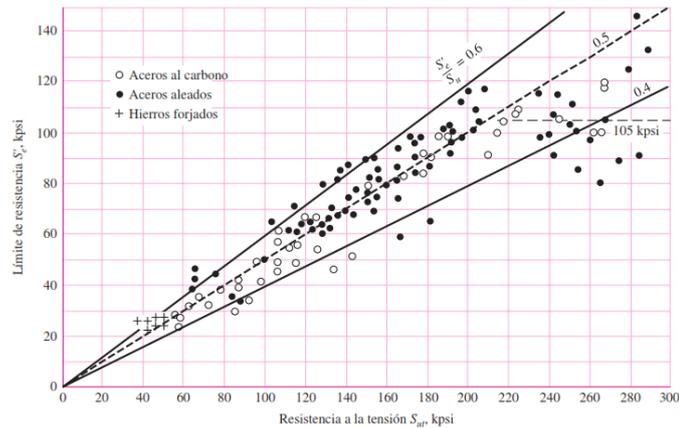


Gráfico 3-2. Límites de resistencia a la fatiga vs tensión de resultados de ensayos reales

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

De esta manera la ecuación que relaciona el límite de resistencia a la fatiga con la resistencia a la tensión es la ecuación (8):

$$S_e' = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ Kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ Kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ Kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (8)$$

2.5.1.4 Resistencia a la fatiga

Los elementos de máquinas sometidos a cargas variables pueden diseñarse para un número de ciclos determinado, dependiendo de la vida requerida. De manera particular, los materiales que no tienen límite de resistencia a la fatiga no pueden ser diseñados para una vida infinita, deben diseñarse para una duración determinada, por ello se puede hablar de una resistencia a la fatiga para vida finita. (Vanegas Useche, 2018, p. 201)

Es importante desarrollar métodos de aproximación del diagrama S-N cuando se diseñan componentes mecánicos en la región de alto ciclaje, teniendo como información solo los resultados de un ensayo de tensión simple. Las diferentes fuentes literarias han demostrado que. (Nisbett & Budynas, 2008, p. 276)

La ecuación de la recta S-N para un componente mecánico puede escribirse como la ecuación (9):

$$S_f = aN^b \quad \text{para} \quad 10^3 \leq N \leq 10^6 \quad (9)$$

Donde:

N: Número de ciclos hasta una falla

Y, las constantes a y b son, ecuaciones (10) y (11):

$$a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S_e} \quad (10)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right) \quad (11)$$

Donde:

f = fracción de resistencia a la fatiga en función a la resistencia última a tracción S_{ut} .

S_e = límite de resistencia a la fatiga.

El factor f se puede obtener en el Gráfico 4-2.

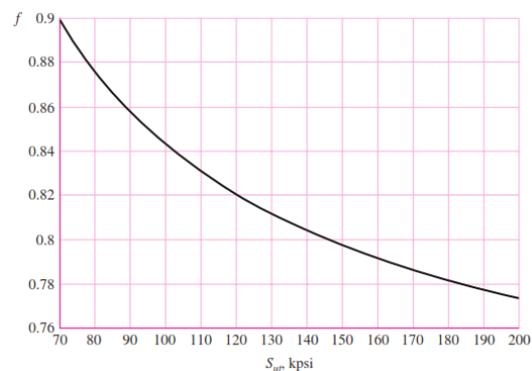


Gráfico 4-2. Fracción de resistencia a la fatiga

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

Con estas dos constantes es posible hallar la resistencia a la fatiga (S_f) cuando se conoce N, ecuación (12):

$$S_f = aN^b \quad \text{para} \quad 10^3 \leq N \leq 10^6 \quad (12)$$

O bien el número de ciclos necesarios para llevar a cabo la falla por fatiga en el material, bajo un esfuerzo completamente invertido σ_a , ecuación (13):

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a}\right)^{(1/b)} \quad \text{para} \quad 10^3 \leq N \leq 10^6 \quad (13)$$

Con la ecuación anterior se puede construir la gráfica S- N teórica la cual se podrá comparar con la gráfica S- N experimental.

2.5.1.5 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

El límite de resistencia a la fatiga y la resistencia a la fatiga son propiedades que se basan en probetas de ensayo normalizadas (generalmente de 0.3 in de diámetro en la sección más delgada), de superficies altamente pulidas (pulido a espejo), trabajando bajo condiciones ambientales favorables, como por ejemplo, en ausencia de corrosión y a temperaturas normales. (Vanegas Useche, 2018, p. 209)

Las características de los elementos de máquinas y de su entorno difieren de las características de las probetas ensayadas en el laboratorio. Los elementos de máquinas suelen tener mayores rugosidades, pues obtener una superficie pulida a espejo es un procedimiento costoso. Las temperaturas de trabajo pueden ser bajas, tendiendo a fragilizar los materiales, o muy altas, disminuyendo la resistencia del material o produciendo el fenómeno de termofluencia (en inglés, creep). Los elementos pueden tener concentradores de esfuerzos o pueden estar en presencia de agentes corrosivos. Todas estas condiciones hacen que se modifique el límite de resistencia a la fatiga del componente, y se estudiarán a continuación. (Vanegas Useche, 2018, p. 209)

El límite de resistencia a la fatiga modificado se expresa con la ecuación (14):

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_g S'_e \quad (14)$$

Donde:

K_a = Factor de modificación de la condición superficial

K_b = Factor de modificación del tamaño

K_c = Factor de confiabilidad

K_d = Factor de modificación de la temperatura

K_g = Factor de modificación de efectos varios

S'_e = Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria experimental. (MPa)

S_e = Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso. (MPa)

El producto de los términos $k_a k_b k_c k_d k_g$ se designa con el término K, y el tipo de carga está incorporado en S'_e como se presentó en la ecuación (8).

➤ Factor de superficie K_a

El estado superficial tiene efecto sobre la resistencia a la fatiga de los elementos; a mayor rugosidad de la superficie, menor será la resistencia, ya que las irregularidades de la superficie actúan como pequeñísimos concentradores de esfuerzo que pueden iniciar una grieta de manera prematura. (Vanegas Useche, 2018, p. 209)

El factor K_a se puede determinar con la ecuación (15):

$$K_a = a S_{ut}^b \quad (15)$$

Donde:

a y b: sus valores se encuentran en la Tabla 1-2.

S_{ut} : Resistencia mínima a la tensión.

Tabla 1-2: Valores de a y b para el factor de superficie

Acabado superficial	S_{ut} (Kpsi)		S_{ut} (MPa)	
	a	b	a	b
Esmerilado	1.34	-0.085	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frio	2.70	-0.265	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	-0.718	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	-0.995	272	-0.995

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

También se puede determinar el valor de K_a mediante el Gráfico 5-2 conociendo la resistencia mínima a la tensión y el acabado superficial.

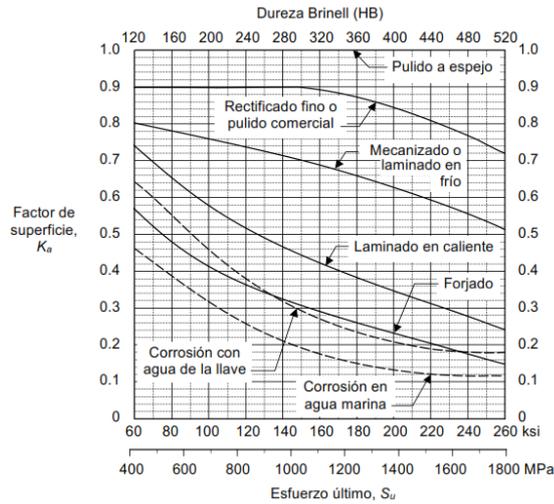


Gráfico 5-2. Factores de superficie para el acero

Fuente: (Vanegas Useche, 2018)

➤ Factor de tamaño K_b

De manera general, a mayor tamaño de la pieza menor es su resistencia, aunque para carga axial no existe este efecto; por lo tanto, para elementos sometidos a carga axial el valor de K_b se muestra en la ecuación (16): (Vanegas Useche, 2018, p. 211)

$$K_b = 1 \quad (16)$$

Diversas fuentes proponen ecuaciones para calcular el factor de tamaño, las mismas que dicen estar basadas en 133 conjuntos de datos experimentales con probetas de acero de diámetros entre 0.11 in y 2 in; pueden usarse para determinar el factor de tamaño de piezas de acero sometidas a flexión o torsión, ecuación (17):(Vanegas Useche, 2018, p. 211)

$$K_b = \begin{cases} 1 & d_e \leq 8 \text{ mm } (0.3 \text{ in}) \\ 1.24 d_e^{-0.107} & 8 \text{ mm} \leq d_e \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51 d_e^{-0.157} & 51 < d_e \leq 254 \text{ mm} \\ 0.879 d_e^{-0.107} & 0.3 \text{ in} \leq d_e \leq 2 \text{ in} \\ 0.91 d_e^{-0.157} & 2 \text{ in} < d_e \leq 10 \text{ in} \\ 0.6 & d_e > 254 \text{ mm } (10 \text{ in}) \end{cases} \quad (17)$$

Donde d_e , es el diámetro de la probeta sometida a flexión giratoria.

Para secciones circulares de diámetro d, sometidas a:

$$\begin{cases} \text{Flexión giratoria} & d_e = d \\ \text{Flexión no giratoria} & d_e = 0.37 d \\ \text{Torsión} & d_e = d \end{cases} \quad (18)$$

Para secciones rectangulares o en I (Figura 15-2) sometidas a flexión no giratoria, ecuación (19):

$$\begin{cases} \text{Sección rectangular de área } hb & d_e = 0.808\sqrt{hb} \text{ in} \\ \text{Sección en I} & d_e = 0.808\sqrt{hb} \text{ in} \quad \text{si } t_h > 0.025h \end{cases} \quad (19)$$

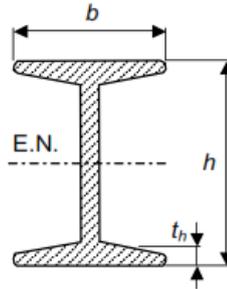


Figura 15-2. Sección en I

Fuente: (Vanegas Useche, 2018)

➤ Factor de confiabilidad K_c

El factor de confiabilidad K_c , corrige la resistencia a la fatiga de tal manera que se tenga una mayor probabilidad y confiabilidad de que la resistencia real de un elemento sea mayor o igual que el valor corregido. (Vanegas Useche, 2018, p. 214)

El factor de confiabilidad varía entre 0 y 1 como se puede ver en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Factores de confiabilidad

Confiabilidad %	Variación de transformación Z_a	Factor de confiabilidad K_c
50	0	1.00
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.999	4.753	0.620

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

➤ Factor de temperatura K_d

Las propiedades de un material dependen de su temperatura, T . Por ejemplo, un acero puede fragilizarse al ser sometido a “bajas” temperaturas, y tanto la resistencia máxima a la tracción como la resistencia a la fatiga pueden reducirse notoriamente por encima de unos 500 °C. Para tener en cuenta el efecto de reducción de resistencia a la fatiga, se utiliza el factor de temperatura, K_d (Tabla 3-2), que varía entre 0 y ~1, dependiendo de la temperatura: cero cuando la resistencia es nula y uno cuando la resistencia para vida infinita es igual al límite de fatiga, es decir, cuando la temperatura no modifica la resistencia. (Vanegas Useche, 2018, p. 215)

Tabla 3-2: Factores de temperatura

Temperatura °C	S_T/S_{RT}	Temperatura °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

➤ Factor de concentración de esfuerzos K_f

Es importante saber que los concentradores de esfuerzos son discontinuidades presentes en las piezas, estas pueden ser, chaveteros, agujeros, cambios de sección y ranuras; es aquí donde se produce un aumento localizado de los esfuerzos. (Vanegas Useche, 2018, p. 219)

El factor de concentración de esfuerzos para carga estática y para carga por fatiga son, K_t y K_f , respectivamente. El factor por fatiga K_f , se calcula con la ecuación (20):

$$K_f = \frac{\text{esfuerzo por fatiga en la probeta con muesca}}{\text{esfuerzo por fatiga en la probeta sin muesca}} \quad (20)$$

Como se dijo anteriormente una muesca o concentración de esfuerzos puede ser un agujero, un filete o una acanaladura. El concentrador de esfuerzos por fatiga es una función del material y del tipo de carga. Para hacer esta consideración del material se usa un factor de sensibilidad a la muesca q , el cual se define como se muestra en la ecuación (21): (Jacobson et al, 2000, p. 271)

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad \text{o} \quad q = \frac{k_{fs} - 1}{k_{ts} - 1} \quad (21)$$

En la ecuación (21) se requiere conocer la sensibilidad de la muesca del material y el tipo de carga para obtener el factor de concentración de esfuerzos a la fatiga k_f , ecuación (22). (Jacobson et al, 2000, p. 271)

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad \text{o} \quad k_{fs} = 1 + q(k_{ts} - 1) \quad (22)$$

En el Gráfico 6-2 se encuentra la sensibilidad de la muesca versus el radio de la misma, para algunos materiales comúnmente usados con varios tipos de carga. Los aceros más duros y más resistentes tienden a ser más sensibles a la muesca (tienen un valor grande de q). Esto no parece tan sorprendente, pues la sensibilidad a la muesca es una medida de la ductilidad del material, y los aceros más duros tienen una ductilidad limitada. En el mismo gráfico también se puede ver que un acero determinado es ligeramente más sensible a la muesca en carga torsional que en carga flexionante y axial. (Jacobson et al, 2000, p. 271)

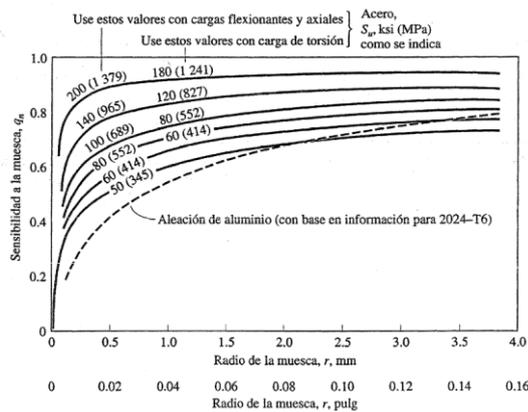


Gráfico 6-2. Sensibilidad a la muesca vs radio de la muesca para varios materiales y tipos de carga

Fuente: (Jacobson et al , 2000)

Los valores de K_t se obtienen del Gráfico 7-2, para eje redondo sometido a flexión, y el valor de k_{ts} se obtiene del Gráfico 8-2, para eje redondo sometido a torsión.

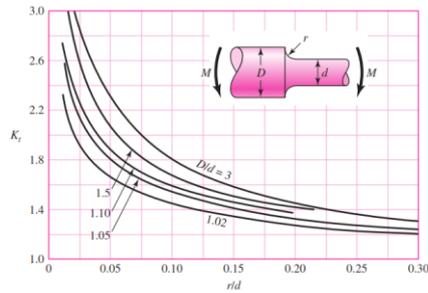


Gráfico 7-2. Eje redondo con filete en el hombro en flexión

Fuente:(Nisbett & Budynas, 2008)

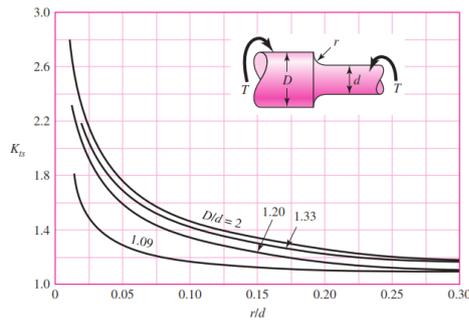


Gráfico 8-2. Eje redondo con filete en el hombro en torsión

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

➤ Factor de efectos varios K_g

Existen otros factores que modifican la resistencia a la fatiga de los materiales; todos los efectos no considerados por los otros factores son cuantificados por el factor K_g . Sin embargo, es muy escasa la información cuantitativa sobre dichos efectos. En general, $0 \leq K_g \leq 1$; en ausencia de corrosión, esfuerzos residuales, etc., se puede tomar $K_g = 1$.(Vanegas Useche, 2018, p. 216)

2.5.2 Torsión

La torsión se produce por la actuación de un par de fuerzas que produce el giro de las secciones en su plano un retorcimiento de la pieza alrededor de su eje, sufriendo las diferentes secciones transversales deslizamiento de una respecto a la otra.(White et al, 1992, p. 49)

2.5.2.1 Definición de torsión

Cualquier vector momento que sea colineal con un eje de un elemento mecánico se llama vector de par de torsión, porque el momento causa que el elemento se tuerza respecto a ese eje. Una barra sometida a un momento de ese tipo se dice que está sometida a torsión.(Nisbett & Budynas, 2008, p. 95)

En la Figura 16 se muestra el par de torsión T que se aplica a una barra, se designa dibujando flechas en la superficie de la barra para indicar su dirección o dibujando flechas de vector-par de

torsión a lo largo de los ejes de torsión de la barra. Los vectores de par de torsión son las flechas huecas que se muestran en el eje x de la Figura 16-2. Observe que siguen la regla de la mano derecha para vectores. (Nisbett & Budynas, 2008, p. 95)

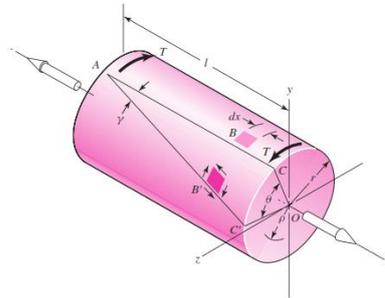


Figura 16-2. Par de torsión aplicado a una barra circular

Fuente: (Nisbett & Budynas, 2008)

➤ Efectos de la torsión

Al producirse una carga de torsión sobre una barra se ocasionan los siguientes efectos:

- Se produce un desplazamiento angular de la sección de un extremo respecto al otro.
- Se origina tensiones cortantes en cualquier sección de la barra perpendicular a su eje.

(Castillo Cuenca, 2011, p. 31)

2.5.2.2 *Momento torsor*

En ocasiones generales son varios los pares de fuerzas que actúan sobre un eje, por lo tanto, el momento torsor se define como la suma algebraica de los momentos de los pares aplicados ubicados a un extremo de la sección a considerar. En la Figura 17-2 se puede observar el momento T aplicado a un extremo de la barra lo que produce una deformación angular. (Garzón et al, 2015, p. 11)

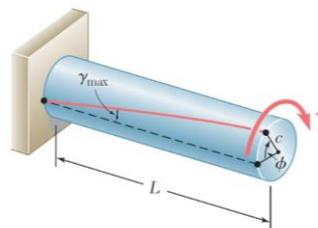


Figura 17-2. Momento torsor aplicado a una barra circular

Fuente: (Beer et al, 2010)

2.5.2.3 Diagrama de momento torsor versus ángulo de torsión.

La obtención del diagrama de momento torsor en función del ángulo de torsión, para una probeta cilíndrica sometida a torsión, es fundamental para determinar el módulo de rigidez al corte, el esfuerzo cortante de proporcionalidad y el esfuerzo cortante de fluencia. (Medina, p. 4)

En el Gráfico 9-2 se indica el diagrama de momento torsor versus ángulo de torsión. En dicho diagrama se pueden distinguir: El límite de proporcionalidad, el límite de fluencia superior A, el límite de fluencia inferior B, la zona de cedencia C y el límite de ruptura de la probeta, señalado con el punto D. La zona lineal del gráfico, permite determinar el módulo de rigidez al corte del material y el esfuerzo cortante de proporcionalidad. El esfuerzo cortante de fluencia superior se determina a través del punto A del diagrama. (Medina, p. 4)

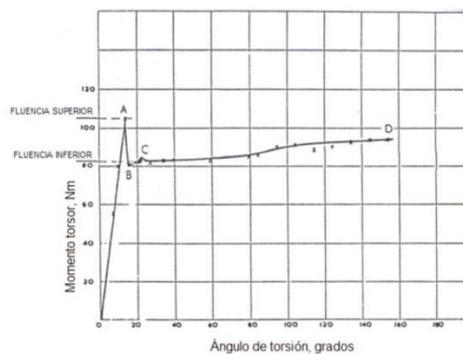


Gráfico 9-2. Momento torsor en función del ángulo de torsión

Fuente: (Medina)

2.5.2.4 Momento polar de inercia

El momento polar de inercia es una propiedad geométrica muy importante para el cálculo de esfuerzos, ecuación (23). (Nisbett & Budynas, 2008, p. 96)

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \quad (23)$$

Dónde d es el diámetro de la barra.

En cambio, para una sección transversal redonda hueca se calcula mediante la fórmula (24).

$$J = \frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4) \quad (24)$$

Dónde los subíndices o e i se refieren a los diámetros exterior e interior, respectivamente.

2.5.2.5 Esfuerzo cortante de torsión.

A través de la sección transversal se desarrollan esfuerzos cortantes. Para una barra sólida circular en torsión, estos esfuerzos son proporcionales al radio ρ y están dados por la ecuación (25): (Nisbett & Budynas, 2008, p. 96)

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (25)$$

Si se designa a r como el radio de la superficie exterior, se tiene la ecuación (26):

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (26)$$

Reemplazando la ecuación (25) en la (26) se tiene que el esfuerzo cortante a torsión para una barra sólida circular es, ecuación (27):

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} \quad o \quad \tau = \frac{2T}{\pi r^3} \quad (27)$$

2.5.2.6 Deformación por cortante

Cuando un eje circular se somete a torsión, todas sus secciones transversales permanecen planas y sin distorsión; es decir las distintas secciones transversales a lo largo del eje giran como una placa sólida rígida. Esto se puede observar en la Figura 18-2. Dicha propiedad mencionada anteriormente, no se cumple en barras con sección transversal cuadrada, puesto que sus secciones transversales se tuercen y no permanecen planas (Figura 18-2). (Beer et al, 2010, p. 136)

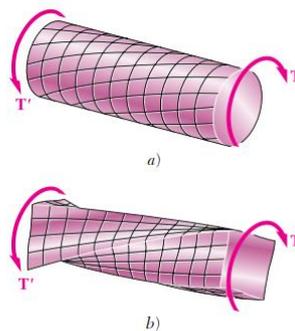


Figura 18-2. Barra circular y barra cuadrada sometidas a torsión

Fuente: (Beer et al , 2010)

La deformación a cortante se puede observar en la Figura 19-2, donde para valores pequeños de γ , la longitud de arco $AA' = l\gamma$. Por otra parte, se tiene que $AA' = \rho\varphi$; por lo tanto se deduce la siguiente ecuación (28):(Beer et al, 2010, p. 136)

$$\gamma = \frac{\rho\varphi}{L} \quad (28)$$

Dónde γ , φ están expresados en radianes. La ecuación muestra que la deformación a cortante es proporcional al ángulo de giro φ y a su vez proporcional a la distancia ρ desde el eje de la flecha hasta el punto en consideración.(Beer et al, 2010, p. 136)

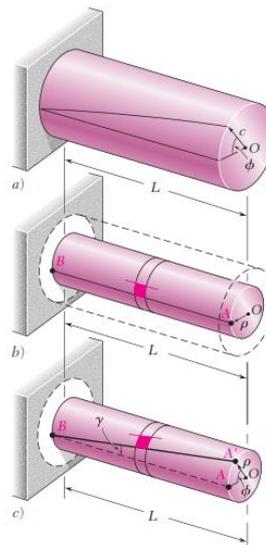


Figura 19-2. Deformación a cortante de una barra circular sólida

Fuente: (Beer et al, 2010)

2.5.2.7 Módulo de elasticidad en corte

La relación entre el esfuerzo cortante τ y su deformación γ se llama módulo de elasticidad en cortante o módulo de rigidez G , está dada por la ecuación (29):(Castillo Cuenca, 2011, p. 34)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{o} \quad G = \frac{TL}{\varphi J} \quad (29)$$

Puesto que la deformación no tiene dimensión, las unidades del módulo de rigidez son las mismas que del esfuerzo cortante.

2.5.2.8 Ángulo de torsión

El ángulo de giro de torsión, en radianes, de una barra sólida de sección circular se calcula mediante la ecuación (30). (Nisbett & Budynas, 2008, p. 95)

$$\varphi = \frac{Tl}{GJ} \quad (30)$$

Dónde:

$T =$ par de torsión

$l =$ longitud

$G =$ módulo de rigidez

$J =$ segundo momento polar de área

2.5.2.9 Resistencia máxima a corte

Es el punto donde el material tiene la mayor resistencia al esfuerzo cortante. Generalmente es el punto de ruptura del material, aunque dependiendo de la composición es el punto donde comienza a perder resistencia hasta que sucede la fractura. (Garzón et al, 2015, p. 15)

El valor se obtiene de hacer ensayos de materiales a torsión y generalmente se encuentran publicados, para efectos de cálculos, para los casos en que no se encuentre publicado este valor, se puede utilizar las siguientes ecuaciones (31), (32), (33) y (34):(Garzón et al, 2015, p. 15)

$$S_{su} = 0.65 S_{ut} \quad \text{Aleaciones de aluminio} \quad (31)$$

$$S_{su} = 0.82 S_{ut} \quad \text{Acero Estructural} \quad (32)$$

$$S_{su} = 0.90 S_{ut} \quad \text{Hierro maleable y aleaciones de cobre} \quad (33)$$

$$S_{su} = 1.30 S_{ut} \quad \text{Hierro fundido gris} \quad (34)$$

Dónde:

$S_{ut} =$ Esfuerzo último a la tensión

$S_{su} =$ Esfuerzo último a corte

La resistencia a la fluencia cortante predicha por la teoría de la energía de distorsión (Von Mises) se muestra en la ecuación (35):(Nisbett & Budynas, 2008, p. 217)

$$S_{sy} = 0,577S_y \quad (35)$$

2.6 Sistema eléctrico y electrónico

2.6.1 Controlador programable S7-1200 (PLC)

El controlador lógico programable (PLC) S7-1200 (Figura 20-2) ofrece la flexibilidad y capacidad de controlar una gran variedad de dispositivos para las distintas tareas de automatización. Gracias a su diseño compacto, configuración flexible y amplio juego de instrucciones, el S7-1200 es idóneo para controlar una gran variedad de aplicaciones. (SIEMENS, 2009, p. 11)

La CPU incorpora un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, así como circuitos de entrada y salida en una carcasa compacta, conformando así un potente PLC. Una vez cargado el programa en la CPU, ésta contiene la lógica necesaria para vigilar y controlar los dispositivos de la aplicación. La CPU vigila las entradas y cambia el estado de las salidas según la lógica del programa de usuario, que puede incluir lógica booleana, instrucciones de conteo y temporización, funciones matemáticas complejas, así como comunicación con otros dispositivos inteligentes. (SIEMENS, 2009, p. 11)

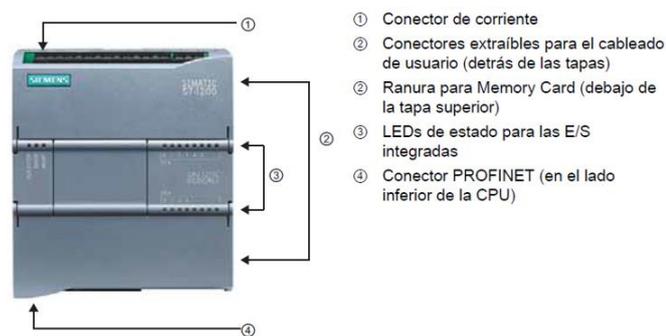


Figura 20-2. PLC S7-1200

Fuente: (SIEMENS, 2009)

2.6.2 Variador de frecuencia (Convertidor SINAMICS G120C)

SINAMICS G120C es el nombre de una serie de convertidores (Figura 21-2) que sirven para controlar la velocidad de motores trifásicos. Está concebido para el montaje en instalaciones eléctricas o máquinas. El convertidor está homologado para la utilización en redes industriales del ámbito industrial. (SIEMENS, 2014, pp. 25–26)



Figura 21-2. Convertidor SINAMICS G120C

Fuente: (SIEMENES, 2014)

2.6.3 *Encóder rotatorio*

Un generador de pulsos es un transductor rotativo que convierte un movimiento angular en una serie de impulsos digitales, de esta forma el encóder es una interfaz entre un dispositivo mecánico móvil y un controlador. Los encóder se clasifican en dos grupos: lineales y los rotativos (Figura 22-2), dentro de ellos los tipos de codificación puede ser: Absolutos e incrementales. La analogía entre los dos codificadores es que tiene el mismo alcance, pero la codificación relativa es útil solamente desde el punto de inicio definido. (Bárdenes Olivares & Guallán Zárte, 2019, p. 17)



Figura 22-2. Encóder rotatorio

Fuente: (<https://es.aliexpress.com/i/4000345172663.html>)

2.7 **Procesos de mecanizado y geometría de las probetas de ensayo**

2.7.1 *Refrentado*

La operación de refrentado es aquella operación en la cual se mecaniza el extremo de la pieza, en el plano perpendicular al eje de giro (Figura 23-2). Para poder efectuar esta operación, con el carro transversal se regula la profundidad de pasada y, por lo tanto, el diámetro del cilindro, y con el carro paralelo se regula la longitud del cilindro. El carro paralelo avanza de forma automática de acuerdo al avance de trabajo deseado. En este procedimiento, el acabado superficial y la tolerancia que se obtenga puede ser un factor de gran relevancia. Para asegurar calidad al cilindrado el torno tiene bien ajustada su alineación y concentricidad. (Pacheco Vega & Espinosa Toro, 2016, pp. 55–56)

En aplicaciones de refrentado, la herramienta avanza axialmente hacia el centro, en el extremo de la pieza.(Pacheco Vega & Espinosa Toro, 2016, p. 56)

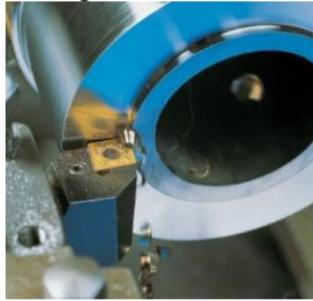


Figura 23-2. Refrentado

Fuente: (Pacheco Vega & Espinosa, Toro 2016)

2.7.2 *Cilindrado*

El cilindrado es una operación realizada en el torno mediante la cual se reduce el diámetro de la barra de material que se está trabajando (Figura 24-2).(Reyes Reyes, 2011, p. 131)

Para poder efectuar esta operación, la herramienta y el carro transversal se han de situar de forma que ambos formen un ángulo de 90° (perpendicular), y éste último se desplaza en paralelo a la pieza en su movimiento de avance. Esto es así por el hecho de que por el ángulo que suele tener la herramienta de corte, uno diferente a 90° provocará una mayor superficie de contacto entre ésta y la pieza, provocando un mayor calentamiento y desgaste.(Reyes Reyes, 2011, p. 132)

En este procedimiento, el acabado que se obtenga puede ser un factor de gran relevancia; variables como la velocidad y la cantidad de material que se corte en un "pase", así como también el tipo y condición de la herramienta de corte que se esté empleando, deben ser observados.(Reyes Reyes, 2011, p. 132)

En este proceso, comúnmente rigen la cilindrada y la concentricidad, si es el caso en que hayan varios diámetros a ser obtenidos.(Reyes Reyes, 2011, p. 132)

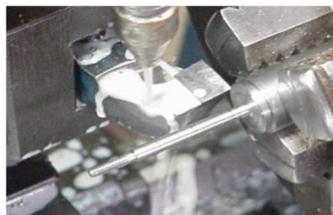


Figura 24-2. Cilindrado

Fuente: (Reyes Reyes, 2011)

2.7.3 Geometría de la probeta para el ensayo de torsión

Las probetas para el ensayo de torsión se elaboran bajo norma NTE INEN 140:2013. El espécimen debe tener una forma cilíndrica (Figura 25-2), con los extremos ensanchados para asegurar la fractura en la longitud de menor sección transversal.

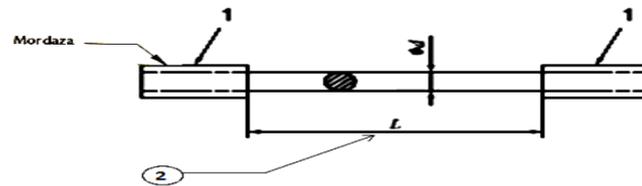


Figura 25-2. Muestra para la prueba de torsión

Fuente: (NTE INEN 140:2013, 2013)

2.7.4 Geometría de la probeta para el ensayo de tracción

Las probetas para el ensayo son estandarizadas bajo la norma ASTM E8, de tipo lámina, el espécimen tiene sus extremos más grandes (Figura 26-2), para que la fractura no se produzca en las empuñaduras. Antes de realizar el ensayo, se hacen pequeñas marcas sobre la longitud uniforme de la probeta. Se hacen mediciones tanto del área de la sección transversal de la probeta, como en la longitud calibrada G entre las marcas. (Hibbeler, 2011, p. 82)

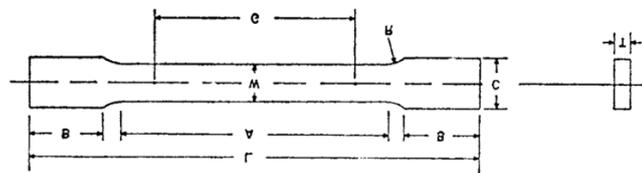


Figura 26-2. Muestra de prueba de tracción rectangular

Fuente: (ASTM E8-E8M, 2013)

2.7.5 Geometría de la probeta para el ensayo de impacto

La probeta para este ensayo, puede o no tener muesca. Generalmente se utilizan probetas con una muesca en V, con lo cual se mide mejor la resistencia del material a la propagación de grietas. (Askeland, 2011, p. 143)

La norma que se aplica para dimensiones de la probeta y descripción del ensayo de impacto es la ASTM E23.

En la Figura 27-2 se puede observar las dimensiones y tolerancias permisibles según lo que establece la respectiva norma.

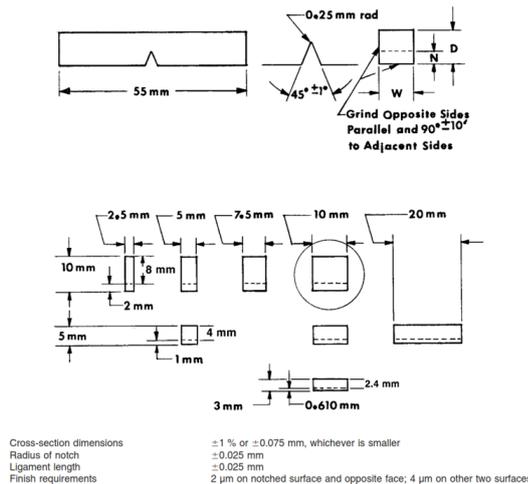


Figura 27-2. Dimensiones y tolerancias para un espécimen de prueba de impacto

Fuente: (ASTM E23, 2007)

2.8 Ensayos Mecánicos

2.8.1 Descripción del ensayo de torsión

El ensayo de torsión consiste en aplicar un par torsor a una probeta por medio de un dispositivo de carga y medir el ángulo de torsión resultante en el extremo de la probeta. (Castillo Cuenca, 2011, p. 36)

Este ensayo se realiza en el rango de comportamiento linealmente elástico del material. Los resultados del ensayo de torsión resultan útiles para el cálculo de elementos de máquina sometidos a torsión tales como ejes de transmisión, tornillos, resortes de torsión y cigüeñales. (Castillo Cuenca, 2011, p. 36)

Las probetas utilizadas en el ensayo son de sección circular, a estas se les aplica un par torsor hasta llegar a su fractura, los materiales dúctiles generalmente fallan a cortante y se produce su fractura a lo largo de un plano perpendicular a su eje longitudinal. Por lo tanto, los materiales frágiles son más débiles a tensión que a corte, estos tienden a fracturarse a lo largo de las superficies perpendiculares a la dirección en que la tensión es máxima.

2.8.2 Tracción

El ensayo de tracción es el ensayo mecánico más común, usado para determinar la relación esfuerzo- deformación en los diferentes materiales. Mediante el ensayo de tracción se puede determinar varias propiedades de los materiales que son importantes para el diseño, tales como: el módulo de elasticidad, límite de fluencia, resistencia a la tracción, porcentaje de elongación a la rotura y porcentaje de reducción en el área de rotura. (Callister, 2005, p. 115)

2.8.2.1 Gráfica esfuerzo- deformación

Los resultados obtenidos en el respectivo ensayo son aplicables para cualquier tipo de muestra sin importar el tamaño o forma, siempre que se trate del mismo material. (Askeland, 2011, p. 130)

Al graficar dichos resultados genera la curva llamada diagrama esfuerzo- deformación como se puede ver en la Figura 28-2.

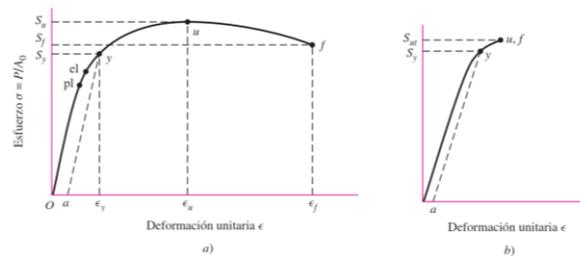


Figura 28-2. Diagrama esfuerzo- deformación unitaria: a) material dúctil b) material frágil

Fuente:(Nisbett & Budynas, 2008)

El esfuerzo se determina al dividir la carga aplicada P entre el área A_0 de la sección original de la probeta como se indica en la ecuación (36).(Hibbeler, 2011, p. 83)

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (36)$$

La deformación o deflexión se determina por $l - l_0$ donde l es la longitud calibrada correspondiente a la carga P. La deformación unitaria se determina a partir de la ecuación (37).(Nisbett & Budynas, 2008, p. 29)

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (37)$$

Para generar la gráfica es necesario conocer el esfuerzo y la deformación.

2.8.2.2 Propiedades obtenidas del ensayo de tracción

-Módulo de elasticidad (E).- En la Figura 28-2 la región elástica se termina en el punto “el” denominado límite elástico. La relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria está dada por la ley de Hooke en la ecuación (38).(Nisbett & Budynas, 2008, p. 29)

$$\sigma = E\epsilon \quad (38)$$

La pendiente E de la parte lineal de la curva esfuerzo- deformación unitaria, es el módulo de elasticidad o el módulo de Young, el mismo que mide la rigidez de un material y sus unidades

son las mismas del esfuerzo, debido a que la deformación unitaria es adimensional. (Nisbett & Budynas, 2008, p. 29)

-Esfuerzo de fluencia (S_y).- Un material que presenta una deformación permanente es porque el valor del esfuerzo aplicado estuvo por encima del límite elástico, este comportamiento se denomina fluencia y está indicado por el punto “y” en la Figura 28-2 (Hibbeler, 2011, p. 84), por lo tanto el esfuerzo de fluencia divide las regiones elástica y plástica del material. En ciertos materiales el esfuerzo de fluencia no es fácil de determinar; es por ello que se establece un esfuerzo de fluencia convencional como se puede ver en el Gráfico 10-2. Para obtener el esfuerzo convencional se traza una línea paralela a la parte inicial de la curva esfuerzo- deformación, desplazándose 0.002 in/in (0.2%) desde el origen. La intersección de esta recta con la curva esfuerzo- deformación da el valor de S_y . (Askeland, 2011, p. 134)

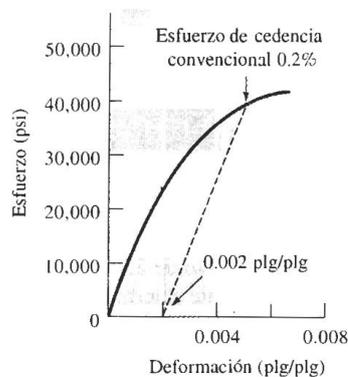


Gráfico 10-2. Determinación del límite elástico convencional al 0.2% de deformación en el acero fundido gris

Fuente: (Askeland, 2011)

Para ciertos aceros de bajo carbono o aceros laminados en caliente, el punto de fluencia suele caracterizarse mediante dos valores (Figura 29-2), ocurriendo primero el punto de fluencia superior (σ_2), y luego de una disminución en la capacidad de la carga se genera el punto de fluencia inferior (σ_1). (Hibbeler, 2011, p. 84)

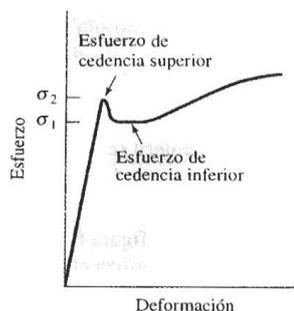


Figura 29-2. Esfuerzo de cedencia superior e inferior que para comportamiento mecánico de un acero al bajo carbono

Fuente: (Askeland, 2011)

-Resistencia a la tensión.- El esfuerzo máximo que se observa en la Figura 28-2 se denomina resistencia a la tensión, es el esfuerzo necesario para continuar la deformación después del inicio de la deformación plástica, si esta tensión se mantiene se producirá la fractura. Cuando se alcanza la tensión máxima, una región de la sección recta se deforma más que otra y ocurre una disminución localizada en el área de la sección transversal de dicha zona, denominada estricción o encuellamiento, Figura 30-2. La fractura ocurre en la estricción. Debido a que el área de la sección transversal se reduce, se requiere un esfuerzo menor para continuar la deformación. Se puede decir que la resistencia a la tensión es un esfuerzo que da inicio al encuellamiento de materiales dúctiles.(Askeland, 2011, pp. 134–135)



Figura 30-2. Deformación localizada durante el ensayo de tracción de un material dúctil

Fuente: (Askeland, 2011)

Cuando se alcanza la resistencia a la tensión, el material ha experimentado una deformación plástica grande y ya no sería útil, es por ello que cuando se menciona la resistencia de un metal para diseño se indica el límite elástico. Comúnmente en el diseño en ingeniería la resistencia a la fractura no se muestra, este punto está representado en la Figura 28-2 con la letra f.(Callister, 2005, p. 127)

-Ductilidad.- Es una propiedad mecánica que cuantifica la deformación plástica que soporta un material hasta su fractura. Se denomina material frágil aquel que experimenta poca o ninguna deformación plástica, mientras que el material dúctil es todo lo contrario, se somete a grandes deformaciones. Existen dos maneras de medir la ductilidad, con el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción en área.(Callister, 2005, p. 129)

Porcentaje de elongación.- Significa la distancia que el espécimen se extiende plásticamente antes de la fractura expresada con la ecuación (39).(Askeland, 2011, p. 137)

$$\text{Porcentaje de elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (39)$$

Donde l_0 es la longitud original calibrada de la probeta y l_f es la longitud en el instante de la fractura.(Callister, 2005, p. 129)

Porcentaje de reducción en área.- Expresa la reducción del área en la sección transversal que sufrió la probeta durante la prueba. Se define en la zona de estricción con la ecuación (40):(Askeland, 2011, p. 137)

$$\text{Porcentaje de reducción en área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (40)$$

Donde A_0 es el área original de la sección transversal y A_f es el área en el cuello al momento de la fractura. El acero de bajo carbono por lo general tiene un valor de 60%.(Hibbeler, 2011, p. 87)

2.8.2.3 Descripción del ensayo

Normalmente el ensayo de tracción se realiza por medio de la conocida máquina universal, en la cual la probeta se deforma hasta la fractura aplicando una fuerza que es la carga de tracción la misma que crece gradualmente y que es aplicada uniaxialmente a lo largo del eje de la probeta, como lo muestra la Figura 31-2.

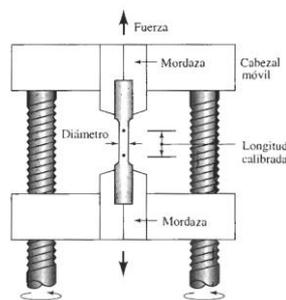


Figura 31-2. Mediante un cabezal móvil, en la prueba de tracción se aplica una fuerza unidireccional a una probeta

Fuente: (Askeland, 2011)

Generalmente la sección de la probeta es circular, pero también se utilizan probetas de sección rectangular.(Callister, 2005, p. 116)

Los extremos de la probeta se montan en las mordazas de la máquina universal. Esta alarga la probeta a una velocidad constante, y para medir de manera continua y simultánea la carga aplicada lo hace por medio de una celda de carga, para el alargamiento utiliza un extensómetro. El ensayo es destructivo, es decir la probeta llega al punto de fracturarse y dura varios minutos.(Callister, 2005, p. 116)

2.8.3 Impacto

El impacto se produce cuando una fuerza externa es aplicada a una parte o a una estructura, siempre y cuando el tiempo de aplicación de esta carga sea menor que un tercio del periodo natural de vibración mínimo de la parte o estructura. (Nisbett & Budynas, 2008, p. 37)

Cuando la velocidad de aplicación de la carga es extremadamente grande, el material puede tener un comportamiento frágil comparado con el ensayo de tracción.(Askeland, 2011, p. 143)

2.8.3.1 *Propiedades obtenidas en el ensayo de impacto*

- Tenacidad

Es la capacidad que tiene un material de absorber energía antes de la fractura. Para que un material sea tenaz, debe poseer tanto alta resistencia como ductilidad; es por ello que los materiales dúctiles son más tenaces que los frágiles. Esto se puede observar en la Figura 32-2, en la cual los materiales frágiles poseen mayor límite elástico y mayor resistencia a la tracción, pero tienen menor tenacidad que los dúctiles.

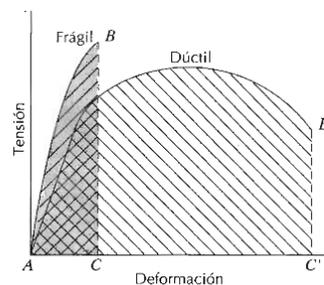


Figura 32-2. Representación esquemática de los diagramas de tracción de materiales frágiles y dúctiles

Fuente: (Askeland, 2011)

2.8.3.2 *Descripción del ensayo de impacto*

Este ensayo se utiliza para evaluar la tenacidad de un material. Entre los ensayos más conocidos tenemos el ensayo Charpy para materiales metálicos y el ensayo Izod para materiales no metálicos (Figura 33-2). (Askeland, 2011, p. 144)

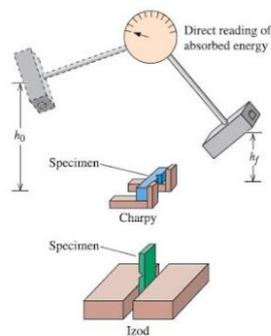


Figura 33-2. Ensayos de impacto: Charpy e Izod

Fuente: (Askeland, 2011)

El ensayo inicia con un péndulo pesado desde una altura h_0 , el cual describe un arco hasta golpear y romper la probeta, llegando a una altura final h_f . Conociendo estas dos alturas, se puede calcular la diferencia de energía potencial; a esta diferencia se la conoce como la energía de impacto absorbida durante la falla de la probeta. (Askeland, 2011, p. 143)

2.9 Material de las probetas de ensayo

Las probetas de ensayo se mecanizan de acero AISI 1018, y del material de las turbinas hidráulicas, ASTM A743 CA-6NM. Las propiedades mecánicas y composición química de cada material se presentan en la Tabla 4-2 y Tabla 6-2, respectivamente.

Tabla 4-2: Propiedades mecánicas y composición del acero AISI 1018

AISI 1018 CD (estirado en frío)		
Propiedades mecánicas	Resistencia a la fluencia (S_y)	370 MPa
	Esfuerzo de tensión (S_{ut})	440 MPa
	Módulo de corte (G)	78 GPa
	Módulo de elasticidad (E)	205 GPa
	Porcentaje de elongación en 50mm	15 %
	Dureza	126 HB
Composición	%C	0.15-0.20 %
	%Si	0.15-0.35 %
	%Mn	0.60-0.90 %
	%P	0.04 % máx
	%S	0.05% máx

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (SAE J1397, ASTM A108)

Las aplicaciones comunes del acero ASTM A743 CA-6NM es en campos que se requieren una alta resistencia a la corrosión moderada. Esta aleación se desarrolló en Suiza en la década de 1960 y continúa mejorándose para cumplir con los requisitos de propiedad mecánica, como el aumento de vida útil de las piezas en áreas agresivas. Este material se usa principalmente en la fabricación de sistemas sometidos a procesos de fatiga como, las palas de turbinas hidráulicas, componentes de la industria química y del petróleo, bombas y compresores. (Cañizares Silva & Quinchuela Paucar, 2017, p. 19)

Las características de este grado de acero CA-6NM se presentan en la Tabla 5-2. Este material se obtiene mediante un proceso de fundición, de ahí también que su designación se relacione con la letra C, lo cual hace referencia a su resistencia a la corrosión, pero también a la palabra “Cast”, lo cual significa fundido o fundición.(Cañizares Silva & Quinchuela Paucar, 2017, p. 19)

Tabla 5-2: Características de la denominación del acero CA-6NM

Denominación	Características
C	Servicio para ambientes corrosivos líquidos menores a 650°C
A	Relación entre los contenidos de Cr y Ni
6	Contenido de carbono en porcentaje en peso multiplicado por 100
N	Presencia de Níquel
M	Presencia de Molibdeno

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Cañizares Silva & Quinchuela Paucar, 2017)

A continuación, en la Tabla 6-2 se presentan las características mecánicas y la composición química del acero ASTM A743.

Tabla 6-2: Propiedades mecánicas y composición del acero ASTM A743 CA-6NM

ASTM A743 CA-6NM		
Propiedades mecánicas	Resistencia a la fluencia (Sy)	550-725 MPa
	Esfuerzo de tensión (Sut)	740-910 MPa
	Módulo de corte (G)	75-81 GPa
	Módulo de elasticidad (E)	200 GPa
	Porcentaje de elongación en 50mm	15% mín
	Dureza	289 HV (30HRC) (285 HBW)
Composición	%C	0.06% máx
	%Cr	11.5-14%
	%Fe	82.9-88.1%
	%Mn, %Si	1% máx
	%Mo	0.4-1%
	%P-%S	0.04%-0.03% máx
	%Ni	3.5-4.5%

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (ASTM A743, Matweb)

2.10 Caracterización de los mecanismos de falla

2.10.1 Mecánica de fractura

La mecánica de la fractura es la disciplina que trata con el comportamiento de los materiales que contienen grietas u otras imperfecciones menores. El término “imperfección” se refiere a las características como poros (orificios) pequeños, inclusiones o microgrietas. El término “imperfección” no se refiere a los defectos a nivel atómico como las vacancias o dislocaciones. Lo que se desea conocer es el esfuerzo máximo que puede soportar un material si contiene imperfecciones de cierto tamaño y geometría. La tenacidad a la fractura mide la habilidad de un material que contiene una imperfección para soportar una carga aplicada. El esfuerzo aplicado al material se intensifica en la imperfección, la cual actúa como un elevador de esfuerzo. (Askeland et al, 2013, p. 248)

La habilidad de un material para resistir el crecimiento de una grieta depende de un gran número de factores:

- Las imperfecciones más grandes reducen el esfuerzo permitido. Las técnicas de fabricación especiales, como el filtrado de impurezas de metales líquidos y el prensado en caliente o prensado isostático en caliente de partículas en polvo para producir componente cerámicos o superaleaciones reducen el tamaño de las imperfecciones y mejoran la tenacidad a la fractura.(Askeland et al, 2013, p. 249)
- La habilidad de un material para deformarse es crítica. En los metales dúctiles el material cercano a la punta de la imperfección puede deformarse, ocasionando que la punta de cualquier grieta se redondee, reduciendo el factor de intensidad del esfuerzo y previniendo el crecimiento de la grieta. El incremento de la resistencia de un metal dado, por lo regular disminuye la ductilidad y da una tenacidad a la fractura menor.(Askeland et al, 2013, p. 249)
- Las piezas más rígidas y gruesas de un material dado tiene una tenacidad a la fractura menor que los materiales delgados.(Askeland et al, 2013, p. 250)
- El incremento de la rapidez de la aplicación de la carga, como en una prueba de impacto, por lo regular reduce la tenacidad a la fractura del material.(Askeland et al, 2013, p. 250)
- El aumento de la temperatura por lo regular incrementa la tenacidad a la fractura, tal como en la prueba de impacto.(Askeland et al, 2013, p. 250)
- Un tamaño de grano pequeño por lo regular mejora la tenacidad a la fractura, mientras que más defectos puntuales y dislocaciones reducen la tenacidad a la fractura.(Askeland et al, 2013, p. 250)

La Mecánica de Fractura se ha impulsado desde los materiales metálicos, tradicionales de ingeniería, que siendo magníficos para la construcción de componentes de máquinas y como elementos estructurales, han dado a lo largo de su historia importantes roturas frágiles, que han obligado al estudio y modelización de su comportamiento. (Arana & González, 2002, p. 13)

Este campo de trabajo ha llegado a ser de gran importancia en la comunidad ingenieril ya que permite aumentar la seguridad de los diseños de estructuras y componentes de todo tipo en la industria, además de permitir el análisis y control de componentes estructurales.(Arana & González, 2002, p. 13)

2.10.2 Fallas y su clasificación

Cuando una estructura, un elemento, un conjunto de elementos de máquinas o un equipo durante su operación son incapaces de brindar las prestaciones, o las condiciones de seguridad, o la eficiencia, o la operatividad, o los costos de operación y mantenimiento, o la vida de servicio, o demás indicadores de desempeño dentro de los límites especificados por el diseñador, se dice que

ha experimentado una falla. Los tipos de falla se muestra en la Figura 34-2.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 27)



Figura 34-2. Clasificación de las fallas

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

- Falla catastrófica.- genera parada total del equipo, lo que involucra pérdidas económicas por el lucro cesante y los costos de reparación, o incluso en algunos casos implica pérdidas de vidas como es en el caso de la industria automotriz.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 28)
- Falla no catastrófica.- No implican pérdida de funcionalidad, pero la baja eficiencia generada o el acortamiento de la vida a desgaste y corrosión que pueden estar presentes, hace que se trabaje por fuera de los límites de diseño. El problema de las fallas no catastróficas está en que en la práctica pueden llevar a subestimar sus posibles consecuencias, porque una persona con un mínimo de conocimiento técnico es consciente de las implicaciones del desgaste y corrosión, por lo tanto, las considera como fallas, para tomar así las acciones correctivas pertinentes, pero una persona sin conocimiento técnico puede no considerar como fallas, ya que la funcionalidad no se ha perdido y, por lo tanto, no toma acciones correctivas.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 28–29)
- Falla súbita.- Cuando una falla se desarrolla en tiempos muy cortos, por lo que es casi imposible su detección en etapas tempranas, con los sensores y tecnología disponibles, y que por lo tanto no permite realizar una parada programada del equipo para tomar una acción correctiva. Este tipo de fallas generalmente son catastróficas. Ejemplos de algunos modos de falla comúnmente asociados con las fallas súbitas son la fractura frágil, la fractura dúctil o la deformación plástica.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 29)
- Falla progresiva.- Cuando la falla tiene un tiempo prolongado de evolución, que permite su detección en etapas tempranas y el seguimiento de su progreso, lo cual facilita la toma de acciones correctivas antes que se convierta en una falla

catastrófica. La mayoría de los modos de falla son de este tipo, por lo que se tienen ejemplos como la fractura por fatiga, la fractura por corrosión bajo esfuerzo, el desgaste adhesivo, el desgaste abrasivo, la corrosión generalizada, entre otras. Si la velocidad de evolución de la falla progresiva es muy alta, puede llegar a convertirse en súbita; es el caso por ejemplo del desgaste adhesivo que experimenta un eje girando a altas revoluciones por minuto, sobre un cojinete que pierda completamente el suministro de lubricante, lo cual desencadena en pocas revoluciones del eje, aumento severo de la temperatura y fusión de las partes.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 29–30)

Es posible definir tanto para las fallas progresivas como para las súbitas, dos etapas generales: falla en etapa latente o falla latente y falla en etapa manifiesta o falla manifiesta.

- Falla latente.- Se caracteriza por ser una etapa en la cual el mecanismo de falla está en marcha (bien sea el mecanismo físico o el humano-organizacional), pero aún no se ha manifestado, es decir, el sistema mecánico no se ha salido de los parámetros de diseño.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 30)
- Falla manifiesta.- La evolución del mecanismo ya ha hecho que el sistema mecánico se salga de los parámetros de diseño, siendo detectable el mecanismo de falla si se analizan las partes.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 30)

2.10.3 *Modo de falla y mecanismo de falla*

El modo de falla es la manera física o química en que un elemento de máquina se degrada, es decir, la forma en que la pieza se agrieta, distorsiona, cambia de dimensiones, etc.; ejemplos de modos de falla son la fractura por fatiga, la corrosión por picadura, el desgaste adhesivo, entre otros. Mecanismo de falla es el proceso mediante el cual un elemento de máquina falla, es decir, se refiere a toda la secuencia de eventos físicos o químicos involucrados, desde la fuente de falla hasta que esta es detectada, por lo tanto un mecanismo de falla puede incluir secuencias de modos de falla y se trata de una secuencia de eventos causa-efecto físicos (Figura 35-2). Al establecerse el mecanismo de falla de una pieza se responde a la pregunta ¿cómo falló? (Figura 36-2).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 31)

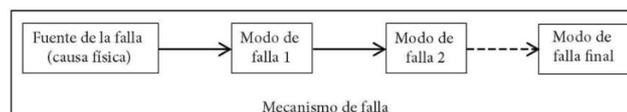


Figura 35-2. Relación entre fuente, modos y mecanismo de falla

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)



Figura 36-2. Ejemplo de un mecanismo de falla hipotético en la fractura de un cigüeñal de motor

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

El evento final de un mecanismo de falla es el modo de falla final detectado dentro del proceso de falla, mientras que el evento inicial del mecanismo de falla corresponde a la fuente de la falla o causa física de la falla. Las fuentes generales de falla se muestran en la Figura 37-2.



Figura 37-2. Fuentes de falla básicas de los elementos mecánicos y estructuras

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Los elementos mecánicos son piezas de máquinas diseñadas para soportar cargas o deformaciones, bajo unas determinadas condiciones de radiación electromagnética o de radiación material incidente, de temperatura, de presión y de composición química del medio ambiente circundante, lo cual hace que se desarrollen varios modos de falla en el tiempo, que se pueden agrupar en cuatro familias básicas (Figura 38-2), estos modos aplican también a estructuras. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 32)

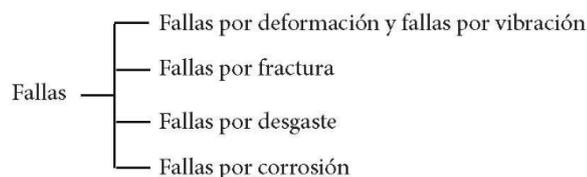


Figura 38-2. Familias de modos de falla básicos de los elementos mecánicos y las estructuras

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

- Fallas por deformación y fallas por vibración.- Se presentan, si bajo la acción de las cargas una pieza cambia su geometría de manera permanente (deformación plástica) o si su deformación elástica no es la esperada, bien sea por muy elevada o muy baja. También es posible tener fallas por vibración, lo cual indica que se tienen amplitudes,

velocidades, aceleraciones o frecuencias de vibración fuera de rango, que pueden desencadenar la ocurrencia de los otros modos de falla. Las fallas por deformación y vibración se pueden agrupar en una misma familia, ya que la vibración es una deformación cíclica.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 34)

- Fallas por fractura.- Son una familia de modos de falla mediante los cuales se disgrega en dos o más fragmentos un elemento de máquina o estructura, lo cual ocurre como consecuencia de la generación y posterior propagación de grietas en la pieza bajo la acción de las cargas que experimenta.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 34)
- Fallas por desgaste y fallas por corrosión.- Son modos de falla que remueven, agregan o desplazan material de la superficie de las piezas, modificando su estructura, enlaces químicos, composición química, geometría y dimensiones, dándose estos procesos bajo la acción de esfuerzos de contacto o deslizantes en el caso del desgaste, y por la acción química, electroquímica o de la radiación del medio que rodea una pieza en el caso de la corrosión. Dentro de los fenómenos de corrosión se incluyen también aquellos modos de falla, derivados de la modificación de propiedades de los materiales por la interacción con el medio ambiente, sin que necesariamente se haya dado modificación de la geometría o dimensiones de una pieza. Es posible tener sinergias entre modos de falla (acción conjunta), por ejemplo, *fallas por corrosión fractura*, donde cargas y medio corrosivo promueven la fractura de una pieza, o *fallas por corrosión desgaste*, donde se presenta modificación superficial de las piezas, por la acción combinada de esfuerzos de contacto y un medio corrosivo.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 34–35)

2.10.4 Fallas por fractura y Fractografía

Las fallas de este tipo constan de las siguientes etapas: (1) nucleación de una o varias grietas, (2) propagación de la grieta o las grietas y (3) fractura del elemento. Si el modo de falla es detectado en la etapa (2), se trata generalmente de una falla no catastrófica, pero cuando alcanza la etapa (3), la anulación de la operatividad del elemento por la fragmentación implica una falla catastrófica. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 147)

Si las tres etapas generales de evolución de una falla por fractura ocurren en un lapso tan corto como un ciclo de trabajo de la máquina (un ciclo de carga), lo cual equivale a decir que las grietas se propagan a una velocidad tan alta como 0,2 a 0,4 de la velocidad del sonido en el material, u otras veces más lento, tomando segundos o minutos (10^{-3} - 10^{-1} m/s), ahí se habla de una fractura súbita.

Ese tipo de crecimiento de grietas a alta velocidad lo llamamos crecimiento inestable de grieta.

Cuando las etapas (1) y (2) de una falla por fractura se dan durante muchos ciclos de carga de la pieza o un largo periodo de trabajo de esta, lo que implica velocidades de propagación de grietas tan bajas como por ejemplo 1mm/mes o 1mm/día, allí tenemos una fractura progresiva. Debido a la velocidad de propagación tan lenta de las grietas en las fracturas progresivas, es posible detectar y monitorear su crecimiento en servicio con el equipo apropiado y el personal entrenado para ello, de tal manera que se puede realizar una parada de mantenimiento programada que permita corregir el problema antes que se produzca la fractura o falla catastrófica, lo cual no es posible hacer en las fracturas súbitas. El crecimiento lento de las grietas en las fracturas progresivas se conoce como crecimiento estable de la grieta. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 147–148)

2.10.4.1 Clasificación general de las fracturas

A partir de la clasificación básica entre fracturas súbitas y progresivas, se puede agrupar la mayoría de los modos de falla por fractura más comunes en metales, como se muestra en la Figura 39-2, en la cual las fracturas súbitas se clasifican de acuerdo a si predomina un comportamiento frágil o dúctil en el proceso de falla, o si es mixto entre los dos. Estas fracturas se forman en un solo ciclo de carga de una pieza y las sollicitaciones que las originan son completamente mecánicas, es decir, se forman bajo la acción pura de los esfuerzos. Las velocidades de crecimiento de grieta son grandes 6m/s (dúctiles) a 10^3 m/s (frágiles). Para que se forme la fractura súbita, el esfuerzo aplicado debe superar la *resistencia última del elemento* al modo de carga que actúa en este (tracción, compresión, cortante, flexión o torsión). Por ello, a estos modos de fractura se les suele llamar *fracturas por sobrecarga*; las fracturas progresivas se dividen de acuerdo a si son ciclos de carga los principales responsables de la nucleación y propagación de las grietas, o si lo es el paso del tiempo, o si son mixtas (dependientes de los ciclos de carga y del tiempo). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 150)



Figura 39-2. Clasificación de los modos de falla por fractura más comunes en metales, de acuerdo con su naturaleza súbita o progresiva.

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

En las fracturas por fatiga los ciclos de carga son los responsables de la nucleación y el crecimiento de grietas (en este caso se habla de *fatiga mecánica*), si además un medio corrosivo ayuda a esa nucleación y/o crecimiento, se habla de *corrosión fatiga*. Se habla de *fatiga térmica* o *corrosión fatiga térmica*, si los ciclos de carga son consecuencia de cambios cíclicos de temperatura (ciclos de dilatación y contracción restringidos por apoyos). En la *fluencia lenta* se da una deformación plástica y finalmente un agrietamiento progresivo en el tiempo, el cual es activado por una alta temperatura bajo carga para el material que lo experimenta, mientras que en los fenómenos de *fragilización* el agrietamiento es asistido por un proceso de elementos químicos fragilizantes dentro del material cargado, donde dichos elementos pueden estar presentes en su composición química o ser aportados por el medio ambiente. El agrietamiento por *corrosión esfuerzo* este se genera por la acción de un medio corrosivo en un material que está sometido a un cierto nivel de esfuerzo, sin que haya ciclos de carga (para diferenciarse de la *corrosión fatiga*). La *fatiga termomecánica* es un proceso de deformación y agrietamiento donde cooperan la fluencia lenta y la fatiga (mecánica y/o térmica), siendo común que además se tenga cooperación de la corrosión (oxidación a alta temperatura). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 150–151)

2.10.4.2 *Fractografía*

Es una disciplina de la ciencia de los materiales que estudia las superficies fracturadas analizando los aspectos topográficos característicos que cada modo de falla por fractura deja en las superficies de fractura formadas. A partir de este conocimiento y de la observación de la superficie de fractura de una pieza fallada, es posible inferir el modo de falla que la formó. Cuando se habla de observar una superficie de fractura de una pieza fallada, se hace referencia a la inspección visual a simple vista, con ayuda de lupas, con ayuda de estereoscopio o con la ayuda de un microscopio electrónico de barrido (MEB). Dentro del estudio fractográfico también es importante observar la presencia o ausencia de deformación plástica alrededor de las zonas de fractura de las piezas, y relacionar todo lo observado con el tipo de cargas que se experimentaron, el medio de trabajo en el cual se operó y la temperatura de operación, entre otras variables. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 148–149)

Marcas características en las superficies de fractura

En las superficies de fractura de los elementos mecánicos se pueden formar cuatro tipos principales de marcas: marcas de dirección de propagación, marcas de posición del frente de grieta, marcas de interacción con ondas de deformación y marcas de cambio de material (Figura 40-2 y Figura 41-2). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 153)

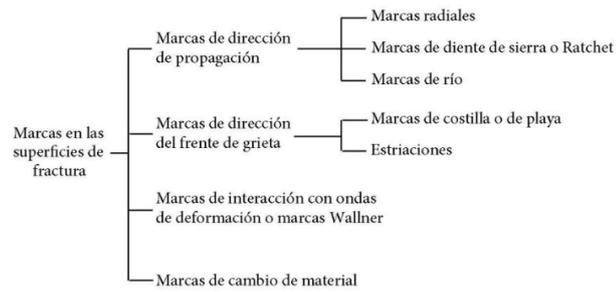


Figura 40-2. Clasificación de las marcas que comúnmente se presentan en las superficies de fractura de los elementos mecánicos

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

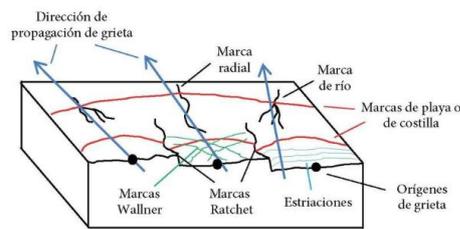


Figura 41-2. Marcas que comúnmente se presentan en las superficies de fractura de elementos mecánicos

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Las *marcas de dirección de propagación*, como su nombre lo indica, están alineadas con la dirección local de crecimiento de grieta en una superficie de fractura. Dentro de estas marcas se encuentran las radiales, las de diente de sierra o Ratchet y las de río. Todas estas marcas tienen en común que a través de ellas se separan dos o más superficies de grieta que están a diferente nivel. Todas estas marcas se pueden ver en la Figura 42-2. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 153)

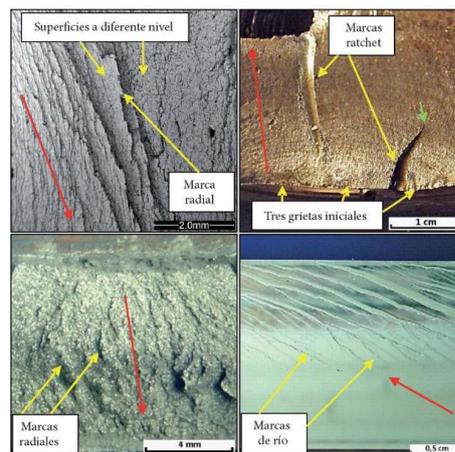


Figura 42-2. Marcas de fractura

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Las marcas Ratchet se forman en las zonas de origen de las fracturas, separando cada marca a dos grietas independientes adyacentes, lo cual origina la geometría de diente de sierra que las caracteriza. Mientras las grietas iniciales se propaguen en planos diferentes, las marcas Ratchet persistirán, pero una vez estas grietas se unan para formar un solo frente común de propagación la marca desaparecerá.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 155)

Las *marcas radiales* y las marcas de río se forman sobre la superficie de fractura en las zonas de propagación. Las *marcas de río* obtienen su nombre a partir de la forma que tienen, la cual asemeja el cauce de un río, en donde el sentido de propagación de las grietas se orienta con la misma lógica del movimiento de una corriente de agua de este tipo.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 156)

La formación de las marcas de río y las radiales, en una superficie de fractura, indica que en la propagación de la grieta se produce una división de esta en dos planos (marca radial) o en varios planos (marca de río), como consecuencia de heterogeneidades locales del material, alta velocidad de propagación de la grieta, cambio de estado de esfuerzos presente, etcétera. Si los planos de grieta divididos vuelven a converger las marcas desaparecerán.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 156)

Es posible al inspeccionar una superficie de fractura, establecer con buena precisión su dirección y sentido de propagación (y por lo tanto, los orígenes), a partir de las marcas Ratchet y las marcas de río, mientras que a partir de las marcas radiales solo se establece la dirección, mas no necesariamente el sentido, especialmente cuando las marcas radiales presentan patrón paralelo. En este último caso se requiere información adicional como tipo de carga que experimentó el elemento; por ejemplo, a partir de una carga flectora se puede inferir que la fractura debe originarse en el lado de tensión para un metal. Hay dos tipos de patrones de marcas radiales o de río que permiten establecer el sentido de propagación, además de la dirección: el patrón de Chevron o de “V” de sargento (marcas de Chevron) y el patrón de roseta o estrella; ambos patrones de marcas radiales o de río son comunes en fracturas súbitas frágiles y apuntan o convergen hacia las zonas de origen del agrietamiento.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 157)

Las *marcas de posición del frente de grieta* cuando se forman, indican la ubicación que en su momento tenía la cabeza de una grieta; por lo tanto, son perpendiculares a la dirección local de crecimiento y a las marcas de dirección de propagación. A este grupo pertenecen las marcas de costilla o de playa y las estriaciones. Las *marcas de playa o de costilla* reciben este nombre debido a su forma y se originan por cambios en la velocidad de crecimiento de la grieta, cambios en el estado de esfuerzos, por acción del medio ambiente en la cabeza de la grieta, etcétera (Figura 41-2, marcas rojas, y Figura 43-2, superior izquierda).(ASM Handbook, 2002, pp. 300–301) Cuando estas

marcas se forman en un periodo en que la grieta no avanza, se conocen como *marcas de detención*. Las *estriaciones* son marcas que se forman con cada ciclo de crecimiento de una grieta, y, por ende, tienen espaciamiento entre ellas del orden de los micrómetros, o aún menores, lo cual solo permite que se puedan observar por una técnica como la microscopía electrónica de barrido (MEB) (Figura 41-2, marcas azules, y Figura 43-2, superior derecha).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 158)

Las *marcas de interacción con ondas de deformación o marcas Wallner* se forman cuando durante la propagación en una grieta inestable, interfieren con el frente de grieta ondas de deformación producidas por: (1) el propio fenómeno de agrietamiento, que al reflejarse contra superficies libres retornan al área de grieta, o (2) por cargas aplicadas a alta velocidad (impactos). Estas ondas al interferir con el frente de grieta, hacen que esta se propague, generando con ello pequeñas oscilaciones a cada lado de la dirección principal, dejando marcas que son muy parecidas en su forma a las de playa o de costilla (Figura 43-2, inferior izquierda). Estas marcas es común encontrarlas en fracturas súbitas frágiles por clivaje, de materiales poliméricos o cerámicos amorfos. Las marcas por su forma pueden llegar a confundirse con marcas de posición del frente de grieta, sin embargo, en general estas marcas no coinciden con la posición de todo el frente de grieta en un instante de tiempo, solo lo hacen si se forman cuando todo el frente de grieta es alcanzado por un máximo de una onda de deformación al mismo tiempo. No obstante lo anterior, es posible localizar la zona de origen del agrietamiento, ya que esta se encontrará siguiendo la dirección del lado cóncavo de las marcas (Figura 41-2, marcas verdes).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 158)

Las *marcas de cambio de material* se forman cuando en la propagación de las grietas dentro de una pieza continua, estas pasan, por ejemplo, de una zona de alta dureza a una de baja o viceversa, o cuando hay un cambio efectivo de composición química del material. Lo anterior es común que se dé en piezas con tratamientos superficiales, depósitos o zonas soldadas.(ASM Handbook, 1998, pp. 250–252) En un material metálico como regla general se notará que la textura de la superficie de grieta será más rugosa en las zonas de baja dureza que en las de alta dureza, ello debido a que las zonas de baja dureza podrán tener mayor participación de mecanismos de fractura dúctiles (formación de microvacíos), los cuales, por el flujo plástico asociado, dejan una superficie más distorsionada que en las zonas de alta dureza, donde podrán predominar mecanismos de fractura frágil (clivaje o intergranular) (Figura 43-2, inferior derecha).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 159)

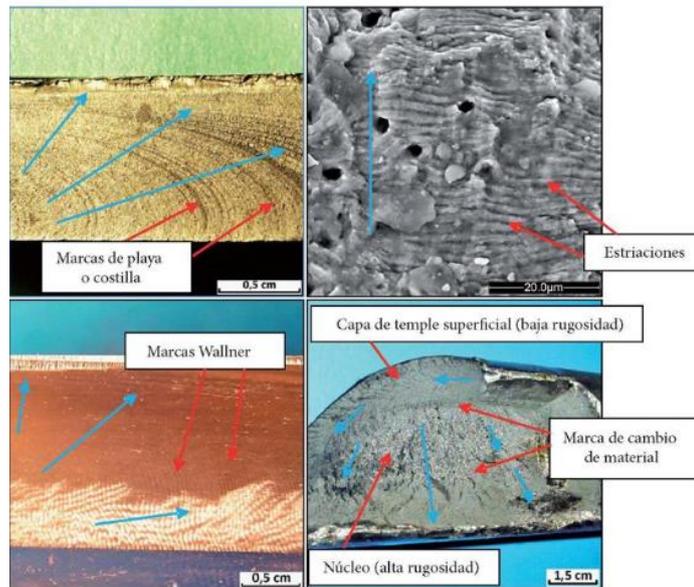


Figura 43-2: Diferentes tipos de marca

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

2.10.5 *Textura de las superficies de fractura*

Cuando se hace la inspección visual a simple vista, con lupas o estereoscopio de las superficies de fractura, se debe poner atención además de las marcas presentes en estas, a la textura que en general se encuentra en dicha superficie (entre las marcas). La textura hace referencia al aspecto visual que tiene una superficie y que es consecuencia de su topografía (rugosidad). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 160)

Las fracturas súbitas en los materiales generalmente presentan cuatro tipos de texturas: (1) la granular, (2) la fibrosa, (3) la tersa o (4) la plana (Figura 44-2). La textura granular recibe su nombre debido a que muestra un aspecto similar al de granos de arena y tiende a ser brillante en metales; (ASM Handbook, 1998, p. 284) la textura fibrosa es en general más opaca (en metales) y rugosa que la granular, y recibe su nombre porque recuerda la textura de la madera fracturada; la textura tersa es poco rugosa y en metales puede llegar a ser brillante (en este caso producto del frotamiento entre las superficies de fractura); y la textura plana es la que en inspección visual se aproxima más al concepto de planitud. Las fracturas progresivas muestran las mismas cuatro texturas mencionadas, solo que en general tienden a ser más opacas y pueden estar cubiertas de residuos, los cuales algunas veces deben ser retirados primero para poder observar la textura con claridad (Figura 45-2). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 161)

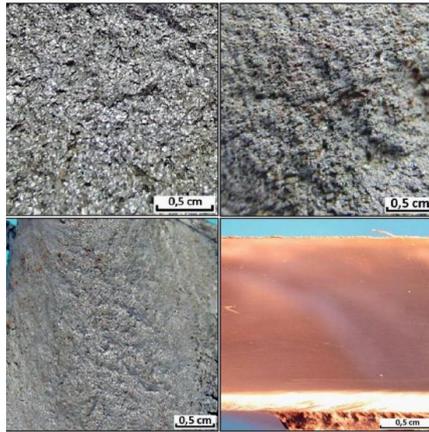


Figura 44-2. Texturas típicas de las superficies de fractura súbitas en materiales

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

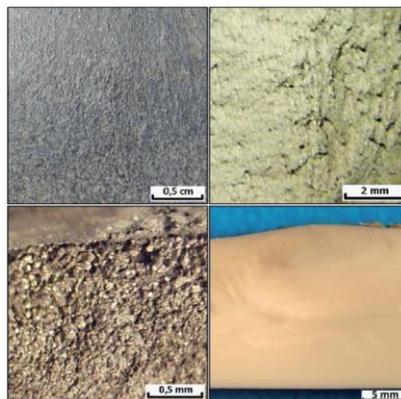


Figura 45-2. Texturas típicas de las superficies de fractura progresivas en materiales

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

La textura granular de las fracturas se forma en materiales policristalinos, tengan o no la capacidad de presentar deformación plástica, aunque se hace más notoria esta textura si se tiene un comportamiento frágil. Las texturas fibrosa y tersa están íntimamente relacionadas con la capacidad de deformación plástica del material, pudiendo ser este cristalino o no. La textura plana se presenta en materiales amorfos que tengan poca capacidad de deformación plástica. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 163)

Por lo anterior, en las fracturas las texturas granular, fibrosa y tersa serán comunes en metales, ya que su estructura típicamente policristalina hace que en fracturas frágiles las grietas revelen una textura granular, y debido a su capacidad de deformación plástica se favorece la formación de las texturas fibrosa y tersa en las fracturas dúctiles. Los cerámicos, al tener un comportamiento eminentemente frágil, favorecen la formación en sus fracturas de la textura granular (si son cristalinos) y la plana (si son amorfos), y en polímeros, al no tenerse la estructura cristalina y en

algunos casos poseerse la capacidad de deformación plástica, es común que se encuentren las texturas fibrosa, tersa y plana. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 163–164)

Las trayectorias de propagación de las grietas dentro de los materiales cristalinos están fuertemente influenciadas por la estructura granular (tamaño, forma y orientación de los granos), teniéndose por tanto dos tipos principales de trayectoria de las grietas a nivel microscópico: (1) *trayectoria intergranular*, cuando las grietas se propagan siguiendo los límites de grano del material, y (2) *trayectoria transgranular*, cuando las grietas se propagan atravesando los granos (Figura 46-2). Las texturas granulares de las superficies de fractura pueden formarse a partir de trayectorias de propagación de las grietas tanto inter como transgranulares. Las texturas fibrosa y tersa típicamente se forman a partir de trayectorias de propagación de grietas transgranulares. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 164)

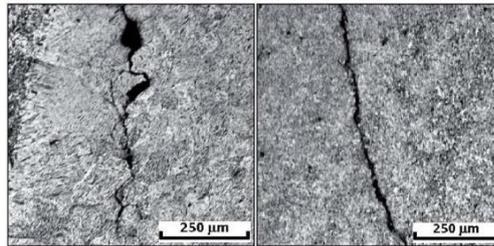


Figura 46-2. Secciones metalográficas transversales a grietas

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

2.10.6 Modos de falla por fracturas súbitas más comunes en materiales metálicos

Este tipo de fracturas se divide en súbitas frágiles, súbitas dúctiles y las súbitas mixtas. También se pueden incluir dentro del grupo de las fracturas súbitas, aquellas producidas por mecanismos progresivos, que por su elevada velocidad de propagación se pueden considerar súbitas. Es el caso de algunos agrietamientos debido a la fragilización por contacto con metales en estado líquido, donde si la velocidad de agrietamiento es muy elevada (0,1- 1m/s), se suele hablar de fracturas súbitas cuasi frágiles, para diferenciarlas de las fracturas súbitas frágiles, donde las velocidades de propagación son del orden de 10^3 m/s. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 169)

La Figura 47-2 ilustra esquemáticamente los mecanismos de fractura más comunes en metales y aleaciones. Materiales dúctiles (Figura 47-2a) generalmente fallan como resultado de la nucleación, el crecimiento y la fusión de huecos microscópicos que se inician en inclusiones no metálicas, a esto se lo conoce como fractura dúctil. Fractura súbita frágil por clivaje (Figura 47-2b) implica separación a lo largo de planos cristalográficos específicos. Tenga en cuenta que el camino de fractura es transgranular. Fractura súbita frágil intergranular (Figura 47-2c), como su nombre implica, ocurre cuando los límites de grano son el camino de fractura preferida en el material. (Anderson, 2016, p. 229)

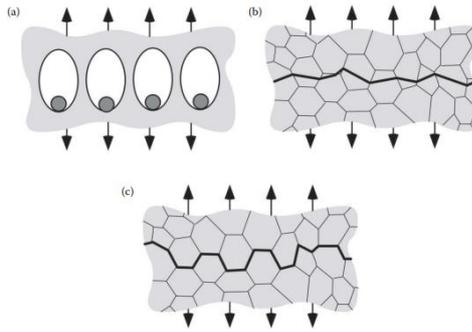


Figura 47-2. Tres mecanismos de fractura en metales: (a) fractura dúctil, (b) fractura frágil por clivaje y (c) fractura frágil intergranular

Fuente: (Anderson, 2016)

El estudio de los mecanismos de fractura ha progresado a partir de la utilización del microscopio electrónico. La microscopía electrónica de barrido (SEM, sus siglas en inglés), ocupa el primer lugar en el examen de fractura. (Arana & González, 2002, p. 143)

Un rayo electrónico de alta intensidad y de muy pequeño diámetro, barre la superficie de fractura. Debido a la excitación de estos electrones primarios, otros electrones (electrones secundarios) son emitidos por la superficie de fractura. Estos electrones secundarios producen una imagen de la superficie de fractura que puede hacerse visible en la pantalla de un osciloscopio de rayos catódicos. El resultado práctico es una excelente imagen fractográfica que puede interpretarse con relativa facilidad. Las probetas que presentan fracturas, para ser analizadas, se pueden introducir directamente en las cámaras de vacío del microscopio electrónico de barrido sin ninguna preparación previa, pero es importante una conveniente limpieza y eliminación de posibles aceites lubricantes o suciedad que suelen acompañar generalmente a las superficies de crecimiento de grieta. (Arana & González, 2002, p. 144)

2.10.7 *Fractura súbita frágil por clivaje*

La fractura frágil es un tipo de fallo, generalmente de los materiales estructurales, que normalmente se produce sin una deformación plástica previa y a velocidades enormemente elevadas, del orden de 2000 m/s en los aceros por ejemplo. La fractura se caracteriza generalmente por una fisura con superficie plana con mínimos labios de deformación plástica. Las fracturas frágiles no son tan comunes como las de fatiga o de plastificación generalizada, pero cuando ocurren, son generalmente catastróficas y suponen importantes costos en daños materiales y desgraciadamente también a veces en vidas humanas. (Arana & González, 2002, p. 15)

La tenacidad es el término utilizado para definir la capacidad de un material para deformarse plásticamente y absorber energía, como consecuencia del mecanismo de rotura. Los términos de

uso frecuente como dúctil o frágil, refiriéndose a materiales conllevan en el uso ordinario la definición de que se trata de materiales de alta tenacidad (dúctil) o baja tenacidad (frágil). En este contexto la fractura frágil se puede originar en materiales cristalinos. (Arana & González, 2002, p. 144)

La fractura frágil por clivaje se puede definir como una propagación extraordinariamente rápida de una grieta, por la simple separación de los enlaces atómicos, a lo largo de un plano cristalográfico determinado. La grieta que se propaga cambia de dirección cada vez que cruza un límite de grano. Los planos preferentes del clivaje son aquellos que tienen la menor densidad de empaquetamiento por dos razones: el número de enlaces a separar es menor y la distancia interplanar es mayor. El mecanismo de fractura por clivaje es más susceptible cuando la deformación plástica está restringida: por ejemplo, los metales de cristalización cúbica centrada en las caras (FCC), como el níquel, cobre, aluminio, etc. Con gran número de sistemas de deslizamiento, normalmente presentan baja susceptibilidad a la fractura por clivaje. A baja temperatura los metales BCC (cúbica centrada en el cuerpo) fallan por clivaje porque tienen un número limitado de sistemas de deslizamiento, particularmente el hierro y los aceros dulces, el wolframio, molibdeno y cromo. Finalmente los metales policristalinos, hexagonal compacto (HCP), que solo tienen tres sistemas de deslizamiento por grano son susceptibles de fractura por clivaje, como el cinc, berilio y magnesio. (Arana & González, 2002, p. 144). En un material policristalino cada grano fracturará en un plano de menor resistencia, sin embargo, a escala macroscópica, se podrá ver que en promedio el plano de fractura seguirá la dirección perpendicular al máximo esfuerzo normal; esto origina la formación de una textura granular cuando se observa una superficie de fractura de este tipo. Entre menos sistemas de deslizamiento posea una estructura cristalina, se favorece la aparición del clivaje (Figura 48-2), lo cual ocurre en metales BCC y HCP. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 170–171)

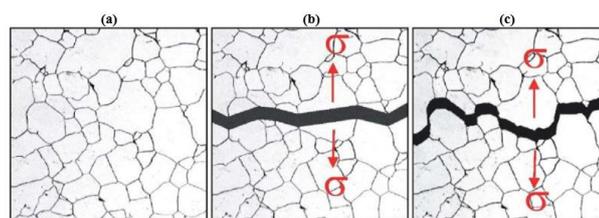


Figura 48-2. Fractura súbita frágil

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

La dirección de propagación de la grieta posee tendencia a cambiar de plano cuando pasamos de un grano al contiguo, ya que la grieta sigue el plano de clivaje con orientación más favorable en cada grano y los granos vecinos tienen orientaciones ligeramente diferentes. (Arana & González, 2002, p. 145)

Dentro de cada grano la superficie de fractura por clivaje idealmente debería ser plana (descohesión a lo largo del plano cristalino de menor resistencia), sin embargo, ello no se da, por la presencia de marcas como las radiales o las de río. (ASM Handbook, 2002, p. 452) El origen de estas marcas está relacionado con las no homogeneidades presentes dentro del grano (partículas de segunda fase, zonas de apilamiento de dislocaciones, cruce de maclas, cambios de velocidad de la grieta, etcétera), lo que hace que dentro en un grano se puedan generar varias grietas o planos de fractura, bien sea cuando inicia el agrietamiento del grano o en la propagación de las grietas. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 172)

El origen del agrietamiento dentro de un plano de clivaje de un grano, se da mediante la formación de microgrietas en zonas de menor resistencia local y/o altos esfuerzos locales (concentración de esfuerzos), como pueden ser: (1) fractura por clivaje previo de partículas duras de segunda fase o impurezas ubicadas en límite de grano (por ejemplo carburos en aceros); (2) zonas de alta energía por cruce de maclas previas o intersección de una macla con un límite grano; (3) zonas de alta energía generadas en apilamiento de dislocaciones por deslizamiento previo contra límites de grano o partículas de segunda fase; (4) zonas de alta energía por apilamiento de dislocaciones, generadas por deslizamientos internos en granos adyacentes curvos, (Figura 49-2). Nótese que todas estas posibilidades de formación de las microgrietas iniciales requieren que haya deformación plástica previa, la cual, al darse a escala tan pequeña, no se refleja macroscópicamente en la pieza (Figura 50-2). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 172)

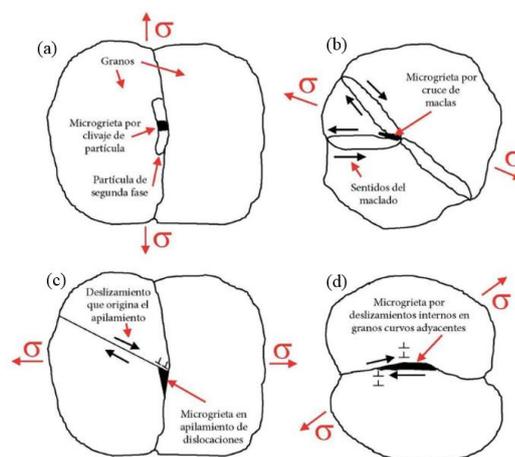


Figura 49-2. Ejemplos de formación de microgrietas a partir de las cuales se nuclea el clivaje en los granos metálicos

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

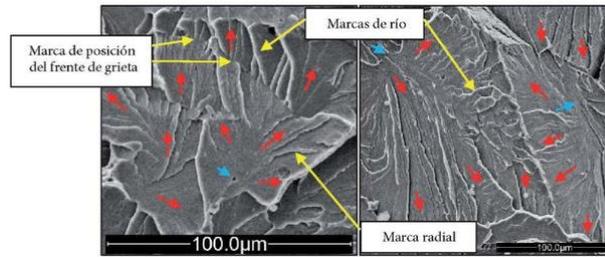


Figura 50-2. Imágenes de MEB de granos de ferrita clivados en un acero de bajo carbono

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

El mecanismo de clivaje que se puede dar en materiales metálicos policristalinos se resume en: (1) aplicación del esfuerzo, (2) deformación plástica a pequeña escala dentro de los granos mediante deslizamiento y/o maclaje, (3) formación de una microgrieta a través de alguno de los mecanismos mencionados anteriormente, (4) crecimiento inestable de grietas por clivaje en los granos, a partir de las microgrietas previas.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 174)

En materiales cristalinos, aunque a escala macro exista una dirección de crecimiento de grieta, ello no necesariamente implica que a escala micro, en frente de grieta, ocurra lo mismo estrictamente. Lo anterior se debe a que en el campo de concentración de esfuerzo que hay en el frente de grieta, pueden haber varios granos que están sobrecargados; por lo tanto, algunos de ellos pueden clivar antes que el frente de grieta principal los alcance, lo cual implica que puede haber granos que tengan direcciones de clivaje contrarias a las del crecimiento de la grieta global (Figura 51-2).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 174)

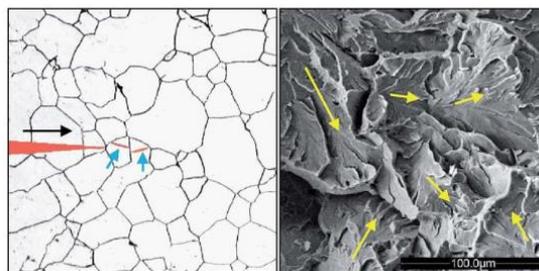


Figura 51-2. Avance de fractura por clivaje en material policristalino

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

2.10.8 *Fractura súbita frágil intergranular*

Es un mecanismo de fractura súbita frágil que se presenta en materiales policristalinos, donde la descohesión del material sigue los límites de grano. Lo anterior origina una textura granular en la superficie de fractura, la cual a escala macro sigue la dirección perpendicular al esfuerzo máximo local de tracción (Figura 48-2c). La diferencia entre la fractura frágil intergranular y la de clivaje

están que la primera sigue los límites de grano (Figura 52-2) y la segunda los planos de clivaje.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 179)

La fractura intergranular es una forma de agrietamiento, menos frecuente que el clivaje, pero de gran importancia en ciertas aplicaciones en las que la agresión de medio es muy importante para el desarrollo de mecanismos de agrietamiento que desencadenan roturas intergranulares, como es el caso de la corrosión bajo tensión.(Arana & González, 2002, p. 157)

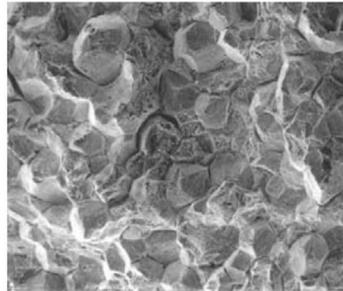


Figura 52-2. Fractografía mostrando el fallo preferencial a lo largo de los bordes de grano

Fuente: (Arana & González, 2002)

En los metales se presenta una temperatura crítica conocida como *temperatura equicohesiva* (se ubica aproximadamente en 0,4 de la temperatura de fusión absoluta de cada metal), en la cual la resistencia mecánica de los límites de grano y la interna de los granos es aproximadamente igual. Por debajo de esta temperatura, los materiales de este tipo tienden a presentar mayor resistencia en los límites de grano a comparación de la que tienen en el interior de los granos, debido a que estas barreras presentan mayor resistencia a fluir, por lo que bloquean el movimiento de las dislocaciones, que es relativamente libre en el interior de los granos.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 179)

En materiales metálicos policristalinos correctamente procesados y en un ambiente benigno, en general no ocurre la fractura súbita intergranular (a temperatura ambiente). Por lo anterior, cuando un metal policristalino exhibe una fractura súbita frágil intergranular, por debajo de la temperatura equicohesiva, se considera anormal, y, por lo tanto, es probable que esté asociada con algún fenómeno de fragilización.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 179–180)

En aceros algunos de los procesos fragilizantes más conocidos son: (1) Segregación en ciclos de tratamiento térmico o termoquímico hacia límites de grano de la austenita original, de elementos químicos fragilizantes de los grupos IV a VI de la tabla periódica, tales como el silicio, el germanio, el estaño, el fósforo, el arsénico, el antimonio, el azufre, el selenio y el telurio; (2) formación de carburos discontinuos o continuos en límite de grano de la austenita original, en aceros bonificados o recocidos de alto carbono; (3) formación de películas de carburo en límites

de grano, en aceros de bajo carbono; (4) formación de nitruros en límites de grano de la austenita original de aceros nitrurados; (5) sensibilización de aceros inoxidable austeníticos por precipitación de carburos de cromo en límites de grano; (6) fragilización de aceros maraging por precipitación en límites de grano de la austenita original, de carburos o carbonitruros de titanio, cuando se calientan por encima de 1095 °C y se enfrían lentamente; (7) precipitación de sulfuro de manganeso en límites de grano, por sobrecalentamiento durante trabajo en caliente o soldadura (entre 1200 y 1300 °C); (8) fragilización por difusión en límites de grano de la austenita original, de elementos como el mercurio, el galio, el cadmio, el zinc, el indio y el litio, cuando están en estado líquido y en contacto con el acero (fragilización por metales en estado líquido o sólido); (9) fragilización por difusión o ataque con hidrógeno; (10) corrosión previa intergranular. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 181–182)

La presencia de mínimas cantidades de hidrógeno, unos p.p.m., en los aceros de alta resistencia, puede causar agrietamiento después de un periodo de tiempo de aplicación de una carga estática. El pequeño tamaño del átomo de hidrógeno se puede difundir muy rápidamente y se concentra en regiones con alto grado de tensiones triaxiales, como por ejemplo en la región próxima al frente de grieta. La concentración de hidrógeno puede causar altas tensiones que se traducen normalmente en un agrietamiento intergranular. (Arana & González, 2002, p. 158)

El inicio de la descohesión intergranular en metales que han sufrido alguno de los procesos de fragilización antes descritos, puede darse, entre otros, a través de los siguientes fenómenos: (1) descohesión o ruptura a tracción de enlaces entre átomos ubicados en límites de grano; (2) movimiento de dislocaciones en corte entre granos adyacentes, que finalmente generan descohesión intergranular; (3) por difusión de los átomos fragilizantes a zonas que bajan la resistencia local y promueven la descohesión intergranular (Figura 53-2). El apilamiento de dislocaciones contra límites de grano, o el clivaje previo de partículas de segunda fase ubicadas en límite de grano (Figura 49-2), también son sitios de inicio de la descohesión intergranular. Estos y otros procesos relacionados involucran un grado de deformación plástica aún menor que el del clivaje; por ello, la tenacidad asociada a este mecanismo de fractura es en general menor que la del clivaje. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 182–183)

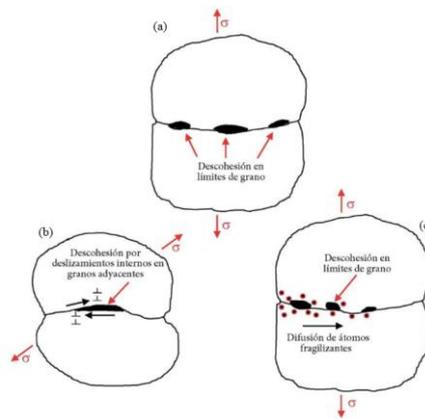


Figura 53-2. Ejemplos de la descohesión intergranular (microgrietas o microvacíos)

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Con lo anterior, el mecanismo del agrietamiento intergranular, que se puede dar en materiales metálicos policristalinos, se resume en: (1) fragilización de los límites de grano del material, a través de alguno de los procesos antes descritos; (2) aplicación del esfuerzo; (3) en algunos casos puede haber flujo plástico previo por movimiento de las dislocaciones (Figura 53-2b); (4) iniciación de la descohesión intergranular, es decir, formación de microgrietas o microvacíos (también pueden ser grietas submicrométricas); (5) crecimiento inestable de grietas por descohesión intergranular, ya que se presenta menor resistencia respecto a la del crecimiento inestable por clivaje (producto de la fragilización).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 184)

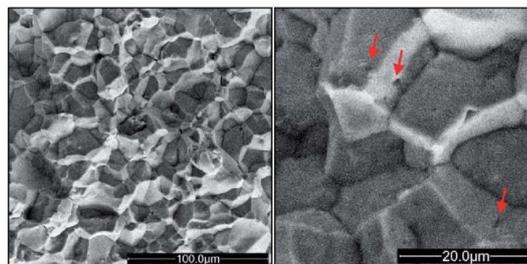


Figura 54-2. Imágenes MEB de fracturas súbitas intergranulares

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

A nivel microscópico, las superficies por fractura frágil intergranular mostrarán el contorno de los granos que recorrió la grieta (Figura 54-2, izquierda), y en algunos casos se encontrarán microhuecos o microvacíos en los contornos de dichos granos, que podrán estar relacionados con alguno de los mecanismos de inicio del agrietamiento en cada grano, como: fractura de partículas de segunda fase, apilamiento de dislocaciones, descohesión de límite de grano, descohesión por deslizamientos internos en granos adyacentes o difusión de elementos químicos fragilizantes (Figura 54-2, derecha). A estos microhuecos o microvacíos se les suele llamar *cavitación en límite de grano*, y su presencia es mucho más común cuando hay una mayor participación de la

deformación plástica cerca a los límites de grano durante el proceso de fractura, lo que se puede dar en fracturas súbitas mixtas. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 184–185)

En la Figura 55-2 se muestra un ejemplo de daño intergranular observado en aceros inoxidable austeníticos; a) microscopía óptica de una sección longitudinal que muestra la presencia de grietas intergranulares b) micrografía electrónica de barrido que muestra grietas intergranulares, ver flechas. (Francois et al, 2013, p. 451)

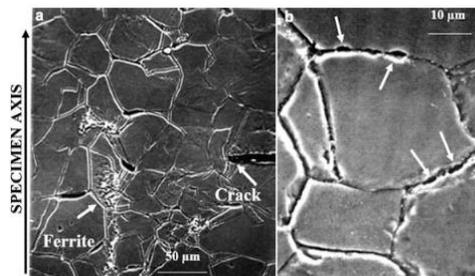


Figura 55-2. Daño intergranular en aceros inoxidable austeníticos

Fuente: (Francois et al, 2013)

2.10.9 *Fractografía de la fractura súbita frágil*

La fractura frágil ocurre en metales y aleaciones de resistencia alta o en metales y aleaciones con ductilidad y tenacidad malas. Además, incluso los metales que por lo general son dúctiles pueden fallar de manera frágil a temperaturas bajas, en las secciones gruesas, a velocidades de deformación altas (como el impacto), o cuando las imperfecciones desempeñan una función importante. Las fracturas frágiles se observan con frecuencia cuando el impacto, en vez de la sobrecarga, ocasiona la falla. (Askeland et al, 2013, p. 257)

A simple vista las fracturas súbitas frágiles de elementos mecánicos no mostrarán deformación plástica o distorsión notable de las piezas en su conjunto o cerca de las zonas de fractura (Figura 56-2a); sin embargo, es necesario recordar que sí hay deformación plástica a escala nanométrica o micrométrica, sobre todo concentrada en la superficie de fractura (asociada al clivaje o la descohesión intergranular), que para ser detectada requiere instrumentación especial. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 186–187)

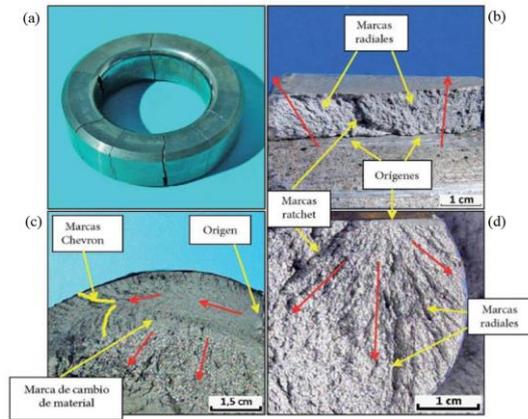


Figura 56-2. Superficies de fracturas súbitas frágiles

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Las marcas radiales, las de río y las Ratchet tienden a formar un patrón paralelo, cuando la fractura se forma, por ejemplo, a flexión o tracción en una pieza tipo platina (ancha y delgada), lo cual indica que el frente de grieta parte del lado de tracción y se mueve hacia el lado opuesto. El lado de origen se podrá ubicar donde se encuentren las marcas Ratchet (Figura 56-2b). Las mismas marcas pueden formar un patrón de roseta o estrella, y esto se da bajo cargas de tracción, torsión o flexión en piezas generalmente redondas, aunque también se pueden presentar en piezas tipo platina; el origen del agrietamiento se encuentra en la zona donde convergen las marcas (Figura 56-2d y Figura 57-2). Las mismas marcas de dirección de propagación pueden formar un patrón de “V” de sargento o de Chevron, lo cual se presenta generalmente en piezas tipo platina bajo carga de flexión o tracción; sin embargo, también se pueden presentar en piezas redondas. Aquí al igual que en el caso anterior, el origen del agrietamiento se encontrará hacia la zona en que apuntan las marcas (Figura 56-2c y Figura 58-2). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 187)

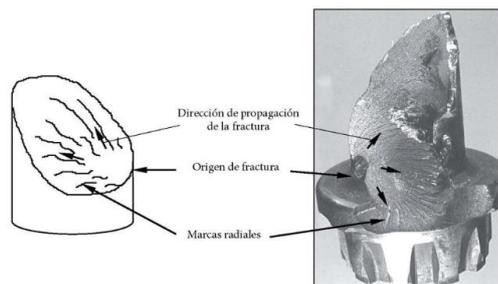


Figura 57-2. Ejemplo de una fractura súbita frágil a torsión de un eje

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

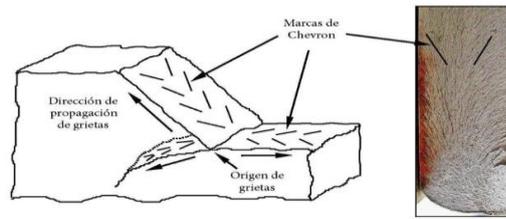


Figura 58-2. Ejemplo de fracturas súbitas frías con patrón de Chevrón de las marcas radiales

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Los modelos de ríos se forman a su paso por los límites de grano, como se puede ver en la Figura 60-2. La figura ilustra cómo se forman los patrones de los ríos. Una grieta de rotura en propagación encuentra un límite de grano, donde el plano de ruptura más cercano en el grano contiguo se orienta en un ángulo de giro finito desde el plano de ruptura actual. Inicialmente, la grieta acomoda el desajuste de giro al formarse en varios planos paralelos. A medida que se propagan las múltiples grietas, se unen mediante rasgaduras entre planos (Figura 59-2).(Anderson, 2016, p. 244)

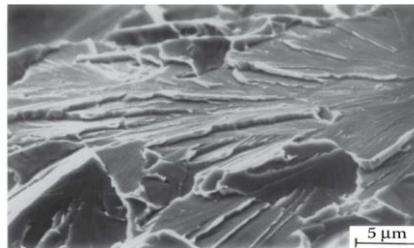


Figura 59-2. Rupturas en forma de ríos en un acero (C 0.25max.; Mn 1.30; Ni 1.00; Mo 0.50) al vacío, templado y revenido

Fuente: (Arana & González, 2002)

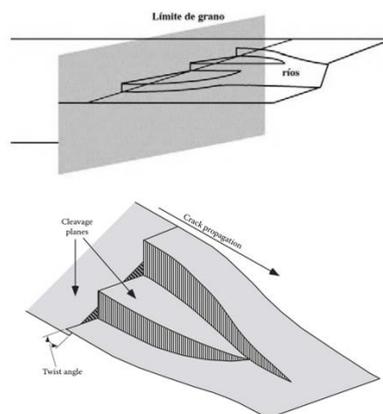


Figura 60-2. Formación de rupturas con forma de ríos al pasar a través de un límite de grano

Fuente: (Arana & González, 2002) (Anderson, 2016)

El tamaño de grano representa un papel importante en la fractura, los metales de grano fino son tenaces, de manera muy opuesta un metal con tamaño de grano grueso presenta una alta tendencia a la rotura frágil (Figura 61-2).(Arana & González, 2002, p. 149)

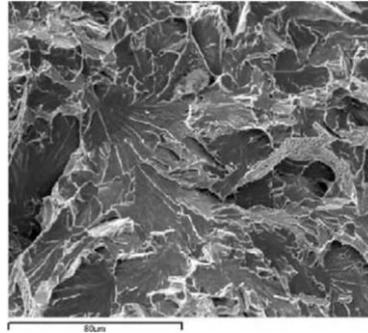


Figura 61-2. Fractografía SEM de una fractura iniciado en borde de grano

Fuente:(Arana & González, 2002)

En general, los materiales de naturaleza frágil tienden a propagar las grietas en la dirección perpendicular al máximo esfuerzo normal de tracción local; por ejemplo, bajo cargas de tracción o flexión, un eje fracturará en sección transversal, mientras que, bajo carga de torsión, la superficie de fractura estará orientada a 45° respecto al eje del elemento (Figura 62-2). En todos estos casos se presenta el modo I de carga para la nucleación y propagación de las grietas.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 189)

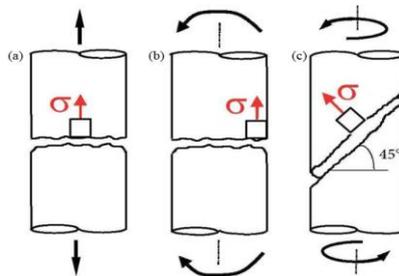


Figura 62-2. Orientación de las superficies de fractura súbita frágil en función del tipo de carga aplicada: (a) tracción, (b) flexión, (c) torsión

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil 2017)

En relación con lo anterior, las grietas preexistentes bajo modo I de carga (tracción a cara de grieta) tenderán a propagarse de manera recta (por ejemplo, flexión y/o tracción aplicados a un eje con grieta transversal). Si se sobreponen el modo I y el modo II (corte en plano de la grieta), ello generará curvatura en la dirección del crecimiento de grieta (por ejemplo, tracción más cortante puro, sobre un eje con grieta transversal), en tanto que si se sobreponen el modo I y el modo III (corte fuera del plano de la grieta), la grieta experimentará un giro en su crecimiento

(por ejemplo, tracción más torsión, sobre un eje con grieta transversal) (Figura 63-2). En materiales frágiles bajo modos puros II y III de carga, no se logra en general propagar las grietas, lo cual no significa que las piezas no se fracturen, sino que se nuclearán nuevas grietas en plano de máximo esfuerzo normal, a partir del campo de esfuerzo generado alrededor de la grieta que no se pudo propagar. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 192)

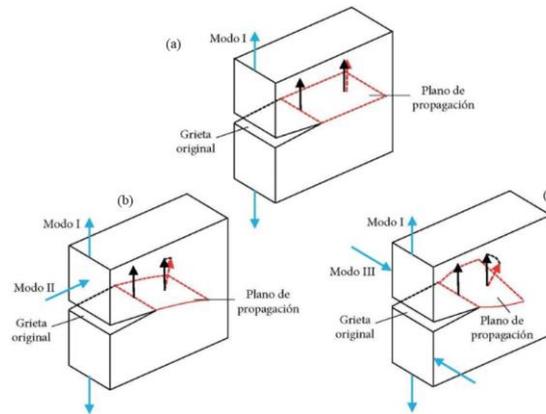


Figura 63-2. Direcciones de propagación de grietas preexistentes en fracturas súbitas frágiles y progresivas

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Al inspeccionar a altos aumentos las superficies de fractura súbitas frágiles de materiales cristalinos con el estereoscopio óptico o el MEB, y complementar dicha inspección con observación de secciones metalográficas transversales a las superficies de fractura, (ASM Handbook, 2002, p. 503) se podrá determinar con precisión cuál de los mecanismos de fractura frágil está presente: el clivaje, la descohesión intergranular o ambos (Figura 64-2). No se puede dar una escala de aumentos específicos, a los cuales se observan con claridad dichos mecanismos, ya que ello depende del tamaño de grano que tenga el material de la pieza analizada. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 193)

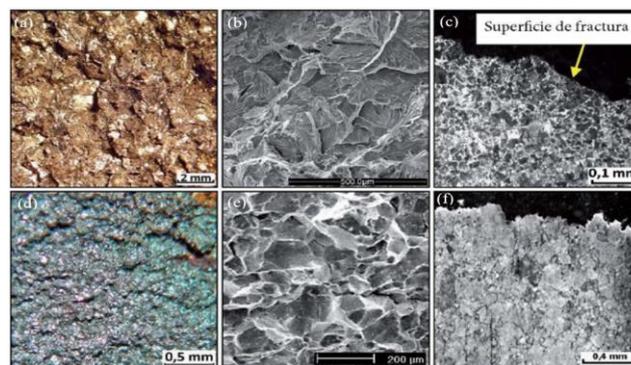


Figura 64-2. Fracturas frágiles

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

2.10.10 Fractura súbita dúctil

La fractura dúctil por lo regular ocurre de una forma transgranular (a través de los granos) en los metales que tienen buena ductilidad y tenacidad. Las fracturas dúctiles por lo regular son ocasionadas por sobrecargas sencillas, o por la aplicación de un esfuerzo muy alto al material. (Askeland et al, 2013, pp. 254–255)

Este mecanismo de fractura se caracteriza en materiales metálicos policristalinos por estar precedido de un importante grado de deformación plástica, a través del deslizamiento interno de los granos, vía el movimiento de dislocaciones. Producto de esta deformación plástica, el material nuclea microcavidades (microvacíos o microhuecos) principalmente intragranulares, en zonas propicias para ello, donde cada microcavidad es un origen local de grieta. Con el progreso de la deformación plástica, las microcavidades crecen y coalescen (se unen), para formar así la superficie de fractura de la pieza. La trayectoria de grieta es transgranular y se puede formar bajo esfuerzo normal o cortante (Figura 65-2). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 197)

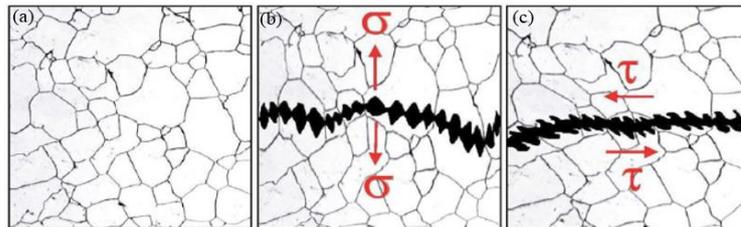


Figura 65-2. Fractura súbita dúctil

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

La formación de un microvacío se puede dar en alguno de los siguientes sitios propicios: (1) alrededor de inclusiones no coherentes con la matriz, donde estas generalmente tienen una baja fuerza de unión con el metal, lo cual facilita que se descohesionen en la medida en que la matriz metálica de los alrededores fluye; (2) alrededor de partículas de segunda fase, donde también se presente descohesión; (3) en partículas de segunda fase con alta fuerza de unión a la matriz y de naturaleza frágil, las cuales ante el deslizamiento de la matriz pueden fallar por clivaje y formar así un microvacío; (4) en partículas de segunda fase que estén previamente agrietadas, debido al proceso de deformación plástica experimentado durante la fabricación; (5) en la matriz metálica cerca de una partícula de segunda fase de bordes angulosos, que genere un concentrador de esfuerzo tal que agriete a la matriz; (6) en apilamientos de dislocaciones presentes en bordes de grano; (7) en discontinuidades generadas durante fabricación, como rechupes de fundición, poros, grietas previas, etcétera. Ejemplos de lo anterior se esquematizan en la Figura 66-2. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 197–198)

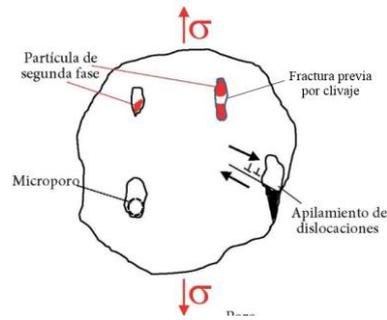


Figura 66-2. Ejemplos de formación de microvacíos dentro de un grano metálico

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Una superficie de fractura formada por microvacíos en un metal, mostrará microhuecos claramente definidos al observarse bajo una técnica como la MEB, donde si estos microhuecos se formaron principalmente alrededor de partículas de segunda fase o inclusiones, será posible observar fragmentos de estas en su interior (Figura 67-2a). En aquellos casos donde la formación de los microhuecos no estuvo asociada a partículas de segunda fase o inclusiones, sino a apilamiento de dislocaciones, por ejemplo, solo se observará el microhueco (Figura 67-2b). En general, a escala microscópica no se forman marcas de dirección de crecimiento o de posición del frente de grieta, como ocurre con el clivaje. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 200)

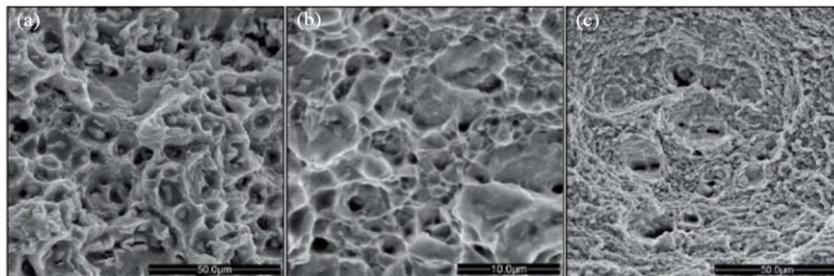


Figura 67-2. Imágenes de MEB de metales que fallaron por formación y coalescencia de microvacíos

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

El tamaño del microhueco o microvacío generado es en general proporcional al tamaño de la inclusión o partícula de segunda fase, alrededor de la cual se formó, si este fue el caso. Cuando se tienen varios tamaños de inclusiones o partículas de segunda fase en el metal, los primeros microvacíos se forman alrededor de las más grandes (generalmente las inclusiones), y a altos porcentajes de deformación aparecen los microvacíos asociados a las partículas más pequeñas (generalmente las de segunda fase) (Figura 67-2c). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 201)

Los microvacíos, después de formados, siguen su crecimiento con la deformación plástica que se está experimentando en la matriz metálica de los alrededores, y la superficie de fractura se genera

a través de dos mecanismos básicos: (1) coalescencia de microvacíos, donde microhuecos cercanos se encuentran y unen mientras crecen; y (2) a través de bandas de corte, las cuales se forman entre microvacíos alejados de gran tamaño, que vía la concentración de esfuerzo que producen, nuclean unas zonas de deslizamiento localizado llamadas bandas de corte. Dentro de la banda de corte se pueden formar otros microvacíos, asociados a partículas de segunda fase más pequeñas. La formación de bandas de corte generalmente produce superficies de fractura zigzagueantes, mientras que la coalescencia pura produce una sola superficie de fractura (Figura 68-2).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 202)

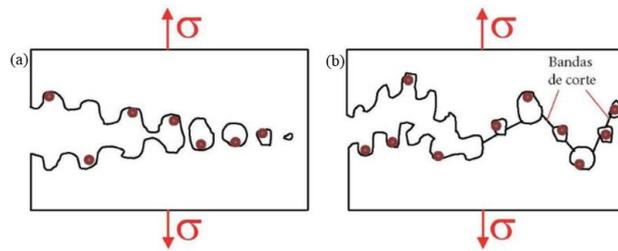


Figura 68-2. Crecimiento de grietas

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Al igual que como se mencionó en el caso del clivaje y la fractura intergranular, aunque exista a escala macro una dirección de crecimiento de grieta, ello no necesariamente implica que a escala micro en frente de grieta ello se cumpla de manera estricta. Lo anterior se debe a que en el campo de concentración de esfuerzo que hay en el frente de grieta, pueden haber varias zonas sobrecargadas que estén nucleando microvacíos; por lo tanto, allí pueden coalescer y formar una grieta, la cual puede crecer en dirección contraria a la grieta principal hasta que se encuentran (Figura 68-2a).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 202–203)

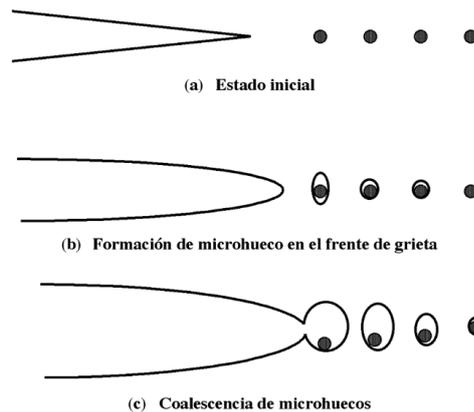


Figura 69-2. Formación de microhuecos <<voids>>

Fuente: (Arana, González 2002)

La formación y coalescencia de microvacíos (Figura 69-2) se puede dar bajo los modos de carga I, II, III o por combinaciones entre ellos, es decir, el plano de fractura puede ser perpendicular a

la dirección del esfuerzo normal máximo o coplanar con la dirección del cortante máximo. Los microhuecos que se aprecian sobre la superficie de fractura podrán ser circulares o elípticos, dependiendo de las combinaciones de modos de carga aplicados. Los microhuecos redondos sugieren cargas de tracción y/o flexión (modo I), mientras que los microhuecos elípticos indican cortante puro o torsión (modos II y III), o combinación de estos con tensión o flexión. Bajo flexión pura también se pueden formar microhuecos elípticos, sin embargo, estos no serán tan alargados como los presentes con los modos II y III. Cuando la fractura se forma por modos de carga II, III o combinación entre ellos, donde puede haber presencia también de compresión, o si la fractura se desarrolla a través de bandas de corte, es común que las superficies de fractura se dañen por la fricción entre las dos partes, lo cual puede borrar la presencia de los microhuecos (Figura 70-2), dejando una textura muy parecida a la del desgaste adhesivo. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 203)

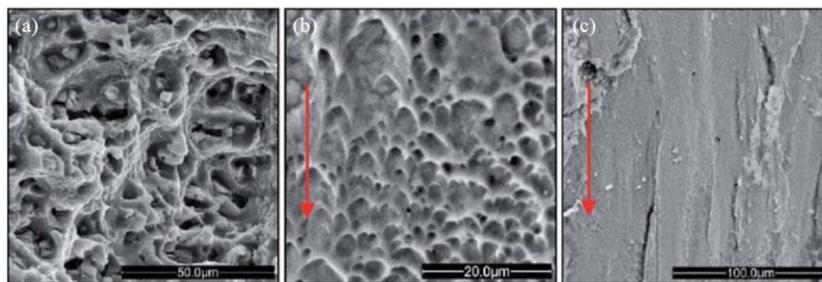


Figura 70-2. Imágenes MEB de metales fracturados por formación y coalescencia de microvacíos

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

El ensayo de fractura más popular, que normalmente presenta un comportamiento dúctil, es el ensayo de tracción, a medida que la deformación continúa, puede formarse un borde cortante a 45°, lo que produce la conocida rotura dúctil de copa y cono, como se puede ver en la Figura 71-2. Cuando se ha alcanzado la carga máxima, la deformación plástica se concentra en una pequeña fracción de la probeta, produciéndose la estricción característica. (Arana & González, 2002, p. 151)

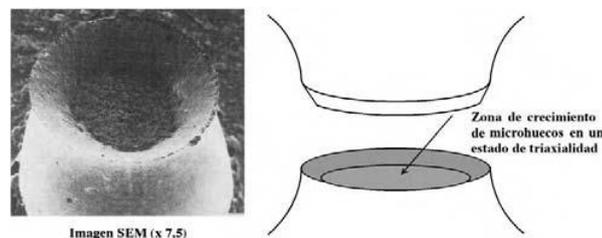


Figura 71-2. Fractura de copa y cono típica de un ensayo de tracción, con formación de microhuecos

Fuente: (Arana & González, 2002)

Cuando se estira un material dúctil en la prueba de tracción, comienza el rebajo y se forman vacíos, comenzando cerca del centro de la barra, por la nucleación en los límites de los granos o por inclusiones (Figura 72-2).(Askeland et al, 2013, p. 255)

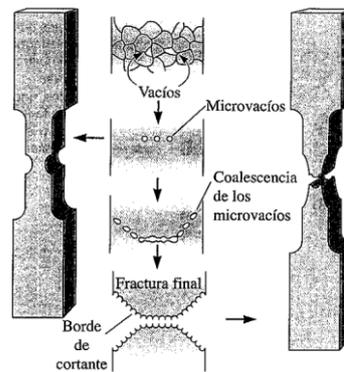


Figura 72-2. Ensayo de tracción

Fuente: (Askeland et al, 2013)

2.10.10.1 Fractografía de la fractura súbita dúctil

La formación de una fractura súbita dúctil se favorece si: (1) el material del cual está hecha la pieza es intrínsecamente dúctil, por ejemplo, materiales metálicos de baja dureza, polímeros termoplásticos o metales no fragilizados en límite de grano; (2) hay un estado de esfuerzo plano, lo cual facilita el comportamiento dúctil del material; (3) la pieza es pequeña o delgada y, por lo tanto, favorece un estado de esfuerzo plano; (4) si la velocidad de aplicación de la carga es lenta, es decir, una carga cuasiestática, lo que no limita la ductilidad del material; (5) la temperatura es alta para el material, lo que favorece su comportamiento dúctil; por ejemplo, en metales por encima de la temperatura de transición dúctil-frágil o en polímeros termoplásticos por encima de la temperatura de transición vítrea.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 205). Generalmente todos los materiales metálicos presentan una temperatura de transición dúctil-frágil, de forma que a temperaturas más elevadas que la de transición las probetas ensayadas presentan valores de tenacidad a fractura altos, mientras que a temperaturas menores que la de transición, los valores pueden ser extraordinariamente bajos. A bajas temperaturas el acero es frágil y la fractura que se produce por consiguiente es frágil sin embargo, a altas temperaturas la fractura es dúctil y crece por coalescencia de microhuecos.(Arana & González, 2002, p. 156)

Cuando una superficie de fractura dúctil no tenga marcas de dirección de propagación o de posición del frente de grieta, es indicio de que en toda el área de fractura se nuclearon y coalescieron microhuecos, de una manera más o menos homogénea, por lo tanto, no hay orígenes de grieta especialmente identificables; a este tipo de fractura dúctil se le llama *colapso plástico*. En otros casos, las superficies de fractura dúctil pueden insinuar marcas radiales o de posición de

frente de grieta (costillas o playas). No es común observar marcas Ratchet o de río. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 205)

A simple vista, las fracturas dúctiles de elementos mecánicos mostrarán deformación plástica o distorsión notable de las piezas en su conjunto o cerca de las zonas de fractura (Figura 73-2 y Figura 74-2, fotos de la izquierda). En el caso particular de la fractura bajo torsión, la deformación consistirá en rotación de la superficie de la pieza. Las texturas apreciables a simple vista, con lupas o estereoscopio óptico de las superficies de fractura en metales, serán la fibrosa, la tersa y la tersa con frotamiento. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 205–206)

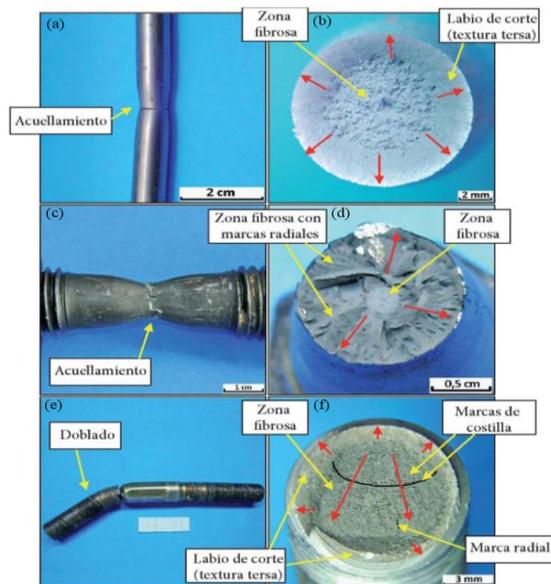


Figura 73-2. Fracturas dúctiles

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Cuando se presenta una fractura a tracción habrá encuellamiento de la pieza y en la superficie de fractura se tendrá una zona central de textura fibrosa, la cual es la primera en formarse y tiene una orientación perpendicular al esfuerzo de tracción. En esta zona fibrosa no habrá ningún origen particular de grietas, ya que aquí hay colapso plástico; alrededor de la zona fibrosa se tendrá otra zona con textura tersa, cuya orientación seguirá la del esfuerzo cortante máximo, es decir, 45° aproximadamente respecto al eje de la pieza (Figura 73-2, fotos superiores). Esta zona de textura tersa es la última en formarse y tiene su origen en la zona fibrosa, comúnmente se le conoce como labio de corte. Este labio de corte se forma con dichas características, ya que consiste en el colapso de un anillo cuyo material es de espesor delgado, dentro del cual predomina la condición de esfuerzo plano, donde los materiales dúctiles desgarran siguiendo la dirección del cortante máximo. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 206)

En algunos casos con materiales no tan dúctiles, pero que siguen conservando dicho comportamiento, como puede ser el caso de un acero bonificado con 35 HRC, en las piezas

sometidas a tracción puede que se presente una subdivisión de la zona fibrosa, donde se tendrá en el centro una zona fibrosa como la que se describió en el párrafo anterior y alrededor de ella otra muy rugosa con marcas radiales (Figura 73-2, fotos centrales). La zona fibrosa con marcas radiales se forma porque la grieta crece anularmente a alta velocidad cerca a la límite para el material.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 207)

Cuando se presenta una fractura bajo cortante puro (desgarre), en la pieza se formará un labio de desgarre y en la superficie de fractura se tendrá una textura tersa, en la cual, si se presenta deslizamiento entre las partes, se generará una textura tersa con frotamiento; la superficie de desgarre estará orientada con la dirección del esfuerzo cortante aplicado (Figura 74-2, fotos superiores).(ASM Handbook, 1998, p. 411) Las fracturas bajo carga de torsión generarán deformación por rotación de la pieza, sin que necesariamente se genere doblado o adelgazamiento en la zona de fractura. La superficie de fractura se alineará con los esfuerzos cortantes del torsor, es decir, será perpendicular al eje del momento. La textura de la superficie de fractura generalmente será tersa con frotamiento en la periferia de la pieza, y fibrosa en la zona central, la cual es la última en formarse (Figura 74-2, fotos inferiores).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 209)

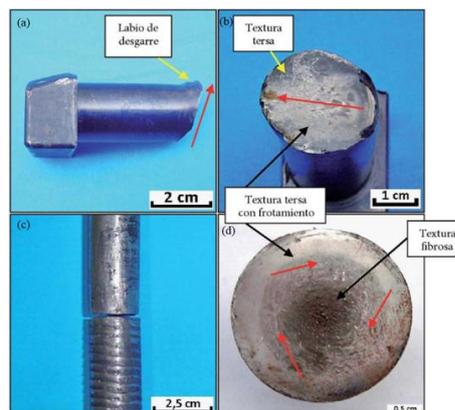


Figura 74-2. Fracturas dúctiles por desgarre y torsión

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil 2017)

Al inspeccionar con el MEB las superficies de fractura de metales, a altos aumentos, y complementar dicha inspección con observación de secciones metalográficas transversales a las superficies de fractura, se podrán observar: (1) los microhuecos de forma circular típicos de la textura fibrosa (Figura 75-2, fotos superiores); (2) los microhuecos de forma oval o elíptica comunes de la textura tersa (Figura 75-2, fotos centrales); (3) la superficie deformada y desgastada por el deslizamiento en una textura tersa con frotamiento (Figura 75-2, fotos inferiores). Además, en la sección metalográfica será posible detectar la deformación plástica presente en los granos (distorsión de estos).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 210–211)

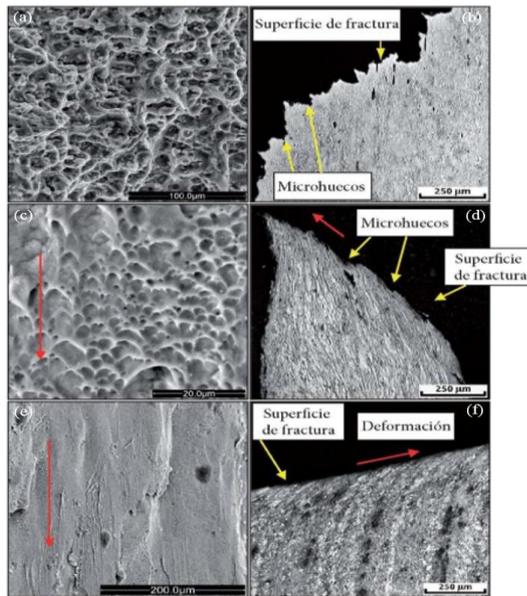


Figura 75-2. Imágenes de MEB y metalográficas de fracturas súbitas dúctiles

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil 2017)

A simple vista, es posible que en una superficie de fractura súbita dúctil se vean grandes cavidades, del orden de las décimas de milímetro o aún más grandes, las cuales generalmente estarán asociadas a grandes inclusiones, grandes discontinuidades del material (poros, rechupes, etcétera) o delaminaciones (descohesión dúctil en un plano que contiene una gran inclusión alargada) (Figura 76-2).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 212)

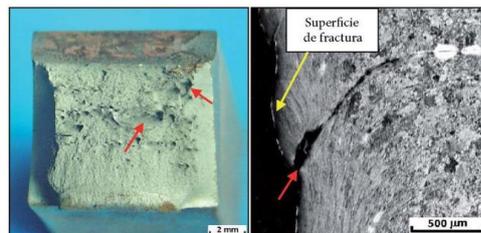


Figura 76-2. Superficie de fractura dúctil

Fuente:(Espejo Mora & Hernández Albañil 2017)

A partir de la forma de los microhuecos y la orientación que estos tienen en las dos superficies generadas en una fractura, se puede deducir el tipo de carga bajo la cual se formaron, según las reglas básicas que se muestran en la Figura 77-2.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 212)

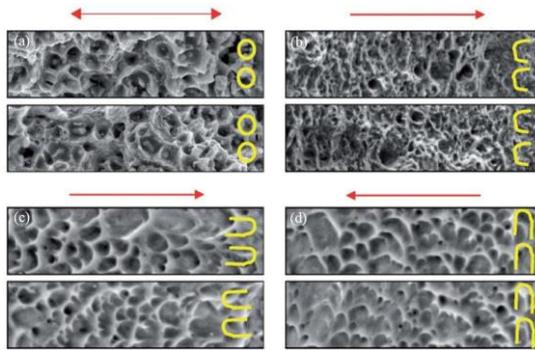


Figura 77-2. Imágenes de MEB de la morfología típica de los microhuecos en las dos superficies de fractura formadas

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Los materiales de naturaleza dúctil bajo tracción o flexión fracturan, bien sea siguiendo el esfuerzo cortante máximo en piezas delgadas (45° respecto al esfuerzo de tracción normal, en modos II y/o III), o mediante una combinación de fractura perpendicular al esfuerzo normal de tracción máximo (modo I) y labios de corte laterales que siguen al cortante máximo (modos II y/o III), lo cual se da en piezas gruesas. Bajo torsión o cortante puro, la fractura sigue el cortante máximo (modos II y/o III) (Figura 78-2). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 214)

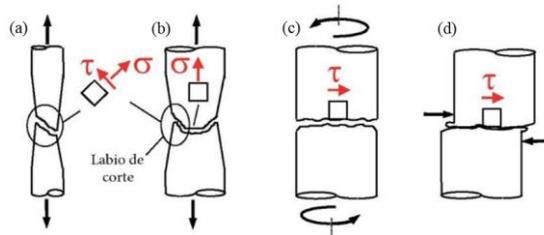


Figura 78-2. Orientación de las superficies de fractura súbita dúctil, en función del tipo de carga aplicada

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

En piezas hechas de materiales dúctiles, dependiendo de su espesor, se tendrá bajo carga de tracción o flexión: una fractura predominantemente perpendicular a la dirección del esfuerzo normal, con textura fibrosa (pieza gruesa), una formando un labio de corte a 45° siguiendo los esfuerzos cortantes máximos, con textura tersa (pieza delgada), o una mezcla de ambos (espesor intermedio) (Figura 79-2). De nuevo, como se ha mencionado antes, decir pieza delgada o gruesa es relativo a cada material, y se encuentra en general que, a mayor tenacidad de fractura del material, la zona límite entre delgado y grueso se correrá a mayores valores de espesor. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 215)

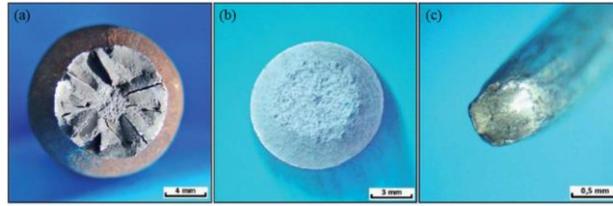


Figura 79-2. Fracturas dúctiles a tracción en función del espesor

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

2.10.11 *Fractografía de las fracturas súbitas mixtas*

Las fracturas súbitas mixtas se forman por condiciones intermedias entre las que favorecen a las fracturas frágiles y a las fracturas dúctiles, como son: (1) un material intermedio entre dúctil y frágil, por ejemplo, un metal de dureza media o un metal fragilizado en límite de grano que promueva fractura intergranular con microvacíos; (2) un estado de esfuerzos intermedio entre esfuerzo plano y deformación plana; (3) un tamaño de pieza o espesor de estado intermedio entre grande y pequeño; (4) una temperatura ubicada en la zona de transición dúctil-frágil del material; (5) una velocidad de aplicación de carga intermedia entre impacto y cuasiestática. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 217)

Las fracturas mixtas mostrarán características de deformación, marcas en la superficie de fractura, textura y mecanismos de fractura combinados, entre los típicos de las fracturas dúctiles y los de las frágiles. (ASM Handbook, 1998, p. 443) No existen criterios unificados que permitan establecer una clara división entre fracturas dúctiles y fracturas frágiles. Piénsese en el siguiente caso: si se encuentra una fractura donde una pieza metálica no muestre a escala macro distorsión visible o deformación, pero a escala micro, mediante observación con estereoscopio y MEB, se advierte formación de microvacíos, ¿cómo debe clasificarse esta fractura?, ¿frágil, por la no presencia de deformación de la pieza, o dúctil, por la presencia de los microhuecos?, y ¿qué tal si además se halla que los microhuecos están en algunas zonas de las superficies de fractura y en otras hay clivaje? La respuesta no es sencilla, algunos analistas podrán responder: a escala macro es una fractura frágil y a escala micro será dúctil si el porcentaje en área ocupada por los microvacíos supera el del clivaje. En este contexto fracturas súbitas que presenten situaciones como esta o similares son las que llamaremos *súbitas mixtas*. (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 217–218)

Bajo inspección a simple vista, con lupas o estereoscopio, se podrán encontrar marcas de dirección de crecimiento de grietas (Ratchet, radiales o de río) o marcas de posición del frente de grieta. En cuanto a la textura se encontrará que será granular si predomina el micromecanismo de descohesión intergranular y/o el de clivaje, o fibrosa si son los microvacíos los que predominan (Figura 80-2). (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 218)

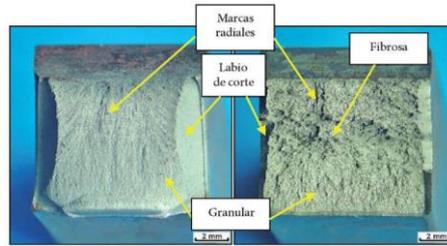


Figura 80-2. Superficie de fractura súbita mixta

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

Algunos ejemplos de casos de fracturas mixtas son:

-Fracturas macroscópicamente dúctiles, en cuya superficie haya participación de micromecanismos frágiles (intergranular y/o clivaje). Puede ser el caso de materiales con heterogeneidades estructurales, donde globalmente muestran una alta elongación, pero al formarse la fractura, esta se ve influida por la presencia de fases frágiles.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 219)

-Fracturas macroscópicamente frágiles, en cuya superficie de fractura haya participación de micromecanismos dúctiles (microhuecos), lo cual es común que se presente con piezas de material dúctil, pero con concentradores de esfuerzo severos que promueven un estado de deformación plana que limita la ductilidad de la pieza.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 219)

-Combinación de clivaje y microvacíos en una superficie de fractura, esto corresponde a uno de los tipos de cuasiclivaje, el cual se puede presentar por ejemplo en aceros de medio carbono bonificados de durezas intermedias a altas, 45 RC y superiores, (Figura 81-2a).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 219)

-Combinación de intergranular y microvacíos en una superficie de fractura, lo que sugiere que hay presencia parcial de elementos químicos o partículas fragilizantes en límites de grano, (Figura 81-2b).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 219)

-Zona central de la superficie de fractura con clivaje y/o intergranular y formación de labio de corte en los bordes con microvacíos, donde este labio se puede formar al final de la propagación de las grietas frágiles, y el remanente del material, por ser delgado, ingresa a la condición de esfuerzo plano, facilitando el comportamiento dúctil. El aspecto de una fractura como esta es similar al que se muestra en la Figura 79-2b, solo que en la zona central no habrá textura fibrosa, sino granular.(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, p. 220)

-Textura granular con presencia de microhuecos en límite de grano, donde, por ejemplo, se tiene segregación de fases fragilizantes cerca al límite de grano (no necesariamente en el propio límite), lo que facilita el flujo y la formación de microvacíos alrededor de los precipitados, que al crecer y encontrarse con los límites de grano generan fractura; otra posibilidad es tener cerca al límite

de grano las zonas conocidas como zonas libres de precipitados (ZLP), en donde hay una alta concentración de matriz metálica dúctil, la cual nuclea microvacíos desde este límite; por su aspecto, es común que se refieran a estas fracturas como las formadas por *cavitación en límite de grano* (Figura 81-2c).(Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017, pp. 220–221)

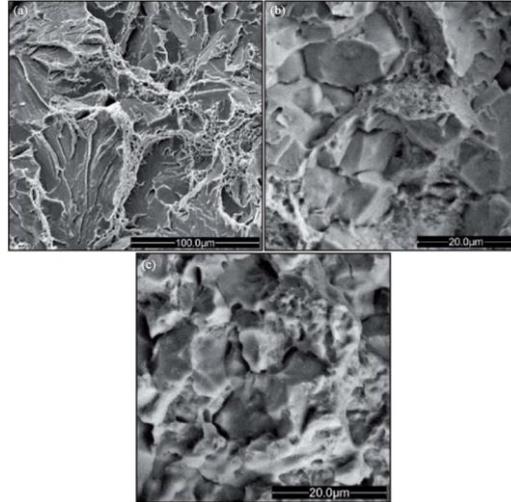


Figura 81-2. Imágenes de MEB de superficies de fractura súbitas mixtas en aceros bonificados

Fuente: (Espejo Mora & Hernández Albañil, 2017)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Propuesta de diseño del banco para ensayos de fatiga por flexión rotativa

El diseño conceptual del banco de flexión rotativa se basa en el método inductivo ya que se inicia con el análisis de la estructura funcional del sistema para generar posibles soluciones que son los elementos que conforman el banco de ensayos. Esto se desarrolla aplicando la técnica de gestión de la calidad basada en ingeniería, la cual se denomina despliegue de la función de calidad, por sus siglas en inglés QFD (Quality function Deployment). De esta manera, al aplicarla, se podrá establecer características y requerimientos del usuario; el despliegue de la casa de la calidad se hace mediante un cálculo matemático básico que permite evaluar las características técnicas más importantes a considerarse en el diseño del producto.

3.1.1 Definición del producto

El banco de ensayos de flexión rotativa se utiliza para realizar ensayos de fatiga en los diferentes tipos de materiales, utilizados para la fabricación de elementos de máquina en la industria.

Para el diseño del banco de flexión rotativa es importante desarrollar un método de calidad, como el QFD, para transformar las necesidades del cliente en características apropiadas para el banco.

3.1.1.1 Proceso de despliegue de la función de la calidad (QFD)

➤ Voz del usuario

Se identifican las necesidades del cliente, para ello se realiza una entrevista al Ing. Marcelo Toapanta, Especialista en control de calidad y laboratorio del CIRT, quién es el operador de la máquina. Conforme a los requerimientos, manifiesta lo siguiente:

- Capacidad para varios tipos de materiales metálicos
- Semiautomática
- Fácil manejo y visualización
- Bajas vibraciones
- Durabilidad
- Silenciosa
- Que ocupe poco espacio
- Seguridad al operar
- Bajo Costo
- Apariencia agradable

➤ Voz del ingeniero

Son características técnicas basadas en los requerimientos del cliente:

- Capacidad máxima de carga 50 kgf
 - Control mediante PLC
 - Software Didáctico
 - Alineación y sobrecargas
 - Materiales
 - Nivel de Ruido
 - Dimensiones (Volumen)
 - Elementos protectores
 - Costo Total
 - Estética
- Análisis de la competencia

En el Ecuador no existen empresas dedicadas a la fabricación de máquinas de ensayos de flexión rotativa, sin embargo, a nivel internacional si existen algunas empresas que fabriquen dichas máquinas; pero debido al excesivo costo no se adquieren estos equipos.

Es importante conocer que empresas poseen máquinas para ensayos; así como sus características para poder compararlas con nuestros diseños.

En Taiwán la empresa Advance Instrument Inc es reconocida como pionera en el campo de equipos para pruebas de materiales y como fabricantes de Instrumentación. En este ámbito se encuentra la máquina para ensayos de flexión rotativa (Rotating Beam Fatigue Testing System) Modelo RRM, cuyas características y especificaciones técnicas se encuentran en el ANEXOS Anexo A.

Otra empresa ubicada en Taiwán con agencia en México es GOTECH Testing Machines Inc. Con 42 años de experiencia en investigación y desarrollo ha estado trabajando en cooperación industria-universidad. Entre varios equipos de prueba se encuentra la máquina Rotation Fatigue Tester Modelo GT-7053, el cual está diseñado para medir la fatiga por flexión giratoria a una velocidad de rotación específica y bajo una fuerza de flexión constante. Características y especificaciones se encuentran en el Anexo B.

3.1.1.2 *Matriz QFD*

En la Figura 1-3 se puede observar los resultados obtenidos al realizar la matriz QFD, en la cual nos da las características más importantes en la que se basa el diseño. Las características que

tienen mayor porcentaje de incidencia son: los materiales, la seguridad, el costo total y la parte semiautomática de la máquina.

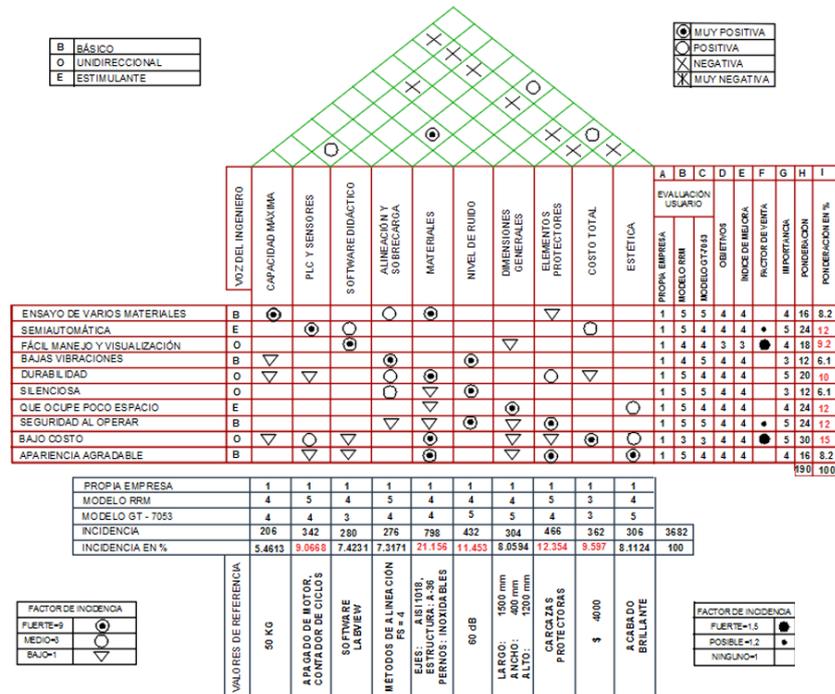


Figura 1-3. Cada de la Calidad del banco de ensayos de flexión rotativa

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las características técnicas del banco de flexión rotativa se presentan en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Características técnicas

Capacidad máxima de carga	50 kgf
Tipo de control	Semiautomático
Software	Labview

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.1.2 Diseño conceptual

El diseño conceptual se basa en la estructura funcional del equipo, luego de este análisis se procede a la definición de módulos, para generar las posibles soluciones para cada módulo y finalmente evaluar y seleccionar las mejores alternativas.

3.1.2.1 Análisis funcional- modular

En el nivel cero del análisis funcional se presenta la tarea principal que realiza el banco de flexión rotativa, seguidamente en el nivel 1 se detalla el proceso que se desarrolla en la misma, para llegar a obtener la tarea principal descrita en el nivel 0.

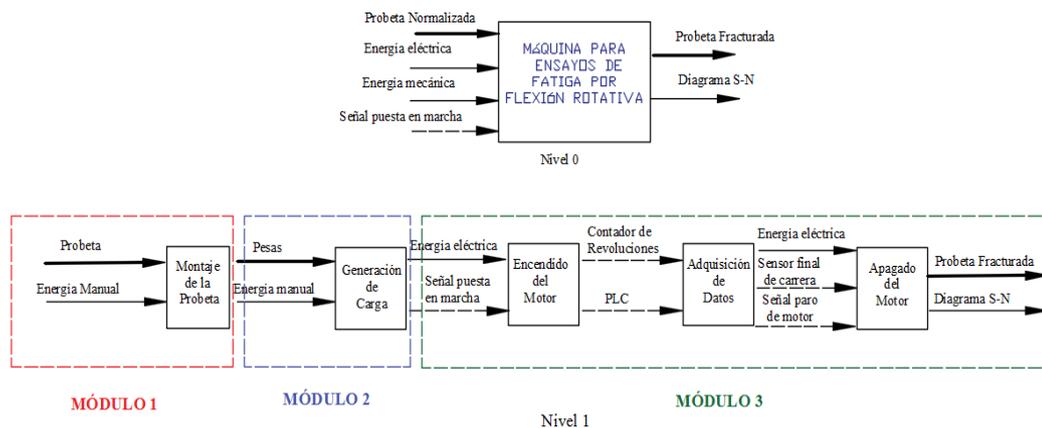


Figura 2-3. Funciones y módulos del banco de flexión rotativa
 Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Figura 2-3 se puede apreciar claramente tres principales módulos que son:

Módulo 1: Sistema de sujeción de la probeta

Módulo 2: Sistema de aplicación de carga

Módulo 3: Sistema de control

3.1.3 Selección de alternativas

3.1.3.1 Matriz morfológica

Previo a la selección de alternativas de solución es necesario conocer las funciones que desempeña cada módulo.

Módulo 1: Sistema de sujeción de probetas

Las funciones del módulo se presentan en la Tabla 2-3:

Tabla 2-3: Módulo 1 del banco de flexión rotativa

MÓDULO 1		
Función 1	Facilidad de acoplamiento entre el mandril y los ejes conductor y conducido	
Función 2	Mantener alineada la probeta durante el ensayo	
Función 3	Permitir un ajuste adecuado para evitar deslizamientos de la probeta	

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Módulo 2: Sistema de aplicación de carga

Las funciones del módulo se presentan en la Tabla 3-3:

Tabla 3-3: Módulo 2 del banco de flexión rotativa

MÓDULO 2		
Función 1	Transmitir la fuerza mediante algún tipo de mecanismo.	
Función 2	Colocar la carga respectiva de acuerdo a los niveles de carga calculados.	

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Módulo 3: Sistema de control

Las funciones del módulo se presentan en la Tabla 4-3:

Tabla 4-3: Módulo 3 del banco de flexión rotativa

MÓDULO 3		
Función 1	Dar movimiento a los ejes motriz y conducido	
Función 2	Registrar el número de ciclos hasta la fractura de la probeta	
Función 3	Controlar el encendido y apagado del motor	

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.1.3.2 Análisis de alternativas

A continuación se presentan las características de cada módulo en la Tabla 5-3, Tabla 6-3 y Tabla 7-3.

Tabla 5-3: Alternativas del módulo 1- banco de flexión rotativa

SOLUCIONES DEL MÓDULO 1			
	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
A	<p>El acople del mandril con el eje es roscado y la sujeción de la probeta se realiza con llave ajustable.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil mecanizado de los ejes. -Acoplamiento sencillo. -Bajo costo de adquisición. -Fácil operación -Seguridad de ajuste en vibración. 	<ul style="list-style-type: none"> -Apertura de mordazas limitada hasta ciertos diámetros.
B	<p>El acople del mandril con el eje es roscado y la sujeción de la probeta se lo realiza con mandril autoajustable.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Fácil mecanizado de los ejes. -Acoplamiento sencillo. -Fácil operación. -Bajo costo de adquisición. 	<ul style="list-style-type: none"> -Posibles deslizamientos en vibración. -Apertura de mordazas limitada hasta ciertos diámetros.
C	<p>El acople del mandril con el eje es cónico y la sujeción de la probeta se lo realiza con llave ajustable.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -No existe deslizamiento cuando está acoplado -Fácil operación -Seguridad de ajuste en vibración. 	<ul style="list-style-type: none"> -Alto costo de adquisición. -Dificultad de mecanizado en los ejes. -Requiere fuerza al desmontar.

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Tabla 6-3: Alternativas del módulo 2- banco de flexión rotativa

SOLUCIONES DEL MÓDULO 2			
	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
A	<p>La fuerza se transmite por medio de un espárrago y la carga se aplica mediante un dinamómetro.</p> 	<p>-Fácil adquisición. -Lectura de carga directa. -Valores reales de carga.</p>	<p>-Desgaste del Dinamómetro. -Necesita calibración. -Alto costo de adquisición. -Acoplamiento complejos.</p>
B	<p>La fuerza se transmite por medio de un eje o barra y la carga se aplica mediante pesas con valores previamente determinados.</p> 	<p>-Fácil mecanizado del eje. -Acoplamiento sencillo. -Fácil operación. -Bajo costo de adquisición.</p>	<p>-Valores de carga aproximados. -Se necesita varias pesas para los niveles de carga calculados.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Tabla 7-3: Alternativas del módulo 3- banco de flexión rotativa

SOLUCIONES DEL MÓDULO 3
<p>El módulo tres tiene una única solución que consta de un motor eléctrico trifásico que es el encargado de transmitir movimiento al eje motriz y conducido. Un sensor óptico incremental que tiene la función de registrar el número de ciclos hasta la fractura de la probeta y a través del PLC que se plantea usar en el banco de ensayos de torsión, se controla el encendido y apagado del motor eléctrico trifásico.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.1.3.3 Selección de la mejor alternativa para cada módulo

➤ MÓDULO 1

Principios de solución: para el sistema de sujeción de la probeta

- **Solución A:** El acople del mandril con el eje es roscado y la sujeción de la probeta se realiza con llave ajustable.

- **Solución B:** El acople del mandril con el eje es roscado y la sujeción de la probeta se lo realiza con mandril autoajutable.
- **Solución C:** El acople del mandril con el eje es cónico y la sujeción de la probeta se lo realiza con llave ajustable.

Criterios de valoración:

- **Costo:** Este criterio evalúa el costo de fabricación de cada solución.
- **Sujeción:** Con este criterio se evalúa el grado de seguridad que presenta cada solución para que la probeta no se deslice.
- **Vibración:** Se evalúa cual es la solución que mantendrá ajustada la probeta en caso de existir vibraciones.
- **Acoplamiento:** Se verá la facilidad de acoplamiento entre el mandril y los ejes conductor y conducido.

Para la correcta evaluación de los criterios antes mencionados se emplea el método de criterios ponderados. Los valores con los que se trabaja se muestran en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3: Valores para el método de criterios ponderados

1	Si el criterio o solución de la fila es superior o mejor que el de las columnas
0.5	Si el criterio o solución de la fila es equivalente al de las columnas
0	Si el criterio o solución de la fila es inferior o peor que el de las columnas

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Gusqui Martínez, Rivera Enríquez, 2018)

Considerando los códigos asignados para cada alternativa del módulo se desarrolla los criterios de valoración de las soluciones a través de ponderaciones (Tabla 9-3).

Tabla 9-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 1

Criterio	Costo	Sujeción	Vibración	Acoplamiento	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo		1	0.5	1	3.5	0.35
Sujeción	0		0.5	0	1.5	0.15
Vibración	0.5	0.5		0	2	0.2
Acoplamiento	0	1	1		3	0.3
TOTAL					10	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

A continuación, se evalúa cada criterio de la Tabla 9-3 respecto a los códigos establecidos para cada alternativa del módulo 1 (Tabla 5-3).

- El criterio costo se evalúa en la Tabla 10-3.

Tabla 10-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0.5	1	2.5	0.4167
B	0.5		1	2.5	0.4167
C	0	0		1	0.1667
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio sujeción se evalúa en la Tabla 11-3.

Tabla 11-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio sujeción

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	0.5	2.5	0.4167
B	0		0	1	0.1667
C	0.5	1		2.5	0.4167
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio vibración se evalúa en la Tabla 12-3.

Tabla 12-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio vibración

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	0.5	2.5	0.4167
B	0		0.5	1.5	0.25
C	0.5	0.5		2	0.3333
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio acoplamiento se evalúa en la Tabla 13-3.

Tabla 13-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio acoplamiento

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0.5	1	2.5	0.4167
B	0.5		1	2.5	0.4167
C	0	0		1	0.1667
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las ponderaciones de la Tabla 14-3 muestra que la primera prioridad para el módulo uno es la alternativa A.

Tabla 14-3: Tabla de conclusiones del módulo 1

	Costo	Sujeción	Vibración	Acoplamiento	Σ	Prioridad
A	0.145845	0.062505	0.08334	0.05001	0.3417	1
B	0.062505	0.025005	0.05	0.12501	0.26252	2
C	0.058345	0.062505	0.06666	0.05001	0.23752	3

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

➤ **MÓDULO 2**

Principios de solución: para el sistema de aplicación de carga

- **Solución A:** La fuerza se transmite por medio de un espárrago y la carga se aplica mediante un dinamómetro.
- **Solución B:** La fuerza se transmite por medio de un eje o barra y la carga se aplica mediante pesas con valores previamente determinados.

Criterios de valoración:

- **Costo:** Este criterio evalúa el costo de fabricación de cada solución.
- **Capacidad:** Se evalúa el rango de carga que cada solución puede admitir.
- **Montaje:** Se evalúa cual es la solución que presenta una configuración sencilla para construir e implementar.
- **Aplicación de carga:** Facilidad de aplicación de la carga.

Para la correcta evaluación de los criterios antes mencionados se emplea el método de criterios ponderados. Los valores con los que se trabaja se muestran en la Tabla 8-3.

Considerando los códigos asignados para cada alternativa del módulo se desarrolla los criterios de valoración de las soluciones a través de ponderaciones (Tabla 15-3).

Tabla 15-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 2

Criterio	Costo	Capacidad	Montaje	Aplicación de Carga	$\Sigma +1$	Ponderación
Costo		0.5	1	1	3.5	0.35
Capacidad	0.5		1	0	2.5	0.25
Montaje	0	0		0	1	0.1
Aplicación de Carga	0	1	1		3	0.3
TOTAL					10	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

A continuación, se evalúa cada criterio de la Tabla 15-3 respecto a los códigos establecidos para cada alternativa del módulo 2 (Tabla 6-3).

- El criterio costo se evalúa en la Tabla 16-3.

Tabla 16-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo

	A	B	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0	1	0.3333
B	1		2	0.6667
		TOTAL	3	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio capacidad se evalúa en la Tabla 17-3.

Tabla 17-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio capacidad

	A	B	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0	1	0.3333
B	1		2	0.6667
		TOTAL	3	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio montaje se evalúa en la Tabla 18-3.

Tabla 18-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio montaje

	A	B	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0.5	1.5	0.5
B	0.5		1.5	0.5
		TOTAL	3	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio aplicación de carga se evalúa en la Tabla 19-3.

Tabla 19-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio aplicación de carga

	A	B	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0	1	0.3333
B	1		2	0.6667
		TOTAL	3	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las ponderaciones de la Tabla 20-3 muestran que la primera prioridad para el módulo dos es la alternativa B.

Tabla 20-3: Tabla de conclusiones del módulo 2

	Costo	Capacidad	Montaje	Aplicación de Carga	Σ	Prioridad
A	0.116655	0.083325	0.05	0.09999	0.34997	2
B	0.233345	0.166675	0.05	0.20001	0.65003	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.1.4 Características del banco de flexión rotativa

Para obtener las partes constitutivas del banco de ensayo se toman las soluciones de cada módulo que se clasificaron como primera prioridad en la tabla de conclusiones, estas soluciones se complementan una con la otra para concretar el diseño conceptual del banco de ensayo (Figura 3-3).

Los mandriles para sujetar la probeta van acoplado a los ejes motriz y conducido; el ajuste de la probeta se hace con una llave ajustable que vienen con los mandriles. La carga para producir el momento flector que genera la fractura de la probeta se aplica por medio de una barra sobre la cual se colocan pesas que son previamente calculadas. Un motor eléctrico trifásico es el encargado de transmitir movimiento al eje motriz y conducido. El sensor óptico permite registrar el número de ciclos hasta la fractura de la probeta y a través un PLC, se controla el encendido y apagado del motor eléctrico trifásico.

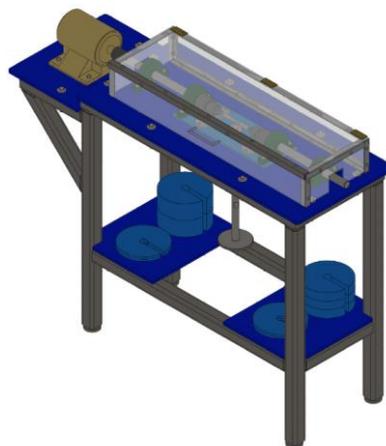


Figura 3-3. Pre diseño del banco de ensayos de flexión rotativa

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.2 Diseño del banco de flexión rotativa

Se utiliza el método deductivo para el diseño del banco de flexión rotativa, ya que una vez que se conoce la estructura general del banco de ensayos, a partir de esto se diseña los elementos mecánicos de manera cuantitativa y para ello se aplican técnicas de diseño mecánico como: el criterio de falla de la energía de distorsión (Von Mises), el método LRFD (diseño por factores de carga y resistencia) propuesto por la AISC (Instituto Americano de Construcción en Acero) con el software virtual: SAP 2000 y para la verificación de la resistencia y rigidez de ciertos elementos mecánicos se utiliza como herramienta virtual el software ANSYS que se basa en el método de elementos finitos (FEA).

3.2.1 Cálculo de la capacidad máxima de carga

A continuación, se calcula la carga máxima que se puede aplicar al sistema; es decir se determina la capacidad del banco de ensayos.

Teóricamente se considera 5 niveles de esfuerzo que se utilizan para la ejecución de los ensayos: 80%, 70%, 60%, 55% y 50% del S_{ut} .

El mayor nivel de esfuerzo del ensayo es de 80% del S_{ut} del acero ASTM A743 CA-6NM que es el material de estudio. Las propiedades de este material se encuentran en la Tabla 6-3 y se toma el valor de 910MPa para el S_{ut} .

El esfuerzo de flexión a un nivel de esfuerzo de 80% se calcula con la ecuación (41):

$$\sigma_a = 80\%S_{ut} \quad (41)$$

$$\sigma_a = 0,8 (910 MPa)$$

$$\sigma_a = 728 MPa$$

Por tratarse de un esfuerzo a flexión se tiene la ecuación (42):

$$\sigma_a = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (42)$$

Despejando el momento flector de la ecuación (42):

$$M_{MAX} = \frac{\sigma_a \pi d^3}{32}$$

$$M_{MAX} = \frac{(728 MPa)\pi(7^3)mm^3}{32}$$

$$M_{MAX} = 24 514,63 Nmm$$

Cálculo de la carga máxima aplicando la ecuación (43):

$$M_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{2} * d_{AB} \quad (43)$$

$$P_{MAX} = \frac{2 * 24\,514,63\, Nmm}{200\, mm}$$

$$P_{MAX} = 245,15\, N$$

$$P_{MAX} = 25\, kgf$$

Considerando que el material de la probeta a ensayar puede tener un tratamiento térmico con el cual el valor del Sut aumenta y con la finalidad de que el banco de pruebas tenga la capacidad de ensayar diferentes probetas, se determina que la carga máxima para el sistema sea de 50kg; lo cual implica que la probeta a ensayar debe tener un valor de Sut menor a 1818,91 MPa, el cual se obtiene con las ecuaciones anteriores.

3.2.2 *Diseño del eje de transmisión motriz y eje conducido*

Los ejes y árboles de transmisión son elementos de máquina de sección transversal circular, los cuales funcionan con elementos que se montan sobre ellos como son: ruedas dentadas, poleas, piñones para cadena, acoples, entre otros.

A continuación, se diseña el eje de transmisión motriz y el resultado será válido para el eje conducido, ya que tienen condiciones iguales de funcionamiento además de ser simétricos.

Previo al cálculo se necesita conocer que material es el más idóneo para que sea resistente a la fatiga y al desgaste. Uno de los materiales más utilizados en ejes de transmisión en la industria es el acero AISI 1018, el cual posee propiedades óptimas para esta aplicación.

Las propiedades que más se utilizan en el cálculo son la resistencia a la fluencia (Sy) y la resistencia última a la tensión (Sut), éstas y otras propiedades se pueden ver en la Tabla 4-3.

El valor del peso máximo que se aplica en el sistema de carga es de $P_{MAX} = 50\, KG$. Con este dato y teniendo en cuenta las distancias entre los apoyos, se tiene el diagrama de cuerpo libre (Gráfico 1).



Gráfico 1-3. Diagrama de cuerpo libre

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del Gráfico 1-3 se deduce las siguientes ecuaciones:

$$\sum FY = 0$$

$$R_A + R_D - 2\left(\frac{P}{2}\right) = 0$$

$$R_A + R_D = P \quad (44)$$

$$\sum MA \curvearrowright_{-} \curvearrowleft_{+} = 0$$

$$-\left(\frac{P}{2}\right)(200) - \left(\frac{P}{2}\right)(600) + R_D(800) = 0$$

$$R_D = \frac{P}{2} \quad (45)$$

Reemplazando la ecuación (45) en la ecuación (44) se tiene:

$$R_A + \frac{P}{2} = P$$

$$R_A = \frac{P}{2} \quad (46)$$

Sustituyendo los valores respectivamente en la ecuación (46), resulta:

$$R_A = 25 \text{ kgf} = 245 \text{ N} \quad \text{Y} \quad R_D = 25 \text{ kgf} = 245 \text{ N}$$

Una vez calculados los valores de las reacciones, se procede a realizar la gráfica de cortante y momento flector.

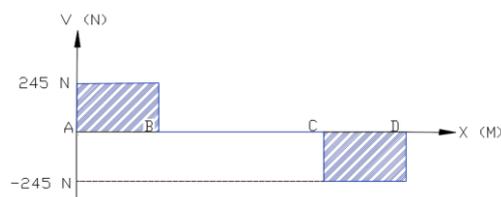


Gráfico 2-3. Diagrama de cortante

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del Gráfico 2-3 se deduce la ecuación (47) de cortante máximo:

$$V_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{2} \quad (47)$$

$$V_{MAX} = \frac{490}{2} = 245 \text{ N}$$

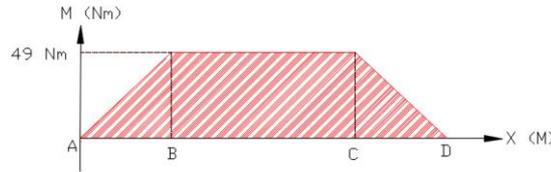


Gráfico 3-3. Diagrama de momento flector

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del Gráfico 3-3 se deduce la siguiente ecuación para el momento flector máximo:

$$M_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{2} * d_{AB}$$

$$M_{MAX} = \frac{490}{2} * 0.2 = 49 Nm$$

Con estos valores se diseña el árbol de transmisión, realizando un análisis estático y dinámico del mismo.

3.2.2.1 Análisis estático

Los esfuerzos a los que está sometida la máquina son de torsión y flexión; la torsión toma un valor casi nulo por lo que no se lo considera en los cálculos; la flexión causa un esfuerzo cortante relativamente pequeño que por tratarse de flexión pura se lo desprecia.

Se aplica la teoría de falla de Von Mises, ecuación (48).

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (48)$$

Despreciando los esfuerzos cortantes como se mencionó anteriormente se tiene:

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

Por tratarse de un esfuerzo a flexión pura se tiene la siguiente ecuación para un eje de sección transversal llena.

$$\sigma = \frac{32 M_{max}}{\pi d^3}$$

Se asume un coeficiente de seguridad $n = 2$, tomando de referencia el Anexo C.

$$\frac{32 M_{max}}{\pi d^3} = \frac{S_y}{n}$$

$$\frac{32 * 49000}{\pi d^3} = \frac{370}{2}$$

$$d = 13.921 \text{ mm}$$

Con este valor se elige un diámetro comercial de 19 mm o 3/4 IN.

3.2.2.2 Análisis dinámico

En el análisis a carga dinámica se considera un esfuerzo a flexión totalmente alternante.

El momento alternante se calcula mediante la ecuación (49):

$$M_a = \frac{M_{max} - M_{min}}{2} \quad (49)$$

$$M_a = \frac{49 - (-49)}{2} = 49 \text{ Nm}$$

Por tratarse de un esfuerzo totalmente alternante el momento flector medio es igual a cero.

Aplicando la ecuación (50) se calcula el diámetro del eje.

$$d = \left\{ \frac{16 n}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (50)$$

Se asume los siguientes valores para un pre cálculo.

$$- K_f = 1.6$$

$$- n = 2$$

$$S'_e = 0.5 * S_{ut}$$

$$S_e = k S'_e = 0.6 * 0.5 * .440 = 132 \text{ MPa.}$$

Entonces se tiene:

$$d = \left\{ \frac{16 (2)}{\pi} \left[4 \left(\frac{1.6(49000)}{132} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 22.957 \text{ mm}$$

Se selecciona un diámetro comercial aproximado de 25.4 mm o 1 IN.

Se recalcula el límite de resistencia a la fatiga con la ecuación (14) que se basa en los factores de Marín.

- Factor de Superficie: Se determina con la ecuación (15) y los valores de a y b están en la Tabla 1-2.

$$K_a = a S_{ut}^b$$

$$K_a = 1.58 (440)^{-0.085} = 0.942$$

- Factor de tamaño: Se determina mediante la ecuación (17)

$$K_b = 1.24 d^{-0.107}$$

$$K_b = 1.24 (25.4)^{-0.107} = 0.877$$

- Factor de confiabilidad: Este valor se puede obtener de la Tabla 2-2.

Para una confiabilidad de 99.9% el valor de Kc es 0.753.

- Factor de temperatura: Este valor se encuentra en la Tabla 3-2.

Para una temperatura de 20 a 250 °C el valor de Kd=1.

- Factor de efectos varios: Kg=1

El valor de K se obtiene multiplicando los factores de Marín:

$$K = 0.942 * 0.877 * 0.753 * 1 * 1$$

$$K = 0.622$$

El nuevo valor de Se es:

$$S_e = 0.622 * 0.5 * 440 \text{ MPa}$$

$$S_e = 136.84 \text{ MPa}$$

Los factores de concentración de esfuerzos por fatiga debido a la flexión y torsión también se recalculan, y para ello se hace uso de la ecuación (21).

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

Usando el Gráfico 6-2 y el Gráfico 7-2, considerando un radio de muesca igual a 0.5 mm y con la relación $\frac{D}{d} = 1.2$. Se obtiene:

$$q = 0.6 ; k_t = 2.5$$

Por lo tanto:

$$k_f = 1 + 0.6(2.5 - 1) = 1.9$$

Recalculando el diámetro con la fórmula de la ASME B 106.1M se tiene:

$$d = \left\{ \frac{16 (2)}{\pi} \left[4 \left(\frac{1.9(49000)}{136.84} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 24.02 \text{ mm}$$

Se escoge un diámetro comercial de 25.4 mm o 1 IN. Con este valor se calcula el nuevo coeficiente de seguridad utilizando la misma fórmula anterior.

$$25.4 = \left\{ \frac{16 (n)}{\pi} \left[4 \left(\frac{1.9(49000)}{136.84} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$n = 2.36$$

El diámetro es de 1 IN con un coeficiente de seguridad de 2.36, notable diferencia ante el análisis estático que dio un valor de ¾ IN; por lo tanto, se diseña los ejes motriz y conducido con el análisis dinámico.

Para facilitar el montaje y desmontaje de la probeta de ensayo, a continuación, se realiza el diseño de un estriado para acoplar fácilmente el mandril en el extremo del eje.

Para esto, con ayuda de la norma DIN 5463, y partiendo del diámetro calculado anteriormente se determinan las dimensiones tanto del cubo como del eje nervado.

Los datos de esta norma coinciden con las recomendaciones del Comité ISO TC 32, de Setiembre de 1953.

Medidas en mm

A perfil de cubo nervado B perfil de eje nervado

Los detalles no indicados se calculan convencionalmente.

Designación de un perfil de cubo nervado A de medidas nominales 8 x 46 x 34: Perfil de cubo nervado A 8 x 46 x 34 DIN 5463 ... 1)

Designación de un perfil de eje nervado B de medidas nominales 8 x 46 x 34: Perfil de eje nervado B 8 x 46 x 34 DIN 5463 ... 1)

Medidas nominales			Nº de espesores	Centrado	d ₁	d ₂	b	α [°]		f	g	h	r
Nueva abreviatura	Antigua abreviatura 1)	Antigua abreviatura 2)						exterior	interior				
6x 14x 14	11x 14x 3	11x 14x 3	3	Centrado	11	14	3	9.9	1.55	—	0.3	0.3	0.2
6x 13x 16	13x 16x 3.5	13x 16x 3.5	3.5	Centrado	13	16	3.5	12.0	1.5	0.32	0.3	0.3	0.2
6x 16x 20	16x 20x 4	16x 20x 4	4	Centrado	16	20	4	14.64	2.1	0.16	0.3	0.3	0.2
6x 18x 22	18x 22x 5	18x 22x 5	5	Centrado	18	22	5	16.7	1.95	0.45	0.3	0.3	0.2
6x 21x 25	21x 25x 5	21x 25x 5	5	Centrado interior 1)	21	25	5	19.5	1.98	1.95	0.3	0.3	0.2
6x 23x 26	23x 26x 6	23x 26x 6	6	Centrado interior 1)	23	26	6	21.3	2.3	1.34	0.3	0.3	0.2
6x 26x 32	26x 32x 6	26x 32x 6	6	Centrado interior 1)	26	32	6	23.4	2.94	1.65	0.4	0.4	0.3
6x 28x 34	28x 34x 7	28x 34x 7	7	Centrado interior 1)	28	34	7	25.9	2.94	1.20	0.4	0.4	0.3
8x 32x 38	32x 38x 6	32x 38x 6	6	Centrado interior 1)	32	38	6	29.4	3.3	0.15	0.4	0.4	0.3
8x 36x 42	36x 42x 7	36x 42x 7	7	Centrado interior 1)	36	42	7	33.5	3.01	1.02	0.4	0.4	0.3
8x 42x 48	42x 48x 8	42x 48x 8	8	Centrado interior 1)	42	48	8	39.5	2.91	2.57	0.4	0.4	0.3
8x 46x 54	46x 54x 9	46x 54x 9	9	Centrado interior 1)	46	54	9	42.7	4.1	0.86	0.5	0.5	0.5
8x 52x 60	52x 60x 10	52x 60x 10	10	Centrado interior 1)	52	60	10	48.7	4.0	2.44	0.5	0.5	0.5
8x 56x 65	56x 65x 10	56x 65x 10	10	Centrado interior 1)	56	65	10	52.2	4.74	2.5	0.5	0.5	0.5
8x 62x 72	62x 72x 12	62x 72x 12	12	Centrado interior 1)	62	72	12	57.8	5.0	2.4	0.5	0.5	0.5
10x 72x 82	72x 82x 12	72x 82x 12	12	Centrado interior 1)	72	82	12	67.4	5.43	—	0.5	0.5	0.5
10x 82x 92	82x 92x 12	82x 92x 12	12	Centrado interior 1)	82	92	12	77.1	5.4	3.0	0.5	0.5	0.5
10x 92x 102	92x 102x 14	92x 102x 14	14	Centrado interior 1)	92	102	14	87.3	5.2	4.5	0.5	0.5	0.5
10x 102x 112	102x 112x 16	102x 112x 16	16	Centrado interior 1)	102	112	16	97.7	4.9	6.3	0.5	0.5	0.5
10x 112x 125	112x 125x 18	112x 125x 18	18	Centrado interior 1)	112	125	18	106.3	6.4	4.4	0.5	0.5	0.5

1) El centrado interior no es posible para todos los perfiles en la fabricación de los perfiles de ejes nervados según el procedimiento de redondeado.
2) Estos valores se han calculado basándose en la fabricación de perfiles de ejes nervados según el procedimiento de redondeado. Otros acotaciones en página siguiente.
3) Las tolerancias para el diámetro interior d₁, diámetro exterior d₂, y anchura del nervio b se indicarán en el pedido, véase DIN 5463.
4) La antigua abreviatura no se empleará para construcciones nuevas y solo es válida para el periodo transitorio.
Acoplamiento de ejes nervados, sinopsis, DIN 5461
Acoplamiento de ejes nervados, tolerancias, DIN 5465

Figura 4-3. Dimensiones de los perfiles nervados

Fuente: Norma DIN 5463.

De acuerdo a la Figura 4-3 se selecciona un eje nervado con designación B6X21X25, cuyas dimensiones son:

$$d_1 = 21 \text{ mm}$$

$$d_2 = 25 \text{ mm}$$

$$b = 5 \text{ mm}$$

$$g = 0.3 \text{ mm}$$

$$k = 0.3 \text{ mm}$$

A continuación, se verifica la resistencia por los dos posibles modos de falla comunes en los ejes estriados, los cuales son: falla por aplastamiento de los flancos laterales y falla por corte en la base de los nervios.

- Verificación de resistencia por aplastamiento

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

La fuerza (F) aplicada está en función del torque en la ecuación (51):

$$T = F * \frac{d_m}{2} * f_c * z \quad (51)$$

Donde:

T = torque a transmitir (Nmm)

F = fuerza de aplastamiento (N)

$d_m = \text{diámetro medio} \left(\frac{d_1 + d_2}{2} \right)$ (mm)

$f_c = \text{factor de corrección (0.75 para nervios con flancos rectos)}$

Z = número de nervios

El área de aplastamiento se calcula con la ecuación (52):

$$A_a = l_{acople} * (h - (g + k)) \quad (52)$$

Donde:

$A_a = \text{área de aplastamiento (mm}^2\text{)}$

$l_{acople} = \text{longitud de acople (mm)}$

$h = \text{diferencia de altura de diámetros} \left(\frac{d_2 - d_1}{2} \right) \text{ (mm)}$

$g = \text{chaflán del perfil del eje nervado (mm)}$

$k = \text{chaflán interno en el perfil del cubo nervado (mm)}$

Una vez conocida las variables se aplica la teoría de fallas de Von Mises, y se despeja la longitud mínima de acople con la ecuación (53):

$$l_{\text{mín-acople-aplastamiento}} = \frac{2 * T * n}{d_m * f_c * z * (h - (g + k)) * S_Y} \quad (53)$$

Se asume un coeficiente de seguridad de 5, el S_y de 370 MPa y un torque de 8185 Nmm (torque que transmite el motor seleccionado).

$$l_{\text{mín-acople-aplastamiento}} = \frac{2 * (8185) * (5)}{\left(\frac{21 + 25}{2} \right) * 0.75 * 6 * \left(\left(\frac{25 - 21}{2} \right) - (0.3 + 0.3) \right) * 370}$$

$$l_{\text{mín-acople-aplastamiento}} = 1.527 \text{ mm}$$

- Verificación de resistencia por corte

$$\tau = \frac{F}{A_c}$$

La fuerza aplicada es la misma del aplastamiento, el área de corte es diferente cuya fórmula es:

$$A_c = l_{\text{acople}} * b$$

Donde:

$A_c = \text{área de corte (mm}^2\text{)}$

$l_{\text{acople}} = \text{longitud de acople (mm)}$

$b = \text{ancho del diente nervado (mm)}$

De igual manera se aplica la teoría de fallas de Von Mises, y se despeja la longitud mínima de acople:

$$l_{\text{mín-acople-corte}} = \frac{4 * (8185) * (5)}{\left(\frac{21 + 25}{2} \right) * 0.75 * 6 * (5) * 370}$$

$$l_{\text{mín-acople-corte}} = 0.855 \text{ mm}$$

De las dos longitudes calculadas, el mayor valor se utiliza como referencia de la longitud mínima de acople, cuyo valor es de 1.527 mm. Por tanto, se establece una longitud de acoplamiento de 10 mm, con lo cual se cumple las longitudes mínimas calculadas.

Por razones de diseño se escoge una longitud del perfil nervado igual a 20 mm para que se pueda deslizar el mandril sobre el eje, con esto se facilita el montaje y desmontaje de la probeta.

3.2.2.3 Análisis de rigidez de los ejes

Para el diseño del eje, aparte del análisis de resistencia mecánica donde se calcula el diámetro, también se debe hacer el análisis de rigidez, y esto consiste en el cálculo de deformaciones totales en puntos críticos del eje.

Los valores de estas deformaciones deben cumplir con los rangos establecidos en la Tabla 21-3.

Tabla 21-3: Límites de deformación recomendados

TIPOS	LÍMITES
Elementos de máquina	$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300}\right) * L$
Elementos estructurales	$\left(\frac{1}{600} - \frac{1}{700}\right) * L$

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (STIOPIN, 1968)

Dónde L = Longitud, Luz

Es responsabilidad del diseñador especificar la flexión máxima permisible de un elemento de máquina, chasis o estructura.

Utilizando las ecuaciones (54), (55) y (56) de deformación para el cálculo de una viga simple se tiene:

$$\delta_{B1} = \frac{Pa^2b^2}{3EI} \quad (54)$$

$$\delta_{B1} = \frac{245 * 200^2 * 600^2}{3 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} = 0.35099 \text{ mm}$$

$$\delta_{C1} = \frac{P * a(l - x) * (2 * l * x - x^2 - a^2)}{6 * E * I * l} \quad (55)$$

$$\delta_{C1} = \frac{245 * 200(800 - 600) * (2 * 800 * 600 - 600^2 - 200^2)}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} = 0.27299 \text{ mm}$$

$$\delta_{C2} = \frac{Pa^2b^2}{3EI}$$

$$\delta_{C2} = \frac{245 * 600^2 * 200^2}{3 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} = 0.35099 \text{ mm}$$

$$\delta_{B2} = \frac{P * b * x(l^2 - b^2 - x^2)}{6 * E * I * l}$$

(56)

$$\delta_{B2} = \frac{245 * 200 * 200(800^2 - 200^2 - 200^2)}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} = 0.27299 \text{ mm}$$

$$\delta_B = \delta_{B1} + \delta_{B2}$$

$$\delta_B = 0.35099 + 0.27299 = 0.62398 \text{ mm}$$

$$\delta_C = \delta_{C1} + \delta_{C2}$$

$$\delta_C = 0.27299 + 0.35099 = 0.62398 \text{ mm}$$

Se utiliza el software SAP 2000 para comprobar los resultados.

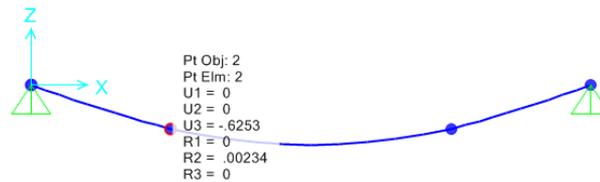


Gráfico 4-3. Deformación total en el punto B

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.



Gráfico 5-3. Deformación total en el punto C

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

El valor de las deformaciones en los puntos B y C (Gráfico 4-3 y Gráfico 5-3) es de 0.6253 mm, el cual es inferior al límite permitido de los elementos de máquina según los límites siguientes:

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300} \right) * L$$

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300}\right) * 800 \text{ mm}$$

$$(0.8 - 2.66) \text{ mm}$$

3.2.2.4 Velocidades críticas de los ejes

Como ya se dijo anteriormente en el diseño del banco de torsión a ciertas velocidades el eje puede llegar a ser inestable y las deflexiones se incrementan sin tener un límite lo que puede ocasionar un daño, por ello, es importante que las velocidades críticas sean al menos el doble de la velocidad de operación para evitar el fenómeno de resonancia. Los ejes entran en resonancia cuando su velocidad de operación es cercana a la velocidad crítica. Para este caso la velocidad de operación del motor seleccionado es de 1720 rpm.

A continuación, se realiza el cálculo de las velocidades críticas según los criterios de Rayleigh-Ritz y de Dunkerley; para ello previamente se calculan las deformaciones puntuales y totales en cada punto de interés considerando únicamente los pesos de los elementos montados sobre el eje.

En el Gráfico 6-3 se observa el esquema del eje con sus respectivos pesos y distancias. Los valores de los pesos son:

P1 y P4 = 5.88 N (Peso de la chumacera)

P2 y P3 = 1.96 N (Peso del acople)

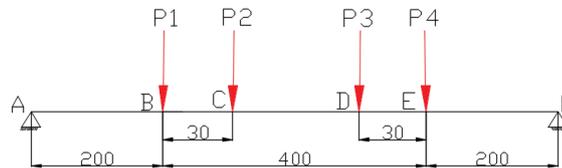


Gráfico 6-3. Diagrama de los ejes con los pesos de los elementos

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el cálculo de las deformaciones se debe tener en cuenta que el primer subíndice corresponde al punto de interés, y el segundo subíndice corresponde a los diferentes pesos.

$$\delta_{B1} = \frac{P_1 a^2 b^2}{3EI} = \frac{5.88 * 200^2 * 600^2}{3 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} = 8.4238 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{C1} = \frac{P_1 a(l-x)}{6EI} (2lx - x^2 - a^2)$$

$$\delta_{C1} = \frac{5.88 * 200 * (800 - 230)}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} (2 * 800 * 230 - 230^2 - 200^2) = 9.1729 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{D1} = \frac{P_1 a(l-x)}{6EI} (2lx - x^2 - a^2)$$

$$\delta_{D1} = \frac{5.88 * 200 * (800 - 570)}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} (2 * 800 * 570 - 570^2 - 200^2) = 7.3610 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{E1} = \frac{P_1 a(l-x)}{6EI} (2lx - x^2 - a^2)$$

$$\delta_{E1} = \frac{5.88 * 200 * (800 - 600)}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} (2 * 800 * 600 - 600^2 - 200^2) = 6.5518 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{B2} = \frac{P_2 b x}{6EI} (l^2 - b^2 - x^2)$$

$$\delta_{B2} = \frac{1.96 * 370 * 200}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} (800^2 - 370^2 - 200^2) = 3.3411 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{C2} = \frac{P_2 a^2 b^2}{3EI} = \frac{1.96 * 230^2 * 570^2}{3 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} = 3.3514 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{D2} = \frac{P_2 a(l-x)}{6EI} (2lx - x^2 - a^2)$$

$$\delta_{D2} = \frac{1.96 * 230 * (800 - 570)}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} (2 * 800 * 570 - 570^2 - 230^2) = 2.7552 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\delta_{E2} = \frac{P_2 a(l-x)}{6EI} (2lx - x^2 - a^2)$$

$$\delta_{E2} = \frac{1.96 * 230 * (800 - 600)}{6 * 205000 * 20.43 \times 10^3 * 800} (2 * 800 * 600 - 600^2 - 230^2) = 2.4537 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Por simetría se producen las siguientes igualdades en las deformaciones de cada punto de interés:

$$\delta_{B3} = \delta_{E2}$$

$$\delta_{C3} = \delta_{D2}$$

$$\delta_{D3} = \delta_{C2}$$

$$\delta_{E3} = \delta_{B2}$$

$$\delta_{B4} = \delta_{E1}$$

$$\delta_{C4} = \delta_{D1}$$

$$\delta_{D4} = \delta_{C1}$$

$$\delta_{E4} = \delta_{B1}$$

Las deformaciones totales en los puntos de interés son:

$$\delta_B = \delta_{B1} + \delta_{B2} + \delta_{B3} + \delta_{B4}$$

$$\delta_B = 8.4238 \times 10^{-3} + 3.3411 \times 10^{-3} + 2.4537 \times 10^{-3} + 6.5518 \times 10^{-3} = 0.02077 \text{ mm}$$

$$\delta_C = \delta_{C1} + \delta_{C2} + \delta_{C3} + \delta_{C4}$$

$$\delta_C = 9.1729 \times 10^{-3} + 3.3514 \times 10^{-3} + 2.7552 \times 10^{-3} + 7.3610 \times 10^{-3} = 0.02264 \text{ mm}$$

Por simetría igualmente se tiene:

$$\delta_C = \delta_D$$

$$\delta_B = \delta_E$$

Cálculo de las velocidades críticas por el criterio de Rayleigh Ritz:

$$\eta_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sum P * \delta}{\sum P * \delta^2}}$$

$$\eta_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.8(2x(5.88x2.077x10^{-5}) + 2x(1.96)(2.264x10^{-5}))}{2x(5.88)(2.077x10^{-5})^2 + 2x(1.96)(2.264x10^{-5})^2}}$$

$$\eta_c = 6482.1232 \text{ rpm}$$

Cálculo de las velocidades críticas por el criterio de Dunkerley:

$$\eta_1 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.81}{8.4238 \times 10^{-6}}} = 10299.83805 \text{ Rpm}$$

$$\eta_2 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.81}{3.3514 \times 10^{-6}}} = 16329.43984 \text{ Rpm}$$

$$\eta_3 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.8}{3.3514 \times 10^{-3}}} = 16329.43984 \text{ Rpm}$$

$$\eta_4 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.8}{8.4238 \times 10^{-6}}} = 10299.83805 \text{ Rpm}$$

$$\frac{1}{\eta_c^2} = \frac{1}{\eta_1^2} + \frac{1}{\eta_2^2} + \frac{1}{\eta_3^2} + \frac{1}{\eta_4^2}$$

$$\eta_c = 6160.06473 \text{ rpm}$$

Los valores de las velocidades críticas en el eje varían de 6160.06473 Rpm a 6482.1232 Rpm; al comparar con la velocidad de operación del motor de 1720 Rpm, se determina que el eje no entrará en resonancia.

3.2.3 Cálculo de la potencia del motor

La potencia requerida en el motor se calcula en función de las fuerzas que se oponen al movimiento de los ejes, en este caso los únicos elementos que generan oposición son los rodamientos; por lo tanto, el torque que se produce en cada rodamiento se calcula de acuerdo a la ecuación (57):

$$T = \mu * F * \frac{d}{2} \quad (57)$$

Donde:

- T: Par torsor en Nm
- μ : Coeficiente de fricción del rodamiento.
- F: Fuerza en el rodamiento.
- d: diámetro interno del rodamiento en m.

$$T = 0.0015 * 245 * \frac{0.0254}{2}$$

$$T = 0.00466 \text{ N.m}$$

Este torque se produce en cada rodamiento, de tal manera que al ser 4 rodamientos se tiene un torque total de:

$$T_{total} = 4 * (0.00466) \text{ N.m} = 0.01864 \text{ Nm}$$

Con este dato se procede al cálculo de la potencia del motor:

$$P = T * w$$

Dónde:

- P = Potencia en W
- T = par torsor en Nm
- W = velocidad angular en $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$

Considerando la máxima velocidad angular de $1720 \text{ rpm} = 183.259 \text{ rad/s}$

$$P = 0.0187 * 183.259 = 3.427 \text{ W}$$

$$P = 0.0045 \text{ HP}$$

Con el dato de potencia y velocidad se selecciona el motor eléctrico, el cual se encuentra disponible en la bodega de la empresa con las siguientes características que se muestran en la Tabla 22-3.

Tabla 22-3: Características principales del motor eléctrico SUPERLINE

Tipo de Motor	Motor de Inducción Trifásico
Potencia	1.5 KW
Velocidad	1720 RPM
Frecuencia	60 HZ
# Polos	4

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Manual SUPERLINE

3.2.4 Selección de rodamientos

El banco de ensayos consta de 4 chumaceras, de las cuales dos son de soporte y dos son de pivote. A estas chumaceras se les conoce como unidad o soportes de rodamientos tipo Y.

En la selección de rodamientos los parámetros más importantes son:

- El diámetro del eje: 25.4 mm
- Fuerza radial: 245 N
- Velocidad de rotación: 1720 rpm

Se calcula la vida nominal L_{10h} de acuerdo a las diferentes clases de máquinas. (Ver Anexo D)

$$L_{10h} = \frac{\text{Límite inferior} + \text{Límite Superior}}{2}$$

$$L_{10h} = \frac{8000 + 12000}{2} = 10\ 000 \text{ h}$$

A continuación, se selecciona el tamaño del rodamiento utilizando la ecuación (58) de la vida útil de acuerdo al catálogo SKF (Anexo E):

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (58)$$

Dónde:

- L_{10} = Vida nominal básica (con una confiabilidad del 90 %).

- L_{10h} = Vida nominal SKF (confiabilidad del 90 %) (horas de funcionamiento).
- C = Capacidad de carga dinámica básica(KN).
- P = Carga dinámica equivalente de rodamiento(KN).
- n = velocidad de giro (rpm).
- ρ = exponente de la ecuación de la vida útil.

para rodamiento de bolas = 3

$$\text{para rodamientos de rodillos} = \frac{10}{3}$$

De la ecuación (58) se despeja la capacidad de carga dinámica:

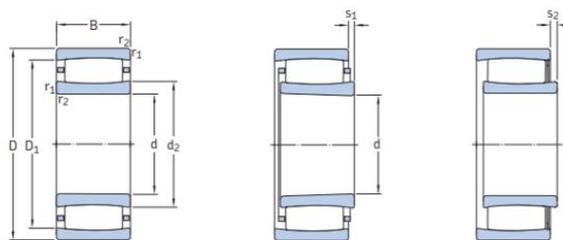
$$C = P * \left(\frac{(L_{10h} * 60 * n)}{10^6} \right)^{\left(\frac{3}{10}\right)}$$

$$C = 0.245 \text{ KN} * \left(\frac{(10000 * 60 * 1720)}{10^6} \right)^{\left(\frac{3}{10}\right)}$$

$$C = 1.9646 \text{ KN} = C'$$

Con el valor calculado de la carga dinámica teórica C' , se selecciona en el catálogo SKF con un valor de carga dinámica mayor.

9.1 Rodamientos de rodillos toroidales CARB d 25–55 mm



Agujero cilíndrico

Agujero cónico

Completamente lleno de rodillos

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica dinámica C	Carga límite de fatiga P _u	Velocidades nominales Velocidad de referencia	Masa	Designaciones			
d	D	B					Rodamiento con agujero cilíndrico	agujero cónico		
mm			kN	kN	r. p. m.	kg	-			
25	52	18	44	40	4,55	13 000	18 000	0,17	* C 2205 TN9 ¹⁾	* C 2205 KTN9 ²⁾
	52	18	50	49	5,7	=	7 000	0,18	* C 2205 KV ²⁾	* C 2205 KV ²⁾
30	55	45	134	180	21,2	=	3 200	0,49	* C 6006 V	=
	62	20	69,5	62	7,2	11 000	15 000	0,28	* C 2206 TN9	* C 2206 KTN9
	62	20	76,5	71	8,3	=	6 000	0,29	* C 2206 V	* C 2206 KV
35	72	23	83	80	9,3	9 500	13 000	0,44	* C 2207 TN9	* C 2207 KTN9
	72	23	95	96	11,2	=	5 300	0,46	* C 2207 V	* C 2207 KV
40	62	22	76,5	100	11,8	=	4 300	0,25	* C 4908 V	* C 4908 K30V
	62	30	104	143	16	=	3 400	0,35	* C 5908 V ¹⁾	=
	62	40	122	180	21,2	=	2 800	0,45	* C 4908 V ¹⁾	=
	80	23	90	86,5	10,2	8 000	11 000	0,51	* C 2208 TN9	* C 2208 KTN9
	80	23	102	104	12,2	=	4 500	0,53	* C 2208 V	* C 2208 KV

Figura 5-3. Rodamientos de rodillos toroidales CARB (SKF pág: 980)

Fuente: (Catálogo SKF).

En la Figura 5-3 se puede observar que, para el diámetro de eje de 25 mm, la carga dinámica C es igual a 44 KN, por lo tanto es mayor a la carga dinámica teórica calculada anteriormente. De esta forma el Rodamiento seleccionado es C 2205 TN9.

Con este nuevo dato se calcula la vida nominal del rodamiento.

$$L_{10} = \left(\frac{44000 N}{245 N} \right)^3 = 5\,792\,416.425$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10} = \frac{10^6}{60 * 1720} * 5\,792\,416.425$$

$$L_{10h} = 56\,128\,066.13 \text{ h}$$

Por lo tanto, se selecciona 4 rodamientos del catálogo SKF con la siguiente designación C 2205 TN9.

Para los rodamientos anteriores a continuación se seleccionan soportes apropiados a partir de un catálogo de la misma marca SKF para que no haya ningún problema en las dimensiones al momento de montar los rodamientos sobre los soportes.

Primero se selecciona la serie del soporte, para este caso es la serie SNL 2, 3, 5 y 6 ya que el diámetro del eje es de 25.4 mm y se encuentra dentro del rango de 20 a 30 mm como se puede observar en la Figura 6-3.

SKF bearing housings – overview, selection and application recommendations

Split plummer (pillow) block housings			
			
Series	SNL 2, 3, 5 and 6	SE 2, 3, 5 and 6	SNLN 30
Chapter	2	3	4
Bearing types			
Self-aligning ball bearing	✓	✓	-
Spherical roller bearing	✓	✓	✓
CARB bearing	✓		
Shaft diameter range			
from [mm]	20 and 60	30	110
to [mm]	30 and 160	75	280
from [in.]	3/4 and 2 3/16	1 1/8	-
to [in.]	1 and 5 1/2	2 1/2	-
Shaft-bearing combination			
Bearing on an adapter sleeve	✓	✓	✓
Bearing on a withdrawal sleeve	✓	✓	✓
Bearing on a cylindrical seat	✓	✓	✓
Sealing solutions			
Lip seal	✓	✓	✓ ¹⁾
Radial shaft seal	-	-	-
V-ring seal	✓	✓	✓ ¹⁾
Felt seal	✓	✓	✓ ¹⁾
Labyrinth seal	✓	✓	✓
Taconite heavy-duty seal	✓	✓	✓
Multi-seal	-	-	-

Figura 6-3. Soporte de rodamientos SKF (Pág 30)

Fuente: (Catálogo SKF).

En función del diámetro del eje y de la designación del rodamiento se selecciona el soporte o carcasa para los rodamientos como se muestra en la Figura 7-3.

Shaft diameter d_s	Housing	Appropriate parts Bearing ¹⁾	Locating ring ⁴⁾	Seals	End cover	Width incl. seals A_2
mm	-	-	-	-	-	mm
25	SNL 205	1205 ETN9	FRB 5/52	TSN 205 S	ASNH 505-605	90
		2205 ETN9	FRB 3.5/52	TSN 205 ND		140
		22205 E B52-2205-2CS C 2205 TN9	FRB 3.5/52 FRB 1/52 FRB 3.5/52			
	SNL 505	1205 ETN9 2205 ETN9 22205 E B52-2205-2CS C 2205 TN9	FRB 5/52 FRB 3.5/52 FRB 3.5/52 FRB 1/52 FRB 3.5/52	2 FS 170	ASNH 505	67
	SNL 206-305	1305 ETN9 21305 CC 2305 ETN9	FRB 7.5/62 FRB 7.5/62 FRB 4/62	TSN 305 A TSN 305 S TSN 305 ND	ASNH 507-606	77 89 140

Figura 7-3. Soporte SNL para rodamientos en un asiento cilíndrico (Pág 120)

Fuente: (Catálogo SKF).

Por lo tanto, se selecciona 4 carcasas del catálogo soporte de rodamientos SKF con la siguiente designación SNL 205.

3.2.5 Selección del acople

Los datos a considerar en la selección del acople son la potencia y la velocidad, con lo cual se calcula el par nominal a transmitir mediante la ecuación (59):

$$C = \frac{7160 H}{RPM} \quad (59)$$

$$C = \frac{7160 (2 HP)}{1720} = 8.32 Nm$$

A este valor se lo corrige de acuerdo a un factor de servicio que a su vez está en función de tres factores que relacionan el tipo de máquina, frecuencia de arranque y horas diarias de funcionamiento. (Ver Anexo F).

$k_1 = 1$; máquina motriz y receptora.

$k_2 = 1.2$; frecuencia de arranque.

$k_3 = 1$; horas de funcionamiento diario.

$k = k_1 * K_2 * k_3 = 1 * 1.2 * 1 = 1.2$.

El nuevo par nominal corregido es:

$$C_c = 1.2 * 8.32 = 9.98 Nm$$

Con este valor seleccionamos en el catálogo LOVEJOY (Anexo G) el acople L-090, el cual posee un par nominal de 16.3 Nm.

3.2.6 Selección de mandriles

En base al pre diseño establecido, la sujeción de la probeta se lo hace con dos mandriles con llave ajustable marca ingco, con capacidad de abertura de 3 a 16 mm, de tres mordazas y rosca para acoplamiento de ½ IN – 20 UNF

3.2.7 Diseño de la barra de carga

La aplicación de la carga se hace por medio de una sola barra de acero AISI 1018 en la cual se ubican las respectivas pesas para provocar la fractura en la probeta de ensayo; por tal razón esta barra está sometida a una fuerza máxima de tracción de 490 N. El modelado de la misma se la realiza en el software SOLIDWORKS (Figura 8-3) con sus respectivas dimensiones y tolerancias detalladas en el plano.

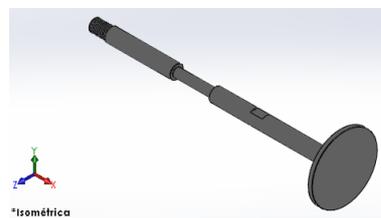


Figura 8-3. Modelado de la barra de carga

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Como se dijo anteriormente la barra de carga soporta una carga axial máxima de 490 N, la aplicación de la misma es en el área roja ya que sobre ella se colocan las pesas (Figura 9-3).



Figura 9-3. Aplicación de fuerzas en la barra de carga

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Para analizar los esfuerzos y la deformación se utiliza el software ANSYS, el cual ofrece resultados muy confiables a partir de un mallado adecuado. En la Figura 10-3 se puede apreciar una malla aceptable con un valor promedio de 0.88 en el tipo de mallado de Element Quality.

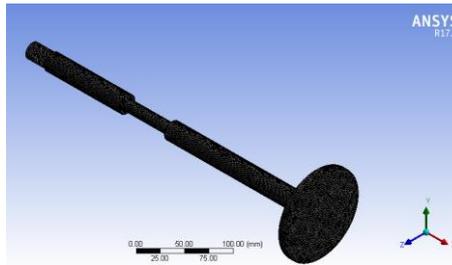


Figura 10-3. Mallado de la barra de carga

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

El valor del esfuerzo equivalente de Von-Mises es de 18.276 MPa (Figura 11-3), al comparar este valor con el esfuerzo de flexión (S_y) del acero AISI 1018 se determina el coeficiente de seguridad que debe ser mayor a uno.

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{equiv}}$$

$$n = \frac{370 \text{ MPa}}{18.276 \text{ MPa}} = 20.24$$



Figura 11-3. Esfuerzo equivalente de Von Mises

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Para determinar la rigidez de la barra de carga se analiza la deformación máxima (Figura 12-3). El resultado de deformación que proporciona el software es 0.0086 mm y se considera aceptable.



Figura 12-3. Deformación máxima en la barra de carga

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.2.8 Diseño de la placa de fuerza

La función de esta placa es transmitir la fuerza mediante la barra de carga que se encuentra enroscada en ella provocando el momento flector en la probeta. Para ello es necesario conocer todos los pesos que soporta la placa.

El material de la placa es acero estructural ASTM A-36, posee las siguientes propiedades:

$$S_y = 250 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 550 \text{ MPa}$$

$$\rho = 7.85 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

Los pesos de los elementos se hallan usando la ecuación (60):

$$w = \rho V g \quad (60)$$

- Peso propio de la placa

$$w = \rho lae$$

Las medidas de la placa de fuerza se pueden observar en la Figura 13-3.

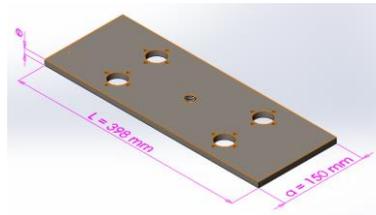


Figura 13-3. Dimensiones de la placa de fuerza

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Asumimos un valor de espesor referencial de $\frac{1}{4}$ IN (6.35 mm) para calcular un peso propio aproximado, posteriormente este valor de espesor será recalculado.

$$W_{\text{peso propio}} = (7.8 \times 10^{-6}) \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} * (398 * 150 * 6.35) \text{ mm}^3$$

$$W_{\text{peso propio}} = 2.957 \text{ kg}$$

- Peso de los ejes guía

Los ejes guía cumplen la función de facilitar el deslizamiento de la placa de fuerza cuando se aplique la carga hacia abajo. En la Figura 14-3 se puede observar el modelado del eje guía.

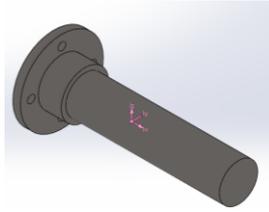


Figura 14-3. Modelado del eje guía

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La masa del eje guía se obtiene a través del software Solidworks en la opción de propiedades físicas, el cual da un valor de 564.30343 gramos (0.5643 Kg), al ser 4 ejes guías se tiene:

$$W_{\text{peso ejes guías}} = 4 * 0.56 \text{ kg} = 2.2572 \text{ kg}$$

- Peso de la barra de carga

De la misma manera, la masa de la barra de carga se obtiene del software Solidworks.

La masa de la barra de carga es de 1709.45 gramos (1.709 Kg)

$$W_{\text{peso barra de carga}} = 1.709 \text{ Kg}$$

- Peso de la carga máxima

El valor de carga máxima es de 50kg.

$$W_{\text{Carga Máxima}} = 50 \text{ Kg}$$

- Peso total

El peso total que soporta la placa de fuerza es:

$$W_{TPF} = (W_{\text{peso propio}} + W_{\text{peso ejes guías}} + W_{\text{peso barra de carga}} + W_{\text{carga máxima}}) * g$$

$$W_{TPF} = (2.957 + 2.2572 + 1.709 + 50) \text{ kg} * g$$

$$W_{TPF} = 56.9232 \text{ kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 557.847 \text{ N}$$

Con el valor calculado del peso total de la placa de fuerza (W_{TPF}) se procede a realizar el diagrama de cuerpo libre de la placa como se muestra en el Gráfico 7-3.

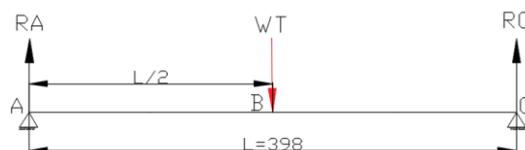


Gráfico 7-3. Diagrama de cuerpo libre de la placa de fuerza

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del Gráfico 7-3 se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\sum FY = 0$$

$$R_A + R_C = W_T$$

$$\sum MA \curvearrowright \curvearrowleft = 0$$

$$R_C(398) - 557.847\left(\frac{398}{2}\right) = 0$$

$$R_C = 278.9235 \text{ N}$$

$$R_A = 278.9235 \text{ N}$$

Con los valores de las reacciones se tiene el diagrama de cortante y momento flector (Gráfico 8-3).

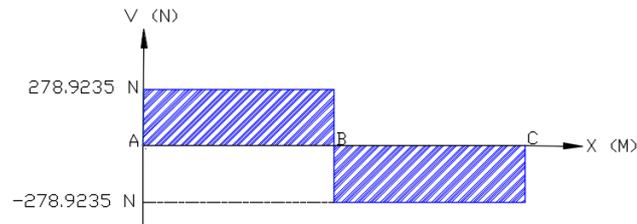


Gráfico 8-3. Diagrama de cortante de la placa de fuerza

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Como se puede observar en el Gráfico 8-3 la fuerza cortante máxima da un valor de 278.9235 N.

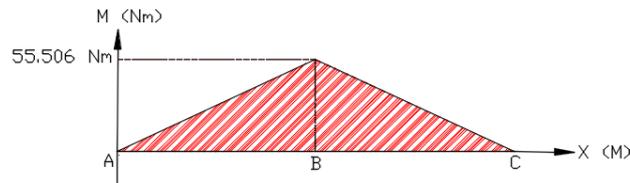


Gráfico 9-3. Diagrama de momento flector de la placa de fuerza

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 9-3 el momento flector máximo es de 55.506 Nm, con este valor se procede al cálculo del espesor de la placa utilizando la fórmula de la teoría de falla de Von Mises, ecuación (48).

$$\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} = \frac{S_y}{n}$$

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

$$\frac{M_{MAX} * C}{I} = \frac{Sy}{n}$$

$$6 * \frac{M_{MAX}}{b * e^2} = \frac{Sy}{n}$$

$$e = \sqrt{6 * \frac{M_{MAX} * n}{Sy * b}}$$

Asumiendo un factor de seguridad de $n=6$, se tiene:

$$e = \sqrt{6 * \frac{55506 * 6}{250 * 150}}$$

$$e = 7.29 \text{ mm}$$

Con el espesor de 7.29 mm se establece usar una plancha con un espesor de 10 mm que es la de menor espesor que se encuentra en la bodega de la empresa.

Con el nuevo espesor de 10 mm se calcula el coeficiente de seguridad:

$$n = \frac{e^2 Sy b}{6 M_{MAX}}$$

$$n = \frac{10^2 * 250 * 150}{6 * 55506}$$

$$n = 11.26$$

3.2.8.1 Análisis de rigidez de la placa de fuerza

Este análisis se lo realiza en el software SAP 2000, dando como resultado la deformación máxima en la mitad de la placa con un valor de 0.3088 mm como se puede observar en el Gráfico 10-3.

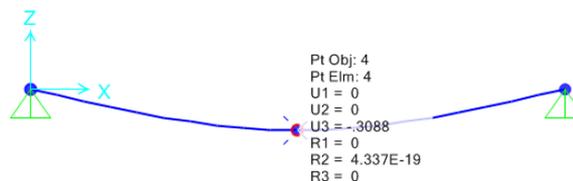


Gráfico 10-3. Deformación máxima de la placa de fuerza

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

El valor de 0.3088 mm se compara con los límites de deformación para elementos de máquina, como se muestra a continuación:

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300}\right) * L$$

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300}\right) * 398 \text{ mm}$$

$$(0.398 - 1.326) \text{ mm}$$

Se observa que la deformación máxima de 0.3088 es menor al límite calculado de 1.326 mm. Entonces se concluye que la placa seleccionada es correcta.

3.2.9 *Diseño de la placa principal*

Sobre la placa principal van montados todos los componentes mecánicos, por tal motivo se debe conocer cada uno de los pesos que soporta la placa incluyendo el peso propio.

Los pesos de los elementos se calculan usando la ecuación (60):

- Peso propio de la placa

Las dimensiones de la placa principal son 950x420, se asume un espesor de ¼ IN (6.35 mm). De igual manera este espesor debe ser recalculado.

$$w = (7.8 \times 10^{-6}) \frac{kg}{mm^3} * (950 * 420 * 6.35) mm^3$$

$$w = 19.76 \text{ kg}$$

- Peso eje motriz

El diámetro y longitud del eje son: $d = 25.4 \text{ mm}$ $L = 370 \text{ mm}$

$$W_{e.motriz} = \rho * (\pi * r^2 * l)$$

$$W_{e.motriz} = 7.8 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} * (\pi * 12.7^2 * 370) mm^3$$

$$W_{e.motriz} = 1.46 \text{ kg}$$

- Peso eje conducido

El diámetro y longitud del eje son: $d = 25.4 \text{ mm}$ $L = 350 \text{ mm}$

$$W_{e.conducido} = 7.8 \times 10^{-6} \frac{kg}{mm^3} * (\pi * 12.7^2 * 350) mm^3$$

$$W_{e.conducido} = 1.38 \text{ kg}$$

- Peso de las chumaceras

El peso de las chumaceras se obtiene a partir de una balanza digital.

$$W_{chumacera} = 0.60 \text{ Kg}$$

$$W_{chumaceras} = 4 * 0.60 \text{ Kg} = 2.4 \text{ Kg}$$

- Peso de los mandriles

De igual manera el peso de los mandriles se obtiene con la balanza digital.

$$W_{mandril} = 0.40 \text{ kg}$$

$$W_{mandriles} = 2 * 0.40 \text{ Kg} = 0.80 \text{ Kg}$$

- Peso total de la placa de fuerza recalculado

Para este análisis al peso total de la placa de fuerza se resta la carga máxima de 50 kg, ya que para la placa principal la carga máxima representa una carga puntual; en cambio, todas las demás cargas son distribuidas a lo largo de la longitud de la placa principal.

El peso total de la placa de fuerza recalculado (W_{TPFR}) es:

$$W_{TPFR} = W_{TPF} - W_{carga\ máxima}$$

$$W_{TPFR} = (56.9232 - 50) \text{ kg} = 6.923 \text{ kg}$$

- Peso de los ángulos de soporte para la placa guía

Estos ángulos están soldados en la parte posterior de la placa principal, con la finalidad de ser un apoyo para placa guía. El peso se lo obtiene del modelado en Solidworks (Figura 15-3).

$$W_{\text{ángulo soporte}} = 0.86747 \text{ kg}$$

$$W_{\text{ángulos soportes}} = 2 * 0.86747 \text{ kg} = 1.735 \text{ kg}$$

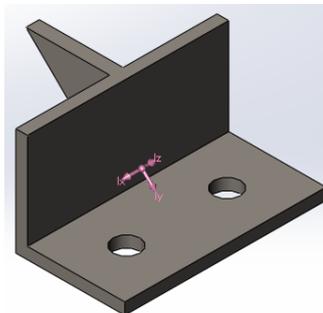


Figura 15-3. Modelado del ángulo de soporte

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- Peso de la placa guía

La placa ayuda a que se deslicen los ejes guía de la placa de fuerza para evitar movimientos bruscos de la misma e impedir vibraciones.

El peso se obtiene del modelado de la placa guía en Solidworks (Figura 16-3).

$$W_{p.guía} = 6.451 \text{ kg}$$

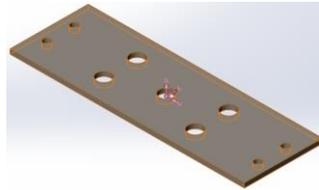


Figura 16-3. Modelado de la placa guía

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- Peso de los bocines

Los bocines se diseñan para que los ejes guía puedan deslizarse sobre estos con un ajuste deslizante.

El peso se obtiene del modelado en Solidworks (Figura 17-3).

$$W_{bocín} = 0.07587 \text{ kg}$$

$$W_{bocines} = 4 * 0.07587 \text{ kg} = 0.3035 \text{ kg}$$

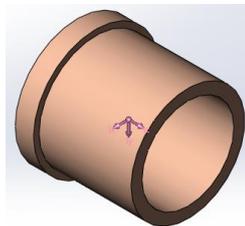


Figura 17-3. Modelado del bocín para ejes guía

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- Peso total distribuido en la placa principal

El peso total distribuido, es igual a la sumatoria de todos los pesos de los componentes mecánicos dividido para la longitud de la placa, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$W_{TD} = \frac{w + W_{e.motriz} + W_{e.conducido} + W_{chumaceras} + W_{mandriles} + W_{TPFR} + W_{ángulos\ soporte} + W_{p.guía} + W_{bocines}}{L}$$

$$W_{TD} = \frac{19.76 + 1.46 + 1.38 + 2.4 + 0.80 + 6.923 + 1.735 + 6.451 + 0.3035}{950}$$

$$W_{TD} = \frac{(19.76 + 1.46 + 1.38 + 2.4 + 0.80 + 6.923 + 1.735 + 6.451 + 0.3035) \text{ kg}}{950 \text{ mm}}$$

$$W_{TD} = 0.04338 \frac{kg}{mm}$$

Para el diseño de la placa principal se considera el peso total distribuido y la carga máxima de 50 kgf como una fuerza puntual. En el Gráfico 11-3 se muestra el diagrama de cuerpo libre, representando estas dos cargas.

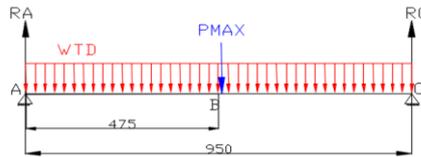


Gráfico 11-3. Diagrama de cuerpo libre de la placa principal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del diagrama de cuerpo libre se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\sum MA \curvearrowright - \curvearrowleft = 0$$

$$R_C(950) - 0.04338 \frac{kg}{mm} * (950mm) * \left(\frac{950}{2} mm\right) - 50 kg * \left(\frac{950}{2} mm\right) = 0$$

$$R_C = 45.6055 kg$$

$$\sum FY = 0$$

$$R_A + R_C = W_{TD} * L + P_{MAX}$$

$$R_A + R_C = 0.04338 \frac{kg}{mm} * (950mm) + 50kg$$

$$R_A + R_C = 91.211kg$$

$$R_A = 45.6055kg$$

Para la gráfica de cortante y momento flector es necesario conocer los valores en los puntos principales de interés. Para ello se analizan las fuerzas cortantes en los tramos AB Y AC (Gráfico 12-3 y Gráfico 13-3).

Tramo AB

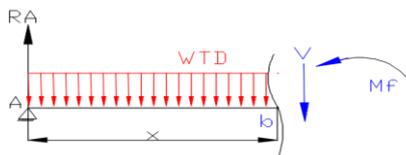


Gráfico 12-3. Diagrama de cuerpo libre del tramo AB

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del Gráfico 12-3 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum FY = 0$$

$$R_A - V - WTD * X = 0$$

$$V = R_A - WTD * X$$

$$V = 45.6055 \text{ kg} - 0.04338 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} * X$$

Límites.

$$X = 0 \rightarrow V = R_A = 45.6055 \text{ kg} = 446.9339 \text{ N}$$

$$X = 475 \rightarrow V = 25 \text{ kg} = 245 \text{ N}$$

Tramo AC

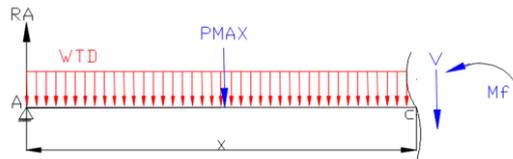


Gráfico 13-3. Diagrama de cuerpo libre del tramo AC

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del diagrama de cuerpo libre del tramo AC mostrado en el Gráfico 13-3 se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\sum FY = 0$$

$$R_A - V - WTD * X - P_{MAX} = 0$$

$$V = R_A - WTD * X - P_{MAX}$$

$$V = 45.6055 \text{ kg} - 0.04338 \frac{\text{kg}}{\text{mm}} * X - 50 \text{ kg}$$

Límites.

$$X = 475 \rightarrow V = -25 \text{ kg} = -245 \text{ N}$$

$$X = 950 \rightarrow V = -45.6055 \text{ kg} = -446.9339 \text{ N}$$

Con estos valores calculados se grafica el diagrama de fuerzas cortantes:

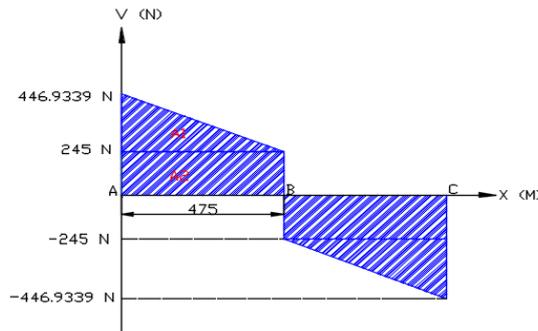


Gráfico 14-3. Diagrama de cortante de la placa principal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

El momento flector máximo se calcula sumando las dos áreas bajo la curva del diagrama de cortante Gráfico 14-3:

$$M_{MAX} = A_1 + A_2$$

$$M_{MAX} = A_1 + A_2$$

$$M_{MAX} = \frac{1}{2} (475)N * (446.9339 - 245)mm + (475mm * 245N)$$

$$M_{MAX} = 164334.3013 \text{ Nmm} = 164.334 \text{ Nm}$$

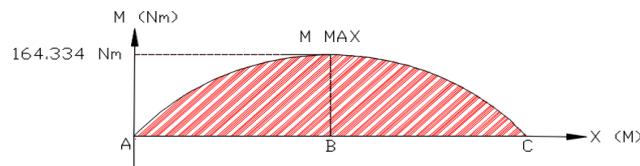


Gráfico 15-3. Diagrama de momento flector de la placa principal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Con el momento flector máximo de 164.334 Nm (Gráfico 15-3), se calcula el espesor de la placa utilizando la fórmula de la teoría de falla de Von Mises, ecuación (48).

$$\sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} = \frac{Sy}{n}$$

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

$$\frac{M_{MAX} * C}{I} = \frac{Sy}{n}$$

$$6 * \frac{M_{MAX}}{b * e^2} = \frac{Sy}{n}$$

Se asume un factor de seguridad $n = 6$, y despejando el espesor se tiene:

$$e = \sqrt{6 * \frac{M_{MAX} * n}{S_y * b}}$$

Reemplazando los respectivos valores se tiene:

$$e = \sqrt{6 * \frac{164334.3013 \text{ N mm} * 6}{250 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 420 \text{ mm}}}$$

$$e = 7.506 \text{ mm}$$

En base al espesor de 7.506 mm se establece usar una plancha de un espesor de 10 mm que es la de menor espesor que se encuentra en la bodega de la empresa.

Con el nuevo espesor seleccionado de 10 mm se calcula el coeficiente de seguridad:

$$n = \frac{e^2 S_y b}{6 M_{MAX}}$$

$$n = \frac{10^2 * 250 * 420}{6 * 164334.3013}$$

$$n = 10.649$$

3.2.9.1 *Análisis de rigidez de la placa principal*

Este análisis de deformaciones se realiza con la ayuda del software ANSYS (Figura 18-3). Siguiendo el debido procedimiento para el análisis de la placa principal, se observa el área de color rojo donde se produce la deformación máxima 0.0035206 mm.

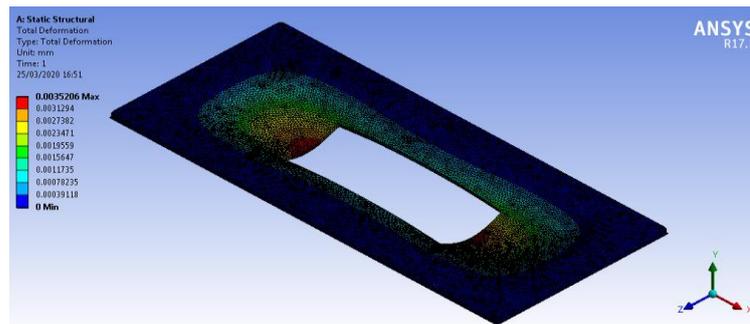


Figura 18-3. Análisis de deformación de la placa principal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Calculando los límites de deformación recomendados para elementos de máquina, en función de la longitud de la placa se tiene:

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300}\right) * L$$

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300}\right) * 950 \text{ mm}$$

$$(0.95 - 3.166) \text{ mm}$$

La deformación máxima obtenida con el software es inferior a los límites recomendados, con lo cual se asegura que la placa de 10 mm de espesor es rígida.

Para terminar con el diseño de las placas del banco de pruebas de flexión, es importante indicar que la placa principal es el elemento que soporta la mayor parte de cargas, por lo que se considera innecesario hacer el diseño de la placa base del motor ya que se utilizará una placa del mismo espesor de la placa principal y únicamente debe soportar 10 kg que es el peso en masa del motor eléctrico.

3.2.10 *Diseño de la estructura del banco de ensayos*

Usando el software SAP re realiza el análisis de la estructura, las cargas que actúan sobre la misma fueron calculadas anteriormente para el diseño de la placa principal, siendo la carga total 881.114 N. A este número se suma un cierto valor de carga como factor de seguridad, aproximando la carga total a un valor de 1000 N, esta fuerza se divide para 2 y se distribuye en los marcos rígidos y en las vigas longitudinales como se muestra en la Figura 19-3; por otro lado actúa una carga de 87.906 N como resultado del peso de las placas que se encuentran en la parte inferior de la estructura, y así mismo a este número se suma una carga asegurando un factor de seguridad, aproximando este valor a 100 N.

Las fuerzas que actúan en la parte sobresalida de la estructura (lado izquierdo) corresponden al peso del motor, con un valor de 98 N, la cual se divide para dos como se muestra en la siguiente figura.

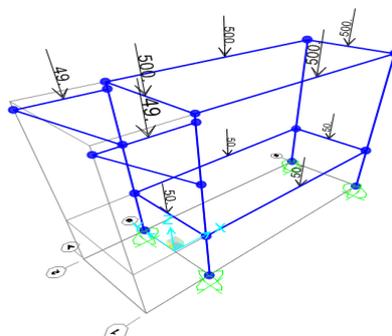


Figura 19-3. Aplicación de cargas en la estructura del banco de ensayos de flexión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La estructura se diseña con tubo cuadrado de 50x50x3 mm y se realiza el análisis de resistencia con el software, el mismo da como resultado una escala de colores que indica la demanda/capacidad de la estructura, el cual debe ser menor a 1. Al observar un color celeste en la Figura 20-3 se identifica que el factor demanda/capacidad es 0.5 lo cual indica que la estructura es resistente.

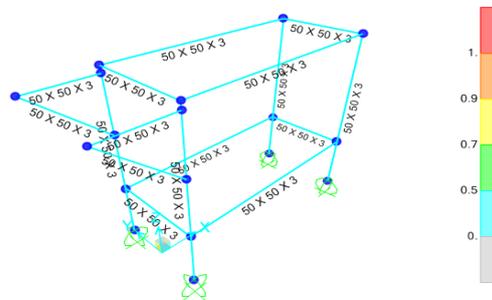


Figura 20-3. Estructura del banco de flexión: factor demanda/capacidad

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.2.11 *Análisis vibracional del banco de ensayos de fatiga por flexión rotativa*

Para el análisis vibracional se utiliza el método deductivo, ya que partimos del análisis total del sistema llamado banco de flexión rotativa, seguidamente se aísla sus componentes en dos partes para facilitar su estudio. Como primera parte se analiza el sistema giratorio y como segunda parte se analiza la parte fija (estructura). De esta manera el análisis se orienta de lo general a lo específico para determinar cuantitativamente la frecuencia natural a la cual trabaja el banco de ensayos.

3.2.11.1 *Análisis del sistema giratorio*

El sistema giratorio se muestra en la Figura 21-3 y tiene los siguientes elementos:

- Eje motriz con su respectiva constante de rigidez (K_1).
- Chumacera fija del eje motriz con su constante de amortiguamiento (C_1).
- Chumacera para aplicación de carga del eje motriz (C_2).
- Probeta con su constante de rigidez (K_p).
- Eje conducido con su respectiva constante de rigidez (K_2).
- Chumacera para aplicación de carga del eje conducido (C_3).
- Chumacera fija del eje conducido con su constante de amortiguamiento (C_4).
- Placa de fuerza con su constante de rigidez (K_3).
- Barra de carga con su constante de rigidez (K_4).
- Masa aplicada (M).

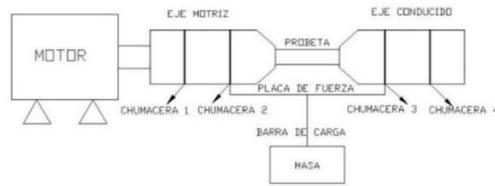


Figura 21-3. Sistema giratorio

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

A continuación, en la Figura 22-3 se esquematiza el sistema giratorio en un sistema masa resorte amortiguador como se muestra en la siguiente figura.

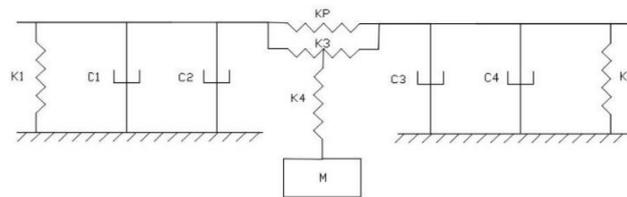


Figura 22-3. Sistema masa- resorte- amortiguador de la parte giratoria

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Se procede a reducir el sistema de la Figura 22-3, sumando los resortes y amortiguadores ya sea en serie o en paralelo de acuerdo a las siguientes condiciones:

- Los resortes K_3 y K_4 se suman en serie, debido a que sus deflexiones son diferentes.

$$\frac{1}{K_{eq1}} = \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4}$$

$$K_{eq1} = \frac{K_3 K_4}{K_4 + K_3}$$

- Luego K_{eq1} y K_p se suman en serie, ya que sus deflexiones son distintas.

$$\frac{1}{K_{eq2}} = \frac{1}{K_{eq1}} + \frac{1}{K_p}$$

$$K_{eq2} = \frac{K_{eq1} K_p}{K_p + K_{eq1}}$$

- Posteriormente K_1 y K_2 se suman en paralelo, debido a que sus deflexiones son iguales.

$$K_{eq3} = K_1 + K_2$$

- Seguidamente K_{eq2} y K_{eq3} se suman en serie, ya que sus deflexiones son diferentes.

$$\frac{1}{K_{eq4}} = \frac{1}{K_{eq3}} + \frac{1}{K_{eq2}}$$

$$K_{eq4} = \frac{K_{eq3} K_{eq2}}{K_{eq2} + K_{eq3}}$$

- Las constantes de los amortiguadores C_1, C_2, C_3 y C_4 se encuentran en paralelo, ya que las deflexiones en las chumaceras tienden a cero.

$$C_{eq1} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

3.2.11.2 Análisis de la parte fija (estructura)

El sistema de la parte fija se muestra en la Figura 23-3 y tiene de los siguientes elementos:

- Columnas de la estructura con su respectiva constante de rigidez (K_5, K_6, K_7, K_8).
- Soportes anti vibratorios ubicados en la base de las columnas con sus valores constantes de amortiguamientos (C_5, C_6, C_7, C_8).

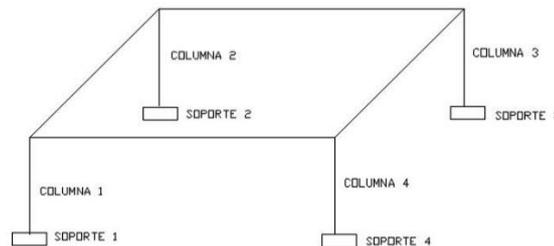


Figura 23-3. Parte fija (estructura)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La parte fija de la estructura se esquematiza como se muestra en la Figura 24-3.

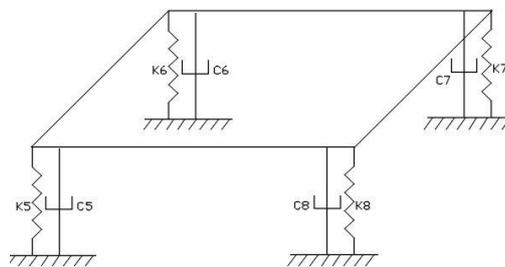


Figura 24-3. Esquema de la estructura

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

El esquema mostrado en la Figura 24 se lo puede reducir mediante las siguientes consideraciones:

- Los resortes K_5, K_6, K_7 y K_8 se suman en paralelo, debido a que sus deflexiones son iguales, ya que la estructura debe ser nivelada mediante los soportes.

$$K_{eq5} = K_5 + K_6 + K_7 + K_8$$

- Las constantes de los amortiguadores C_5, C_6, C_7 y C_8 se suman en paralelo ya que sus deflexiones son iguales al estar nivelada la estructura.

$$C_{eq2} = C_5 + C_6 + C_7 + C_8$$

3.2.11.3 Análisis total del banco de ensayos de flexión rotativa

Una vez analizadas las constantes equivalentes por separado, se establece un sistema reducido de masa-resorte-amortiguador como se puede observar en la Figura 25-3.

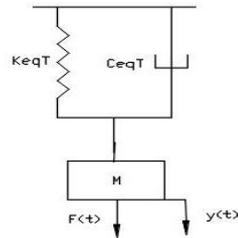


Figura 25-3. Sistema total equivalente de masa- resorte- amortiguador

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La constante total equivalente de rigidez K_{eqT} , se determina de la siguiente manera: se suma en serie K_{eq4} (resultado del análisis de la parte giratoria) con K_{eq5} (resultado del análisis de la parte fija estructura); debido a que sus deflexiones son diferentes.

$$\frac{1}{K_{eqT}} = \frac{1}{K_{eq4}} + \frac{1}{K_{eq5}}$$

$$K_{eqT} = \frac{K_{eq4}K_{eq5}}{K_{eq5} + K_{eq4}}$$

La constante total equivalente de amortiguamiento C_{eqT} , se determina de la siguiente manera: se suma en serie la C_{eq1} (resultado del análisis de la parte giratoria) con C_{eq2} (resultado del análisis de la parte fija estructura).

$$\frac{1}{C_{eqT}} = \frac{1}{C_{eq1}} + \frac{1}{C_{eq2}}$$

$$C_{eqT} = \frac{C_{eq1}C_{eq2}}{C_{eq2} + C_{eq1}}$$

3.2.11.4 Función de transferencia de todo el sistema del banco de ensayo

A partir de la Figura 25-3 se analiza las fuerzas que actúan en el sistema mediante un diagrama de cuerpo libre que se representa en la Figura 26-3.



Figura 26-3. Diagrama de cuerpo libre

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La función de transferencia se obtiene mediante la Figura 25-3 y Figura 26-3, aplicando la segunda ley de Newton:

$$F = M \cdot a$$

$$F_{(t)} - F_c - F_r = m_{eq} \cdot a$$

Como se puede ver en la expresión anterior aparece una masa equivalente, la cual hace referencia a la ecuación (61).

$$m_{eq} = M + 0.5m \quad (61)$$

De dónde m es igual a la masa de la probeta, esta consideración se hace para ser más exactos en los cálculos.

Entonces se tiene:

$$F_{(t)} = m_{eq} \left(\frac{dy^2}{dt} \right) + C_{eqT} \left(\frac{dy}{dt} \right) + K_{eqT} Y_{(t)}$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$F_{(s)} = m_{eq} S^2 Y_{(s)} + C_{eqT} S Y_{(s)} + K_{eqT} Y_{(s)}$$

$$\frac{Y_{(s)}}{F_{(s)}} = \frac{1}{m_{eq} S^2 + C_{eqT} S + K_{eqT}} \quad (62)$$

La ecuación (62) se denomina función de transferencia con la cual se puede analizar la estabilidad del sistema.

3.2.11.5 Cálculo de las constantes de rigidez

Se realiza de acuerdo a fórmulas establecidas que se encuentran en el anexo de masa equivalentes, resortes y amortiguadores (Anexo H).

- Eje motriz (K_1)

$$K = \frac{3EI}{l^3}$$

$$K_1 = \frac{3(205000)\pi(25.4^4)}{(32)(370^3)}$$

$$K_1 = 496.141 \frac{N}{mm}$$

- Eje conducido (K_2)

$$K = \frac{3EI}{l^3}$$

$$K_2 = \frac{3(205000)\pi(25.4^4)}{(32)(350^3)}$$

$$K_2 = 586.146 \frac{N}{mm}$$

- Probeta (K_p)

$$K = \frac{48EI}{l^3}$$

$$K_p = \frac{48(205000)\pi(7^4)}{(32)(152^3)}$$

$$K_p = 660.475 \frac{N}{mm}$$

- Placa de Fuerza (K_3)

$$K = \frac{1}{12} b \cdot h \cdot (b^2 + h^2)$$

$$K_3 = \frac{48(200000)(398)(145)(398^2 + 145^2)}{(12)(398^3)}$$

$$K_3 = 131396707.2 \frac{N}{mm}$$

- Barra de carga (K_4)

$$K = \frac{3EI}{l^3}$$

$$K_4 = \frac{3(205000)\pi(23^4)}{(32)(420^3)}$$

$$K_4 = 228.054 \frac{N}{mm}$$

- Columna de la estructura (K_5)

$$K = \frac{3EI}{l^3}$$

$$K_5 = \frac{3(200000)(212000)}{(800^3)}$$

$$K_5 = 248.438 \frac{N}{mm}$$

$$K_5 = K_6 = K_7 = K_8$$

Con estos valores se calcula las constantes de rigidez equivalente y la rigidez total:

$$K_{eq1} = \frac{K_3 K_4}{K_4 + K_3}$$

$$K_{eq1} = \frac{(131396707.2)(228.054)}{(228.054) + (131396707.2)}$$

$$K_{eq1} = 228.051 \frac{N}{mm}$$

$$K_{eq2} = \frac{K_{eq1} K_p}{K_p + K_{eq1}}$$

$$K_{eq2} = \frac{(228.051)(660.475)}{(660.475) + (228.051)}$$

$$K_{eq2} = 169.519$$

$$K_{eq3} = K_1 + K_2$$

$$K_{eq3} = 496.141 + 586.141$$

$$K_{eq3} = 1082,282 \frac{N}{mm}$$

$$K_{eq4} = \frac{K_{eq3}K_{eq2}}{K_{eq2} + K_{eq3}}$$

$$K_{eq4} = \frac{(1082.282)(169.519)}{(169.519) + (1082.282)}$$

$$K_{eq4} = 146.563 \frac{N}{mm}$$

$$K_{eq5} = K_5 + K_6 + K_7 + K_8$$

$$K_{eq5} = 4(248.438)$$

$$K_{eq5} = 993,752 \frac{N}{mm}$$

$$K_{eqT} = \frac{K_{eq4}K_{eq5}}{K_{eq5} + K_{eq4}}$$

$$K_{eqT} = \frac{(146.563)(993.752)}{993.752 + 146.563}$$

$$K_{eqT} = 127.726 \frac{N}{mm}$$

3.2.11.6 Cálculo de las contantes de amortiguamiento

- Para las chumaceras con rodamiento CARB se tiene según catálogo:

$$C_1 = 540 \frac{Ns}{m}$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4$$

- Para los soportes anti vibratorios (Figura 27-3).



- Dureza Dureza 65 Shore
- Diámetro Espiga M-16
- h m/m 110
- H m/m 38
- D m/m 105
- Zona Optima Trabajo Kgs. 250-500

Figura 27-3. Soporte Anti vibratorio N°. 2

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La constante de amortiguamiento de cada soporte, se obtiene a partir del Gráfico 16-3 del fabricante.

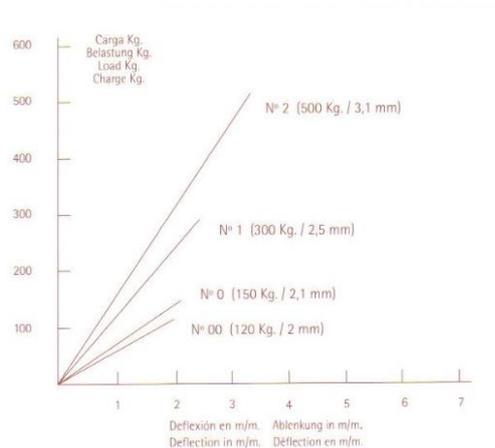


Gráfico 16-3. Curvas de soportes de acuerdo al diámetro

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La carga máxima corresponde a toda la masa del conjunto (máquina) más la carga máxima aplicada, este valor se puede ver en el plano de conjunto del banco de ensayo de flexión y se aproxima a 125Kg.

Debido a que se ubican 4 soportes anti vibratorios, la masa total la dividimos para 4, de esta manera 31.25 kg actúa sobre cada soporte.

Con el valor de 31.25 kg y con el Gráfico 16-3, se interseca y se encuentra la deflexión de 0.25 mm

Con estos valores se encuentra la rigidez con la siguiente expresión.

$$K = \frac{F}{\delta}$$

$$K = \frac{(31.25)(9.8)}{(0.25 \times 10^{-3})}$$

$$K = 1225000 \frac{N}{m}$$

El coeficiente de amortiguamiento viene dado por la ecuación (63):

$$\zeta = \frac{C}{C_c} \tag{ 63}$$

$$C_c = 2\sqrt{km}$$

Dónde:

ζ = Relación de amortiguamiento (adimensional)

$C = \text{Coeficiente de amortiguamiento} \left(\frac{Ns}{m} \right)$

$C_c = \text{Coeficiente de amortiguamiento crítico} \left(\frac{Ns}{m} \right)$

$k = \text{Constante de Rigidez} \left(\frac{N}{m} \right)$

$m = \text{masa (kg)}$

Despejando de la ecuación (63) se tiene que el coeficiente de amortiguamiento es:

$$C = 2\zeta\sqrt{Km}$$

Para el caucho: $\zeta = 0.05$ (Anexo I), entonces:

$$C = (0.05)2\sqrt{(1225000)(31.25)}$$

$$C = 618.718 \frac{Ns}{m}$$

$$C_5 = 618.718 \frac{Ns}{m}$$

$$C_5 = C_6 = C_7 = C_8$$

Con estos valores se calcula los coeficientes de amortiguamiento equivalentes y el amortiguamiento total:

$$C_{eq1} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$C_{eq2} = C_5 + C_6 + C_7 + C_8$$

$$C_{eq1} = 4(540) = 2160 \frac{Ns}{m}$$

$$C_{eq2} = 4(618.718) = 2474.872 \frac{Ns}{m}$$

$$C_{eqT} = \frac{C_{eq1}C_{eq2}}{C_{eq2} + C_{eq1}}$$

$$C_{eqT} = \frac{(2160)(2474.872)}{(2474.872) + (2160)} = 1153.370 \frac{Ns}{m}$$

3.2.11.7 Cálculo de la frecuencia natural y relación de amortiguamiento

La función de transferencia normalizada de un sistema lineal de segundo orden es como se muestra en la ecuación (64):

$$G(s) = \frac{KW_n^2}{s^2 + 2\zeta W_n s + W_n^2} \quad (64)$$

Esta ecuación se iguala a la función de transferencia de nuestro sistema para encontrar la frecuencia natural y la relación de amortiguamiento.

$$\frac{KW_n^2}{S^2 + 2\zeta W_n S + W_n^2} = \frac{1}{m_{eq}S^2 + C_{eqT}S + K_{eqT}}$$

La función de transferencia está precedida por la masa en el primer término del denominador, se divide a toda la función para la masa:

$$\frac{KW_n^2}{S^2 + 2\zeta W_n S + W_n^2} = \frac{1/m_{eq}}{S^2 + \frac{C_{eqT}}{m_{eq}}S + \frac{K_{eqT}}{m_{eq}}}$$

Igualando la frecuencia natural se tiene:

$$W_n^2 = \frac{K_{eqT}}{m_{eq}}$$

$$W_n = \sqrt{\frac{127726}{50 + 0.5(0.131)}}$$

$$W_n = 50.509 \frac{rad}{s}$$

$$W_n = 8.039 \text{ Hertz}$$

Igualando la relación de amortiguamiento se tiene:

$$2\zeta W_n = \frac{C_{eqT}}{m_{eq}}$$

Despejando ζ :

$$\zeta = \frac{C_{eqT}}{2m_{eq}W_n}$$

$$\zeta = \frac{1153.370}{2(50 + 0.5(0.131))(50.509)} = 0.228$$

Debido a que $\zeta < 1$ el sistema es sub-amortiguado.

La velocidad máxima a la que gira el motor es de 1720 rpm que equivale a 180.118 rad/s, considerando este valor como la frecuencia de trabajo del sistema, se lo compara con la frecuencia natural calculada (W_n); estos valores se encuentran alejados en un 28% y lo recomendado es un 20% (Anexo J), por lo tanto se puede decir que no se presenta el fenómeno de resonancia.

3.2.11.8 Estabilidad del sistema masa-resorte- amortiguamiento usando el software Matlab

Para este proceso se reemplaza los valores de masa, resorte y amortiguamiento totales en la función de transferencia, y se obtiene lo siguiente:

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{m_{eq}S^2 + C_{eqT}S + K_{eqT}}$$

$$\frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{50.065S^2 + 1153.370S + 127726}$$

Esta función de transferencia se ingresa en el software Matlab:

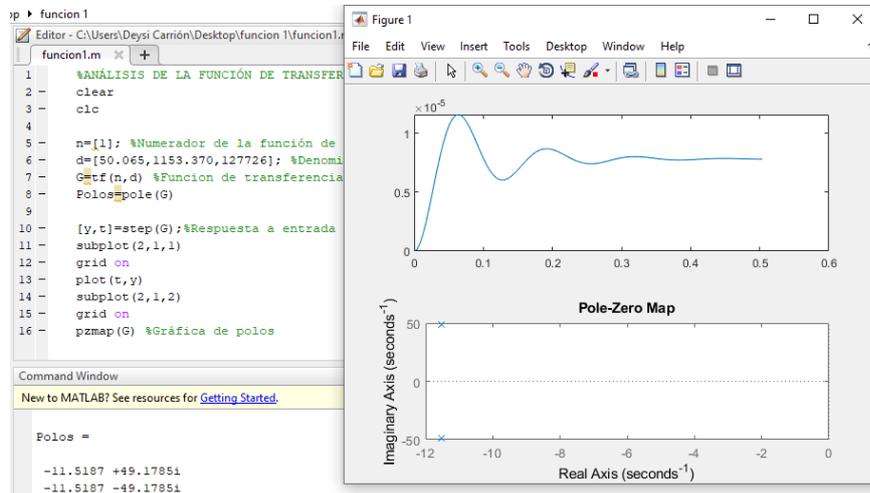


Figura 28-3. Estabilidad del sistema masa-resorte-amortiguador

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

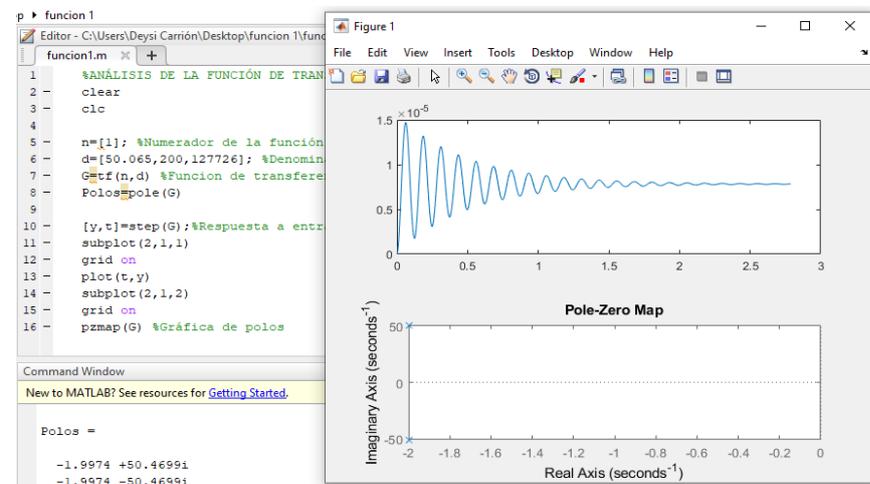


Figura 29-3. Estabilidad del sistema masa- resorte- amortiguador con coeficiente de amortiguamiento bajo

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Analizando la Figura 28-3 y Figura 29-3 se determina que el valor del coeficiente de amortiguamiento influye en la estabilidad del sistema. En la primera figura el sistema tiende a estabilizarse en 0.35s aproximadamente mientras que en la segunda figura empieza a estabilizarse de 1.5 a 2s; es importante que el sistema oscile el menor tiempo posible y en el mejor de los casos que no presente ninguna oscilación.

3.3 Pre diseño del banco de ensayos de torsión

De la misma manera que en el diseño del banco de fatiga por flexión rotativa, para el diseño del banco de torsión se utiliza el método inductivo ya que se inicia con el análisis de la estructura funcional del sistema para generar posibles soluciones que son los elementos que conforman el banco de ensayos. Esto se desarrolla aplicando la técnica de gestión de la calidad basada en ingeniería, la cual se denomina despliegue de la función de calidad, por sus siglas en inglés QFD (Quality function Deployment). De esta manera, al aplicarla, se podrá establecer características y requerimientos del usuario; el despliegue de la casa de la calidad se hace mediante un cálculo matemático básico que permite evaluar las características técnicas más importantes a considerarse en el diseño del producto.

3.3.1 Definición del producto

El banco de ensayos de torsión se usa para realizar pruebas estáticas de torsión en barras circulares de sección uniforme con la finalidad de obtener propiedades mecánicas de materiales que se usan en la industria.

3.3.1.1 Proceso de despliegue de la función de la calidad (QFD)

➤ Voz del usuario

De la misma forma que se hizo para el banco de flexión rotativa, se realiza una entrevista al Ing. Marcelo Toapanta para saber los requerimientos del banco.

- El banco de ensayos debe ser capaz de realizar pruebas en probetas hechas de materiales metálicos, principalmente del acero inoxidable de las turbinas hidráulicas, ASTM A743 CA-6-NM.
- Permitir pruebas en diferentes tamaños de probetas, es decir diferentes diámetros y longitudes.
- Debe presentar facilidad para montar y desmontar la probeta de ensayo.
- Para la construcción del banco de pruebas deben usarse los materiales que posee la bodega de la empresa, así como también para procesos de mecanizado se debe utilizar los equipos con los que cuenta, como son: torno, fresadora, centro de mecanizado, entre otros.
- En el aspecto económico se busca que el costo sea bajo al compararlo con el precio de las máquinas que se encuentran en el mercado y así justificar la construcción de la misma.
- El mantenimiento del banco de ensayos debe ser fácil, rápido y económico, de manera que se puedan usar herramientas fácilmente disponibles, y que no se requiera más de un operador para realizarlo.

- El banco de pruebas debe tener un tamaño que sea fácil de ubicar en el sitio de trabajo, brindar ergonomía y seguridad al usuario.
- Debe tener un sistema de adquisición de datos, a través del cual se pueda visualizar la gráfica torque versus ángulo de giro, el sistema de control debe ser automático y sencillo de operar, esto debe desarrollarse utilizando la tecnología que posee la empresa.
- Estéticamente también debe estar bien presentada.
- Voz del ingeniero

Son características técnicas a partir de las necesidades del cliente:

- Torque máximo
- Tamaño de probetas
- Materiales para la construcción
- Costo
- Dimensiones
- Seguridad y ergonomía
- Tipo de control
- Análisis de la competencia

A continuación, se muestran dos empresas que fabrican máquinas para ensayos de torsión:

La empresa estadounidense TESTRESOURCES, Inc. es un fabricante de soluciones de prueba mecánica como máquinas de prueba universales, máquinas de prueba estáticas y dinámicas. En el Anexo K se presenta un modelo de máquina para ensayos de torsión con sus características técnicas y un costo aproximado.

INSTRON es una empresa considerada líder en la industria de ensayos de materiales a nivel mundial, cuenta con oficinas de servicio en todo el continente americano, europeo y Asia Pacífico. Entre los productos de calidad que fabrica esta empresa se encuentra la máquina para ensayos de torsión cuyas características se muestran en el Anexo L.

3.3.1.2 *Matriz QFD*

A través de la matriz QFD de la Figura 30-3, se determina las características más importantes que tienen incidencia en el diseño del banco bajo el criterio del diseñador, en la siguiente figura se pueden ver dichas características, las cuales son: torque máximo, tamaño de probetas, costo y dimensiones.

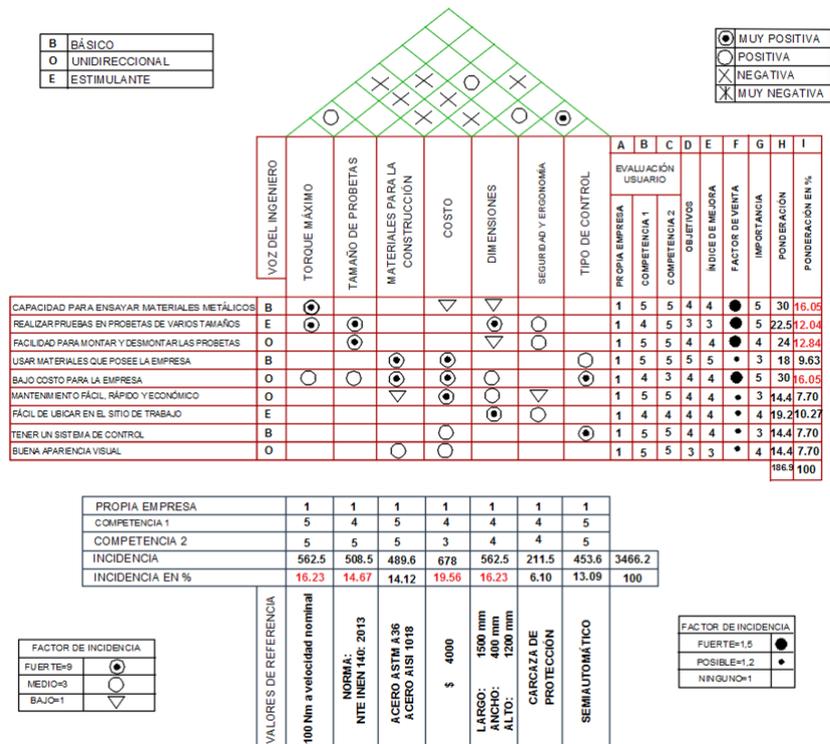


Figura 30-3. Casa de la calidad del banco de ensayos de torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las características técnicas del banco de torsión se muestran en la Tabla 23-3.

Tabla 23-3: Características técnicas

Capacidad máxima de torque	100 Nm a velocidad nominal
Tamaño de probetas	Diámetro: 4-8 mm Longitud: 180-300 mm
Tipo de control	Semiautomático
Software	Labview

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.3.2 *Diseño conceptual*

Después de haber especificado las características del banco de ensayos para torsión, se desarrolla el diseño conceptual, el cual se inicia indicando las etapas que cumplirá el banco de ensayos, esto recibe el nombre de análisis funcional. A partir de estas funciones se genera el análisis modular, con el cual se obtendrá las alternativas de solución, mismas que deben ser evaluadas y seleccionada una de ellas para proceder con el diseño de detalle.

3.3.2.1 Análisis funcional- modular

A continuación, en la Figura 31-3 en el nivel cero del análisis funcional se presenta la tarea principal que realiza el banco de torsión, seguidamente en el nivel 1 se detalla el proceso que se desarrolla en la misma, para llegar a obtener la tarea principal descrita en el nivel 0.

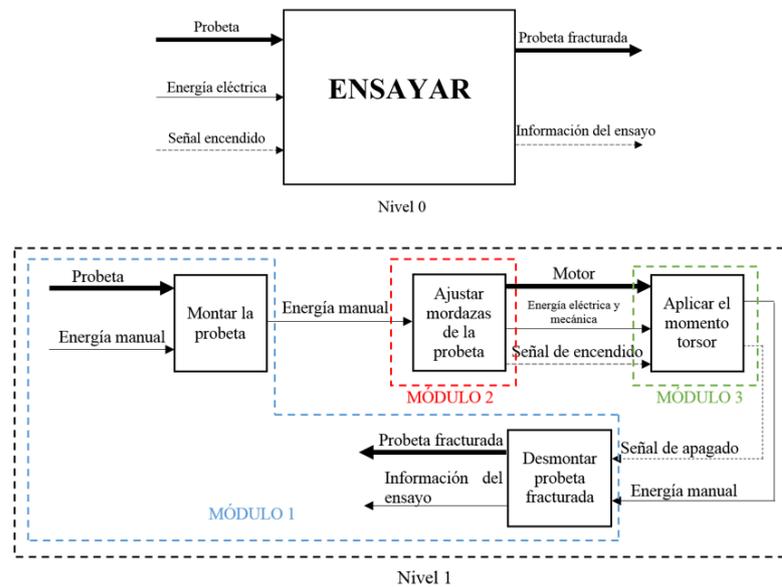


Figura 31-3. Funciones y módulos del banco de ensayos para torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Considerando que son suficiente dos niveles para identificar claramente el proceso para realizar un ensayo de torsión, se procede a extraer los módulos que se detallan a continuación:

Módulo 1: Sistema mecánico

Módulo 2: Sujeción de la probeta

Módulo 3: Sistema de control

3.3.3 Selección de alternativas

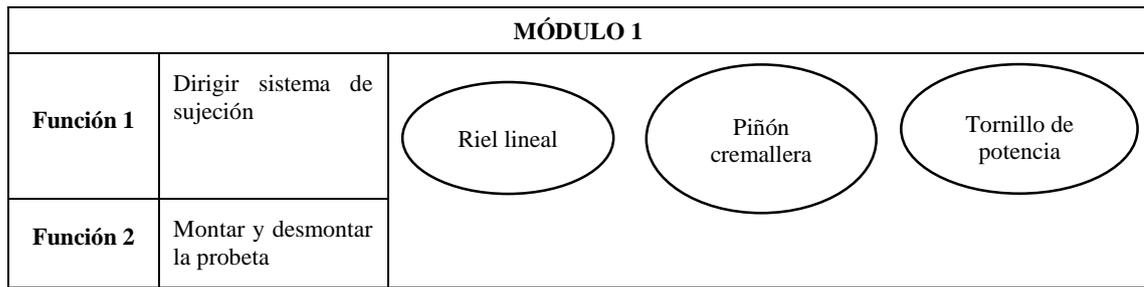
3.3.3.1 Matriz morfológica

La matriz morfológica se realiza por cada estructura modular, y cada módulo tiene sus funciones.

Módulo 1: Sistema mecánico

Las funciones del módulo se presentan en la Tabla 24-3:

Tabla 24-3: Módulo 1 del banco de torsión



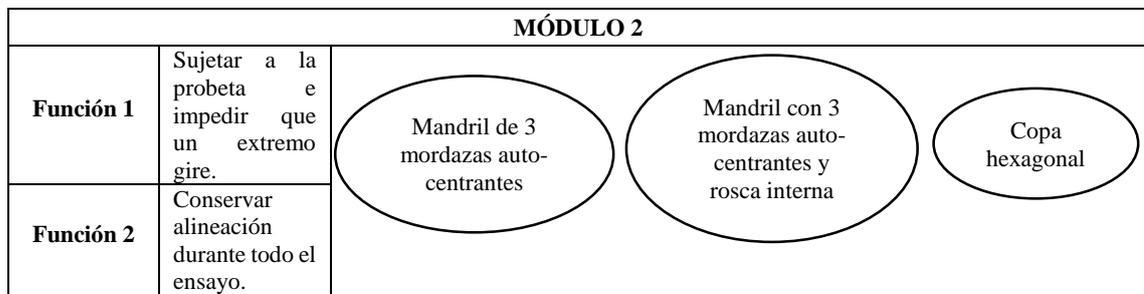
Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Módulo 2: Sujeción de la probeta

Las funciones del módulo se presentan en la Tabla 25-3:

Tabla 25-3: Módulo 2 del banco de torsión



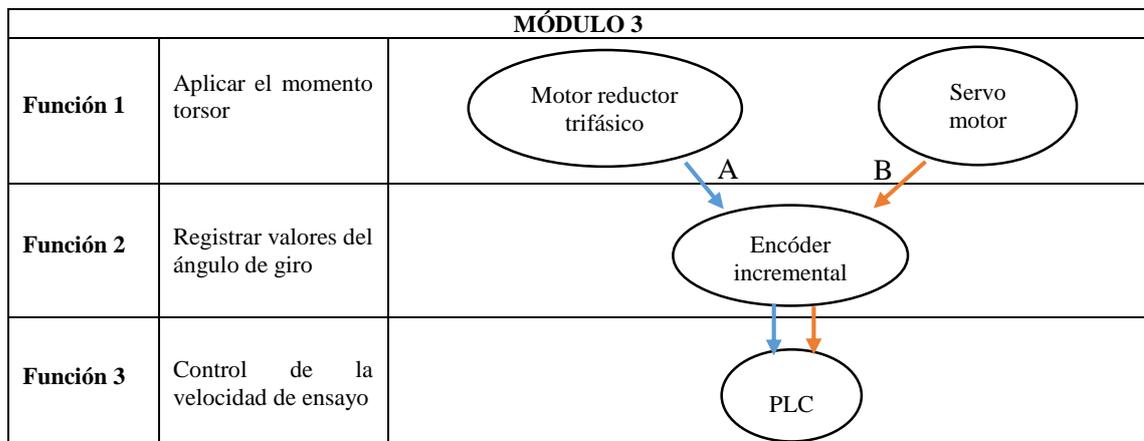
Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

MÓDULO 3: Sistema de control

Las funciones del módulo se presentan en la Tabla 26-3:

Tabla 26-3: Módulo 3 del banco de torsión



Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.3.3.2 Análisis de alternativas

A continuación se presentan las características de cada módulo en la Tabla 27-3, Tabla 28-3 y Tabla 29-3.

Tabla 27-3: Alternativas del módulo 1- banco de torsión

SOLUCIONES DEL MÓDULO 1			
	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
A	<p>La base móvil que permite montar la probeta de acuerdo a su longitud, se desliza por rieles lineales, que son ancladas a la bancada de la máquina por medio de pernos con cabeza allen.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Sencillo de diseñar. -Fácil de mecanizar. -Fácil montaje a través de pernos. -Capacidad para soportar carga. -Larga vida útil. -Ahorro de espacio en la bancada de la máquina. -Bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Para controlar la posición de la base móvil no es muy útil.
B	<p>La base móvil que permite montar la probeta de acuerdo a su longitud, se desliza por medio del mecanismo piñón- cremallera, el cual convierte el movimiento circular del piñón en un movimiento lineal sobre la cremallera.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Sencillez en su diseño. -Poca inversión. -Larga vida útil. -Posibilidad de fabricación con exactitud. -Transmisión suave y con precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rozamiento entre las roscas. -No resulta muy viable usar este mecanismo ya que no se necesita elevada potencia para deslizar la base móvil. -Necesita lubricación.
C	<p>La base móvil que permite montar la probeta de acuerdo a su longitud, se desliza por medio de la fuerza que genera el mecanismo de un tornillo de potencia, el cual convierte un movimiento de rotación en un movimiento lineal.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Sencillez en su estructura. -Auto frenado. -Posibilidad de fabricación con gran exactitud. -Bajo costo. -Permite el traslado de grandes cargas debido a que desarrolla elevadas fuerzas a lo largo de su eje. 	<ul style="list-style-type: none"> -Rozamiento relativamente alto que provoca desgaste.

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Tabla 28-3: Alternativas del módulo 2- banco de torsión

SOLUCIONES DEL MÓDULO 2			
	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
A	<p>Se sujeta la probeta mediante mandriles de tres mordazas auto-centrantes.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Presenta simetría radial. -Sujeta objetos con forma irregular, aquellos que carecen de simetría radial. -Fácil montaje a través de pernos. -Evita deslizamiento de la probeta de prueba. 	<ul style="list-style-type: none"> -Su costo es un poco elevado.
B	<p>Se sujeta la probeta mediante mandriles de tres mordazas auto-centrantes y una rosca interna para su montaje.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Buen agarre de elementos cilíndricos. -Simetría radial. -Fácil montaje. -Fácil operación. -Evita deslizamiento de la probeta de prueba. -Bajo costo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Su capacidad de apertura ronda desde 13mm hasta los 25mm.
C	<p>Se sujeta la probeta mediante copas hexagonales.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Soporta grandes esfuerzos de torsión, sin deformarse ni partirse. -Fácil montaje -Bajo costo. -Evita deslizamiento de la probeta de prueba. -Comercialmente vienen en dimensiones métricas y en pulgadas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Mecanizar la forma de la copa en la probeta de prueba.

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Tabla 29-3: Alternativas del módulo 3- banco de torsión

SOLUCIONES DEL MÓDULO 3			
	DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
A	<p>Un motor-reductor trifásico es el encargado de aplicar el momento torsor para fracturar la probeta, mientras que el valor del ángulo de giro es obtenido a través de un encóder incremental y el control de la velocidad del ensayo es por medio de un PLC.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -La potencia entregada por el motor-reductor es constante y tiene arranque automático y eficiente. -El motor-reductor tiene un par uniforme, es robusto y relativamente económico. -Los motor-reductores requieren poco mantenimiento. -El encóder incremental transforma el movimiento angular en una serie de pulsos digitales, que son usados para controlar el desplazamiento angular o lineal. -Cada encóder se caracteriza por su precisión que está dada por el número de pulsos por revolución. -El PLC está diseñado para soportar temperaturas levadas, ruido eléctrico, vibraciones e impacto; y su instalación es sencilla. 	<ul style="list-style-type: none"> -Un motor-reductor presenta algo de dificultad para trabajar a muy bajas velocidades. -El encóder incremental no mantiene la información de posición, regresa a su punto de referencia cada vez que se inicie el sistema de control o cuando se dificulte el suministro eléctrico.
B	<p>A través de un servo motor se aplica el momento torsor para fracturar la probeta, el valor del ángulo de giro es obtenido a través de un encóder incremental y el control de la velocidad del ensayo es por medio de un PLC.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -El servomotor tiene un diseño mucho más sofisticado. Es sumamente poderoso para su tamaño (mucho torque). -Un servomotor entrega una potencia proporcional para cargas mecánicas, no consume mucha energía y presenta mayor precisión. -Los servomotores son silenciosos en su funcionamiento. -El encóder incremental transforma el movimiento angular en una serie de pulsos digitales, que son usados para controlar el desplazamiento angular o lineal. -Cada encóder se caracteriza por su precisión que está dada por el número de pulsos por revolución. -El PLC está diseñado para soportar temperaturas levadas, ruido eléctrico, vibraciones e impacto; y su instalación es sencilla. 	<ul style="list-style-type: none"> -Costo elevado. -No es posible cambiar las características eléctricas del motor por tanto no se puede cambiar la velocidad del mismo. -Está limitado por el circuito de control a únicamente variar de 0° a 180°. -El encóder incremental no mantiene la información de posición, regresa a su punto de referencia cada vez que se inicie el sistema de control o cuando se dificulte el suministro eléctrico.

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.3.3.3 Selección de la mejor alternativa para cada módulo

➤ MÓDULO 1

Principios de solución: para el sistema mecánico

- **Solución A:** La base móvil que permite montar la probeta de acuerdo a su longitud, se desliza por rieles lineales, que son ancladas a la bancada de la máquina por medio de pernos con cabeza allen.
- **Solución B:** La base móvil que permite montar la probeta de acuerdo a su longitud, se desliza por medio del mecanismo piñón- cremallera, el cual convierte el movimiento circular del piñón en un movimiento lineal sobre la cremallera.
- **Solución C:** La base móvil que permite montar la probeta de acuerdo a su longitud, se desliza por medio de la fuerza que genera el mecanismo de un tornillo de potencia, el cual convierte un movimiento de rotación en un movimiento lineal.

Criterios de valoración:

- **Fácil de construir:** Con este criterio se evalúa el grado de complejidad que presenta cada alternativa en su construcción
- **Fácil montaje:** Permite evaluar la facilidad y el tiempo que toma implementar cada alternativa de solución.
- **Tamaño:** Evalúa el tamaño final de la máquina, en función de cada alternativa de solución.
- **Costo:** Este criterio evalúa el costo de fabricación de cada solución.

Para la correcta evaluación de los criterios antes mencionados se emplea el método de criterios ponderados. Los valores con los que se trabaja se encuentran en la Tabla 8-3.

Considerando los códigos asignados para cada alternativa del módulo se desarrolla los criterios de valoración de las soluciones a través de ponderaciones (Tabla 30-3).

Tabla 30-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 1

Criterio	Fácil construir	Fácil montaje	Tamaño	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Fácil construir		0,5	1	1	3,5	0,35
Fácil montaje	0,5		1	1	3,5	0,35
Tamaño	0	0		0	1	0,1
Costo	0	0	1		2	0,2
				TOTAL	10	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

A continuación, se evalúa cada criterio de la Tabla 30-3 respecto a los códigos establecidos para cada alternativa del módulo 1 (Tabla 27-3).

- El criterio fácil de construir se evalúa en la Tabla 31-3.

Tabla 31-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil de construir

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	1	3	0,500
B	0		0	1	0,167
C	0	1		2	0,333
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio fácil montaje se evalúa en la Tabla 32-3.

Tabla 32-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil montaje

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	0,5	2,5	0,417
B	0		0	1	0,167
C	0,5	1		2,5	0,417
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio tamaño se evalúa en la Tabla 33-3.

Tabla 33-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio tamaño

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	1	3	0,500
B	0		0,5	1,5	0,250
C	0	0,5		1,5	0,250
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio costo se evalúa en la Tabla 34-3.

Tabla 34-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	1	3	0,500
B	0		0,5	1,5	0,250
C	0	0,5		1,5	0,250
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las ponderaciones de la Tabla 35-3 muestra que la primera prioridad para el módulo uno es la alternativa A.

Tabla 35-3: Tabla de conclusiones del módulo 1

	Fácil construir	Fácil montaje	Tamaño	Costo	Σ	Prioridad
A	0,175	0,145833333	0,05	0,1	0,471	1
B	0,058	0,058333333	0,025	0,05	0,192	3
C	0,117	0,145833333	0,025	0,05	0,338	2

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

➤ **MÓDULO 2**

Principios de solución: para el sistema de sujeción de la probeta.

- **Solución A:** Se sujeta la probeta mediante mandriles de tres mordazas auto-centrantes.
- **Solución B:** Se sujeta la probeta mediante mandriles de tres mordazas auto-centrantes y una rosca interna para su montaje.
- **Solución C:** Se sujeta la probeta mediante copas hexagonales.

Criterios de valoración:

- **Seguridad:** Evalúa la seguridad que brinda cada tipo de mordaza al ensayo.
- **Fácil montaje:** Permite evaluar la facilidad y el tiempo que toma implementar cada alternativa de solución.
- **Tamaño:** Se evalúa el tamaño de cada tipo de mordaza.
- **Costo:** Los tipos de mordazas presentados se encuentran en el mercado y su costo es el que se evalúa en este criterio.

Para la correcta evaluación de los criterios antes mencionados se emplea el método de criterios ponderados. Los valores con los que se trabaja se muestran en la Tabla 8-3.

Considerando los códigos asignados para cada alternativa del módulo se desarrolla los criterios de valoración de las soluciones a través de ponderaciones (Tabla 36-3).

Tabla 36-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 2

Criterio	Seguridad	Fácil montaje	Tamaño	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Seguridad		1	1	1	4	0,4
Fácil montaje	0		1	1	3	0,3
Tamaño	0	0		0	1	0,1
Costo	0	0	1		2	0,2
				TOTAL	10	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

A continuación, se evalúa cada criterio de la Tabla 36-3 respecto a los códigos establecidos para cada alternativa del módulo 2 (Tabla 28-3).

- El criterio seguridad se evalúa en la Tabla 37-3.

Tabla 37-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio seguridad

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	1	3	0,500
B	0		1	2	0,333
C	0	0		1	0,167
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio fácil montaje se evalúa en la Tabla 38-3.

Tabla 38-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil montaje

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0	0	1	0,167
B	1		1	3	0,500
C	1	0		2	0,333
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio tamaño se evalúa en la Tabla 39-3.

Tabla 39-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio tamaño

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0	0	1	0,167
B	1		0,5	2,5	0,417
C	1	0,5		2,5	0,417
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio costo se evalúa en la Tabla 40-3.

Tabla 40-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio costo

	A	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0	0	1	0,167
B	1		0,5	2,5	0,417
C	1	0,5		2,5	0,417
			TOTAL	6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las ponderaciones de la Tabla 41-3 muestran que la primera prioridad para el módulo dos es la alternativa B.

Tabla 41-3: Tabla de conclusiones del módulo 2

	Fácil construir	Fácil montaje	Tamaño	Costo	Σ	Prioridad
A	0,200	0,05	0,0166667	0,03333333	0,300	2
B	0,133	0,15	0,0416667	0,08333333	0,408	1
C	0,067	0,1	0,0416667	0,08333333	0,292	3

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

➤ MÓDULO 3

Principios de solución: para el sistema de control.

- **Solución A:** Un motor-reductor trifásico es el encargado de aplicar el momento torsor para fracturar la probeta, mientras que el valor del ángulo de giro es obtenido a través de un encóder incremental y el control de la velocidad del ensayo es por medio de un PLC.
- **Solución B:** A través de un servo motor se aplica el momento torsor para fracturar la probeta, el valor del ángulo de giro es obtenido a través de un encóder incremental y el control de la velocidad del ensayo es por medio de un PLC.

Criterios de valoración:

- **Fácil montaje:** Permite evaluar la facilidad y el tiempo que toma implementar cada alternativa de solución.
- **Tamaño:** Se evalúa el tamaño de cada tipo de motor, siendo mejor el que tenga un tamaño que haga fácil el montaje.
- **Costo:** A través de este criterio se evalúa el costo de cada motor presentado como alternativa de solución.

Para la correcta evaluación de los criterios antes mencionados se emplea el método de criterios ponderados. Los valores con los que se trabaja se muestran en la Tabla 8-3.

Considerando los códigos asignados para cada alternativa del módulo se desarrolla los criterios de valoración de las soluciones a través de ponderaciones (Tabla 42-3).

Tabla 42-3: Evaluación del peso específico de cada criterio- módulo 3

Criterio	Fácil montaje	Tamaño	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Fácil montaje		0,5	0,5	2	0,333
Tamaño	0,5		0	1,5	0,25
Costo	0,5	1		2,5	0,416
TOTAL				6	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

A continuación, se evalúa cada criterio de la Tabla 42-3 respecto a los códigos establecidos para cada alternativa del módulo 3 (Tabla 29-3).

- El criterio fácil montaje se evalúa en la Tabla 43-3.

Tabla 43-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio fácil montaje

	A	B	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0,5	1,5	0,500
B	0,5		1,5	0,500
TOTAL			3	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio tamaño se evalúa en la Tabla 44-3.

Tabla 44-3: Evaluación del peso específico de cada solución al criterio tamaño

	A	B	$\Sigma +1$	Ponderación
A		0	1	0,333
B	1		2	0,667
TOTAL			3	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

- El criterio costo se evalúa en la Tabla 45-3.

Tabla 45-3: Evaluación del peso específico al criterio costo

	B	C	$\Sigma +1$	Ponderación
A		1	2	0,667
B	0		1	0,333
TOTAL			3	1

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las ponderaciones de la Tabla 46-3 muestran que la primera prioridad para el módulo tres es la alternativa A.

Tabla 46-3: Tabla de conclusiones del módulo 3

	Fácil montaje	Tamaño	Costo	Σ	Prioridad
A	0,166666667	0,08333333	0,27777778	0,528	1
B	0,166666667	0,16666667	0,13888889	0,472	2

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.3.4 Características del banco de torsión

Para obtener las partes constitutivas del banco de ensayo de torsión se toman las soluciones de cada módulo que se clasificaron como primera prioridad en la tabla de conclusiones, estas soluciones se complementan una con la otra para concretar el diseño conceptual del banco de ensayo (Figura 32-3).

La base móvil que permite montar la probeta de acuerdo a su longitud, se desliza por rieles lineales, que son ancladas a la bancada de la máquina por medio de pernos con cabeza allen. La probeta se sujeta mediante mandriles de tres mordazas auto-centrantes y una rosca interna que sirve para su montaje. Un motor-reductor trifásico es el encargado de aplicar el momento torsor para fracturar la probeta, mientras que el valor del ángulo de giro o ángulo torsor es obtenido a través de un encóder incremental y el control de la velocidad del ensayo se realiza por medio de un PLC.

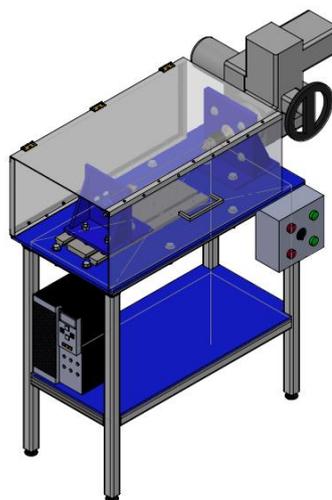


Figura 32-3. Pre diseño del banco de ensayos de torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.4 Diseño del banco de ensayos de torsión

De la misma manera que el banco de flexión rotativa, se utiliza el método deductivo para el diseño del banco de torsión, ya que una vez que se conoce la estructura general del banco de ensayos, a partir de esto se diseña los elementos mecánicos de manera cuantitativa y para ello se aplican técnicas de diseño mecánico como: el criterio de falla de la energía de distorsión (Von Mises), el método LRFD (diseño por factores de carga y resistencia) propuesto por la AISC (Instituto Americano de Construcción en Acero) con el software virtual: SAP 2000 y para la verificación de la resistencia y rigidez de ciertos elementos mecánicos se utiliza como herramienta virtual el software ANSYS que se basa en el método de elementos finitos (FEA).

Una vez identificadas las características del banco de pruebas se procede con los cálculos correspondientes a los elementos que la conforman. Primero se determina el torque y potencia necesaria para asegurar la ruptura de la probeta de ensayo, luego se evalúa bajo el estado más crítico cada uno de los elementos para asegurar su resistencia mecánica y su rigidez, con esto finalmente se procede con el diseño de detalle y se inicia su construcción.

3.4.1 Cálculo del momento torsor para la ruptura de la probeta de ensayo

El valor del momento torsor depende directamente del diámetro de probeta que se va a ensayar. El rango del diámetro de las probetas que se puede ensayar en este banco de pruebas esta entre 4 y 8 mm.

El acero ASTM A743 es el material con mayor esfuerzo último a la tracción que se ensaya, es por ello que en el caso que se necesite ensayar otro material diferente a este se debe verificar que el esfuerzo último a la tracción sea igual o inferior a 910 MPa.

El torque mínimo para fracturar el material viene a ser el torque mínimo que genera el banco de pruebas de torsión. El objetivo del ensayo de torsión es someter a la probeta a un esfuerzo cortante máximo que logre fracturar el material, es por ello que solo se toma el valor del esfuerzo último y no se aplican criterios de falla por Tresca o Von Mises.

Para el cálculo del torque se necesita el esfuerzo cortante máximo, pero este parámetro no se puede obtener directamente en tablas, entonces se toma el valor del esfuerzo último a la tracción del acero ASTM A743 y se hace uso de la ecuación (65):

$$\tau_{min} = 0.82S_{ut} \quad (65)$$

$$\tau_{min} = 0.82(910 \text{ MPa})$$

$$\tau_{min} = 746.2 \text{ MPa}$$

Utilizando los datos geométricos de la probeta normalizada se calcula el torque mínimo, mediante la ecuación (66):

$$\tau_{mín} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (66)$$

Despejando el torque se tiene:

$$T_{mín} = \frac{\pi d^3 \tau_{mín}}{16}$$

$$T_{mín} = \frac{\pi(8)^3 746.2 \text{ Mpa}}{16}$$

$$T_{mín} = 75\ 016.21 \text{ Nmm}$$

$$T_{mín} = 75.016 \text{ Nm}$$

El motor reductor debe entregar un torque por encima de 75.016 Nm.

Para asegurar el correcto funcionamiento del banco de pruebas se multiplica por un factor de seguridad de 1.5 al torque mínimo.

$$T = 112.524 \text{ Nm}$$

3.4.2 Cálculo de la potencia del motor reductor

La norma Ecuatoriana NTE INEN 140:2013 recomienda para este tipo de prueba una velocidad de operación del motor, en función del diámetro de la probeta a ensayar. Para este caso el valor es de 0.15 rev/s (9 RPM).

$$\omega = 9RPM = 0.942 \text{ rad/s}$$

Multiplicando el torque por la velocidad angular se obtiene la potencia mediante la ecuación (67):

$$P = T\omega \quad (67)$$

$$P = (112.524 \text{ Nm})0.942 \text{ rad/s}$$

$$P = 106 \text{ W}$$

$$P = 0.1421 \text{ hp}$$

Se posee un motor reductor con características que son adecuadas para dar funcionamiento al banco de pruebas de torsión (Tabla 47-3).

Tabla 47-3: Características del motor reductor

Velocidad angular de entrada	1680 RPM
Velocidad angular de salida	54 RPM
Torque	120 Nm
Potencia del motor	0.40 kW
Voltaje del motor	460 V
Frecuencia del motor	60 Hz

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Catálogo AUMA

3.4.3 *Diseño del eje motriz y del eje fijo*

El material a partir del cual se fabrican los ejes conductor y conducido es el acero AISI 1018, por tener buena resistencia mecánica y la mejor maquinabilidad que la mayoría de los aceros al carbono. Las características de este material se encuentran en el capítulo II.

El eje conductor tendrá un chavetero y una rosca en un extremo para montar el mandril que sujeta un extremo de la probeta. En el diseño de este eje se considera el peso del mandril como una fuerza externa que actúa sobre este.

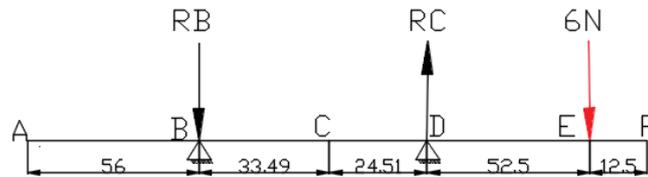


Gráfico 17-3. Diagrama de cuerpo libre del eje motriz

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del diagrama de cuerpo libre del Gráfico 17-3 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum M_B \curvearrowright = 0$$

$$R_C(58) - 6(110.5) = 0$$

$$R_C = 11.431 \text{ N}$$

$$\sum F_Y = 0$$

$$-R_B + R_C - 6 = 0$$

$$R_B = 5.431 \text{ N}$$

Una vez calculado el valor de las reacciones se traza el diagrama de cortante y momento flector (Gráfico 18-3 y Gráfico 19-3).

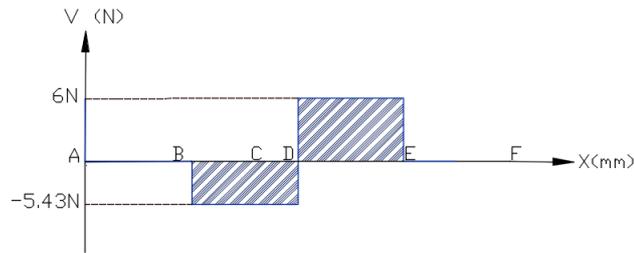


Gráfico 18-3. Diagrama de cortante del eje motriz

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

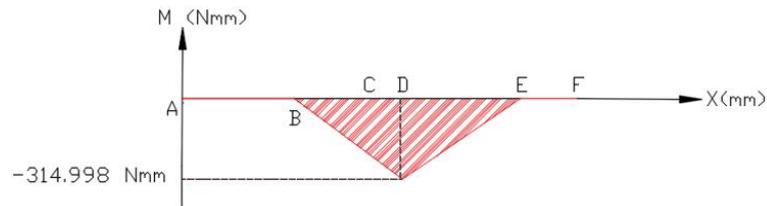


Gráfico 19-3. Diagrama de momento flector del eje motriz

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 19-3 el mayor momento flector es: 314.998 Nmm en el punto D.

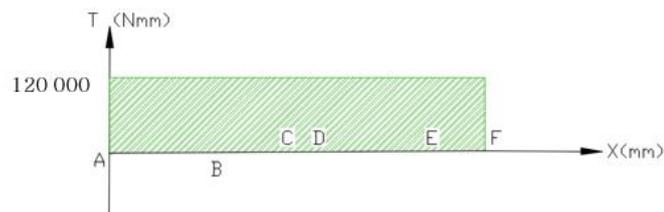


Gráfico 20-3. Diagrama de momento torsor del eje motriz

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 20-3 el valor del momento torsor es 120 000 Nmm.

3.4.3.1 Análisis estático del eje motriz

Se aplica la teoría de falla de Von Mises aplicando la ecuación (48).

Se asume un factor de seguridad $n=2$, de acuerdo a la introducción al diseño de elementos de máquina (Anexo C).

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\left(\frac{32M_f}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$\frac{370MPa}{2} = \sqrt{\left(\frac{32 * 314.998 Nmm}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{16 * 120 000 Nmm}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$d = 14.89 mm$$

3.4.3.2 Análisis dinámico del eje motriz

Para este análisis se utiliza la ecuación (68) de la ASME B106.1M y por tratarse de un momento flexionante completamente invertido los valores de M_m y Ta son igual a cero.

$$d = \left\{ \frac{16 n}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_f M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (68)$$

El momento alternante se calcula con la ecuación (69):

$$M_a = \frac{M_{max} - M_{min}}{2} \quad (69)$$

$$M_a = \frac{314.998 - (-314.998)Nmm}{2} = 314.998 Nmm$$

El momento torsor medio es: $T_m = 120 000 Nmm$

Los siguientes valores son asumidos para hacer un pre cálculo del diámetro:

- $K=0.6$
- $K_f= 1.6$
- $K_{fs} =1.4$
- $n = 2$

$$S'_e = 0.5 * Sut$$

$$S_e = kS'_e$$

$$S_e = 0.6 * 0.5 * 440 MPa$$

$$S_e = 132 MPa$$

Resolviendo la ecuación de la ASME:

$$d = \left\{ \frac{16 n}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = \left\{ \frac{16 (2)}{\pi} \left[4 \left(\frac{1.6 * 314.998 \text{ Nmm}}{132 \text{ MPa}} \right)^2 + 3 \left(\frac{1.4 * 120\,000 \text{ Nmm}}{370 \text{ MPa}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 20.009 \text{ mm}$$

Por motivos de montaje se selecciona un diámetro de 30 mm.

Ahora se vuelve a recalcular el límite de resistencia a la fatiga con la ecuación (14) que se basa en los factores de Marín.

- Factor de Superficie: Se determina con la ecuación (15) y los valores de a y b están en la Tabla 1-2.

$$K_a = a S_{ut}^b$$

$$K_a = 1.58 (440)^{-0.085} = 0.942$$

- Factor de tamaño: Se determina mediante la ecuación (17)

$$K_b = 1.24 d^{-0.107}$$

$$K_b = 1.24 (30)^{-0.107} = 0.862$$

- Factor de confiabilidad: Este valor se puede obtener de la Tabla 2-2.

Para una confiabilidad de 99.9% el valor de Kc es 0.753.

- Factor de temperatura: Este valor se encuentra en la Tabla 3-2.

Para una temperatura de 20 a 250 °C el valor de Kd=1.

- Factor de efectos varios: Kg=1

El valor de K se obtiene multiplicando los factores de Mariño:

$$K = 0.942 * 0.862 * 0.753 * 1 * 1$$

$$K = 0.611$$

El nuevo valor de Se es:

$$S_e = 0.611 * 0.5 * 440 \text{ MPa}$$

$$S_e = 134.42 \text{ MPa}$$

Los factores de concentración de esfuerzos por fatiga debido a la flexión y torsión también se recalculan, y para ello se hace uso de la ecuación (22). Los valores de q, k_t y k_{ts} se obtienen del Gráfico 6-2, Gráfico 7-2 y del Gráfico 8-2 respectivamente.

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \quad \text{o} \quad k_{fS} = 1 + q(k_{tS} - 1)$$

- Para flexión se tiene:

$$r = 0.5 \longrightarrow q = 0.58$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0.5}{12.56} = 0.04 \quad \frac{D}{d} = \frac{30}{12.56} = 2.4 \longrightarrow k_t = 2.38$$

$$k_f = 1.8$$

- Para torsión se tiene:

$$r = 0.5 \longrightarrow q = 0.63$$

$$\frac{r}{d} = \frac{0.5}{12.56} = 0.04 \quad \frac{D}{d} = \frac{30}{12.56} = 2.4 \longrightarrow k_{tS} = 1.82$$

$$k_{fS} = 1.52$$

Al recalculer el diámetro se tiene:

$$d = \left\{ \frac{16 (2)}{\pi} \left[4 \left(\frac{1.8 * 314.998 \text{ Nmm}}{134.42 \text{ MPa}} \right)^2 + 3 \left(\frac{1.52 * 120\,000 \text{ Nmm}}{370 \text{ MPa}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d = 20.565 \text{ mm}$$

Como se dijo anteriormente, por motivos de montaje se selecciona un diámetro de 30 mm.

Ahora se procede a calcular el coeficiente de seguridad, despejando de la fórmula anterior:

$$30 = \left\{ \frac{16 (n)}{\pi} \left[4 \left(\frac{1.8 * 314.998 \text{ Nmm}}{134.42 \text{ MPa}} \right)^2 + 3 \left(\frac{1.52 * 120\,000 \text{ Nmm}}{370 \text{ MPa}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$n = 6.2$$

Con un factor de seguridad mayor a uno, se asegura que el eje tiene resistencia mecánica frente a los esfuerzos que actúan sobre el mismo.

Es importante indicar que este eje es el elemento más crítico de todo el banco, debido a los esfuerzos a los que está sometido, por lo que no se considera necesario hacer el diseño del eje fijo ya que se construirá del mismo diámetro del eje motriz.

3.4.3.3 *Análisis de rigidez del eje motriz*

Para el diseño del eje, aparte del análisis de resistencia mecánica donde se calcula el diámetro, también se debe hacer el análisis de rigidez, y esto consiste en el cálculo de deformaciones totales en puntos críticos del eje.

Los valores de estas deformaciones deben cumplir con los rangos establecidos en la Tabla 21-3. Utilizando las ecuaciones (70) y (71) de deformación para el cálculo de una viga simple se tiene las deformaciones en los puntos que se consideran críticos en el eje.

- Deformación en un punto entre apoyos (C):

$$\delta_C = 0.06415 \frac{Pal^2}{EI} \quad (70)$$

$$\delta_C = 0.06415 * \frac{7N * 52.5mm * (58mm)^2}{205000 MPa * (962.386mm^4)} = 4.02 \times 10^{-4} mm$$

- Deformación en el punto de aplicación de la carga (E):

$$\delta_E = \frac{Pa^2}{3EI} (l + a) \quad (71)$$

$$\delta_E = \frac{7N * (52.5mm)^2}{3 * 205000 MPa * (962.386mm^4)} (58 + 52.5)mm = 3.602 \times 10^{-3} mm$$

Límites de deformación recomendados para elementos de máquina, calculados en función de la longitud del eje:

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300} \right) * L$$

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300} \right) * 179 mm$$

$$(0.179 - 0.597) mm$$

Las deformaciones calculadas son inferiores al límite recomendado, con lo cual se asegura que el eje es rígido.

Para comprobar las deformaciones calculadas se utiliza el software SAP 2000.

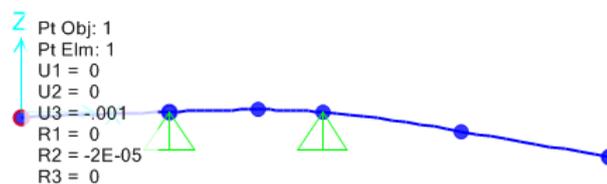


Gráfico 21-3. Deformación en el punto A

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

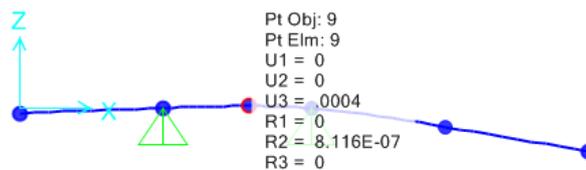


Gráfico 22-3. Deformación en el punto C

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

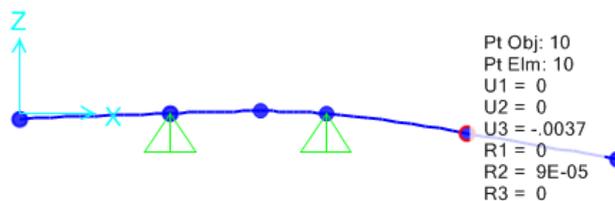


Gráfico 23-3. Deformación en el punto E

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

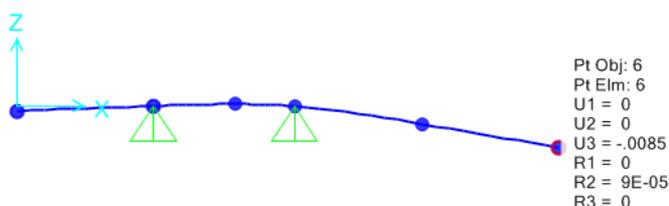


Gráfico 24-3. Deformación en el punto F

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Los valores de deformación del punto C y el punto E (Gráfico 22-3 y Gráfico 23-3) calculados con las fórmulas dadas anteriormente coinciden con los valores obtenidos por medio del software SAP. A través de este software también se pueden ver las deformaciones en otros puntos, como el A y F (Gráfico 21-3 y Gráfico 24-3), y en base a esto se concluye que la deformación máxima se produce en el punto F.

3.4.3.4 Velocidades críticas del eje motriz

A ciertas velocidades el eje puede llegar a ser inestable y las deflexiones se incrementan sin tener un límite lo que puede ocasionar un daño. Es importante que las velocidades críticas sean al menos el doble de la velocidad de operación para evitar el fenómeno de resonancia. Los ejes entran en resonancia cuando su velocidad de operación es cercana a la velocidad crítica y en este escenario se producen fuertes niveles de vibraciones.

A continuación, se realiza el cálculo de las velocidades críticas según los criterios de Rayleigh-Ritz y de Dunkerley; previo a esto se calculan las deformaciones puntuales y totales en cada punto de interés considerando únicamente los pesos de los elementos montados sobre el eje.

En el Gráfico 25-3 se observa el esquema del eje motriz con los pesos de los elementos y sus respectivas distancias. Los pesos son:

$P_1 = 0,612 \text{ kg}$ (peso del mandril)

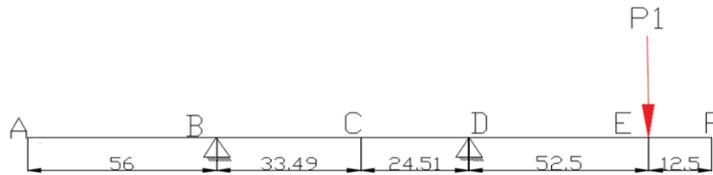


Gráfico 25-3. Diagrama del eje motriz con los pesos de los elementos

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En las deformaciones el primer subíndice es el punto donde se calcula la deformación y el segundo corresponde al peso.

$$\delta_{B1} = \frac{P_1 a^2}{3EI} (l + a)$$

$$\delta_{B1} = \frac{6N * (52,5\text{mm})^2}{3 * 205\,000 \text{ MPa} * 962,386 \text{ mm}^4} (58 + 52,5)\text{mm}$$

$$\delta_{B1} = 3,088 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Cálculo de las velocidades críticas por el criterio de Raileigh Ritz:

$$\eta_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sum P * \delta}{\sum P * \delta^2}}$$

$$\eta_c = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9,81 \text{ m/s}^2 (6N * 3,088 \times 10^{-6} \text{ m})}{6N (3,088 \times 10^{-6})^2 \text{ m}^2}}$$

$$\eta_c = 17\,020,301 \text{ rpm}$$

Cálculo de las velocidades críticas por el criterio de Dunkerley:

$$\eta_1 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9,81 \text{ m/s}^2}{3,08 \times 10^{-6} \text{ m}}}$$

$$\eta_1 = 17\,020,301 \text{ rpm}$$

$$\eta_c = 17\,020,301 \text{ rpm}$$

La velocidad crítica en el eje es de 17 020,301 rpm, está muy alejada de la velocidad de operación del motor que es de 1680 rpm, esto es un indicador de que en el eje no se producirá resonancia.

3.4.4 *Diseño de la placa principal*

Para determinar el espesor de la placa principal se calcula el peso total que actúa sobre ella.

El material de la placa principal, de las placas de la base fija y móvil es el acero ASTM A36, cuyas propiedades ya se mostraron anteriormente.

Los pesos de los elementos se calculan usando la ecuación (60).

- Peso propio de la placa

Las medidas de la placa principal son 870x450 mm, se asume un espesor de 10 mm que al final es recalculado para determinar el espesor de placa adecuado que puede soportar todos los pesos que actúan sobre la misma.

$$w = \rho L b e g$$

$$w = (7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3)(870)(450)(10)\text{mm}^3(9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$w = 299.262 \text{ N}$$

- Peso base fija

Peso placa horizontal: la placa horizontal tiene medidas de 200x220x10 mm.

$$w_1 = (7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3)(200)(220)(10)\text{mm}^3(9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$w_1 = 33.633 \text{ N}$$

Peso placa vertical: las medidas de la placa vertical son 220x240x20 mm.

$$w_2 = (7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3)(220)(240)(20)\text{mm}^3(9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$w_2 = 80.72 \text{ N}$$

Peso cartelas: Las cartelas tienen forma de un triángulo rectángulo y sus medidas son 80x180x10 mm. El peso está multiplicado por 2 debido a que son dos cartelas.

$$w_3 = 2 * \left(7.8 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}\right) * \frac{1}{2} * (80)(180)(10)\text{mm}^3(9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$w_3 = 11.007 \text{ N}$$

Peso mandril

$$w_{mandril} = (0.6 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 5.88 \text{ N}$$

Peso eje motriz

Se tiene el diseño de detalle de este elemento en el software Solidworks (Figura 33-3). A través de la opción “propiedades físicas” se obtiene la masa aproximada del mismo. Para calcular su peso se multiplica este valor por la gravedad:

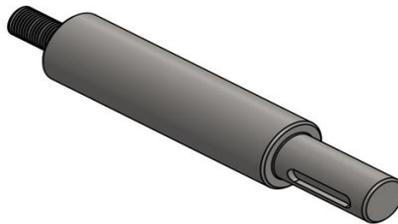


Figura 33-3. Eje motriz- banco de torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

$$w_{eje-motiz} = 0.742 \text{ kg} \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 7.272 \text{ N}$$

Para el peso de la base fija, se suman todos los pesos calculados anteriormente:

$$w_{peso-base-fija} = 138.512 \text{ N}$$

- Peso base móvil

Peso placa horizontal: las medidas de la placa horizontal son 200x200x10 mm.

$$w_4 = (7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3)(200)(200)(10)\text{mm}^3(9.8 \text{ m/s}^2)$$
$$w_4 = 30.576 \text{ N}$$

Peso placa vertical: la placa vertical mide 200x200x10 mm.

$$w_5 = (7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3)(200)(200)(10)\text{mm}^3(9.8 \text{ m/s}^2)$$
$$w_5 = 30.576 \text{ N}$$

Peso cartelas: son de la misma forma y tamaño que las anteriores. El peso está multiplicado por 2 debido a que son dos cartelas

$$w_6 = 2 * \left(7.8 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}\right) * \frac{1}{2} * (80)(180)(10)\text{mm}^3(9.8 \text{ m/s}^2)$$
$$w_6 = 11.007 \text{ N}$$

Peso de la brida para eje

Se tiene el diseño de detalle de este elemento en el software Solidworks (Figura 34-3). A través de la opción “propiedades físicas” se obtiene la masa aproximada del mismo. Para calcular su peso se multiplica este valor por la gravedad:

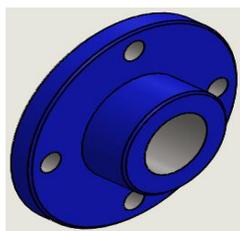


Figura 34-3. Brida

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

$$w_{brida} = (0.738 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 7.232 \text{ N}$$

Peso mandril

$$w_{mandril} = (0.6 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 5.88 \text{ N}$$

Peso eje fijo

De igual manera se tiene el diseño de detalle de este elemento en el software Solidworks (Figura 35-3). A través de la opción “propiedades físicas” se obtiene la masa aproximada del mismo. Para calcular su peso se multiplica este valor por la gravedad:

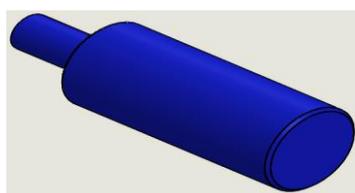


Figura 35-3. Eje fijo

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

$$w_{eje-fijo} = 0.413 \text{ kg} \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 4.047 \text{ N}$$

Para el peso de la base móvil, se suman todos los pesos calculados anteriormente:

$$w_{peso-base-movil} = 89.318 \text{ N}$$

- Peso motor reductor

El peso en masa de este elemento se encuentra en la placa de características.

$$w_{motor-reductor} = 25 \text{ kg} \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 245 \text{ N}$$

- Peso rieles

Para calcular el peso de los rieles primero se calcula el área de la forma de la sección transversal, luego se calcula el volumen, multiplicando el área por la longitud.

Riel 1

$$A = (36)(20) - 2(5)(10) = 620 \text{ mm}^2$$

$$V = A * 500\text{mm} = 310000 \text{ mm}^3$$

El peso está multiplicado por 2 ya que son dos rieles de estas dimensiones.

$$w_{riel1} = 2 * (7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3) * 310000 \text{ mm}^3 (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$w_{riel1} = 47.393 \text{ N}$$

Riel 2

$$A = (87)(20) - 2(5)(10) = 1640 \text{ mm}^2$$

$$V = A * 500\text{mm} = 820000 \text{ mm}^3$$

$$w_{riel2} = (7.8 * 10^{-6} \text{ kg/mm}^3) * 820000 \text{ mm}^3 (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$w_{riel2} = 62.681 \text{ N}$$

El peso de los rieles es: $w_{rieles} = w_{riel1} + w_{riel2} = 110.074 \text{ N}$

El peso total que actúa sobre la placa principal es:

$$W_{TOTAL} = w + w_{\text{peso-base-fija}} + w_{\text{peso-base-movil}} + w_{\text{motor-reductor}} + w_{rieles}$$

$$W_{TOTAL} = 882.166 \text{ N}$$

La carga anterior estará actuando como una carga distribuida sobre toda la superficie de la placa principal, para el cálculo de la carga distribuida se divide la carga total para la longitud total de la placa principal.

$$q = \frac{882.166 \text{ N}}{870 \text{ mm}}$$

$$q = 1.014 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Para calcular el espesor de la placa principal se procede a dibujar el diagrama de cuerpo libre (Gráfico 26-3):

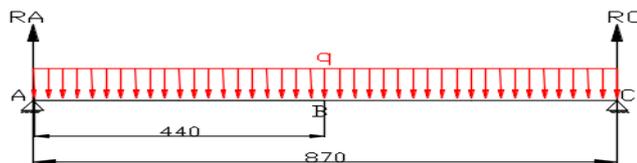


Gráfico 26-3. Diagrama de cuerpo libre de la placa principal- banco torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Del diagrama de cuerpo libre se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum M_A \curvearrowright = 0$$

$$R_C(870) = q * \frac{L^2}{2}$$

$$R_C = 441.09 \text{ N}$$

$$\sum F_Y = 0$$

$$R_A + R_C = qL$$

$$R_A = (882.18 - 441.09) \text{ N}$$

$$R_A = 441.09 \text{ N}$$

Una vez calculado el valor de las reacciones se traza el diagrama de cortante y momento flector (Gráfico 27-3 y Gráfico 28-3).

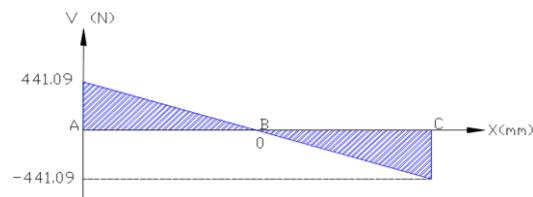


Gráfico 27-3. Diagrama de cortante de la placa principal- banco torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

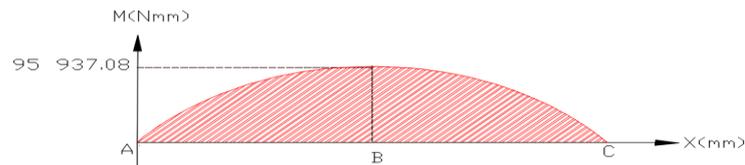


Gráfico 28-3. Diagrama de momento flector de la placa principal- banco torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 28-3 el mayor momento flector es: 95937.08 Nmm en el punto B.

Aplicando la teoría de distorsión con la ecuación (72) se calcula el espesor que se necesita para que la placa presente resistencia mecánica.

$$\sigma = \frac{S_y}{n} \quad (72)$$

$$\sigma = \frac{M_{\text{máx}} C}{I}$$

$$e = \sqrt{\frac{6 * M_{\text{máx}} * n}{S_y * b}}$$

$$e = \sqrt{\frac{6 * 95937.08 \text{ Nmm} * 6}{250 \text{ MPa} * 450 \text{ mm}}}$$

$$e = 5.541 \text{ mm}$$

Se selecciona un espesor de 10 mm por ser el más pequeño de todos los espesores de las placas que posee la empresa. Con este espesor se recalcula el coeficiente de seguridad.

$$n = \frac{e^2 * S_y * b}{6 M_{\text{máx}}}$$

$$n = \frac{(10 \text{ mm})^2 * 250 \text{ MPa} * 450 \text{ mm}}{6(95937.08 \text{ mm})}$$

$$n = 19.544$$

3.4.4.1 Análisis de rigidez de la placa principal

Para este análisis de deformaciones se usa el software ANSYS (Figura 36-3). Siguiendo el debido procedimiento para el análisis de la placa principal se observa la zona de color rojo donde se produce la deformación máxima 0.005623 mm.

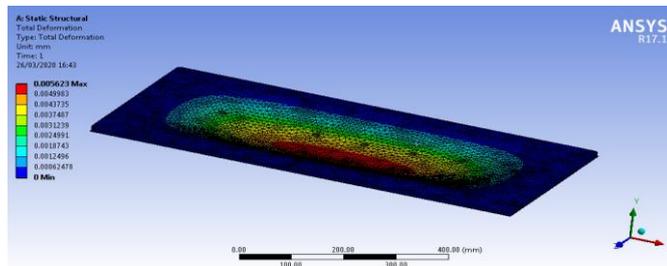


Figura 36-3. Deformación total de la placa principal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Se calcula los límites de deformación recomendados para elementos de máquina, en función de la longitud de la placa:

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300} \right) * L$$

$$\left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{300} \right) * 870 \text{ mm}$$

$$(0.87 - 2.9) \text{ mm}$$

La deformación obtenida con el software es inferior al límite recomendado, con lo cual se asegura que la placa de 10mm es rígida.

3.4.4.2 Diseño de la base fija

El diseño de la base fija se hace por medio del software ANSYS que permite colocar las cargas que actúan en el elemento y se obtiene datos como la deformación y el factor de seguridad para determinar en este caso si el espesor de las placas que conforman la base fija soportará las cargas asignadas.

La fuerza que actúa sobre la base fija es el peso del motor-reductor y para diseñar se traslada esta fuerza con su respectivo momento a la cara pintada de color rojo que se puede ver en la Figura 37-3.

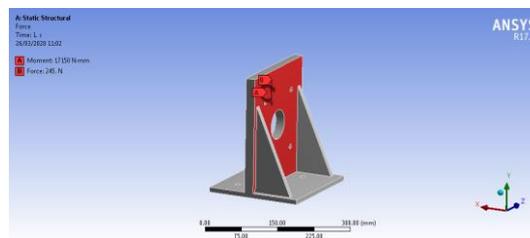


Figura 37-3. Aplicación de cargas en la base fija

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Es importante configurar un mallado para el análisis de esfuerzos y deformación (Figura 38-3), para este caso se aprecia una malla aceptable con un valor de 0.91.

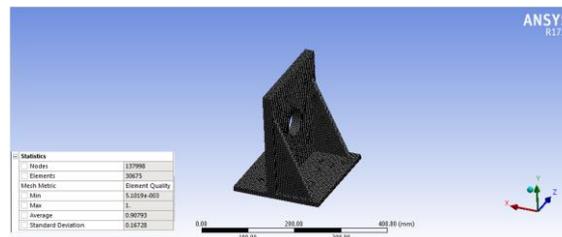


Figura 38-3. Configuración del mallado en la base fija

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Figura 39-3 el valor del esfuerzo máximo equivalente de Von-Mises es de 15.891 MPa, este valor se compara con el S_y del acero estructural ASTM A-36, para determinar su coeficiente de seguridad:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{equiv}}$$

$$n = \frac{250MPa}{15.891 MPa} = 15.73$$

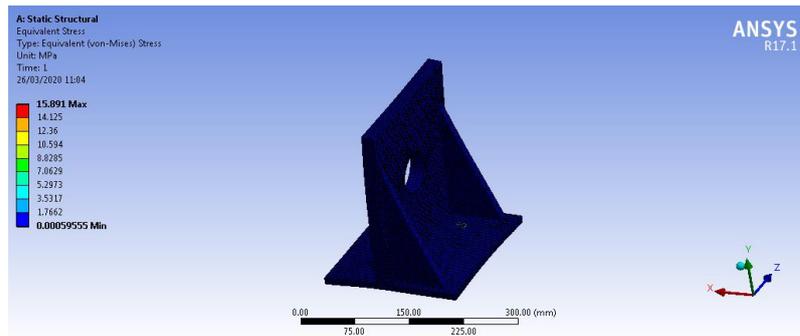


Figura 39-3. Esfuerzo máximo de Von-Mises base fija

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Por último, se tiene el resultado de la deformación máxima que se produce en el elemento (Figura 40-3), con un valor de 0.0080 mm.

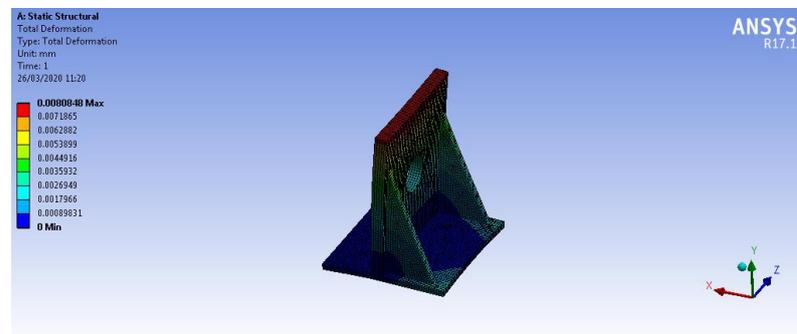


Figura 40-3. Deformación máxima de la base fija

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.4.4.3 *Diseño de la base móvil*

Se utiliza el software ANSYS para diseñar la placa móvil, se aplica las cargas que actúan en el elemento y se obtiene la deformación y el factor de seguridad.

La fuerza que actúa sobre la base móvil es el momento torsor que se transmite desde el motor-reductor, y para diseñar se aplica en la cara de color rojo (Figura 41-3) el momento máximo que genera el motor-reductor a la salida.

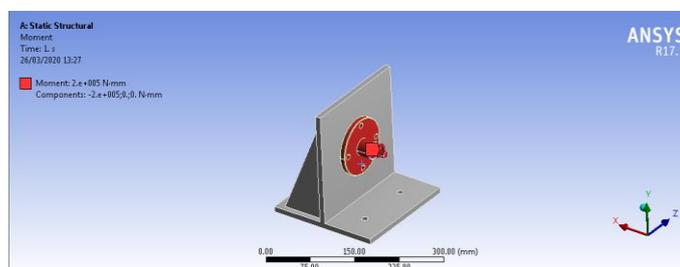


Figura 41-3. Aplicación de cargas en la base móvil

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Se genera un mallado para el análisis de esfuerzos y deformación (Figura 42-3), para este caso se aprecia una malla aceptable con un valor de 0.83.

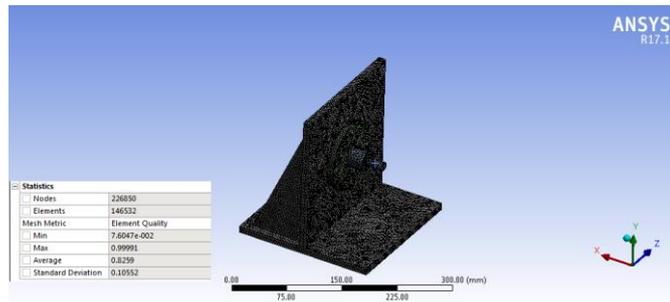


Figura 42-3. Configuración del mallado en la base móvil

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

El coeficiente de seguridad se puede observar en la Figura 43-3, de acuerdo a la escala de colores la base móvil tiene un coeficiente de seguridad mayor a uno.

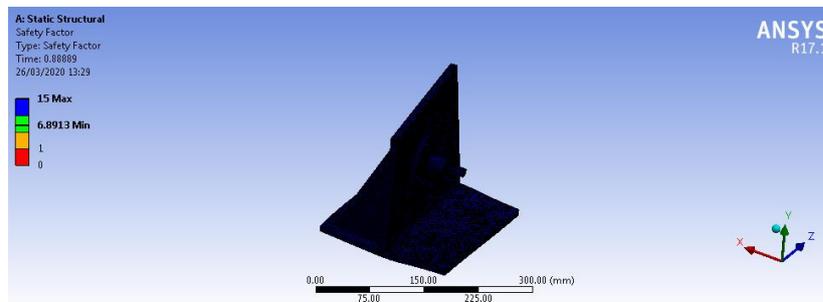


Figura 43-3. Coeficiente de seguridad de la base móvil

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Figura 44-3 se observa el resultado de la deformación máxima que se produce en el elemento, con un valor de 0.035 mm.

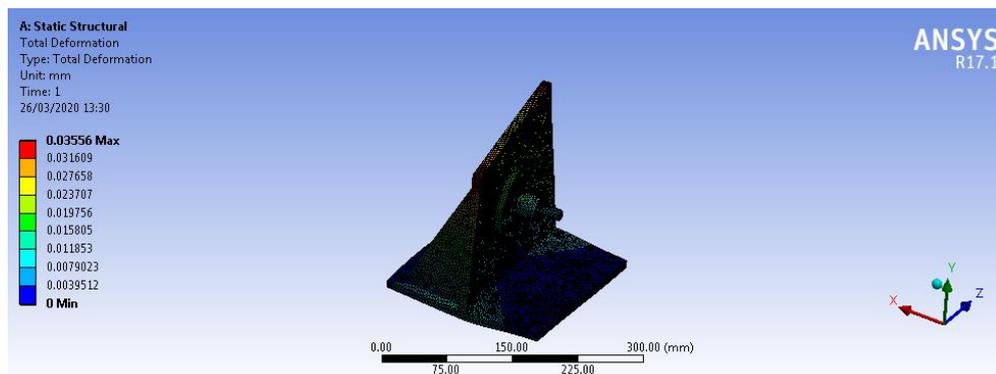


Figura 44-3. Deformación de la base móvil

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.4.4.4 Diseño de la estructura del banco de ensayos

El análisis de la estructura se lo realiza en el software SAP-2000, las cargas que actúan sobre la misma fueron calculadas anteriormente para el diseño de la placa principal, siendo la carga total 882.166 N. A este número se suma un cierto valor de carga como factor de seguridad, dándonos un valor de 1000 N aproximadamente, esta fuerza se divide para 2 y se distribuye en los marcos rígidos y en las vigas longitudinales como se muestra en la Figura 45-3; de la misma manera actúa una carga de 253.526 N en la parte inferior de la estructura producto del peso de la placa secundaria, y así mismo a este número se suma una carga asegurando un factor de seguridad, aproximando este valor a 300 N.

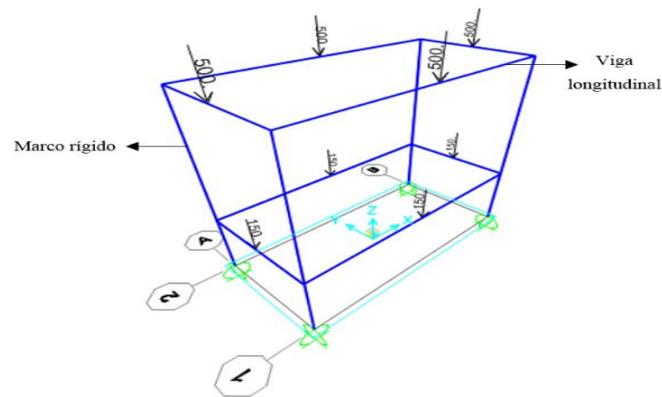


Figura 45-3. Aplicación de cargas en la estructura del banco de ensayos de torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La estructura se diseña con tubo cuadrado de 50x50x3 mm y se realiza el análisis de resistencia con el software, el mismo que da como resultado una escala de colores que indica la demanda/capacidad de la estructura, el cual debe ser menor a 1. Al observar un color celeste en la Figura 46-3 se verifica que el factor demanda/capacidad es 0.5 que indica que la estructura es resistente.

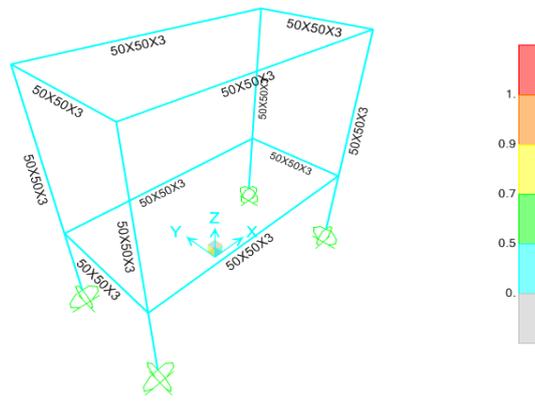


Figura 46-3. Estructura del banco de torsión: factor demanda /capacidad

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.5 Construcción y montaje del banco de ensayo de torsión

La construcción y montaje del banco de ensayos se basa en el método inductivo porque partiendo del mecanizado y fabricación de cada elemento mecánico se logra obtener el banco de ensayos de torsión en su totalidad.

3.5.1 Construcción y montaje mecánico

El procedimiento de construcción y montaje se presenta en la Tabla 48-3 y Tabla 53-3.

Tabla 48-3: Procedimiento para la construcción

No	Componente	Descripción de la actividad	Equipos y materiales	Imagen
1	ESTRUCTURA	Cortar y soldar los tubos cuadrados para construir la estructura, las medidas están dadas en los planos de construcción	Cortadora automática, flexómetro, marcador de metal, guantes, tubo cuadrado HN de 50 x50 x 3 mm, tronzadora manual, protector facial, soldadora automática TIG LINCOLN ELECTRICA, escuadra, antorcha, careta para soldar, mascarilla, argón, varilla de aporte 3/32 ER70S-6, electrodo tungsteno 3/32, amoladora, disco de desbaste	  
2	NIVELADORES	Cortar 4 placas cuadradas de 40 x 40 x 10 mm para los auto-niveladores	Cortadora automática, flexómetro, marcador de metal, guantes, placa de acero A-36	
3		Realizar en el centro de las 4 placas un agujero de 8.5 mm de diámetro	Taladro de pedestal, entenalla, granete, martillo, broca 8.5 mm	
4		Roscar el agujero con un machuelo M10	Bandeador, machuelo M10, entenalla, grasa	
5		Soldar las 4 placas a los tubos cuadrados verticales de la estructura	Los mismos materiales y equipos del paso 1	

Tabla 49-3: Procedimiento para la construcción (continuación)

6	NIVELADORES	Esmerilar el exceso de soldadura de las 4 placas	Amoladora, protector facial, guantes, disco de desbaste	
7		Colocar los niveladores	Limas	
8	INSPECCIÓN CON TINTAS PENETRANTES	Limpiar la superficie para eliminar polvo o grasa que puede estar presente.	Disolvente, guaípe, tela, guantes, mascarilla	
9		Aplicar el líquido penetrante sobre los cordones de soldadura, dejarlo actuar durante 15 minutos	Líquido penetrante, brocha, guantes, mascarilla	
10		Limpiar el líquido penetrante aplicado en los cordones de soldadura	Solvente limpiador, guaípe, lienzo, guantes, mascarilla	
11		Aplicar el revelador de manera continua y uniforme en los cordones de soldadura	Revelador, guantes, mascarilla	
12	ESTRUCTURA	Pintar la estructura	Compresor, pistola para pintar, pintura de esmalte brillante gris, guantes, mascarilla, disolvente	
13	PLACA PRINCIPAL	Cortar la placa principal utilizando plasma, con las medidas dadas en el plano	Cortadora de plasma, playo de presión, escuadra, marcador de metal, flexómetro, gafas, guantes	
14		Realizar todas las perforaciones según el plano, las perforaciones se realizan colocando la placa sobre la estructura para perforar los dos componentes al mismo tiempo	Taladro magnético, mordazas, brocas, flexómetro, marcador de metal, granete, pernos	

Tabla 50-3: Procedimiento para la construcción (continuación)

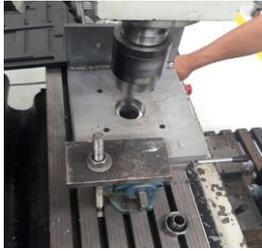
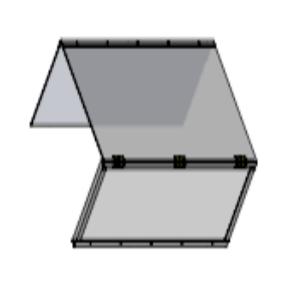
15	PLACA SECUNDARIA	Cortar la placa secundaria	Cortadora de plasma, playo de presión, escuadra, marcador de metal, flexómetro, gafas, guantes, placa A-36	
16	BASE FIJA	Cortar y soldar las placas de la base fija	Cortadora de plasma, playo de presión, escuadra, marcador de metal, flexómetro, gafas, guantes, placa A-36, soldadora automática TIG LINCOLN ELECTRIC, martillo, antorcha, careta para soldar, mascarilla, argón, varilla de aporte 3/32 ER70S-6, electrodo tungsteno 3/32	 
17		Perforar los agujeros en la placa horizontal de la base fija	Taladro magnético, mordazas, brocas, escuadra, flexómetro, marcador de metal, granete	
18		Perforar los agujeros en la placa vertical para el acople del motorreductor, y realizar un alojamiento para el rodamiento en la parte central de la placa vertical	Fresadora, broca, cuchilla para interiores, reloj comparador, flexómetro, escuadra, granete, gafas	
19		Acoplar el rodamiento en el alojamiento	Prensa hidráulica, guantes, gafas	
20		Mecanizar la cara inferior de la placa horizontal, para obtener la planicidad que se indica en el plano	Centro de Mecanizado	

Tabla 51-3: Procedimiento para la construcción (continuación)

21		Cortar y soldar las placas de la base móvil	Cortadora de plasma, playo de presión, escuadra, marcador de metal, flexómetro, gafas, guantes, placa A-36, soldadora automática TIG LINCOLN ELECTRIC, martillo, antorcha, careta para soldar, mascarilla, argón, varilla de aporte 3/32 ER70S-6, electrodo tungsteno 3/32	 
22	BASE MÓVIL	Perforar los agujeros en la placa horizontal de la base fija	Taladro magnético, mordazas, brocas, escuadra, flexómetro, marcador de metal, granete	
23		Perforar un agujero en el centro de la placa vertical para el alojamiento de la brida	Taladro automático, broca, gafas	
24		Mecanizar la cara inferior de la placa horizontal, para obtener la planicidad que se indica en el plano	Centro de Mecanizado	
25	BRIDA	Mecanizar la brida de acoplamiento según las dimensiones detalladas en el plano	Torno convencional, cuchilla de desbaste, brocas, calibrador pie de rey, micrómetro, reloj comparador, gafas, grasa, eje de cero AISI 1018	
26		Perforar los agujeros de la brida y acoplar a la placa vertical de la base móvil	Taladro de Pedestal, broca, entenalla, mordaza, aceite lubricante, gafas	

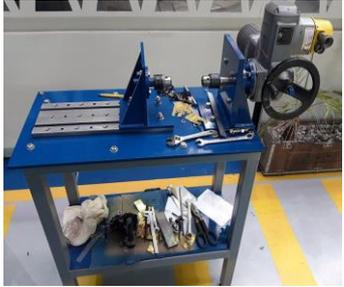
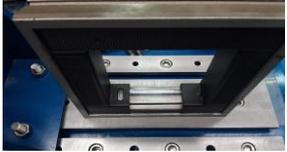
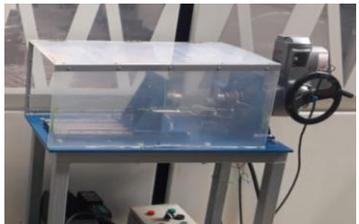
Tabla 52-3: Procedimiento para la construcción (continuación)

27	EJE FIJO Y EJE MOTRIZ	Cortar la longitud del eje fijo y del eje motriz	Cortadora automática, flexómetro, marcador de metal, guantes, eje de acero AISI 1018	
28		Mecanizar los ejes	Torno convencional, cuchilla de desbaste, brocas, calibrador pie de rey, micrómetro, reloj comparador, gafas, grasa, eje de acero AISI 1018	
29	RIELES	Mecanizar las rieles, en las que se desliza la base móvil	Centro de mecanizado, AISI 304	
30		Perforar la placa principal para acoplar los rieles	Taladro magnético, mordazas, brocas, escuadra, flexómetro, marcador de metal, granete	
31		Roscar los agujeros para los respectivos	Bandeador, machuelo, grasa,	
32	PLACAS	Pintar todas las placas mencionadas anteriormente	Compresor, pistola para pintar, pintura hempel brillante color azul, guantes, mascarilla, disolvente	
33	CARCASA DE PROTECCIÓN	Cortar y soldar los ángulos para el marco de la carcasa de protección	Tronzadora manual, soldadora automática TIG LINCOLN ELECTRIC, escuadra, flexómetro, martillo, antorcha, guantes, careta para soldar, mascarilla, argón, varilla de aporte 3/32 ER70S-6, electrodo tungsteno 3/32, ángulo A-36	
34		Cortar y perforar las piezas de acrílico según los detalles en el plano	Caladora eléctrica, taladro magnético, brocas, mordazas, escuadra, marcador de metal, gafas, acrílico	

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Tabla 53-3: Procedimiento para el montaje

No.	Descripción de la actividad	Equipos y materiales	Imagen
1	Colocar la placa principal sobre la estructura y unirla mediante pernos y tuercas	Pernos M12 x 1.75 x 30, tuercas, arandelas, llave de boca y corona,	
2	Ubicar la placa secundaria en la parte inferior de la estructura	Martillo de goma	
3	Situar las rieles sobre la placa principal y unir mediante pernos y tuercas	Pernos cabeza allen M12 x 1.75 x 40, llaves hexagonales, llave de boca y corona	
4	Colocar la base móvil sobre las rieles y ajustar con los espárragos y tuercas en T	Espárragos M12 x 1.75 x 40, tuercas en T mecanizadas, llave de boca y corona	
5	Situar la brida en la placa vertical de la base móvil y ajustarla por medio de pernos y tuercas	Pernos cabeza hexagonal M10 x 1.5 x 40, tuercas, llave de boca y corona	
6	Acoplar el mandril al eje fijo de la base móvil	Llave del mandril	
7	Instalar la base fija sobre la placa principal y unirla mediante pernos y tuercas	Pernos cabeza hexagonal M12 x 1.75 x 35, llave de boca y corona	
8	Acoplar el mandril al eje motriz de la base fija	Entenalla, llave de mandril	
9	Montar la polea para el encóder	Llave hexagonal	
10	Introducir el eje motriz en el rodamiento de la base fija	Martillo de goma	
11	Montar el motor-reductor mediante el acople	Pernos cabeza hexagonal M10 x 1.5 x 25 mm, llave de boca y corona	
12	Nivelar la mesa con los autoniveladores	Nivel de Precisión	
13	Alinear el eje fijo con el eje motriz	Reloj comparador de aguja, reloj comparador de palanca, llave para mandril, alzas	
14	Instalar el encóder rotatorio	Pernos, tornillos, llave de boca y corona, destornillador estrella, poleas, banda	
15	Colocar el protector sobre la placa principal	Pernos cabeza redonda M4 x 0.7 x 25, destornillador estrella, destornillador plano, bisagras	

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.5.2 Alineación del banco de ensayo

En la norma ANSI/ASA S2.75-2017/Part1 “Metodología de alineación de ejes, Part1: Principios generales, métodos, prácticas y tolerancias” se encuentra un diagrama de flujo del proceso de alineación de ejes que documenta los pasos clave y puntos de decisión; dicho diagrama puede ser aplicado ampliamente en todas las industrias (Gráfico 29-3 y Gráfico 30-3). Basándose en este diagrama y las tolerancias dadas por la misma norma se realiza la alineación del banco de ensayos de torsión.

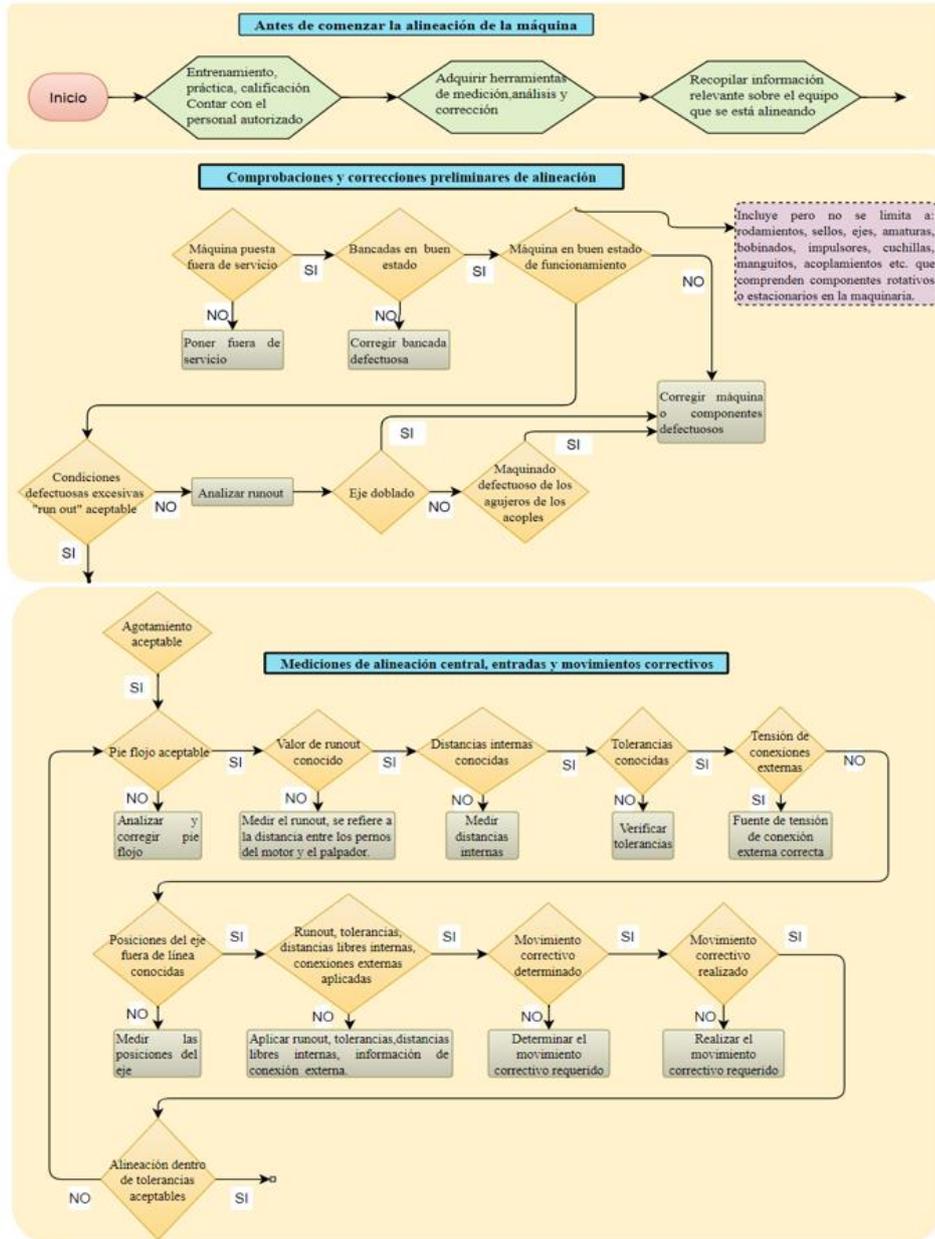


Gráfico 29-3. Diagrama de flujo del proceso de alineación

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Vogel, 2018)



Gráfico 30-3. Diagrama de flujo del proceso de alineación (continuación)

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Vogel, 2018)

A continuación, se muestra las tolerancias de alineación de ejes (Tabla 55-3), proporcionados por la norma ANSI/ASA S2.75-2017/Part1. Además, las tolerancias de otros factores críticos, tales como nivelación, planitud del pie, desviación de superficie coplanar (Tabla 54-3).

Tabla 54-3: Pautas para el nivel, la planitud y la coplanaridad

Tipo de maquinaria	Nivelación recomendada	Planitud recomendada del pie	Desviación de superficie coplanar
Maquinaria de proceso general de hasta 400 kW o 500HP	$\leq 0.8 \text{ um/mm}$ ($\leq 10 \text{ mils/ft}$)	$\leq 0.4 \text{ um/mm}$ ($\leq 5 \text{ mils/ft}$)	$\leq 50 \text{ um}$ ($\leq 2 \text{ mils}$)
Maquinaria de proceso general 400kW o 500HP o superior	$\leq 0.4 \text{ um/mm}$ ($\leq 5 \text{ mils/ft}$)	$\leq 0.2 \text{ um/mm}$ ($\leq 2 \text{ mils/ft}$)	$\leq 50 \text{ um}$ ($\leq 2 \text{ mils}$)

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Vogel, 2018)

Tabla 55-3: Tolerancias de desviación del eje

Tolerancia de desviación del eje	Diámetros de eje hasta 160mm incluido (6.25in)	Diámetros de eje de más de 160mm (6.25in)
Estándar	75 um (3mils) TIR	75 um (3mils) TIR
Precisión	25 um (1mil) TIR	25 um (1mil) TIR

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Vogel, 2018)

Para desarrollar el tercer bloque del diagrama de flujo se aplica uno de los métodos de alineación, para el presente trabajo se usa el método radial-axial (cara y periferia) (Figura 47-3).

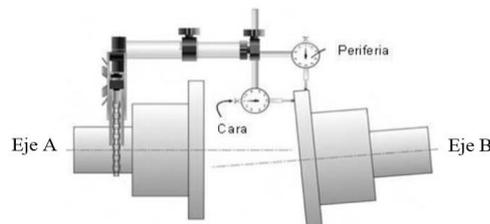


Figura 47-3. Método cara y periferia

Fuente: (SENATI, 2013)

Para la calibración de los bancos de ensayo se siguen los siguientes pasos:

- Montar el reloj comparador para tomar las medidas de desalineación radial (paralela) y axial (angular),(Figura 47-3), comparar estos valores con la tolerancia de alineación.
- Medir los parámetros A, B y C. (Anexo M)
- Registrar las lecturas que se toman.
- Determinar las posiciones verticales y horizontales para realizar los movimientos de corrección usando las ecuaciones del Anexo N, ecuación (73) y (74).

$$P_1 = RAB + \frac{ZAB}{D} x L1 \quad (73)$$

$$P_2 = RAB + \frac{ZAB}{D} x (L1 + L2) \quad (74)$$

Donde:

- P1= movimiento para patas delanteras
- P2= movimiento para patas traseras
- RAB=DIR/2
- ZAB==DIF
- Corregir la posición vertical.
- Corregir la posición horizontal.
- Medir nuevamente las posiciones y comparar con las tolerancias de alineación.

3.5.2.1 Alineación del banco de torsión

Antes del procedimiento de calibración, visualmente se deja lo más linealmente posible el eje motriz y el eje fijo, ubicanco alzas en la patas del motor y realizando movimientos horizontales.

Luego en el proceso de calibración se tiene:

- La toma de medidas se realiza tanto arriba (a), abajo (b), derecha (d) e izquierda (i); para medidas radiales y axiales como se indica en la Figura 48-3. La medida radial indica la altura del eje B respecto al A. La medida axial indica el ángulo del eje B respecto al A.



(a) Lectura en la cara (axial)

(b) Lectura en la periferia (radial)

Figura 48-3. Toma de medidas de desviación (a) y (b)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Se compara verifica que las medidas tomadas estén en la tolerancia según la norma ANSI/ASA S2.75-2017/Part1 y se determina que efectivamente los valores de DIF y DIR son menores a 75 μm (0.075 mm); por lo cual no se realiza el cálculo de correcciones de las patas del motor y se considera que la alineación es aceptable.

3.6 Programación y control automático

3.6.1 Diagrama eléctrico general

El diagrama eléctrico general se muestra en la Figura 49-3 donde se indica la conexión del motorreductor, el variador de frecuencia, el encóder rotatorio y los pulsadores de inicio y paro para realizar los ensayos de torsión.

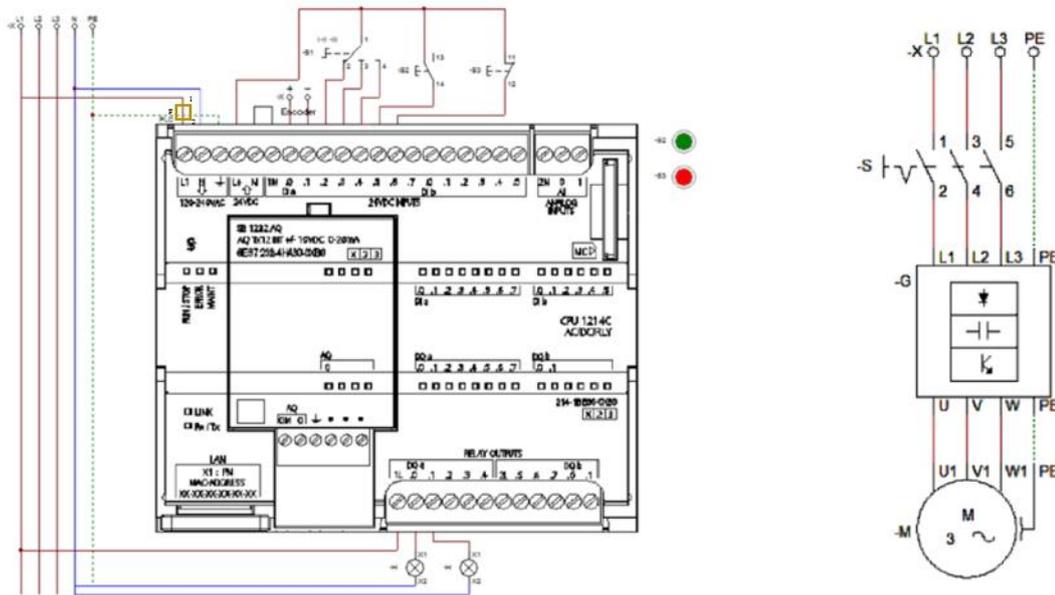


Figura 49-3. Diagrama eléctrico general

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

A continuación, en la Figura 50-3 se muestra la conexión de los componentes electrónicos:



Figura 50-3. Sistema eléctrico

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.6.2 Adquisición de datos

Para el procesamiento de datos y la visualización de los mismos se usa el software LABVIEW; el cual tiene un lenguaje de programación gráfico que permite adquirir datos y procesar señales. LABVIEW es una aplicación considerada como instrumento virtual o VI, ya que puede desempeñar las mismas funciones de un instrumento de medida como una pinza amperimétrica y otros.

LABVIEW se divide en el panel frontal y el diagrama de bloques. En el panel frontal se programa la interfaz hombre-máquina donde el usuario ingresa datos y visualiza datos de salida; en el diagrama de bloques se programa las funciones que se necesitan usando un lenguaje gráfico.

A continuación, se visualiza la interfaz del banco de ensayos de torsión en la cual el usuario debe llenar el campo de datos, donde debe ingresar valores como el diámetro de la probeta de ensayo, nombre del ensayo para que al momento de finalizar la prueba obtenga un archivo en ACCESS que registre resultados como torque, ángulo torsor y demás variables que se pueden ver en la tabla de resultados Figura 51-3, así mismo en el panel frontal se tienen los botones para iniciar y parar el ensayo y configurar la velocidad de la prueba.

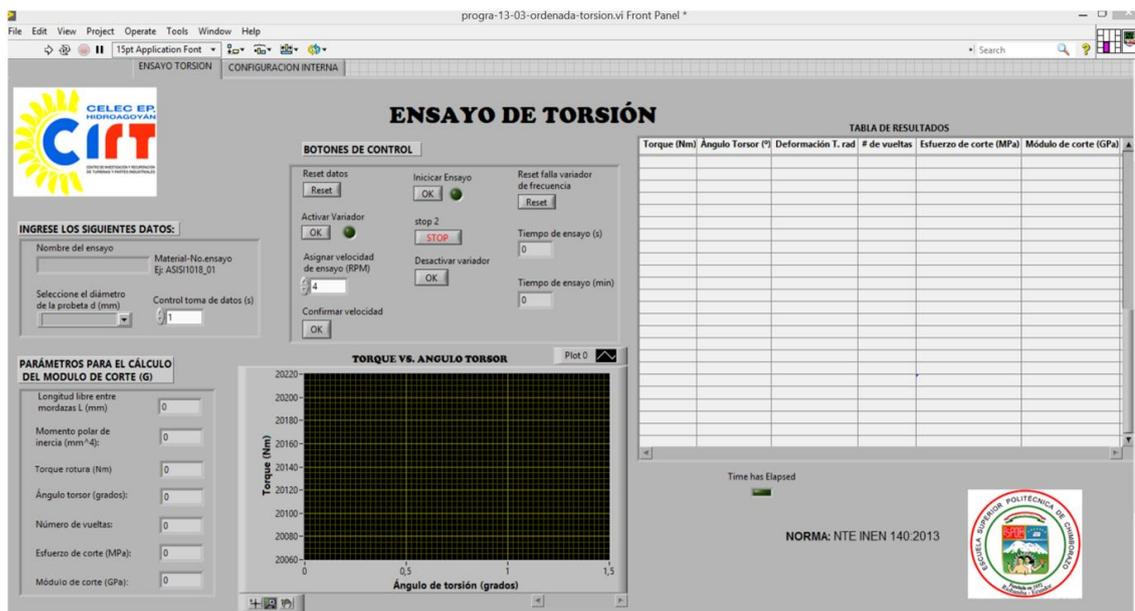


Figura 51-3. Pantalla frontal del banco de ensayos de torsión

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020

La programación del diagrama de bloques se detalla a continuación.

En la Figura 52-3 se puede observar la comunicación del PLC con la PC mediante una comunicación Modbus.

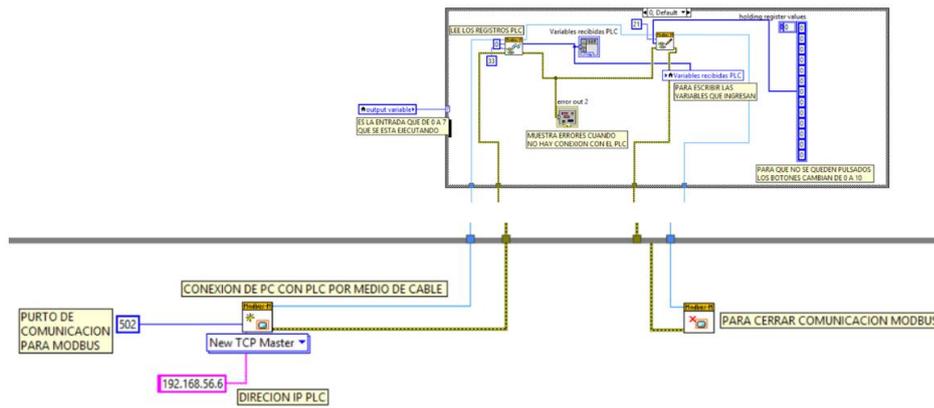


Figura 52-3. Comunicación Modbus y valores de registro

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Las señales de las variables de interés son emitidas por el PLC (Figura 53-3) y recibidas mediante el software Labview.

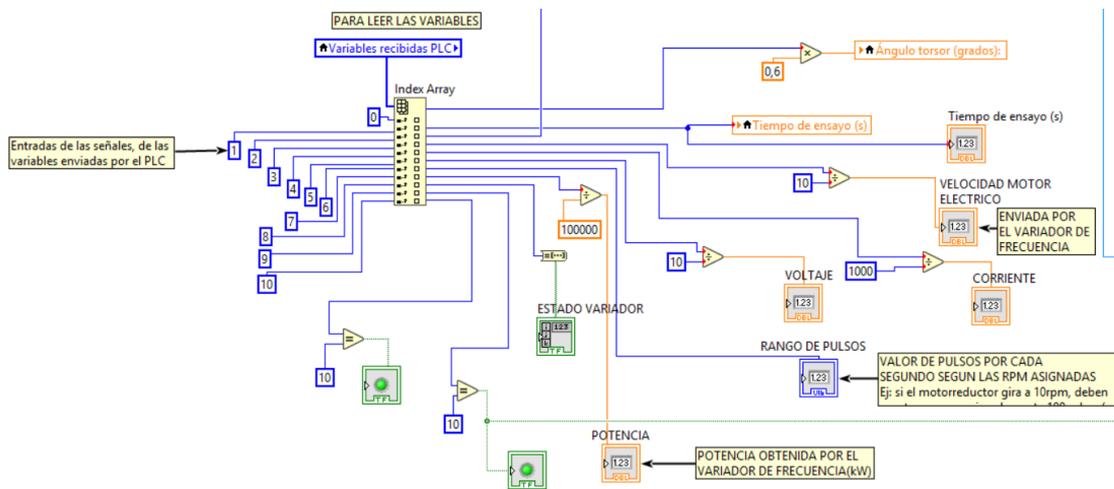


Figura 53-3. Lectura y procesamiento de señales

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Para obtener los valores de las variables del ensayo de torsión, mediante la función “formula node” se introducen las señales recibidas en las ecuaciones matemáticas respectivas (Figura 54-3).

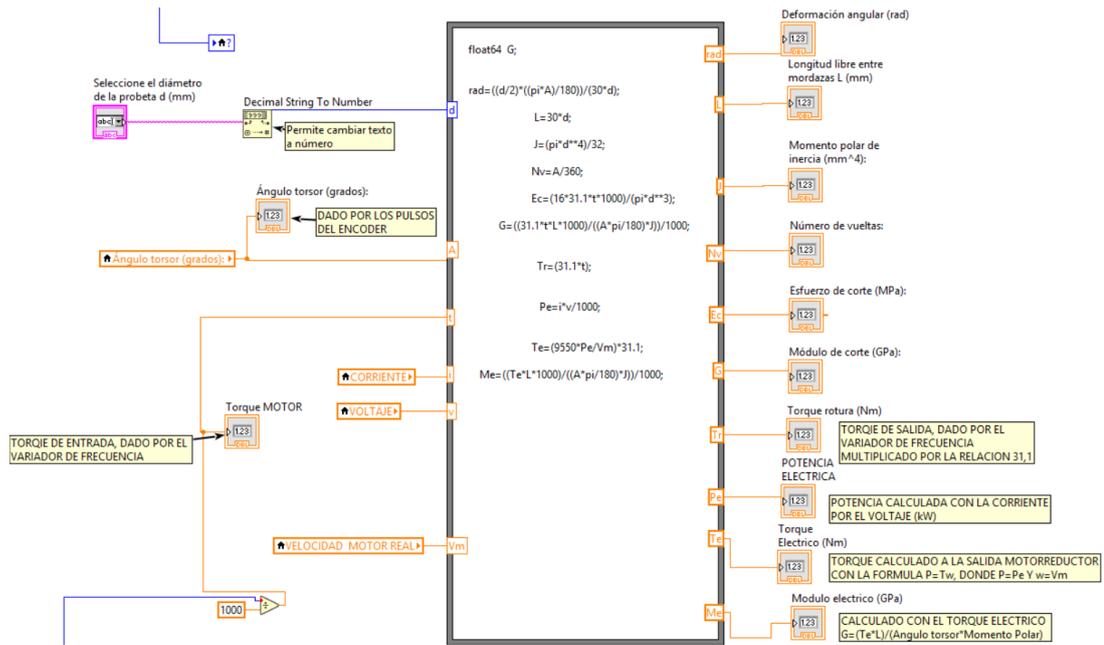


Figura 54-3. Obtención de las variables del ensayo

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Figura 55-3 se observa el control de los pulsadores, lo cual se realiza mediante la función “fórmula node”.

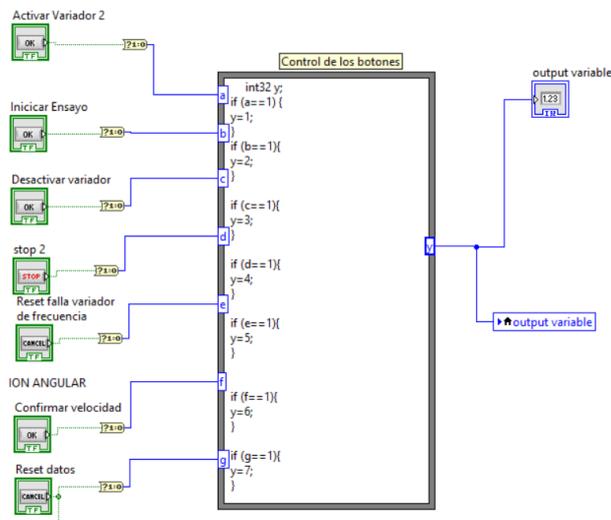


Figura 55-3. Control de pulsadores

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 58-3 se presenta la programación de la tabla de resultados en la pantalla frontal de Labview asociada con un “elapsed time” para el control de tiempo de la toma de datos.

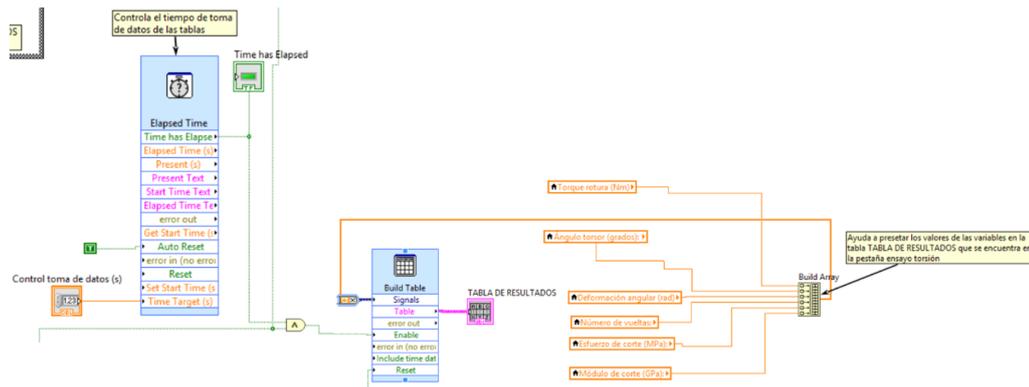


Figura 56-3. Tabla de resultados en la pantalla frontal de Labview

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Los valores de las variables del ensayo de torsión quedan registrados en un archivo de ACCESS al que se puede acceder luego de finalizar el ensayo, esto se logra con la programación de la Figura 57-3.

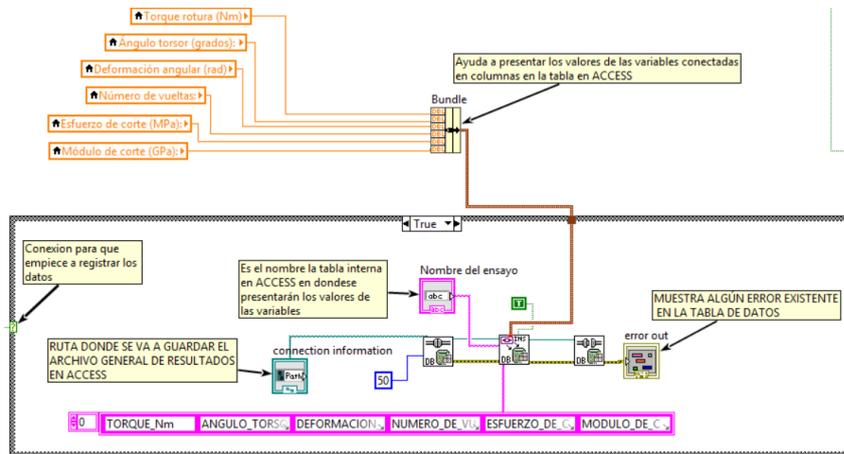


Figura 57-3. Obtención de datos en un archivo de ACCESS

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.7 Caracterización de los materiales a ensayar: ASTM A743 CA-6NM y AISI 1018

En la caracterización de los materiales se utiliza el método experimental debido a que se realiza pruebas de espectrometría, dureza y metalografía con lo cual se confirma que los materiales a ensayar son el acero ASTM A743 CA-6NM y el acero AISI 1018.

3.7.1 Espectrometría del material de las turbinas hidráulicas como viene de fábrica

A partir del corte del álabe directriz, se realiza la espectrometría (Tabla 56-3) para el análisis de composición química y cuantificar los elementos presentes comparando con los presentados en la Tabla 6-2.

Tabla 56-3: Espectrometría del álabe directriz

REPORTE DE ESPECTROMETRÍA				
	CÓDIGO: CIRT-REG-ESP-01		Hoja: 1 de 1	Fecha: 2020-02-12
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA				
Muestra: Álabe directriz de turbina Francis			Estado: Como viene de fábrica.	
Material: Acero Inoxidable				
EQUIPO Y CONDICIONES				
Equipo: Espectrómetro de emisión óptica por chispa			Método: Fe130F S	
Modelo: Q4 MOBILE / Q0037				
COMPOSICIÓN QUÍMICA				
C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0.050	0.497	0.599	0.029	0.012
Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Co (%)
11.93	0.504	4.090	<0.0100	0.070
Cu (%)	Nb (%)	Sn (%)	Ti (%)	V (%)
0.072	<0.0100	0.0085	<0.0020	0.040
W (%)	N (%)	Fe (%)	-	-
<0.030	<0.130	82.005		
OBSERVACIONES:				
De acuerdo al análisis de la composición química del reporte de espectrometría se determina que se trata del acero ASTM A743 grado CA6-NM basados en la norma del material (A743).				

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.7.2 *Espectrometría de un acero de bajo carbono*

A partir de un eje de acero de bajo carbono obtenido en la bodega de Agoyán, se realiza la espectrometría (Tabla 57-3) para el análisis de composición química y cuantificar los elementos presentes comparando con los presentados en la Tabla 4-2.

Tabla 57-3: Espectrometría de un eje de acero

	REPORTE DE ESPECTROMETRÍA				
	CÓDIGO: CIRT-REG-ESP-01	Hoja: 1 de 1	Fecha: 2020-02-12		
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT				
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
Muestra: Eje obtenido de la bodega de Agoyán			Estado: Como viene de fábrica.		
Material: Acero de bajo contenido de carbono					
EQUIPO Y CONDICIONES					
Equipo: Espectrómetro de emisión óptica por chispa			Método: Fe130F S		
Modelo: Q4 MOBILE / Q0037					
COMPOSICIÓN QUÍMICA					
C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	
0.158	0.313	0.602	0.018	0.035	
Cu (%)	Pb (%)	Cr (%)	Al (%)	Mo (%)	
0.270	0.005	0.068	0.001	0.010	
Ni (%)	Nb (%)	W (%)	Ti (%)	V (%)	
0.88	0.003	0.004	0.009	0.003	
Sn (%)	Co (%)	B (%)	Fe (%)		
0.022	0.012	0.0004	98.214		
OBSERVACIONES:					
De acuerdo al análisis de la composición química del reporte de espectrometría se determina que se trata del acero AISI SAE 1018 basados en la norma ASTM A108.					

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.7.3 Metalografía del acero inoxidable ASTM A743 CA-6NM

En la Tabla 58-3 se detalla la metalografía del acero ASTM A743 CA-6NM.

Tabla 58-3: Metalografía del acero ASTM A743 CA-6NM

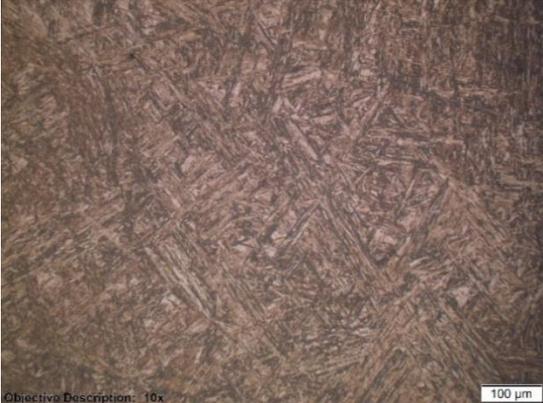
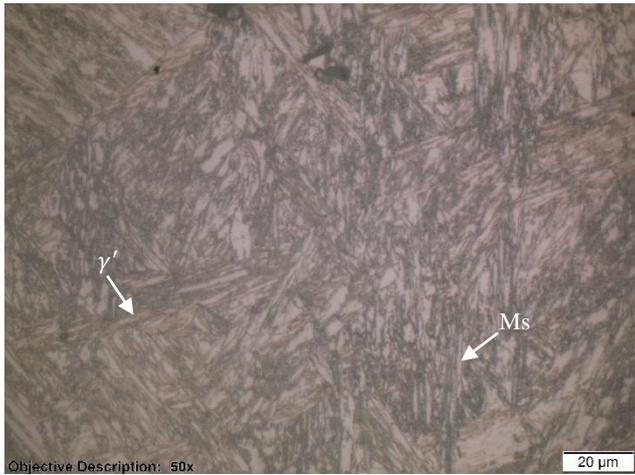
	REPORTE DE INSPECCIÓN METALOGRÁFICO			
	CÓDIGO: CIRT-REG-MET- 01	Hoja: 1	Fecha: 2020-02-06	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL				
Material: Acero Inoxidable		Grado/Tipo: CA6-NM		
Especificación: ASTM A743		Estado: Como viene de fábrica		
PROTOCOLO DEL ENSAYO METALOGRÁFICO				
Tipo de estudio: De Laboratorio Equipo: Microscopio Metalográfico Modelo: Olympus GX51 / 5H42662 Norma Aplicable: ASTM E3, ASTM E407		Preparación Superficial: Pulido Mecánico Tiempo de Preparación: 1 hora Tiempo de ataque: 100-130 segundos Reactivo: Vilella (1g ácido pícrico + 5 mL HCL + 100 MI etanol)		
RESULTADOS				
MICROFOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA				
				
Microestructura del Acero Inoxidable ASTM A743 grado CA6-NM en condiciones de fábrica a 100 X.				

Tabla 59-3: Metalografía del acero ASTM A743 CA-6NM (continuación)

ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA	
 <p>Objective Description: 50x</p>	<p>Magnificación: 500 X</p> <p>Componentes Micro estructurales:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Martensita Revenida (Ms) -Austenita Retenida (γ')
TAMAÑO PROMEDIO DE LAS AGUJAS DE MARTENSITA	
 <p>Objective Description: 50x</p>	<p>Magnificación: 500X</p> <p>L1= 12.94 μm</p> <p>L2= 14.33 μm</p> <p>L3= 13.28 μm</p> <p>L4= 13.02 μm</p> <p>L5= 14.91 μm</p> <p>Promedio= 13.7 μm</p>
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>Microestructura de matriz martensítica revenida (Ms) con una geometría acicular ordenada en grupos de listones paralelos ubicados en diferentes planos de crecimiento. Presencia de espacios de austenita retenida.</p>	

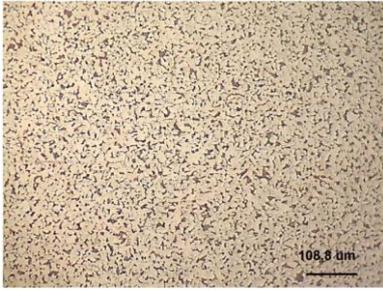
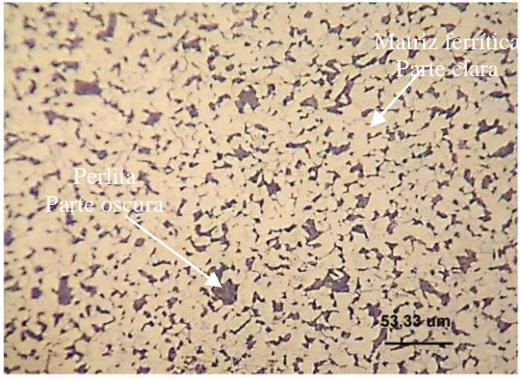
Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.7.4 Metalografía del acero AISI 1018

En la Tabla 60-3 se detalla la metalografía del acero AISI 1018.

Tabla 60-3: Metalografía del acero AISI 1018

	REPORTE DE INSPECCIÓN METALOGRÁFICO		
	CÓDIGO: CIRT-REG-MET-01	Hoja: 1	
AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL			
Material: Acero de bajo carbono		Grado/Tipo: Laminado en frío	
Especificación: AISI-SAE 1018		Estado: Como viene de fábrica	
PROTOCOLO DEL ENSAYO METALOGRÁFICO			
Tipo de estudio: De Laboratorio		Preparación Superficial: Pulido Mecánico	
Equipo: Microscopio Metalográfico		Tiempo de Preparación: 1 hora	
Modelo: Olympus GX51 / 5H42662		Tiempo de ataque: 10-15 segundos	
Norma Aplicable: ASTM E3, ASTM E407		Reactivo: Nital al 3%	
RESULTADOS			
MICROFOTOGRAFÍA DE LA MICROESTRUCTURA			
			
Microestructura del acero AISI-SAE 1018 en condiciones de fábrica a 100 X.			
ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA			
		Magnificación: 200X Componentes Micro estructurales: -Ferrita -Perlita	
OBSERVACIONES:			
La microestructura presenta perlita en una matriz ferrítica, que corresponde a un acero de bajo contenido de carbono con referencia en el ASM Metals HandBook volumen 9.			

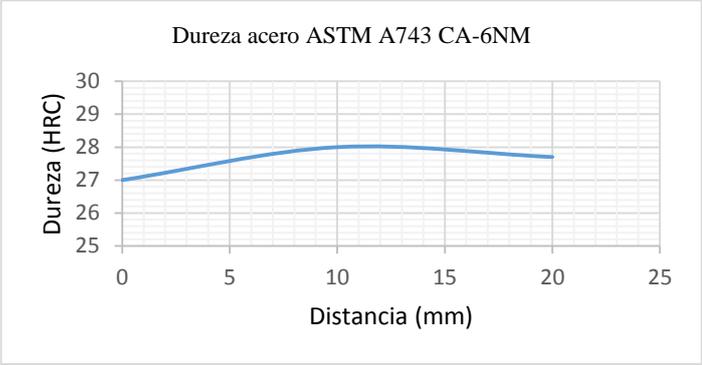
Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.7.5 Dureza del acero inoxidable ASTM A743 CA-6NM

En la Tabla 61-3 se muestra la prueba de dureza para el material de las turbinas.

Tabla 61-3: Dureza del acero ASTM A743 CA-6NM

			REPORTE DE ENSAYO DE DUREZA																	
CÓDIGO: CIRT-REG-MET-01			Hoja: 1 de 1		Fecha: 2020-02-06															
AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT																				
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL																				
Material: Acero Inoxidable Especificación: ASTM A743				Grado/Tipo: CA6-NM Estado: Como viene de fábrica																
PROTOCOLO DEL ENSAYO DE DUREZA																				
Tipo de estudio: De Laboratorio Marca: EMCOTEST Modelo: N4B000 Identador: EMCO 5497 Método: Dureza Rockwell				Norma Aplicable: ASTM A370-16, ASTM E18-15 Tipo de Identador: Cono de Diamante 120 ° Precarga: 10 kg Carga Aplicada: 150 kgf Tiempo de aplicación: 10 s																
RESULTADOS																				
Valores de dureza a varias distancias				Gráfica: Dureza vs Distancia																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nº</th> <th>Distancia entre mediciones (mm)</th> <th>Dureza (HRC)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>20</td> <td>27</td> </tr> </tbody> </table>				Nº	Distancia entre mediciones (mm)	Dureza (HRC)	1	0	26	2	10	28	3	20	27					
Nº	Distancia entre mediciones (mm)	Dureza (HRC)																		
1	0	26																		
2	10	28																		
3	20	27																		
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS																				
La dureza es un requisito fundamental en la caracterización del material. El valor promedio obtenido en el ensayo de dureza del material ASTM A743 grado CA6-NM es de 27 HRC (262 HB) que se aproxima a 30 HRC (285 HB) el cual es el valor estándar asignado al acero A743 CA-6NM.																				

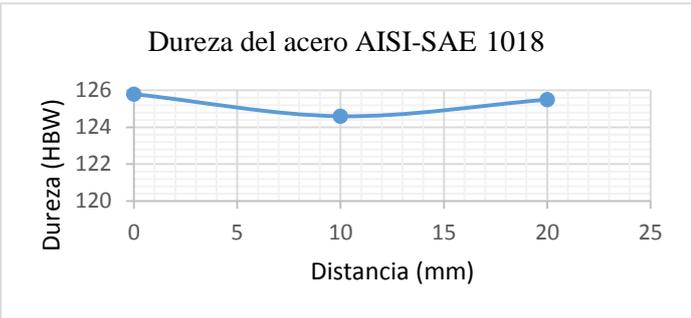
Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.7.6 Dureza del acero AISI 1018

En la Tabla 62-3 se muestra la prueba de dureza para el acero AISI 1018.

Tabla 62-3: Dureza del acero AISI 1018

	REPORTE DE ENSAYO DE DUREZA															
	CÓDIGO: CIRT-REG-MET-01	Hoja: 1 de 1	Fecha: 2020-02-06													
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT															
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL																
Material: Acero de bajo carbono		Grado/Tipo: Laminado en frío														
Especificación: AISI-SAE 1018		Estado: Como viene de fábrica														
PROTOCOLO DEL ENSAYO DE DUREZA																
Tipo de estudio: De Laboratorio		Norma Aplicable: NTE INEN 123														
Marca: EMCOTEST		Tipo de Identador: Bola de carburo de tungsteno de 2,5 mm de diámetro														
Modelo: N4B000		Carga Aplicada: 187,50 kgf														
Método: Dureza Brinell		Tiempo de aplicación: 10-15 s														
RESULTADOS																
Valores de dureza a varias distancias		Gráfica: Dureza vs Distancia														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nº</th> <th>Distancia entre mediciones (mm)</th> <th>Dureza (HB)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>125.8</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> <td>124.6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>20</td> <td>125.5</td> </tr> </tbody> </table>		Nº	Distancia entre mediciones (mm)	Dureza (HB)	1	0	125.8	2	10	124.6	3	20	125.5			
Nº	Distancia entre mediciones (mm)	Dureza (HB)														
1	0	125.8														
2	10	124.6														
3	20	125.5														
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS																
<p>La dureza es un requisito fundamental en la caracterización del material. El valor promedio obtenido en el ensayo de dureza del acero AISI 1018 es de 125.3 HB y se aproxima a 126 HB el cual es el valor estándar asignado a este acero.</p>																

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.8 Tipo y tamaño de muestra

En el tipo y tamaño de muestra se utiliza el método estadístico para determinar una cantidad de probetas que permitan obtener valores de propiedades mecánicas en cada ensayo asegurando una confiabilidad en los datos que se adquieren.

3.8.1 Ensayo de torsión

El tipo de muestra es probabilístico o aleatorio. Por tratarse de una población indeterminada o infinita, el tamaño de muestra que permite establecer las características obtenidas con este ensayo a partir del estudio de una proporción de la población con cierta precisión, se determina con la ecuación (75).(Auz Mogrovejo 2017, p. 77)

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * P_0 * (1 - P_0)}{e^2} \quad (75)$$

Donde:

- n= tamaño de muestra
- Z_{α} = Intervalo de confianza en función de un determinado nivel de confianza, define la probabilidad con la que el método de una respuesta correcta.
- P_0 = proporción verdadera
- e= margen de error de muestreo aceptable

Para un nivel de confianza del 95%, el valor de Z_{α} es igual a 1.96, permitiendo un margen de error del 18% y una variabilidad de la población de 97,5%.

De acuerdo a este nivel de confianza en la Tabla 63-3 se tienen los siguientes valores de las variables de la ecuación anterior:

Tabla 63-3: Variables para el cálculo del tamaño de muestra

Nivel de confianza	95%
Z_{α}	1.96
p_0	0.975
q_0	0.025
$p_0 * q_0$	0.0243
Error	0.18

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: (Auz Mogrovejo 2017)

$$n = \frac{1.96^2 * 0.975 * (1 - 0.975)}{0.18^2} = 2.89$$

Por lo tanto, para tener datos confiables se ensayan tres probetas con las que se tendrá una probabilidad de 97,5%, de que el 95% de la población presenten los datos obtenidos con un error máximo de 18%. Se ensaya tres probetas del acero AISI 1018 y tres del acero ASTM A743 CA-6NM. El material AISI 1018 se ensaya con la finalidad de validar los datos obtenidos en el banco de torsión, el material ASTM A743 se ensaya debido a que es el objeto de estudio en este trabajo.

3.8.1.1 *Codificación de probetas*

Las probetas para el ensayo de torsión tienen la siguiente nomenclatura: A743_T01. La primera letra con el número indica el material de la probeta (A743= material de la turbina hidráulica), la letra después del guión bajo es el ensayo que se realiza (T= torsión) y el número es el número de probeta.

3.8.2 *Ensayo de tracción*

El número de probetas a ensayar se calcula al igual que en el ensayo de torsión, por lo tanto, para tracción se ensayan tres probetas del acero ASTM A743 CA-6NM.

3.8.2.1 *Codificación de probetas*

De igual manera se asigna un nombre a las probetas. Las probetas para el ensayo de tracción tienen la siguiente nomenclatura: A743_TR01. La primera letra con el número indica el material de la probeta (A743= material de la turbina hidráulica), la letra después del guión bajo es el ensayo que se realiza (TR= tracción) y el número posterior a la letra es el número de probeta.

3.8.3 *Ensayo de impacto*

En la norma ASTM A370-16, específicamente en el apartado 23.1.2.2 menciona que para un resultado de prueba promedio, se analizarán tres muestras; por consiguiente, se determina que para el ensayo de impacto se ensaya tres probetas mecanizadas en el acero ASTM A743 CA-6NM.

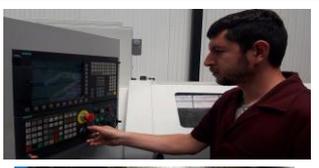
3.8.3.1 *Codificación de probetas*

Las probetas para el ensayo de impacto tienen la siguiente nomenclatura: A743_IM01. La primera letra con el número indica el material de la probeta (A743= material de la turbina hidráulica), la letra después del guión bajo es el ensayo que se realiza (IM= impacto) y el número posterior a la letra es el número de probeta.

3.9 Procedimiento para la obtención de probetas de ensayo a partir del álabe directriz de acero ASTM A743 CA-6NM

En la Tabla 64-3 se detalla el proceso para obtener las probetas de ensayo.

Tabla 64-3: Procedimiento para la obtención de probetas de ensayo

No.	Descripción de la actividad	Equipos y materiales	Imagen
1	Cortar el álabe directriz que destina el CIRT para el tema de investigación	Casco, guantes, cortadora automática, flexómetro, marcador de metal, escuadra, gafas	
2	Obtener una sección rectangular y cortar 6 barras cuadradas de 20 x 20 X 330 mm de largo (para probetas de torsión), 3 barras rectangulares de 70x25x205 mm (para probetas de tracción), una barra cuadrada de 15x15x180 mm (para probetas de impacto).	Cortadora automática, flexómetro, marcador de metal, escuadra, gafas	 
3	Desbastar 6 barras para probetas de torsión, hasta llegar a un diámetro de 18 mm.	Torno convencional, cuchilla de desbaste, calibrador pie de rey, micrómetro, reloj comparador, gafas	
5	Realizar la programación en código ISO para mecanizar 6 probetas de torsión comprobando medidas y tolerancias detalladas en el plano.	Torno CNC, calibrador pie de rey, micrómetro, guantes, gafas, lijas	 
6	Mecanizar 3 caras planas en los extremos de la probeta de torsión según detalles especificados en el plano.	Fresadora, mandril, contrapunto, reloj comparador, calibrador pie de rey, flexómetro, llave de boca y corona, gafas	
7	Mecanizar 3 probetas de tracción y 3 probetas de impacto según los respectivos planos.	Centro de mecanizado, reloj comparador, calibrador pie de rey, flexómetro, llave de boca y corona, gafas, nivel de base magnética	

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Es importante mencionar que las probetas de ensayo para las pruebas de funcionamiento del banco de torsión se obtienen a partir de un eje de acero AISI 1018 que se encuentra disponible en la bodega de la empresa. El cual posteriormente debe ser mecanizado con la programación para probetas de torsión.

3.10 Pruebas y funcionamiento

Para el funcionamiento del banco de ensayos se aplica el método experimental ya que se ensayarán varias probetas bajo las mismas condiciones y posteriormente se obtiene resultados que son analizados para verificar su veracidad y con lo cual se determina la validez del banco construido.

El objetivo de la construcción del banco de ensayo es para generar el mecanismo de falla de torsión, el mismo queda a disposición de la empresa para sus posteriores investigaciones en otros materiales.

3.10.1 Pruebas en el banco de ensayos de torsión

En base a la norma NTE INEN 140:2013 se realizan pruebas de funcionamiento del banco con probetas mecanizadas con el acero AISI 1018 verificando el apartado 4.2 de la norma mencionada en la que indica los siguientes requerimientos en cuanto a equipos para pruebas de torsión:

- Las mordazas de la máquina de ensayo deben estar alineadas de tal manera que, durante el ensayo, permanezcan en el mismo eje longitudinal de la probeta, de tal forma que no se produzcan desviaciones en ninguno de los sentidos.(NTE INEN 140:2013, 2013, p. 2)
- La máquina debe estar construida en tal forma que, no impida el cambio de longitud entre las mordazas, durante el ensayo.(NTE INEN 140:2013, 2013, p. 2)
- Una de las mordazas debe rotar alrededor del eje de la probeta, en tanto que, la otra, debe permanecer fija, sin dar lugar a deflexión angular alguna, excepto en los casos en que esta deflexión sea necesaria para medir el momento de torsión.(NTE INEN 140:2013, 2013, p. 2)

Para validar los datos obtenidos en las pruebas se analiza el esfuerzo de corte en el límite elástico llamado resistencia a la fluencia cortante (S_{sy}), el esfuerzo último a corte (S_{su}) y el módulo de rigidez (G), en base a la tabla de resultados y a la gráfica obtenida para cada probeta ensayada. El valor de S_{sy} debe estar próximo a $0,577S_y$ (Criterio de Von Mises), el valor de S_{su} se debe aproximar a $0,82 S_{ut}$, ecuación (32), y el módulo de rigidez (G) que es la pendiente en la zona elástica se calcula con el esfuerzo cortante y la deformación torsional, usando la fórmula: $\tau = G * \gamma$, el valor del mismo debe ser aproximadamente igual al valor estándar asignado para cada material. El S_{ut} y el S_y se obtienen en el ensayo de tracción de cada material.

Las propiedades mecánicas mencionadas anteriormente se analizan para cada una de las probetas ensayadas y luego se obtiene el promedio de acuerdo a la cantidad de probetas.

3.10.1.1 Ensayos en el material AISI 1018

- Probeta 1: AISI1018_T01

En la Figura 58-3 se muestra la probeta fracturada.

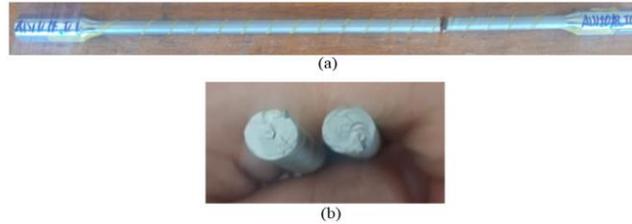


Figura 58-3. Fractura en la probeta AISI1018_T01 (a) sección longitudinal (b) sección transversal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 65-3 se muestra los datos obtenidos en el ensayo de torsión.

Tabla 65-3: Tabla de resultados probeta AISI1018_T01

TORQUE_Nn	ANGULO_TORSOR	DEFORMACION_ANGULAR_rad	NUMERO_DE_VUELTAS	ESFUERZO_DE_CORTE_MPa	MODULO_DE_CORTE_GPa
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7,5573	4,2000	0,0733	0,0083	15,1739	86,1429
48,2361	10,8000	0,1885	0,0300	39,8134	152,7293
65,3411	17,4000	0,3037	0,0467	53,9599	132,9999
68,4200	22,8000	0,3979	0,0617	77,5863	105,3911
76,1950	28,2000	0,4922	0,0783	95,9257	92,3956
79,5824	35,4000	0,6178	0,0967	108,2511	85,0794
81,5465	41,4000	0,7226	0,1133	127,8411	73,3758
83,6924	46,8000	0,8168	0,1300	149,1868	65,5366
85,0441	51,6000	0,9006	0,1417	175,7909	59,0343
87,6302	57,6000	1,0053	0,1583	193,5681	53,7717
88,0416	62,4000	1,0891	0,1717	208,6254	48,5971
145,3614	6729,6000	117,4537	18,6900	297,9366	0,7388
147,9116	6736,2000	117,5689	18,7100	302,3039	0,7509
144,9882	6742,8000	117,6841	18,7283	315,2243	0,7354
145,6724	6748,8000	117,7888	18,7450	328,0302	0,7382
140,9452	6755,4000	117,9040	18,7600	337,0078	0,7137

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 31-3 se observa la curva: torque versus ángulo de torsión.

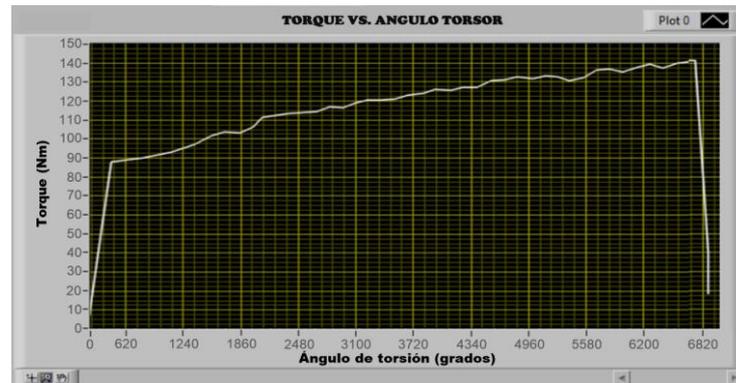


Gráfico 31-3. Gráfico de la probeta AISI1018_T01: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (grados)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En base a la Tabla 65-3 el valor de la resistencia a la fluencia cortante es de 208,625 MPa que corresponde a un ángulo torsor de 62,4°, el valor del esfuerzo último a corte es de 337,007 MPa y el módulo de corte es igual a 76.595 GPa.

- Probeta 2: AISI1018_T02

En la Figura 59-3 se muestra la probeta fracturada.

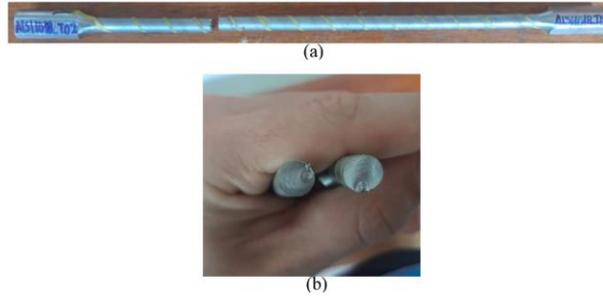


Figura 59-3. Fractura en la probeta AISI1018_T02 (a) sección longitudinal (b) sección transversal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 66-3 se muestra los datos obtenidos en el ensayo de torsión.

Tabla 66-3: Tabla de resultados probeta AISI1018_T02

TORQUE_Nm	ANGULO_TORSOR	DEFORMACION_ANGULAR_rad	NUMERO_DE_VUELTAS	ESFUERZO_DE_CORTE_MPa	MODULO_DE_CORTE_GPa
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2,2361	12,8000	0,2234	0,0300	28,1384	155,7293
5,3411	19,4000	0,3386	0,0467	46,5994	130,9999
14,4200	22,5000	0,3944	0,0617	58,8325	102,3911
23,1950	29,9000	0,5219	0,0783	85,2568	97,1726
32,5824	35,1000	0,6126	0,0967	99,5016	89,0940
45,5465	42,4000	0,7400	0,1133	120,4114	73,9479
58,6924	47,8000	0,8343	0,1300	141,6801	65,3800
66,0441	51,5000	0,9006	0,1417	162,6909	56,9343
73,6302	57,6000	1,0053	0,1583	194,5681	53,7717
77,5264	60,5000	1,0559	0,1717	212,5356	48,5971
136,7156	4956,0000	86,4985	13,7650	275,9352	0,9434
135,4716	4963,2000	86,6242	13,7867	286,5609	0,9334
137,6486	4969,2000	86,7289	13,8017	293,2159	0,9474
139,0481	4975,2000	86,8336	13,8183	321,1370	0,9558
137,2443	4981,2000	86,9383	13,8350	339,1943	0,9423

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 32-3 se observa la curva: torque versus ángulo de torsión.



Gráfico 32-3: Gráfico de la probeta AISI 1018_T02: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (grados)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En base a la Tabla 66-3 el valor de la resistencia a la fluencia cortante es de 212,535 MPa que corresponde a un ángulo torsor de 60,4°, el valor del esfuerzo último a corte es de 339,94 MPa y el módulo de rigidez es igual a 81,392 GPa.

- Probeta 3: AISI1018_T03

En la Figura 60-3 se muestra la probeta fracturada.

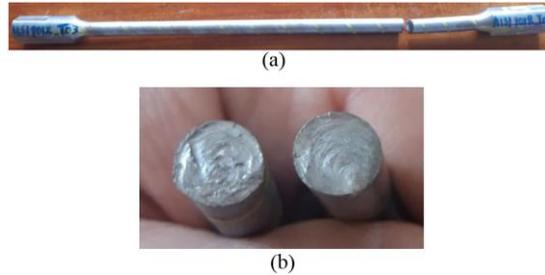


Figura 60-3. Fractura en la probeta AISI1018_T03 (a) sección longitudinal (b) sección transversal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 67-3 se muestra los datos obtenidos en el ensayo de torsión.

Tabla 67-3: Tabla de resultados probeta AISI1018_T03

TORQUE_Nm	ANGULO_TORSOR	DEFORMACION_ANGULAR_rad	NUMERO_DE_VUELTAS	ESFUERZO_DE_CORTE_MPa	MODULO_DE_CORTE_GPa
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
44,3612	10,2000	0,0030	0,0283	22,1539	152,2793
66,1134	16,5000	0,0048	0,0458	43,9940	129,8492
67,2040	23,3000	0,0068	0,0647	65,3326	100,9131
80,9510	30,7000	0,0089	0,0853	84,5927	95,2166
86,5824	36,6000	0,0106	0,1017	102,2431	86,9094
87,4565	44,4000	0,0129	0,1233	120,4801	72,4986
90,6924	50,7000	0,0147	0,1408	145,8816	65,9894
91,6302	57,2000	0,0167	0,1592	169,1509	51,1768
90,2641	63,1000	0,0184	0,1753	196,3527	48,5971
97,5714	69,2000	0,0201	0,1922	228,3775	43,2629
136,7156	4955,0000	1,4414	13,7638	283,1112	0,9444
135,4716	4960,2000	1,4428	13,7783	298,6092	0,9434
137,6486	4968,2000	1,4451	13,8006	319,9425	0,9564
139,0481	4974,2000	1,4469	13,8172	325,7130	0,9584
135,3245	4980,2000	1,4486	13,8338	331,4193	0,9333

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 33-3 se observa la curva: torque versus ángulo de torsión.

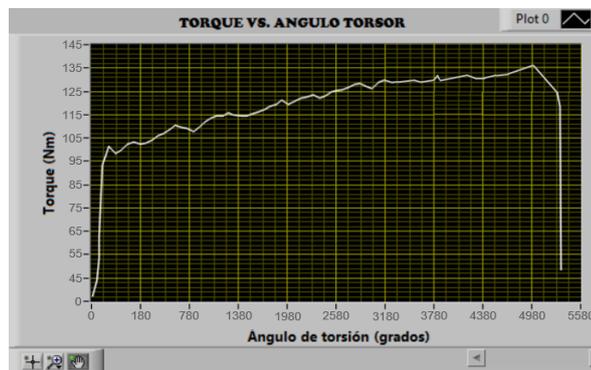


Gráfico 33-3. Gráfico de la probeta AISI 1018_T03: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (grados)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En base a la Tabla 67-3 el valor de la resistencia a la fluencia cortante es de 228,377 MPa que corresponde a un ángulo torsor de 69,2°, el valor del esfuerzo último a corte es de 331,419 MPa y el módulo de rigidez es igual a 80,143 GPa.

Tabla 68-3: Propiedades mecánicas en el ensayo de torsión- AISI 1018

Probeta	Valores Experimentales		
	Resistencia a la fluencia cortante S_{sy} (MPa)	Esfuerzo último a corte S_{su} (MPa)	Módulo de corte G (GPa)
AISI1018_T01	208,625	337,007	76,595
AISI1018_T02	212,535	339,194	81,392
AISI1018_T03	228,377	331,419	80,143
Promedio	216,510	335,87	79,377
Valores teóricos	200,697	349,459	78
Error (%)	7,8	3,8	1,7

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la tabla Tabla 68-3 se puede observar que los valores experimentales de las propiedades mecánicas son aproximados a las relaciones teóricas cuando se aplica el criterio de Von Mises y la relación teórica de la ecuación (32); el porcentaje más alto de error es 7,8% el cual representa baja dispersión de los datos obtenidos; con esto se verifica que el banco de ensayos cumple los requerimientos de la norma NTE INEN 140:2013 de tal manera que los datos son confiables y el banco realiza pruebas de torsión válidos, por tal motivo se procede a ensayar el material ASTM A743 CA-6NM.

3.10.1.2 Ensayos en el material A743 CA-6NM

A continuación, se procede a realizar el ensayo de torsión con probetas mecanizadas a partir del material de las turbina hidráulicas.

- Probeta 1: A743_T01

En la Figura 61-3 se muestra la probeta fracturada.

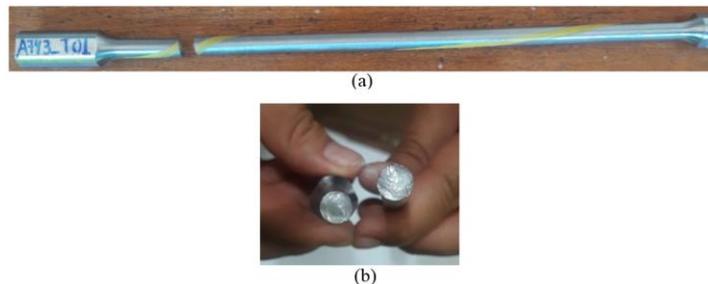


Figura 61-3. Fractura en la probeta A743_T01 (a) sección longitudinal (b) sección transversal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 69-3 se muestra los datos obtenidos en el ensayo de torsión.

Tabla 69-3: Tabla de resultados probeta A473_T01

TORQUE_Nm	ANGULO_TORSOR	DEFORMACION_ANGULAR_rad	NUMERO_DE_VUELTAS	ESFUERZO_DE_CORTE_MPa	MODULO_DE_CORTE_GPa
0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00	0,00
16,40	5,30	0,09	0,03000	66,70	191,23
28,11	9,70	0,17	0,13667	120,29	87,65
43,99	11,30	0,20	0,24167	137,62	54,24
59,35	14,90	0,26	0,33000	171,63	42,70
76,05	21,20	0,37	0,41833	221,74	33,16
101,18	28,80	0,50	0,50333	289,79	28,53
125,68	35,10	0,61	0,58167	337,43	24,69
182,25	719,40	12,56	1,99833	586,83	8,66
180,88	736,20	12,85	2,04500	601,22	8,40
182,06	753,00	13,14	2,09000	642,98	8,27
177,92	771,00	13,46	2,14167	683,83	7,89
182,21	787,80	13,75	2,18667	700,53	7,92

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 34-3 se observa la curva: torque versus ángulo de torsión.

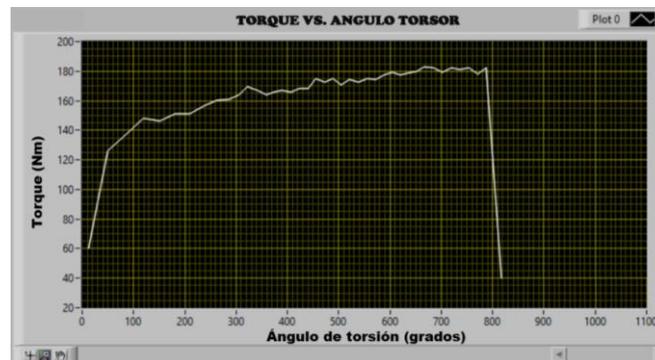


Gráfico 34-3. Gráfico de la probeta A473_T01: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (grados)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En base a la Tabla 69-3 el valor de la resistencia a la fluencia cortante es de 337,43 MPa que corresponde a un ángulo torsor de 35,1°, el valor del esfuerzo último a corte es de 700,53 MPa y el módulo de corte es igual a 73,65 GPa.

- Probeta 2: A743_T02

En la Figura 62-3 se muestra la probeta fracturada.

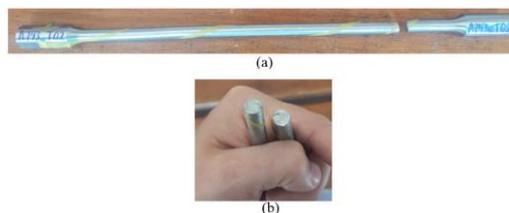


Figura 62-3. Fractura en la probeta A743_T02 (a) sección longitudinal (b) sección transversal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 70-3 se muestra los datos obtenidos en el ensayo de torsión.

Tabla 70-3: Tabla de resultados probeta: A473_T02

TORQUE_Nn	ANGULO_TORSOR	DEFORMACION_ANGULAR_rad	NUMERO_DE_VUELTAS	ESFUERZO_DE_CORTE_MPa	MODULO_DE_CORTE_GPa
0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
24,17	10,20	0,178023583703422	0,03	108,65	382,75
47,30	12,60	0,219911485751286	0,04	141,28	291,19
61,76	14,60	0,254818070791172	0,04	168,13	330,44
83,11	16,80	0,293215314335047	0,05	198,08	361,19
102,39	23,40	0,408407044966673	0,06	255,57	266,06
133,29	31,80	0,555014702134197	0,09	334,89	197,60
156,19	39,00	0,680678408277788	0,11	380,90	160,47
195,77	1.120,20	19,5511782808405	3,11	679,40	5,98
195,81	1.126,80	19,6663700114721	3,13	700,71	5,94
196,43	1.133,40	19,7815617421037	3,14	735,90	5,94
194,38	1.139,40	19,8862814972234	3,17	783,48	5,83
194,69	1.145,40	19,9910012523431	3,18	801,58	5,81

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 35-3 se observa la curva: torque versus ángulo de torsión.



Gráfico 35-3. Gráfico de la probeta A473_T02: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (grados)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En base a la Tabla 70-3 el valor de la resistencia a la fluencia cortante es de 380,90 MPa que corresponde a un ángulo torsor de 39°, el valor del esfuerzo último a corte es de 801,58 MPa y el módulo de corte es igual a 77,97 GPa.

- Probeta 3: A743_T03

En la Figura 63-3 se muestra la probeta fracturada.

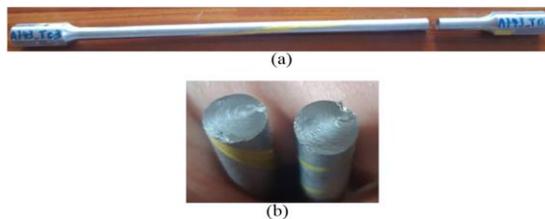


Figura 63-3. Fractura en la probeta A743_T03 (a) sección longitudinal (b) sección transversal

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 71-3 se muestra los datos obtenidos en el ensayo de torsión.

Tabla 71-3: Tabla de resultados probeta: A473_T03

TORQUE_Nm	ANGULO_TORSOR	DEFORMACION_ANGULAR_rad	NUMERO_DE_VUELTAS	ESFUERZO_DE_CORTE_MPa	MODULO_DE_CORTE_GPa
0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
81,16	10,39	0,003022328488	0,03	107,43	325,33
136,80	21,19	0,0061639211416	0,06	206,87	260,95
139,69	29,59	0,0086073820944	0,08	321,64	192,49
191,05	819,79	0,23846724458	2,28	503,71	7,53
196,58	824,59	0,23886350798	2,29	575,27	7,70
191,61	831,79	0,24195790309	2,31	618,77	7,43
194,69	837,19	0,24352869941	2,33	692,15	7,51
190,67	843,19	0,24527402866	2,34	715,49	7,28

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 36-3 se observa la curva: torque versus ángulo de torsión

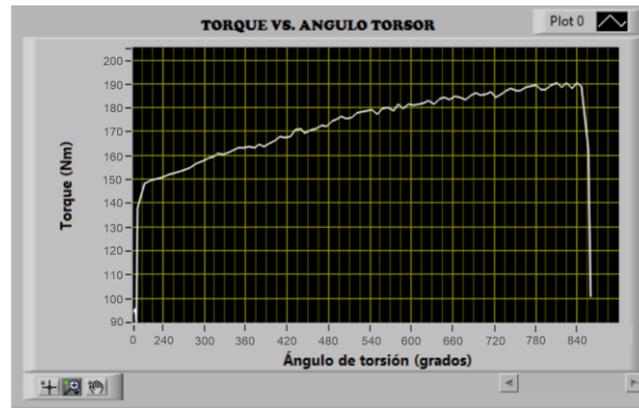


Gráfico 36-3. Gráfico de la probeta A473_T03: Torque (Nm) versus ángulo de torsión (grados)

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En base a la Tabla 71-3 el valor de la resistencia a la fluencia cortante es de 321,64 MPa que corresponde a un ángulo torsor de 29,59°, el valor del esfuerzo último a corte es de 715,49 MPa y el módulo de corte es igual a 79,5 GPa.

Tabla 72-3: Propiedades mecánicas en el ensayo de torsión- ASTM A743 CA-6NM

Probeta	Valores Experimentales		
	Resistencia a la fluencia cortante S _{sy} (MPa)	Esfuerzo último a corte S _{su} (MPa)	Módulo de corte G (GPa)
A743_T01	337,430	700,53	73,65
A743_T02	380,9	801,58	77,97
A743_T03	321,64	715,49	79,5
Promedio	346,66	739,2	77,04
Valores teóricos	366,47	691,481	75-81
Error (%)	5,4	6,9	1,2

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la tabla Tabla 72-3 se puede observar que los valores experimentales de las propiedades mecánicas son aproximados a las relaciones teóricas cuando se aplica el criterio de Von Mises y la relación teórica de la ecuación (32); el porcentaje más alto de error es 6,9% el cual representa

baja dispersión de los datos obtenidos, por ende se ratifica que el banco de ensayos efectúa pruebas confiables.

3.11 Manual de operación y mantenimiento del banco de ensayos de torsión

3.11.1 Manual de operación

El manual de operación se hace con el propósito de brindar al operario el proceso que debe seguir para el manejo del banco de ensayos y evitar accidentes durante la manipulación de la misma.

3.11.1.1 Características principales del banco de ensayos

En la Tabla 73-3 se presenta las características del banco de ensayos de torsión.

Tabla 73-3: Características principales del banco de ensayos

Dimensiones:	1500x400x120 mm
Motor-reductor trifásico de 0.4 kW	W _{entrada} : 1680 RPM
	W _{salida} : 54 RPM
	Torque: 40-120 Nm
	Frecuencia: 60 Hz
Velocidad de operación:	Máxima: 4 RPM en la salida

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.11.1.2 Requisitos para el funcionamiento del banco de ensayos

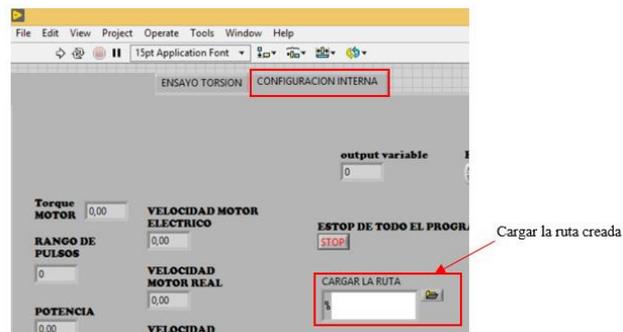
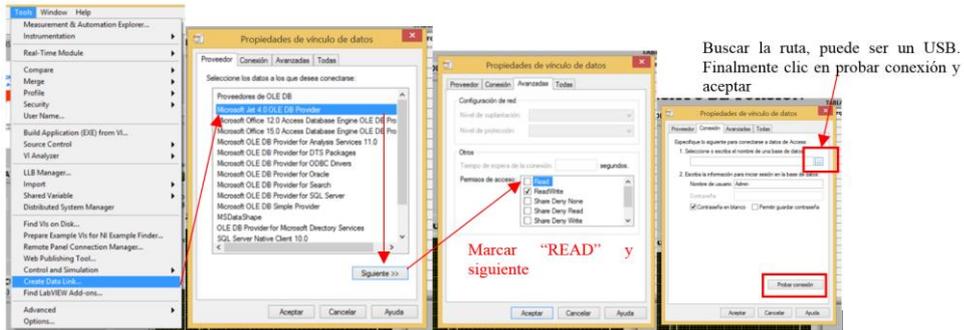
Para el correcto funcionamiento del banco de ensayos, es importante para su operatividad y rápido desenvolvimiento lo siguiente:

- Suministro de corriente trifásica de 460 V
- Asegurar el buen estado de los mandriles que sujetan la probeta de ensayo

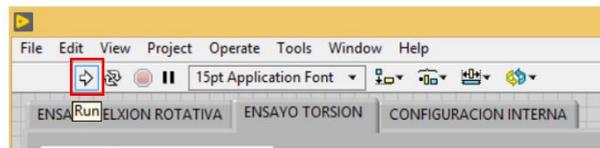
3.11.1.3 Puesta en marcha

- 1) Montar la probeta normalizada en la máquina. Diámetro de la probeta 4- 8 mm.
- 2) Bajar la cubierta de protección.
- 3) Energizar la máquina, subiendo el interruptor a la posición ON.
- 4) Energizar la caja de control, para esto conectar a una fuente de 110 V.
- 5) Ubicar el switch del PLC que se encuentra dentro de la caja de control y moverlo a la posición ON.
- 6) Conectar el PLC y la PC al variador de frecuencia, por medio de cables ethernet.
- 7) Abrir el archivo ejecutable de Labview.

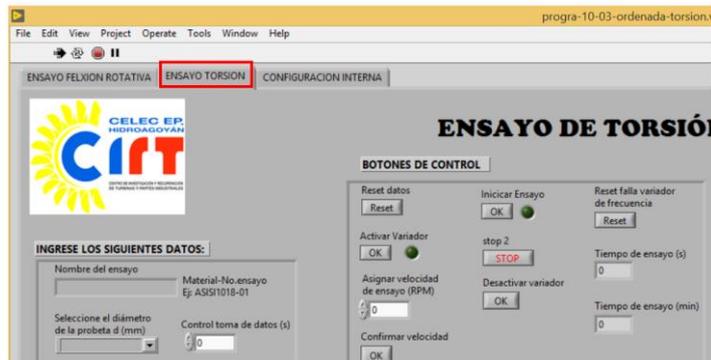
- 8) Crear la ruta en la que se va a guardar el archivo ACCES y clic en la pestaña CONFIGURACIÓN INTERNA para cargar la ruta del archivo ACCESS en la que va a guardar los valores de la tabla de resultados.



- 9) Ejecutar el programa dando clic en Run



- 10) Clic en la pestaña ENSAYO TORSION.

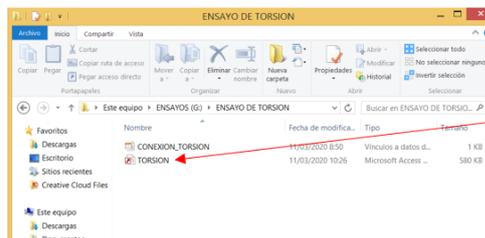


- 11) Llenar los campos de la sección “Ingrese los siguientes datos”

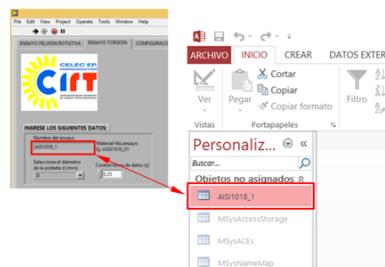


Al asignar un nombre al ensayo se creará una tabla en un archivo ACCESS que se encuentra guardado en la USB; el nombre del archivo es “ENSAYO DE TORSIÓN”. Una vez terminado el ensayo, se podrá abrir el archivo y ver el registro de todos valores de la tabla de resultados para analizar el valor promedio del módulo de corte del material ensayado, teniendo en cuenta la zona lineal de la gráfica puede saber el rango de los datos en el que se debe calcular el valor promedio del módulo de corte.

Es importante que por cada ensayo asigne un nombre; caso contrario los valores de la tabla de datos se registrarán en un mismo archivo de ACCESS y puede ocurrir una confusión de datos.



El archivo de ACCES en el que se guardarán los resultados del ensayo se encuentra con el nombre TORSION, guardado en el Disco G (USB) dentro de la carpeta ENSAYO DE TORSION.



Una vez terminado el ensayo usted puede acceder a este documento dando clic en TORSION. Aquí usted puede encontrar una tabla con el mismo nombre que asignó en la interfaz de Labview:

12) Clic en el botón “Reset datos”, este cumplirá la función de borrar los datos que se registran en la TABLA DE RESULTADOS que se encuentra en la interfaz de Labview, también borrará la gráfica que se haya dibujado y pondrá la posición del encóder en cero.



13) Clic en el botón “activar variador”.



14) Asignar velocidad del ensayo.



15) Confirmar velocidad.



16) Clic en el botón “iniciar ensayo”.



Para iniciar el ensayo también se puede hacer por medio de la caja de control, pulsando el botón verde, pero primero debe verificar que la perilla de la caja de control se encuentre en la posición ON; así el botón de inicio y paro de ensayo se encontrarán activos.

Nota: cuando se presenta algún error en la pantalla del variador de frecuencia se debe girar la perilla de la caja de control a la posición RESET.

17) Parar el motor. El sistema tiene incluido un paro automático en el instante que la probeta se fracture. Si por algún motivo no se acciona esta función, dar clic en el botón STOP; también se puede parar el motor pulsando el botón rojo de la caja de control.

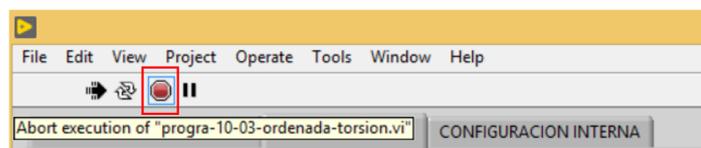


18) Clic en desactivar variador.



19) Si desea realizar otro ensayo vaya al paso ocho y continúe.

20) Finalmente, cuando termine los ensayos, pare la ejecución de Labview dando clic en el botón que se muestra en la figura. Cerrar el archivo ejecutable de Labview.



3.11.2 Plan de mantenimiento del banco de ensayos

El mantenimiento que se muestra en la Tabla 74-3 para el banco de ensayo es con el objetivo de evitar el deterioro de los componentes del banco. En el plan de mantenimiento se detalla la frecuencia con que cada elemento debe ser revisado, limpiado, lubricado y cambiado.

Tabla 74-3: Plan de mantenimiento del banco de ensayos de torsión

ITEM	ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	HERRAMIENTAS Y MATERIALES	FRECUENCIA
1	Banco de Ensayos	Limpiar todos los elementos que componen el banco de ensayos.	Guaípe, guantes, desengrasante	Semanal
2	Rieles	Lubricar los rieles con un aceite de alta viscosidad	Aceite lubricante, guantes	Semanal
3	Pernos, tuercas y tornillos	Revisar y ajustar todos los pernos y tuercas que conforman el banco de ensayo.	Llave de boca y corona, llave hexagonal, destornillado plano y estrella	Trimestral
4	Motor reductor	Cambiar el aceite de la caja de engranajes.	Lubricante F 15, guaípe, guantes	1000 horas
5	Eje motriz y eje fijo	Revisar que la alineación de ambos ejes se encuentre en los valores correspondientes que recomienda la norma ANSI/ASA S2.75-2017/Part1.	Reloj comparador de aguja Reloj comparador de palanca, alzas	Semestral
6	Banco de Ensayos	Restaurar la pintura de la estructura y de todos los componentes que se encuentren en mal estado.	Pintura esmalte gris brillante, pintura azul hempel, brocha, disolvente, guaípe, mascarilla, guantes	Anual
7	Mandril fijo y móvil	Reemplazar los mandriles.	Mandriles nuevos, llave para mandril	100 Ensayos
8	PLC	Verificar que no existan elementos que generen mucho ruido o calor cerca del PLC.	Inspección visual	Mensual
9	Conexiones	Con la máquina apagada, revisar que las conexiones de los cables que conforman la conexión eléctrica se encuentren ajustados.	Destornillador de borneras.	Mensual
10	Caja de control	Comprobar que la caja de control se encuentre cerrada herméticamente para evitar polvo y humedad en el interior.	Inspección visual y llave de caja de control.	Mensual
11	Encóder rotatorio	Confirmar que el número de pulsos se mantenga en el valor establecido (600p/rev).	Instrumento de medición de pulsos.	Semestral

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.12 Análisis de costos del banco de ensayo de torsión

A continuación, se detalla los costos para la construcción del banco de ensayo.

3.12.1 Costos directos

Son los gastos necesarios que tienen relación directa en la construcción de los bancos de ensayo, estos son: materia prima, máquinas o herramientas y mano de obra.

3.12.1.1 Costos de materia prima

Materia prima corresponde a los bienes inventariados que posee la empresa y son necesarios para la construcción de los bancos de ensayo. En la Tabla 75-3 se detalla los materiales utilizados, especificando su valor unitario y valor total correspondientes al año 2019.

Tabla 75-3: Costos de materia prima

No.	Denominación	Cantidad	Unidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
1	Arandela de presión de acero negro M12	6	U	0,02	0,12
2	Arandela plana de acero negro de 10mm	12	U	0,09	1,08
3	Arandela plana de acero negro de 8mm	4	U	0,03	0,12
4	Arandela de presión de acero tropicalizado de 5/16"	4	U	0,03	0,12
5	Arandela de presión de HG DE 3/8"	4	U	0,04	0,16
6	Arandela de presión inoxidable M10	8	U	0,1	0,80
7	Arandela de presión inoxidable M12	10	U	0,2	2
8	Arandela de presión inoxidable 1/2"	2	U	0,19	0,38
9	Arandela plana inoxidable M12	4	U	0,28	1,12
10	Eje de acero de transmisión SAE 1018 Diá=30MM	60	cm	0,08	4,80
11	Eje de acero de transmisión SAE 1018 Diá=20MM	400	cm	0,03	12
12	Estilete reforzado de plástico, grande	2	U	0,49	0,98
13	Clavo de acero para madera de 1"	1	lb	0,54	0,54
14	Lija N° 80 para hierro	1	U	1,17	1,17
15	Lija N° 150 para hierro	14	U	0,64	8,96
16	Lija N° 50 para hierro	2	U	1,55	3,1
17	Lija N° 360 para hierro	2	U	1,62	3,24
18	Lija N° 250 para hierro	2	U	1,67	3,34
19	Lija N° 220 para hierro	14	U	1,49	20,86
20	Remache pop de 5/32" X 1/2"	40	U	0,02	0,8
21	Tuerca hexagonal inoxidable A2-70 M5 X 0.8	27	U	0,32	8,64
22	Tuerca hexagonal inoxidable A2-70 M12 X 1.75	8	U	0,49	3,92
23	Tuerca hexagonal inoxidable A2-70 M10 X 1.5	15	U	0,31	4,65
24	Tornillo de acero niquelado M5 X0.8X25mm	9	U	0,17	1,53
25	Tornillo tripa de pato de acero niquelado de 3/16" X 1/2"	40	U	0,37	14,8
26	Perno cabeza hexagonal inox A2-70 M5X0.80X15 mm	23	U	0,43	9,89
27	Perno cabeza hexagonal inox A2-70 M10X1.5X80mm	4	U	0,67	2,68
28	Perno cabeza hexagonal inox A2-80 M10X1.5X30 mm	4	U	0,41	1,64

Tabla 76-3: Costos de materia prima (continuación)

29	Perno cabeza hexagonal inox A2-70 M12X60X1.75 mm	8	U	1,19	9,52
30	Perno cabeza allen inox A2-70 M12X1.75X35 mm	15	U	1,41	21,15
31	Broca de centro HSS de 3mm	1	U	2,54	2,54
32	Broca de centro HSS de 2mm	1	U	1,5	1,5
33	Broca de centro HSS A4 X 10	1	U	8,4	8,4
34	Broca de acero HSS de 10 mm	1	U	3,92	3,92
35	Brocha multihuso, mango de madera de 2"	2	U	1,11	2,22
36	Rollo de cinta masking de 25mmX40 yardas	1	U	0,45	0,45
37	Guantes de nylon/poliéster, protección 4131 CE. EN 388	2	Par	2,71	5,42
38	Lente oscuro de seguridad 4A	2	U	3,29	6,58
39	Ángulo de hierro de 1/8"X3/4"X6m	1	U	6,62	6,62
40	Rodamiento 6006-ZZ	1	U	11,22	11,22
41	Piedra de asentamiento, Ref. JWG N° 320 031	1	U	17,56	17,56
42	Tubo de acero negro cuadrado 3mmX2"X6m	1	U	28,81	28,81
43	Acrílico transparente de 4X1000X2000 mm, plancha	1	U	103,62	103,62
44	Encóder incremental, servo flange 58mm	1	U	312,00	312,00
45	Autonivelador	4	U	1,50	6,00
46	Mandril apertura de 3-16 mm	2	U	15,00	30,00
				TOTAL	690,87

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: HIDROAGOYÁN CELEC E.P.

El variador de frecuencia, la caja de control, el PLC y el motor reductor no se enlistan en la Tabla 75-3 debido a que estos equipos y elementos electrónicos no fueron adquiridos directamente de la bodega de Agoyán ya que los mismos fueron reutilizados de otros proyectos de investigación que se realizan en el CIRT.

3.12.1.2 Costos máquinas o herramientas y mano de obra

A continuación, en la Tabla 77-3 se detalla los costos del uso de máquinas o herramientas y el costo por la mano de obra.

Tabla 77-3: Costo por el uso de máquinas o herramientas

No.	Denominación	Total de horas	Valor x hora (\$)	Valor total (\$)
1	Cortadora Automática	25	1,15	28,75
2	Torno Convencional	7	100	700
3	Fresadora	60	5	300
4	Taladro de Pedestal	10	1	10
5	Prensa Hidráulica	1	0,7	0,7
6	Tronzadora	4	1	4
7	Esmeril	4	1	4
8	Torno CNC	40	8	320
9	Centro de mecanizado	10	15	150,00

Tabla 78-3: Costo por el uso de máquinas o herramientas (continuación)

10	Soldadora	8	8	64
11	Cortadora de plasma	4	3	12
12	Taladro Magnético	40	1	40
13	Amoladora	6	1,1	6,6
14	Motor tool	4	1	4
15	Taladro manual	5	1	5
16	Caladora Eléctrica	8	1,1	8,8
17	Pistola para pintar	15	0,7	10,50
18	Herramientas manuales	20	0,8	16
TOTAL				1684,35

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: HIDROAGOYÁN CELEC E.P.

Para establecer el costo por hora se toma como base el salario mínimo asignado por el Ministerio de trabajo de Ecuador en la página del IESS en la sección de sueldos sectoriales 2019, a partir del cual se determina el costo por hora de los diferentes técnicos y ayudantes que se presenta en la Tabla 79-3.

Tabla 79-3: Costos de mano de obra

No.	Descripción	Total de horas	Valor x hora (\$)	Valor total (\$)
1	Técnico Mecánico	15	1,73	25,95
2	Soldador	8	1,68	13,44
3	Diseñador, dibujante	120	2,75	330,00
4	Técnico de Centro de Mecanizado	10	2,34	23,40
5	Técnico de Control y Automatización	40	2,34	93,60
6	Ayudantes	10	1,73	17,3
TOTAL				503,69

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: IESS, 2020

3.12.1.3 Valor total de los costos directos

La suma del costo de materia prima, de máquinas o herramientas y de mano de obra genera el costo total directo que se muestra en la Tabla 80-3.

Tabla 80-3: Valor total de costos directos

Descripción	Valor (\$)
Materia prima	690,87
Máquinas o herramientas	1684,35
Mano de obra	503,69
Total	2878,91

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

3.12.2 Costos indirectos

Los costos indirectos relacionan los imprevistos en los que se debe gastar durante el proceso de construcción de los bancos de ensayo. Para el cálculo del valor total de los costos indirectos se toma un 10% del valor total de los costos directos, entonces se tiene 287,89 dólares de costos indirectos.

3.12.3 Costo total

En la Tabla 81-3 se muestra el costo total que representa el costo de la construcción del banco de ensayos y es la suma de los costos directos e indirectos.

Tabla 81-3: Costo total

Tipo de costo	Valor (\$)
Directos	2878,91
Indirectos	287,89
Total	3166,80

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

Para la caracterización fractográfica de los mecanismos de falla se utiliza el método inductivo ya que partimos de lo particular a lo general, es decir, se inicia con un análisis macroscópico y microscópico, para obtener resultados cualitativos de cada mecanismo de falla que se analiza usando el handbook “ASM INTERNATIONAL FAILURE ANALYSIS AND PREVENTION”.

4.1 Caracterización y análisis por torsión

4.1.1 Análisis de los resultados de los ensayos de torsión

A continuación, en la Tabla 1-4 se muestra un reporte de las probetas ensayadas del acero ASTM A743 CA-6NM bajo la norma NTE INEN 140:2013.

Tabla 1-4: Reporte del ensayo de torsión

REPORTE DE ENSAYO DE TORSIÓN					
CODIGO: CIRT-REG-TOR-02	Pag.: 1 de 1	FECHA: 2020-03-04			
AREA DE CONTROL DE CALIDAD - CIRT					
DATOS DE LA PROBETA					
Denominación: Probeta de sección llena	Longitud: 240 mm				
Material: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM	Diámetro: 8 mm				
Cantidad: 3					
Estado: Fundición <input type="checkbox"/> Soldadura <input type="checkbox"/> Mecanizado <input checked="" type="checkbox"/> Sin TT <input type="checkbox"/> Con TT <input type="checkbox"/>					
PARAMETROS DEL ENSAYO					
Equipo: Motorreductor Auma	Norma: NTE INEN 140:2013				
Capacidad: 120 Nm a 1680 RPM	Velocidad: 4 RPM				
Nº de Serie: Z103.489	Sentido de giro: Antihorario				
RESULTADOS					
Nombre Probeta	Ángulo de Torsión (°)	Número de vueltas	Módulo de corte-G (Gpa)	Resistencia a la fluencia cortante - S _{sy} (Mpa)	Esfuerzo último a corte-S _{su} - (Mpa)
A743_T01	787,8	2,187	73,65	337,430	700,53
A743_T02	1145,4	3,182	77,97	380,9	801,58
A743_T03	843,19	2,34	79,5	321,64	715,49
PROMEDIO			77,04	346,66	739,2
Observaciones:					

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

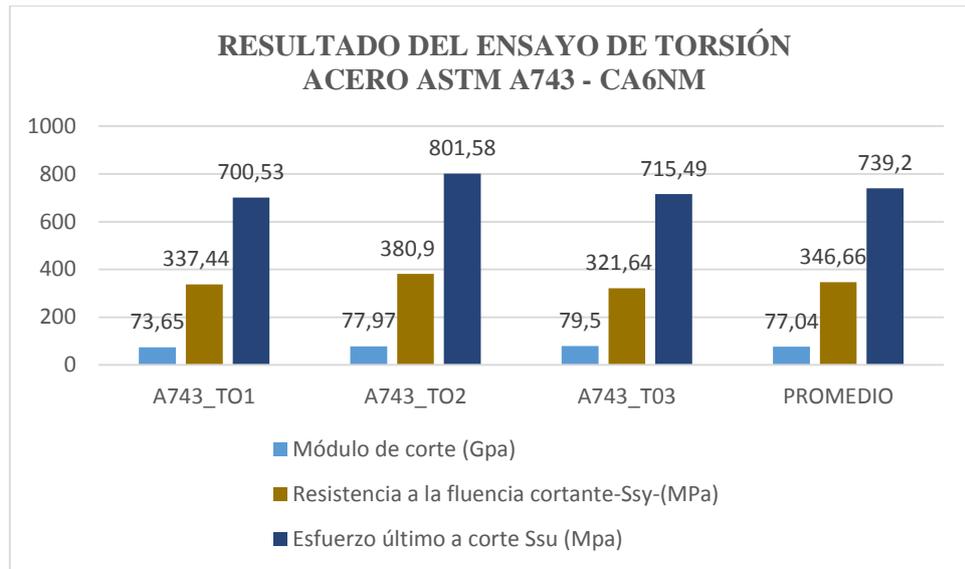


Gráfico 1-4. Resultados del ensayo de torsión- acero ASTM A743 CA-6NM

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 1-4 se muestra las variaciones de las diferentes propiedades mecánicas del acero A743 CA-6NM, obtenidas a partir de las tres probetas ensayadas.

Aplicando las relaciones teóricas del criterio de Von Mises el valor de la resistencia a la fluencia cortante (S_{sy}) para este material es de 366,47 MPa; de acuerdo al Gráfico 1-4 el valor promedio de esta propiedad es 346,66 MPa. Entre estos valores se estima un error de 5,4%.

El valor del esfuerzo último a corte (S_{su}) para este material es 691,481 MPa de acuerdo a la relación teórica de la ecuación (32); mediante el Gráfico 1-4 el valor promedio de esta propiedad es 739,2 MPa, resultando un error de 6,9%.

Por último en el Gráfico 1-4 se puede observar que el valor promedio del módulo de corte es de 77,04 GPa mismo que se encuentra en el rango establecido para este material (75-81 GPa). Para esta propiedad se tiene un error de 1,2%.

Con el análisis de cada propiedad mecánica que se obtiene en el ensayo de torsión se observa que existe una variación pequeña entre los valores promedio y estándar, por lo cual se concluye que el ensayo de torsión es válido.

4.1.2 Caracterización fractográfica de las probetas ensayadas

En la Tabla 2-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_T01 ensayada.

Tabla 2-4: Reporte fractográfico probeta A743_T01

	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-01	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_T01		Tipo de ensayo: Torsión		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- TOR-04		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS) No. Serie: 3941000808		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB) <SEM> Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS) No. Serie: 8006013638		
ANÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p>(a) Zona de fractura</p> <p>Inspección visual ubicando de manera longitudinal a la probeta.</p>		<p>En la fotografía (a) la orientación de la superficie de fractura es plana, siendo la característica de una fractura dúctil a torsión.</p> <p>En el caso particular de torsión la deformación consiste en rotación de la superficie del eje, sin que obligatoriamente se genere doblado o reducción de área (adelgazamiento) en la zona de fractura como se observa en las fotografías (a) y (b). La superficie de fractura sigue los esfuerzos cortantes del momento torsor, de esta manera resulta perpendicular al eje del momento.</p>		
 <p>(b) Zona de textura tersa</p> <p>Inspección visual de la sección transversal de la zona de fractura.</p>				

Tabla 3-4: Reporte fractográfico probeta A743_T01 (continuación)

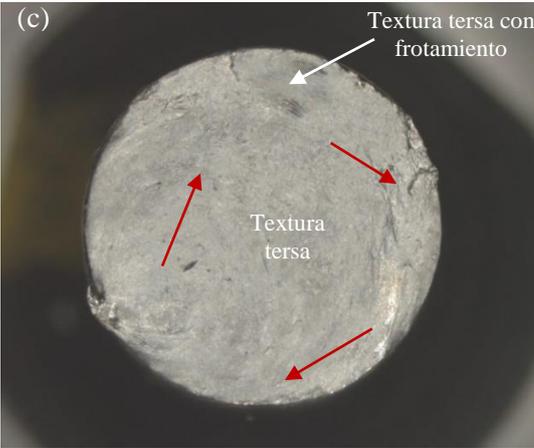
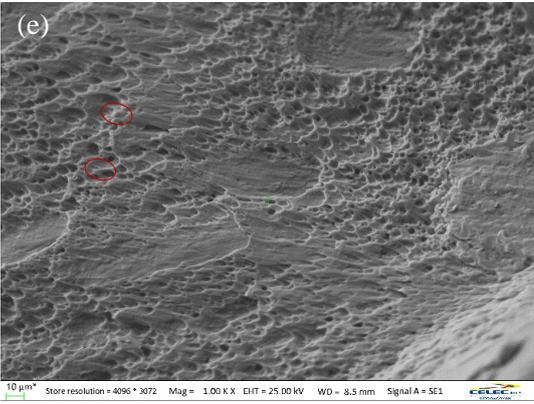
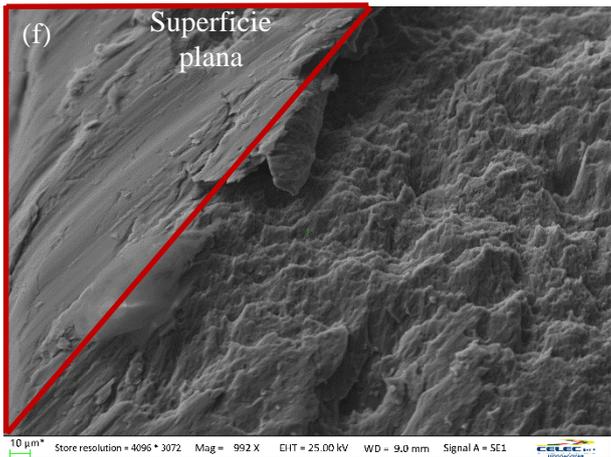
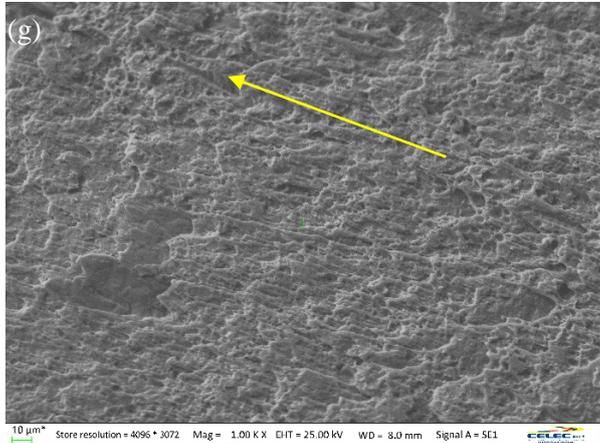
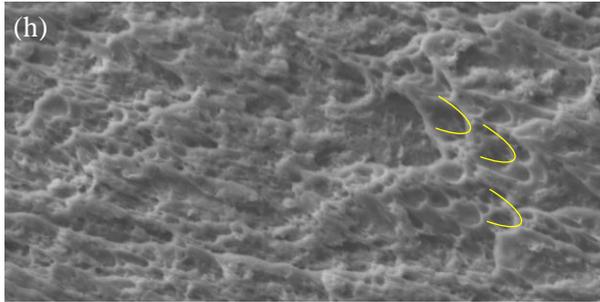
 <p>(c)</p> <p>Textura tersa con frotamiento</p> <p>Textura tersa</p> <p>Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7x).</p>	<p>En la fotografía (c) se visualiza macroscópicamente en la sección transversal, de la zona de fractura, una textura tersa con frotamiento que ocurre en la periferia de la probeta y una textura tersa en la zona central, la cual es la última en formarse. El frotamiento se produce por el contacto bajo presión de las superficies de fracturas formadas. La característica de la textura tersa es que en metales se presenta un poco brillante y poco rugosa.</p> <p>Las flechas rojas indican el sentido de avance de la fractura.</p>
 <p>(d)</p> <p>Aspecto típico de la textura tersa vista con estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	<p>Con ayuda de las fotografías (c) y (d) se observa que en toda la superficie de fractura no se presenta formación de marcas radiales o de posición del frente de grieta (costillas o playas), tampoco se observa marcas ratchet y de río, como ocurre en el clivaje.</p> <p>Macroscópicamente por todo lo dicho anteriormente probablemente se trata de una fractura súbita dúctil.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
<p style="text-align: center;">Periferia</p>  <p>(e)</p> <p>10 µm* Store resolution = 4096 * 3072 Mag = 1.00 K X EHT = 25.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>	<p>Mediante las fotografías obtenidas por medio de los electrones secundarios, se puede obtener información de la topografía de las superficies de fractura. Se puede iniciar indicando que para este caso en particular de un esfuerzo de torsión no hay presencia de marcas radiales, de río y otras que son típicas en el clivaje. La trayectoria de la grieta es transgranular al no presentar indicios de que la fractura se haya ocasionado siguiendo los límites de grano.</p> <p>Los microvacíos que se observan que se han formado (fotografía e) tienden a ser elípticos y son característicos de una carga de torsión.</p>

Tabla 4-4: Reporte fractográfico probeta A743_T01 (continuación)

 <p>(f) Superficie plana</p>	<p>La superficie de fractura pudo generarse por medio de la coalescencia de los microhuecos. En la fotografía (f) se puede ver que hubo fricción entre las dos partes (zona encerrada en el triángulo rojo), lo cual provoca que se borre la presencia de los microhuecos. Esto señala que en la periferia se genera textura tersa con frotamiento como se indicó anteriormente.</p>
<p style="text-align: center;">Centro</p>  <p>(g)</p>  <p>(h)</p> <p style="text-align: center;">Fotografía (g) aplicada zoom</p>	<p>En las fotografías (g) y (h) se puede observar claramente la superficie deformada y desgastada. Nótese que los microhuecos están inclinados o alargados en la dirección del desgarre o del corte. La flecha amarilla indica el sentido de desgarre y las formas amarillas (fotografía h) el aspecto típico de los microhuecos con lo cual se puede deducir el tipo de carga bajo la cual se formaron, en este caso corresponde a torsión.</p> <p>Por todo lo dicho, el material de la turbina hidráulica bajo una carga de torsión presenta una fractura súbita dúctil.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 5-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_T02 ensayada.

Tabla 5-4: Reporte fractográfico probeta A743_T02

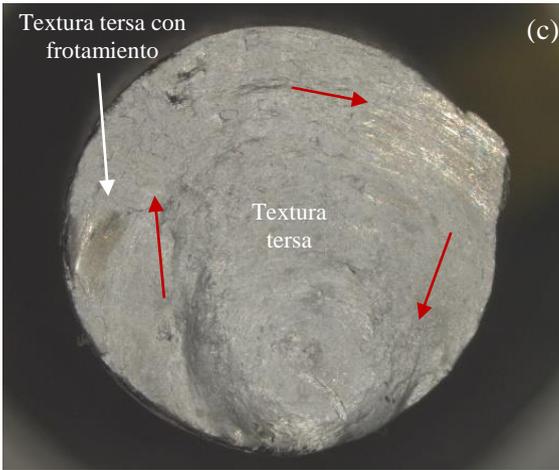
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-02	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_T02		Tipo de ensayo: Torsión		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- TOR-05		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS) No. Serie: 3941000808		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB) <SEM> Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS) No. Serie: 8006013638		
NÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p>Inspección visual ubicando de manera longitudinal a la probeta.</p>		<p>En la fotografía (a) mediante una inspección visual se observa que la superficie de fractura tiene una sección transversal plana, lo cual es indicio de una fractura dúctil bajo una caga de torsión.</p> <p>No existe reducción de área o algún adelgazamiento en la zona de fractura como se puede ver en la fotografía (b), ya que básicamente la deformación consiste en la rotación de la superficie de la probeta.</p>		
 <p>Inspección visual de la sección transversal de la zona de fractura.</p>				
 <p>Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7x).</p>		<p>En la fotografía (c) se visualiza una textura tersa en el centro de la superficie de fractura y en la periferia se observa una textura tersa con frotamiento, la cual es la primera en formarse.</p> <p>El sentido de la fractura está dado por las flechas rojas.</p> <p>El análisis de las fotografías (c) y (d) determina que no hay presencia de marcas características de una fractura frágil como marcas de río, ratchet, entre otras.</p> <p>Por el análisis macroscópico se puede inferir que probablemente se trata de una fractura súbita dúctil.</p>		

Tabla 6-4: Reporte fractográfico probeta A743_T02 (continuación)

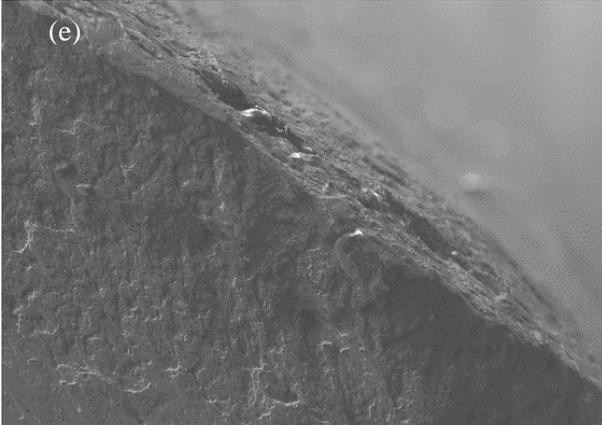
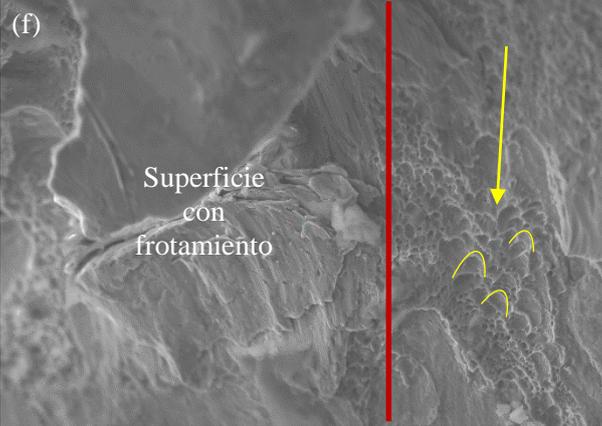
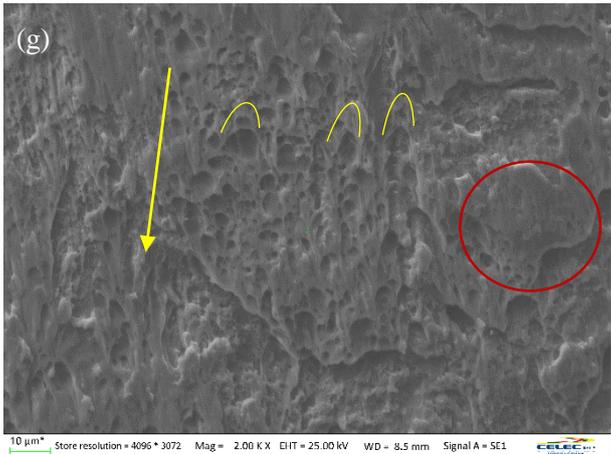
 <p>(d)</p> <p>Aspecto típico de la textura tersa vista con estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
<p style="text-align: center;">Periferia</p>  <p>(e)</p> <p>100 μm* Store resolution = 4096 * 3072 Mag = 250 X EHT = 25.00 kV WD = 7.5 mm Signal A = SE1</p>	<p>Mediante la fotografía (e) se puede ver la deformación plástica del material, es decir el desplazamiento que experimenta el material bajo la aplicación de la carga de torsión.</p> <p>La fotografía (f) muestra el frotamiento de la superficie, lo que ocasiona la pérdida de visibilidad de los microvacíos (lado izquierdo de la línea roja) y la formación de microvacíos que coalescen para formar la superficie de fractura (lado derecho de la línea roja).</p>
 <p>(f)</p> <p>Superficie con frotamiento</p> <p>10 μm* Store resolution = 4096 * 3072 Mag = 1.00 K X EHT = 25.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>	<p>Los microvacíos adoptan una forma elíptica (fotografía (f) y (g)), producto del esfuerzo cortante a torsión. Estos a su vez se orientan en el sentido del desgarre como lo indica las flechas amarillas.</p> <p>En la fotografía (g) se puede observar ampliamente en el centro la forma que tienen los microvacíos bajo un esfuerzo de torsión y de forma general la misma geometría tendrán todos los microvacíos formados en la superficie de fractura (forma amarillas).</p>

Tabla 7-4: Reporte fractográfico probeta A743_T02 (continuación)

<p style="text-align: center;">Centro</p>  <p>10 µm* Store resolution = 4096 * 3072 Mag = 2.00 K X EHT = 25.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1 ETEC</p>	<p>La zona encerrada con el círculo rojo (fotografía (g)) indica cómo se van borrando los microvacíos que se forman y como se mencionó anteriormente esto se debe a la fricción que puede existir entre las partes.</p> <p>La grieta ha experimentado una trayectoria transgranular.</p> <p>Bajo todas las características mencionadas, el material ASTM A743 CA-6NM experimenta una fractura súbita dúctil bajo carga de torsión.</p>
--	--

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 8-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_T03 ensayada.

Tabla 8-4: Reporte fractográfico probeta A743_T03

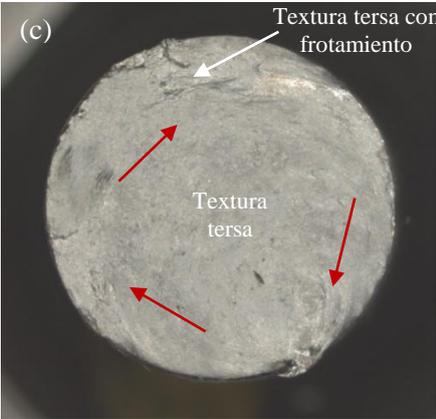
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-03	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_T03		Tipo de ensayo: Torsión		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- TOR-06		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS) No. Serie: 3941000808		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB) <SEM> Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS) No. Serie: 8006013638		
NÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p style="text-align: center;">Zona de fractura</p> <p>Inspección visual ubicando de manera longitudinal a la probeta.</p>		La superficie de fractura es colineal con el esfuerzo cortante, se presenta de una forma plana (fotografía (a) y fotografía (b)), en la cual no se observa distorsión en la zona de fractura.		
 <p style="text-align: center;">Zona de textura tersa</p> <p>Inspección visual de la sección transversal de la zona de fractura.</p>				
 <p style="text-align: center;">Textura tersa con frotamiento</p> <p style="text-align: center;">Textura tersa</p> <p>Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7x).</p>		En la fotografía (c) se presenta una superficie poco brillante y poco rugosa, lo cual indica que se ha formado una superficie de textura tersa con frotamiento en la periferia y una textura tersa en el centro. La textura tersa con frotamiento se origina a partir de la fricción entre las dos superficies generadas, y la textura en el centro es tersa por ser la última en formarse. El sentido de avance de la fractura está indicado por medio de las flechas rojas.		

Tabla 9-4: Reporte fractográfico probeta A743_T03 (continuación)

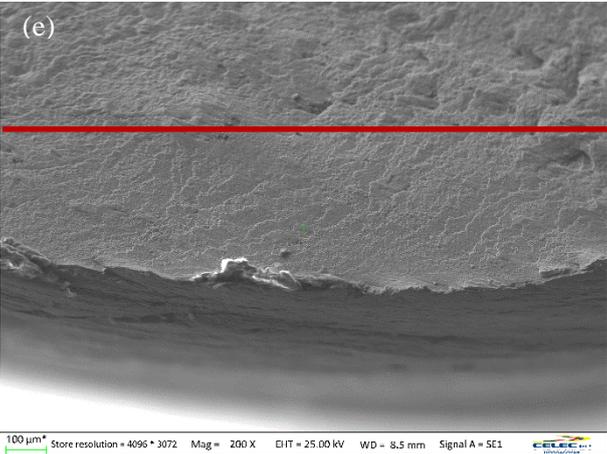
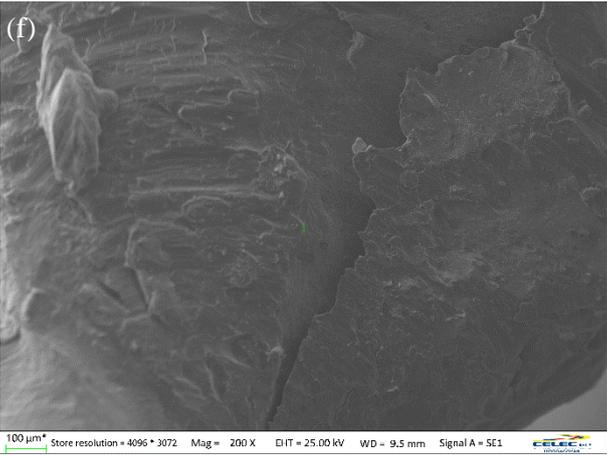
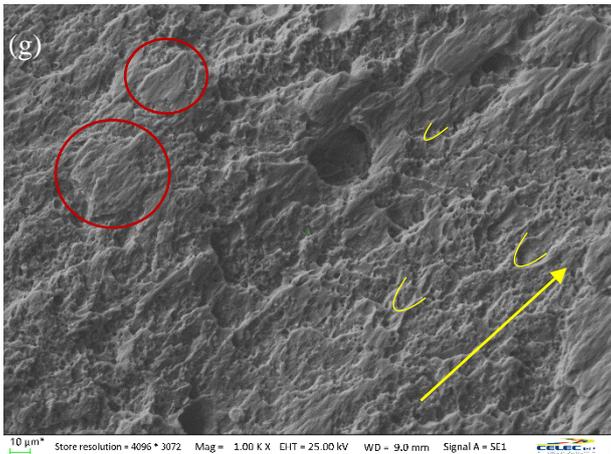
 <p>(d)</p> <p>Aspecto típico de la textura tersa vista con estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	<p>Macroscópicamente las fotografías (c) y (d) indican que no se han formado las típicas marcas radiales, marcas de río, marcas ratchet y demás que son propias en una fractura súbita frágil.</p> <p>Con base en lo expuesto hasta el momento, macroscópicamente se puede decir que la fractura es súbita dúctil.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
<p style="text-align: center;">Periferia</p>  <p>(e)</p>  <p>(f)</p>	<p>En la fotografía (e) se puede distinguir la formación de zonas distintas de topografía; esto se debe a que en la parte inferior de la línea roja (periferia) se produce una textura tersa con frotamiento, mientras que en la parte superior de la línea roja, es decir dirigiéndose hacia el centro de la superficie de fractura se genera una superficie tersa, la cual es la última en formarse.</p> <p>El frotamiento que se produce en la periferia de la superficie de fractura se puede ver claramente en la fotografía (f), donde además, se puede observar un vacío en forma lineal (que se puede confundir con una grieta) lo cual es por el residuo de material que quedó en la superficie de fractura.</p> <p>Los microvacíos tienen una geometría alargada (fotografía g), tienden a ser elípticos, esto se debe a que durante el crecimiento de la deformación plástica los microvacíos coalescen para formar la superficie de fractura.</p> <p>La trayectoria de la fractura es transgranularmente (fotografía g).</p> <p>Las formas amarillas indican el aspecto típico que presentan los microvacíos y la línea amarilla revela que los microvacíos siguieron el sentido de desgarre.</p>

Tabla 10-4: Reporte fractográfico probeta A743_T03 (continuación)

Centro	
	<p>En las áreas encerradas con círculos rojos se muestra que por el frotamiento que existe entre las partes de la superficie de fractura se borra la presencia de los microvacíos.</p> <p>El material ASTM A743 CA-6NM experimenta una fractura súbita dúctil bajo carga de torsión.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

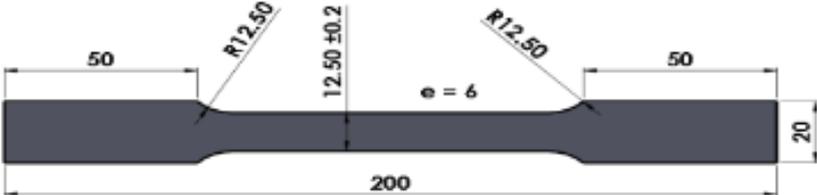
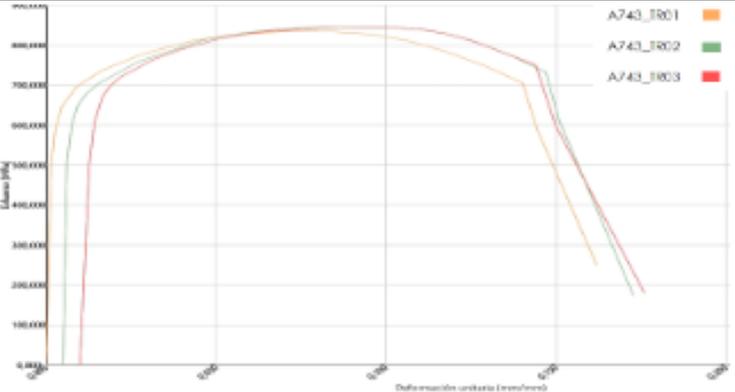
Las tres probetas analizadas bajo un esfuerzo de torsión pura del acero ASTM A743 CA6-NM tienen iguales características macroscópicas y microscópicas, las cuales quedan registradas en fotografías para ser usadas en caracterizaciones de elementos fracturados que sean construidos del mismo material.

4.2 Caracterización y análisis por tracción

4.2.1 Análisis de los resultados de los ensayos de tracción

En la Tabla 11-4 se muestran los resultados de las tres probetas ensayadas del acero A743 CA-6NM bajo la norma ASTM E8- E8M- 15a.

Tabla 11-4: Reporte del ensayo de tracción

		REPORTE DE ENSAYO DE TRACCIÓN				
CODIGO: CIRT-REG-IRA-01		Pág.: 1 de 1		FECHA: 2020-03-04		
AREA DE CONTROL DE CALIDAD - CIRT						
DATOS DE LA PROBETA						
Denominación: Probeta plana de tracción		Dimensiones: 200 x 20 mm				
Material: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM		Espesor: 6 mm				
Cantidad: 3						
Estado: Fundición <input type="checkbox"/> Soldadura <input type="checkbox"/> Mecanizado <input checked="" type="checkbox"/> Sin TT <input type="checkbox"/> Con TT <input type="checkbox"/>						
						
PARAMETROS DEL ENSAYO						
Equipo: Máquina Universal Galdabini			Método: Deformación Controlada			
Capacidad: 600 KN			Norma: ASTM E8-E8M-15a			
Nº de Serie: QUASAR 600			Longitud de Calibración: 50 mm			
RESULTADOS						
Nombre Probeta	Lo (mm)	Lf (mm)	Elongación (50 mm) % (Lf-Lo)/Lo	Esfuerzo a la fluencia Sy (Mpa)	Esfuerzo último de tracción Sut (Mpa)	Módulo de Elasticidad E (Gpa)
A743_TR01	50	56	12	643	835,9	207,94
A743_TR02	50	61	22	633,6	847,1	202,42
A743_TR03	50	61	22	628,8	846,8	195,63
PROMEDIO			18,67	635,13	843,27	202,00
Lo: Longitud Inicial			Lf: Longitud final			
GRÁFICA: ESFUERZO-DEFORMACIÓN						
						
Observaciones: El valor promedio de la resistencia a la fluencia Sy es de 635.13 Mpa para la resistencia a la tracción Sut es de 843.27 Mpa						

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

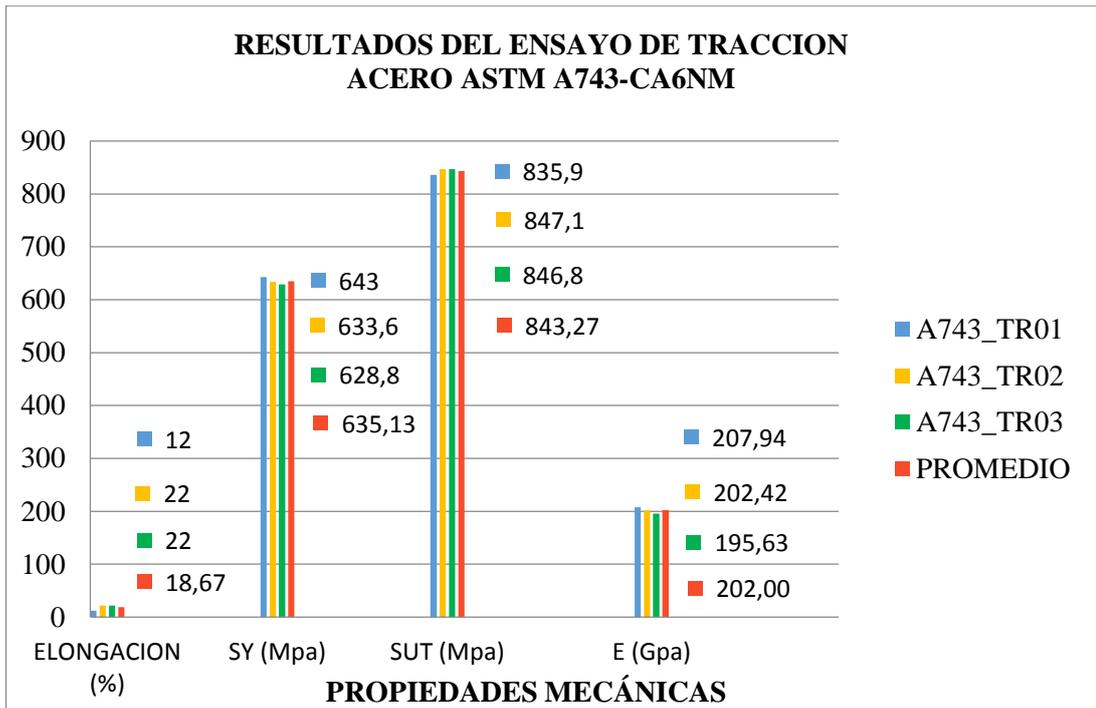


Gráfico 2-4. Resultados del ensayo de tracción- acero ASTM A743 CA-6NM

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En el Gráfico 2-4 se muestra las variaciones de las diferentes propiedades mecánicas del acero A743 CA-6NM, obtenidas a partir de las tres probetas ensayadas.

El porcentaje de elongación según el estándar que consta en la Tabla 6 debe ser mayor al 15%, en el Gráfico 2-4 se puede observar que el promedio de esta propiedad es de 18.67%.

El valor estándar de la resistencia a la fluencia es de 550 a 725 MPa, de acuerdo al Gráfico 2-4 el valor promedio de esta propiedad es de 635.13 MPa, valor que se encuentra dentro del rango estándar.

En el Gráfico 2-4 se puede observar que el valor promedio del esfuerzo de tensión es de 843.27 MPa, encontrándose dentro del rango estándar que es de 740 a 910 MPa.

Por último, se tiene el módulo de elasticidad con un valor promedio de 202 GPa, el cual es aproximadamente igual al valor estándar de 200 GPa con un error de 1%.

Con el análisis de cada propiedad mecánica que se obtiene en el ensayo de tracción se observa que existe una variación pequeña entre los valores promedio y estándar, por lo cual se concluye que el ensayo de tracción es válido.

4.2.2 Caracterización fractográfica de las probetas ensayadas

En la Tabla 12-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_TR01 ensayada.

Tabla 12-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR01

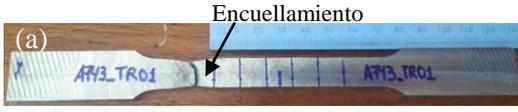
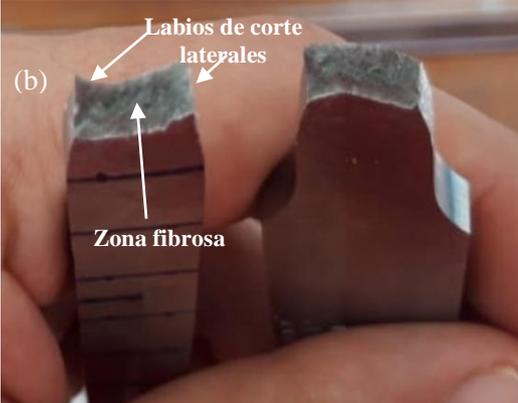
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-07	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	ÁREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_TR01		Tipo de ensayo: Tracción		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- TRA-01		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS) No. Serie: 3941000808		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB) <SEM> Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS) No. Serie: 8006013638		
ANÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p style="text-align: center;">Sección longitudinal a la probeta.</p>		<p>Mediante la inspección visual se observa la zona de encuellamiento en la cual se presenta reducción localizada del área transversal que es producto del alargamiento que sufre la probeta bajo el esfuerzo de tracción y esto a su vez implica que antes de la fractura existió una deformación plástica.</p> <p>Macroscópicamente se visualiza una zona central de textura fibrosa, la cual es perpendicular al esfuerzo de tracción. Alrededor se tiene pequeños labios de corte, con textura tersa, que siguen la orientación del esfuerzo cortante máximo, es decir, 45° aproximadamente respecto al eje de la pieza. Los labios de corte son los últimos en formarse.</p>		
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la zona de fractura.</p>				

Tabla 13-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR01 (continuación)

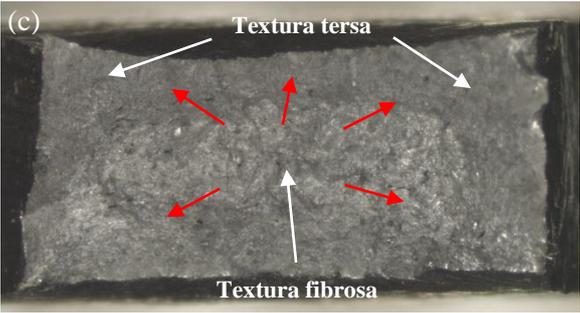
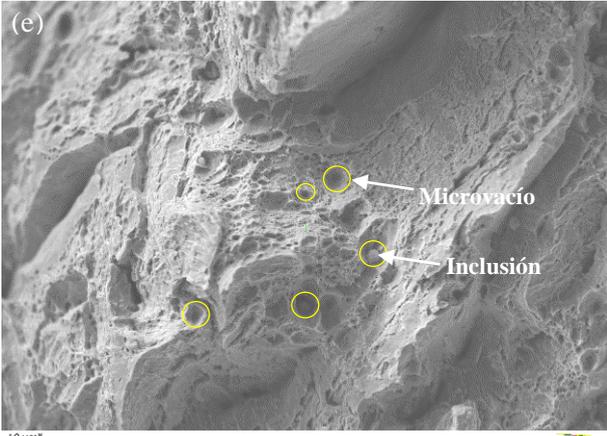
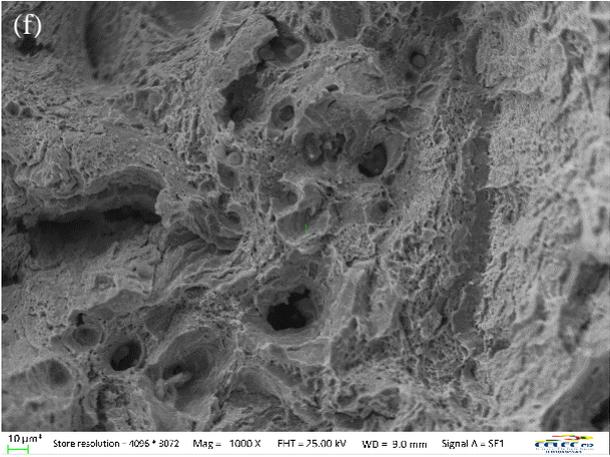
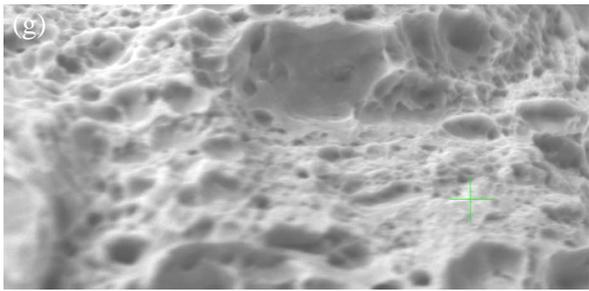
<p>(c)</p>  <p>Textura tersa</p> <p>Textura fibrosa</p> <p>Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7.6x).</p> <p>(d)</p>  <p>Aspecto típico de la textura fibrosa (zona central) vista en estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	<p>En toda la superficie de fractura no se presenta formación de marcas radiales o de posición del frente de grieta (costillas o playas), tampoco se observa marcas ratchet y de río, por lo tanto, aquí hay colapso plástico lo que significa q a nivel microscópico habrá la presencia de microvacíos distribuidos de una manera más o menos homogénea.</p> <p>La textura fibrosa se presenta opaca y rugosa, como generalmente se muestra en los metales, mientras que la textura tersa se exhibe menos rugosa y un poco brillante.</p> <p>Las flechas rojas indican la dirección de propagación de las fracturas (del centro hacia los extremos).</p> <p>Macroscópicamente por todo lo dicho anteriormente probablemente se trata de una fractura súbita dúctil.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
<p>(e)</p>  <p>Microvacío</p> <p>Inclusión</p> <p>10 µm</p> <p>Store resolution = 4096 * 3072 Mag = 1000 X EHI = 25.00 kV WD = 8.0 mm Signal A = 5e1</p>	<p>Los electrones secundarios proporcionan información acerca de la topografía de la superficie, en este caso la trayectoria de la grieta es transgranular al no presentar indicios de que la fractura se haya ocasionado siguiendo los límites de grano, como indica la literatura, no es común en las fracturas súbitas dúctiles.</p> <p>La geometría de los microvacíos se indica con las formas amarillas, con lo cual se puede decir que al tener una forma redondeada el tipo de carga bajo la cual se formaron fue de tracción.</p>

Tabla 14-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR01 (continuación)

	<p>A pesar de ver grandes microhuecos redondeados asociados a inclusiones y microhuecos más finos (figura g) asociados probablemente a carburos que se forman en el revenido, la formación de la mayoría de los microhuecos no están relacionados a partículas de segunda fase o inclusiones, si no posiblemente a apilamiento de dislocaciones, por ello no hay presencia generalizada de partículas en el interior de los microhuecos.</p> <p>El tamaño de los microvacíos el proporcional al tamaño de la inclusión.</p> <p>Microscópicamente no se observan marcas radiales o de río, siendo esto un factor característico de una fractura súbita frágil, por lo tanto el modo de falla que se produjo fue por una fractura súbita dúctil.</p>
 <p>Fotografía (e) aplicada zoom.</p>	<p>Por todo lo dicho anteriormente, se puede señalar que el material de la turbina hidráulica (ASTM A743 CA-6NM) bajo una carga de tracción presenta una fractura súbita dúctil.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 15-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_TR02 ensayada.

Tabla 15-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR02

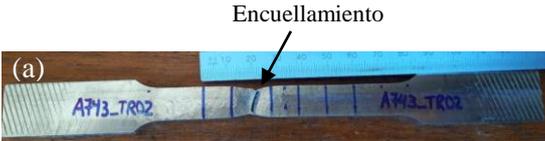
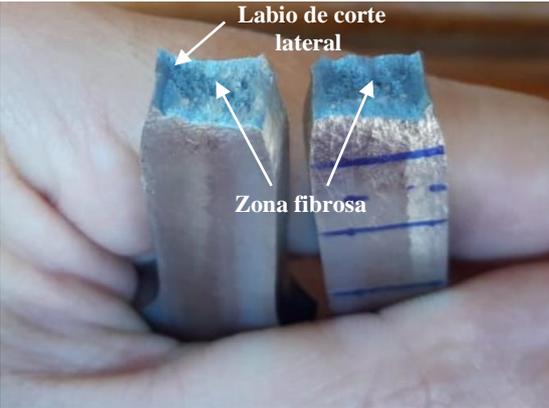
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-08	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_TR02		Tipo de ensayo: Tracción		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- TRA-01		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB)		
Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS)		<SEM>		
No. Serie: 3941000808		Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS)		
		No. Serie: 8006013638		
ANÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p style="text-align: center;">Sección longitudinal a la probeta.</p>		<p>A simple vista se puede ver la distorsión o deformación plástica en la zona de fractura, presentándose en la zona central de la probeta una fractura predominante perpendicular a la dirección del esfuerzo normal de tracción formándose una textura fibrosa central, y un labio de corte lateral que sigue el cortante máximo, en el mismo se forma una textura tersa la cual es la última en formarse.</p>		
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la zona de fractura.</p>		<p>La textura es un aspecto visual que posee la superficie de fractura y está relacionada con la rugosidad de la misma.</p>		

Tabla 16-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR02 (continuación)

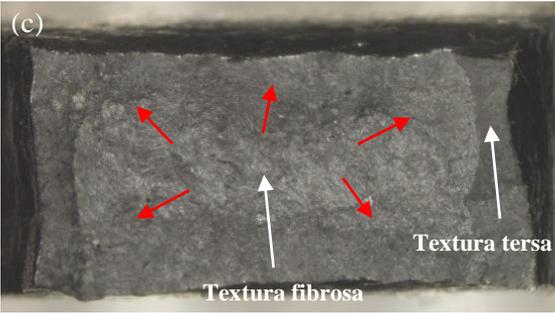
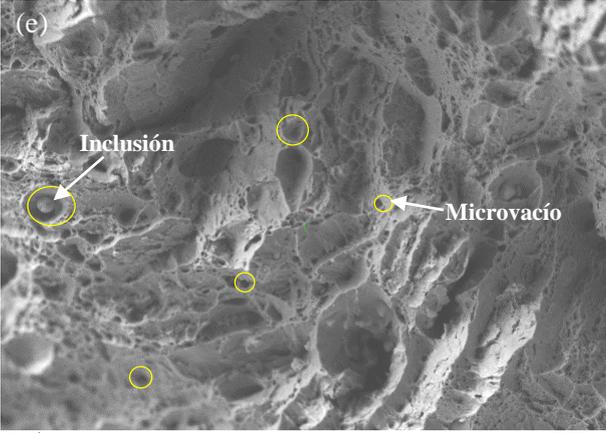
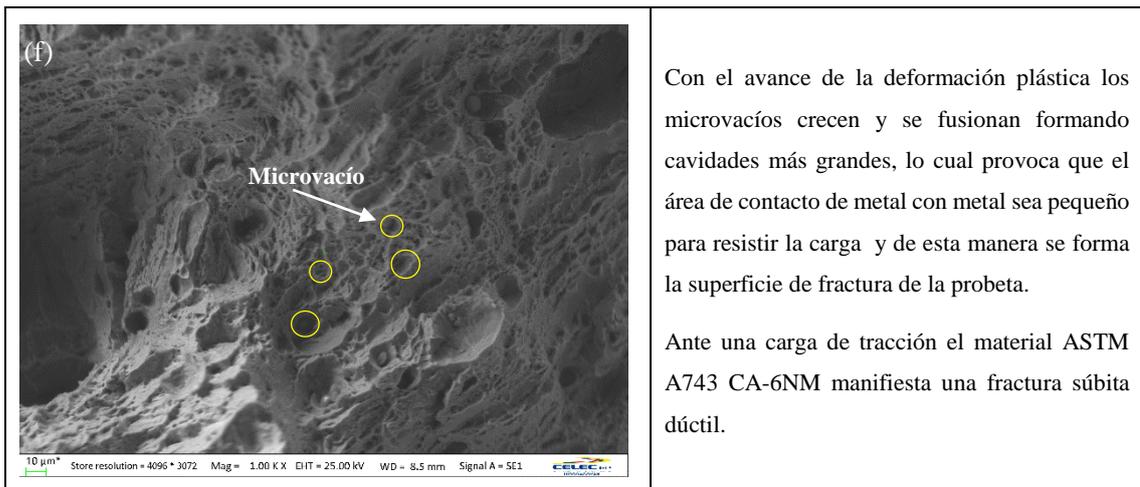
<p>(c)</p>  <p>Textura fibrosa</p> <p>Textura tersa</p> <p>Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7.6x).</p> <p>(d)</p>  <p>Aspecto típico de la textura fibrosa (zona central) vista con estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	<p>No se visualiza ninguna marca característica de una fractura frágil, por ende se puede indicar que en toda el área de fractura se nuclearon y coalescieron microvacíos, y este tipo de fractura dúctil se llama colapso plástico.</p> <p>La superficie de manera general se observa un poco opaca y rugosa por tratarse de una textura fibrosa. En las partes laterales existe presencia de textura tersa, suele ser un poco brillante y menos rugosa que la fibrosa.</p> <p>La fractura se inicia en el centro de la probeta y crece hacia los extremos, esta dirección se indica con las flechas rojas.</p> <p>Por medio del análisis macroscópico posiblemente la fractura es súbita dúctil.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
<p>(e)</p>  <p>Inclusión</p> <p>Microvacío</p> <p>10 μm⁺ Store resolution ~ 4096 * 3072 Mag = 1.00 KX FHT = 75.00 kV WD = 3.0 mm Signal A = SF1</p>	<p>De manera general microscópicamente no se forman marcas de posición del frente de grieta, marcas de radiales, de río, como ocurre en el clivaje.</p> <p>En general en la superficie predominan microvacíos redondos, en los cuales no se observa inclusiones en su interior, es probable que se hayan formado por el apilamiento de dislocaciones. Las inclusiones que pueden estar presentes son carburos que se forman en el revenido; de acuerdo al tamaño de la inclusión el microvacío adoptará proporcionalmente su tamaño.</p> <p>La carga de tracción aplicada hace que los microvacíos adopten la geometría indicada con las formas amarillas.</p>

Tabla 17-4: Reporte fractográfico probeta A743_TR02 (continuación)



Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

E la Tabla 18-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_TR03 ensayada.

Tabla 18-4: Reporte fractográfico- probeta A743_TR03

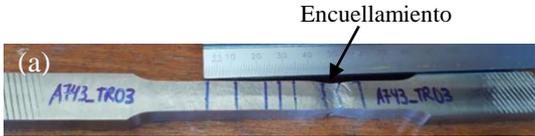
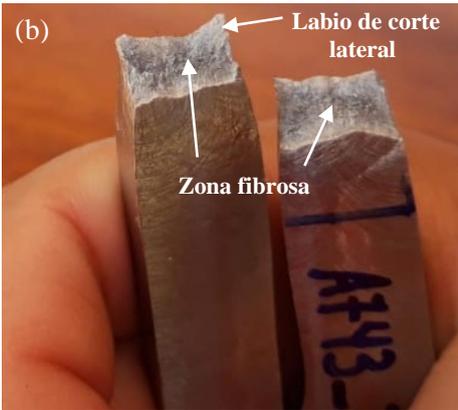
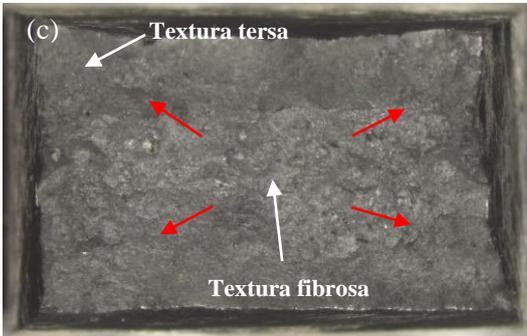
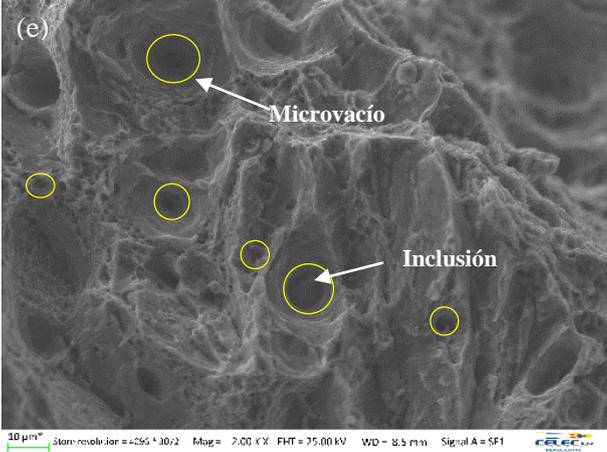
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-09	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_TR03		Tipo de ensayo: Tracción		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- TRA-01		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB)		
Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS)		<SEM>		
No. Serie: 3941000808		Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS)		
		No. Serie: 8006013638		
ANÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p style="text-align: center;">Sección longitudinal a la probeta.</p>		<p>A través de la aplicación de la carga de tracción la probeta ha experimentado una reducción de área (encuellamiento), la cual se puede ver a simple vista en la fotografía (a).</p> <p>Las texturas que se forman en la superficie de fractura se pueden ver en las fotografías (b) y (c). En la parte central se genera una textura fibrosa, la cual es perpendicular al esfuerzo de tracción; alrededor de la zona fibrosa se forma pequeños labios de corte con textura tersa, que siguen la dirección del esfuerzo cortante a 45° respecto al eje de la pieza.</p> <p>La textura fibrosa es la primera en formarse.</p>		
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la zona de fractura.</p>				
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7.6x).</p>		<p>La superficie de fractura no insinúa la formación de marcas radiales o de posición de frente de grieta (costillas o playas), esto es un indicativo de una fractura dúctil.</p> <p>Con el estereoscopio se puede apreciar a más aumentos la forma de una textura tersa y una textura fibrosa.</p> <p>De igual manera que en las probetas anteriores, la fractura inicia en el centro y crece hacia los extremos (flechas rojas).</p>		

Tabla 19-4: Reporte fractográfico- probeta A743_TR03 (continuación)

 <p>(d)</p> <p>Aspecto típico de la textura fibrosa (zona central) vista con estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	<p>Macroscópicamente probablemente es una fractura súbita dúctil.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
 <p>(e)</p> <p>Micrografía que muestra la formación de microvacíos (formas amarillas) y inclusiones (formas oscuras) en la superficie de fractura. Se observan marcas de posición del frente de grieta, marcas radiales, de río, típicas del clivaje.</p> <p>10 μm</p> <p>State resolution = ±255 * 10/2 Mag = 2.00 KX FHT = 75.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SF1</p>	<p>En la fotografía (e) se observa microscópicamente la formación de los microvacíos redondos (formas amarillas) bajo una carga de tracción. En ninguna zona se observa la formación de marcas de posición del frente de grieta, marcas radiales, de río, típicas del clivaje.</p> <p>De manera general en el interior de los microvacíos no se observan inclusiones, es probable que se hayan formado por el apilamiento de dislocaciones. Las inclusiones que pueden estar presentes son carburos que se forman en el revenido; el tamaño del microvacío es proporcional al tamaño de la inclusión.</p> <p>Una vez que se han formado los microvacíos, estos siguen creciendo con la deformación plástica que está sucediendo en la matriz metálica de los alrededores, los microvacíos coalescen y se forma la superficie de fractura.</p> <p>Bajo la acción de una carga de tracción el material ASTM A743 CA-6NM presenta una fractura súbita dúctil.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

De acuerdo a los reportes de inspección fractográfica de las tres probetas del material ASTM A743 CA-6NM, todas tienen iguales características macroscópicas y microscópicas, las mismas quedan registradas en fotografías para ser usadas en caracterizaciones de elementos fracturados que sean construidos del mismo material.

4.3 Caracterización y análisis por impacto

4.3.1 Análisis de los resultados de los ensayos de impacto

En la Tabla 20-4 se muestran los resultados de las tres probetas ensayadas del acero A743 CA-6NM bajo la norma ASTM E23-07A.

Tabla 20-4: Reporte del ensayo de impacto

CIRIT		REPORTE DE ENSAYO DE IMPACTO		CIRIT	
CODIGO: CIRIT-REG-IMP-01		Pag: 1 de 1	FECHA: 2020-03-04		
AREA DE CONTROL DE CALIDAD - CIRIT					
DATOS DE LA PROBETA					
Denominación:	Probeta de impacto con entalle en V		Dimensiones:	10 x 10 mm	
Material:	Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM		Longitud:	55 mm	
Cantidad:	3				
Estado:	Fundición <input type="checkbox"/>	Soldadura <input type="checkbox"/>	Mecanizado <input checked="" type="checkbox"/>	Sin TT <input type="checkbox"/>	Con TT <input type="checkbox"/>
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Equipo:	Máquina de Ensayos Charpy PIC 450	Norma:	ASTM E23-07A		
Capacidad:	450 J	Método:	Cuantitativo		
Nº de Serie:	M152552AR14				
RESULTADOS					
Nombre Probeta	Altura (cm)	Ancho (cm)	Área (cm ²)	Energía Absorbida (J)	Resistencia al impacto KCV (J/cm ²)
A743_IM01	0,807	1,01	0,81507	88,6	108,702
A743_IM02	0,805	1,001	0,80581	99,7	123,727
A743_IM03	0,803	1	0,803	107,3	133,624
PROMEDIO				98,533	122,018
Observaciones: El valor promedio de la energía absorbida es de 98.533 J Y para la resistencia al impacto es de 122.018 J/cm²					

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

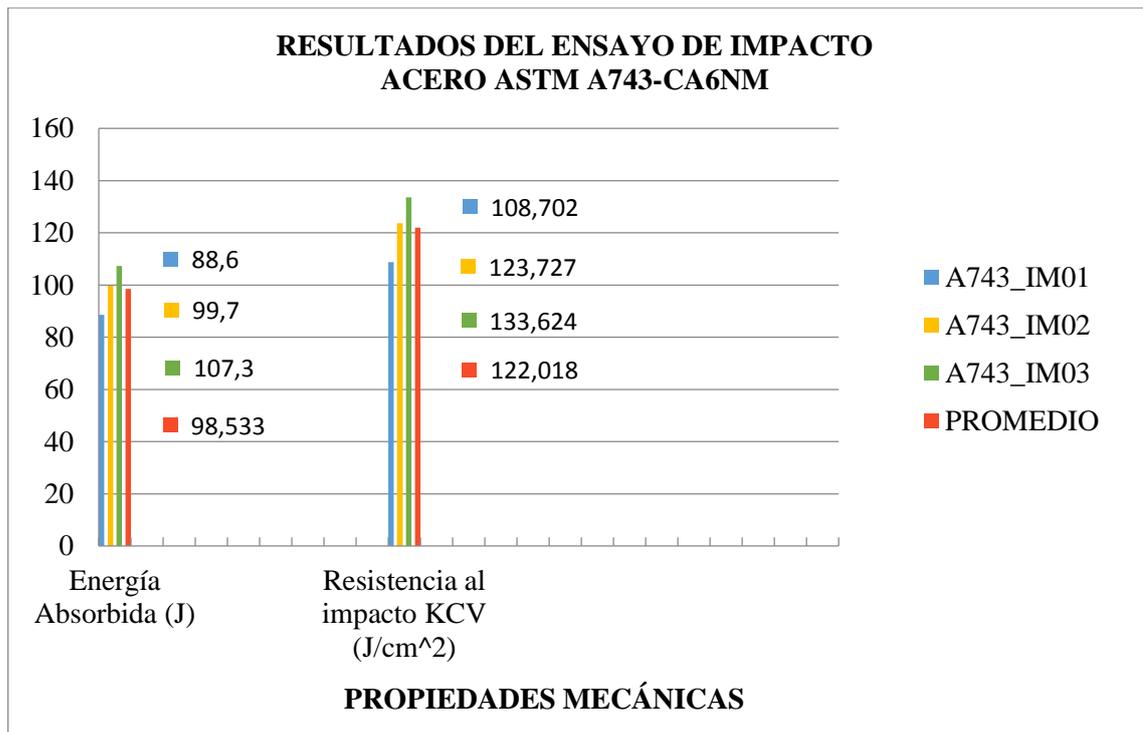


Gráfico 3-4. Resultados del ensayo de impacto- acero ASTM A743 CA-6NM

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

La propiedad mecánica importante en este ensayo es la resistencia al impacto. En el Gráfico 3-4 se puede observar que luego de ser ensayadas tres probetas no existe una variación significativa de esta propiedad y se obtiene un valor promedio de 122.018 J/cm². En base a lo dicho anteriormente, al no existir una variación significativa de la resistencia al impacto se considera que el ensayo es confiable y válido.

4.3.2 Caracterización fractográfica de las probetas ensayadas

En la Tabla 21-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_IM01 ensayada.

Tabla 21-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM01

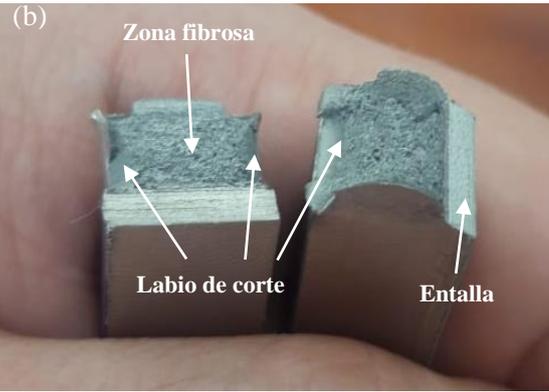
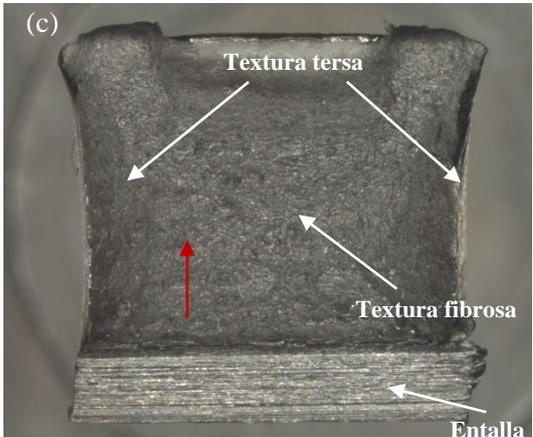
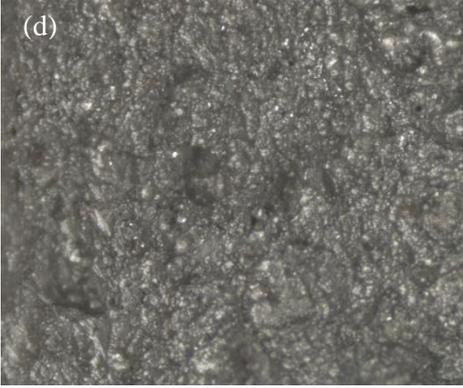
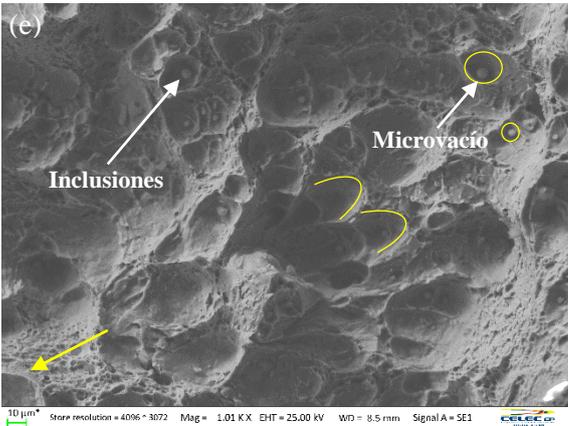
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-10	Hoja: 1		Fecha: 2020-04-07
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_IM01		Tipo de ensayo: Impacto		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- IMP-01		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS) No. Serie: 3941000808		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB) <SEM> Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS) No. Serie: 8006013638		
ANÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p style="text-align: center;">Sección longitudinal de la probeta.</p>		<p>Mediante la inspección visual se observa la zona fibrosa, sin formación de marcas de dirección de crecimiento o de posición del frente de grieta. Es decir, no se observan marcas típicas del clivaje. Alrededor de la textura fibrosa hay un labio de corte con textura tersa.</p> <p>La superficie de fractura no es completamente plana ya que presenta unos pequeños labios de corte, macroscópicamente se puede decir que es una fractura súbita dúctil, pero un análisis microscópico permitirá dar una conclusión que se acerque más al modo de fallo verdadero.</p>		
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la zona de fractura.</p>				
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7.6x).</p>		<p>Una inspección con el estereoscopio óptico ayuda a observar más cerca la textura fibrosa que prevalece en la superficie de fractura la cual se observa opaca y rugosa como típicamente se presenta en los metales.</p> <p>Se ratifica que no hay formación de marcas de clivaje en la superficie de fractura, por lo tanto, como se indica en la literatura, esto es indicio de que en toda el área de fractura se nuclearon y coalescieron microvacíos <<voids>>, de una manera más o menos homogénea, por lo que se ha producido colapso plástico.</p>		

Tabla 22-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM01 (continuación)

 <p>(d)</p> <p>Aspecto típico de la textura fibrosa (zona central) vista con en estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	<p>La superficie de fractura es coplanar al esfuerzo cortante máximo; la dirección del crecimiento de la fractura está dada por la flecha roja.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
 <p>(e)</p> <p>Inclusiones</p> <p>Microvacío</p> <p>10 µm Scale resolution = 4096 x 3072 Mag = 1.01 KX EHT = 25.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>	<p>La posición de la probeta y la manera de aplicación de la carga en el ensayo de impacto provoca flexión por impacto, de manera que internamente existen fuerzas de tracción para la descohesión del material, pero también coexisten fuerzas de corte debido a que la carga que se aplica es perpendicular al eje axial de la probeta. En la fotografía (e) microscópicamente se observa la formación de microvacíos redondeados lo que implica carga de tracción provocada por la flexión y otros microvacíos tienden a ser ovalados o elípticos lo que significa fuerza cortante, estos se encuentran siguiendo la dirección de desgarramiento (flecha amarilla).</p> <p>Algunos microvacíos (formas amarillas) se han formado alrededor de inclusiones, y en función al tamaño de estas se originan los mismos. Aquellos microvacíos que no están relacionados a partículas de segunda fase o inclusiones tienen su origen en el apilamiento de dislocaciones.</p> <p>Los microvacíos que se forman coalescen creando cavidades más grandes de tal manera que el contacto de metal con metal es pequeño para soportar la carga e inmediatamente ocurre la fractura.</p> <p>A escala macroscópica y microscópica, se puede señalar que el material de la turbina bajo una carga de impacto presenta una fractura súbita dúctil.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 23-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_IM02 ensayada.

Tabla 23-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM02

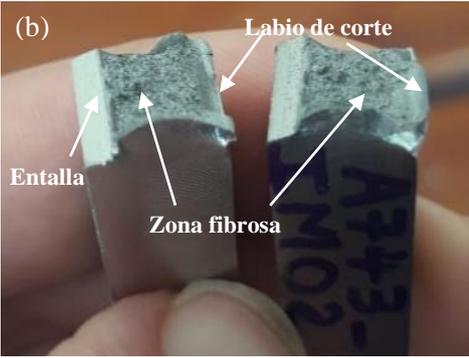
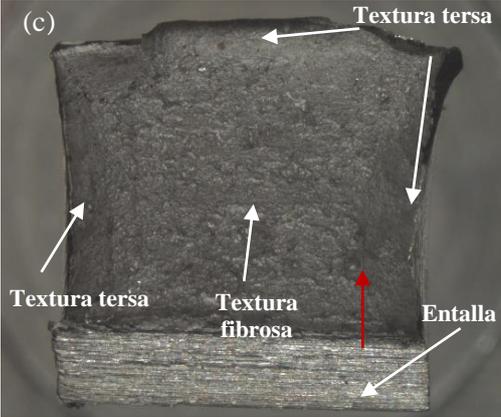
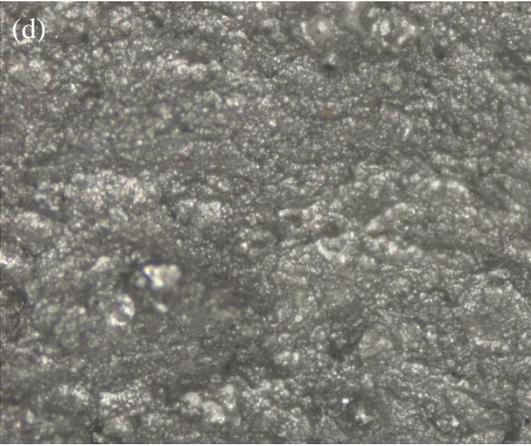
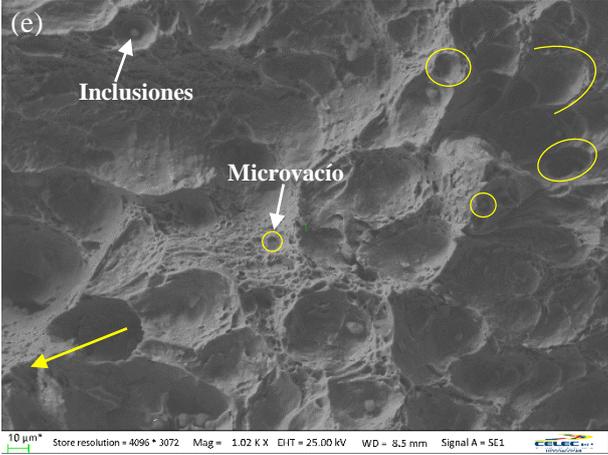
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-11	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_IM02		Tipo de ensayo: Impacto		
Material: A743 CA-6NM		Código de reporte: CIRT- REG- IMP-01		
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica		Inspección microscópica		
Equipo: Estereoscopio Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS) No. Serie: 3941000808		Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB) <SEM> Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS) No. Serie: 8006013638		
ANÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p style="text-align: center;">Sección longitudinal de la probeta.</p>  <p style="text-align: center;">Sección transversal de la zona de fractura.</p>		<p>Por medio de las fotografías (a) y (b) se visualiza que la superficie de fractura no es completamente plana por la presencia de los labios de corte, en la zona central se observa una textura fibrosa, alrededor de la misma existe una textura tersa en los labios de corte. No se encuentran marcas características del clivaje.</p>		
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7.6x).</p>		<p>Con ayuda del estereoscopio se observa la superficie de fractura opaca y rugosa, siendo la característica de la textura fibrosa que es la predominante en esta fractura. La textura tersa se presenta menos rugosa que la textura fibrosa. No hay marcas de clivaje que se manifiesten, esto señala que se produce colapso plástico y se espera encontrar microvacíos en el análisis microscópico.</p>		

Tabla 24-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM02 (continuación)

 <p>(d)</p> <p>Aspecto típico de la textura fibrosa (zona central) vista con estereoscopio (MAG 40.6x).</p>	<p>La superficie de fractura es coplanar al esfuerzo cortante máximo. El sentido de avance de la fractura se muestra por la flecha roja.</p> <p>Macroscópicamente es una fractura súbita dúctil.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
 <p>(e)</p> <p>Inclusiones</p> <p>Microvacío</p> <p>10 µm* Store resolution = 4096 * 3072 Mag = 1.02 K X ElIT = 25.00 kV WD = 8.5 mm Signal A = SE1</p>	<p>La acción de la carga de impacto produce flexión y esta a su vez internamente hace que existan cargas de tracción que ayudan a la separación del material; a la par coexisten fuerzas cortantes por que la carga actúa perpendicularmente al eje del espécimen. Los microvacíos que se generan presentan geometrías combinadas, algunos son redondos por las fuerzas de tracción y otros tienen la forma oval o elíptica debido a fuerzas cortantes.</p> <p>La fractura se produce inmediatamente después de la formación y crecimiento de los microvacíos.</p> <p>El tamaño de los microvacíos es proporcional al tamaño de las inclusiones, aquellos microvacíos que no presentan inclusiones en su interior se forman por el apilamiento de dislocaciones.</p> <p>La flecha amarilla significa la dirección del desgarre del material.</p> <p>Todo lo mencionado permite concluir que el material de las turbinas hidráulicas (ASTM A743 CA-6NM) presenta una fractura súbita dúctil cuando actúa una carga de impacto.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

En la Tabla 25-4 se muestra el reporte fractográfico de la probeta A743_IM03 ensayada.

Tabla 25-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM03

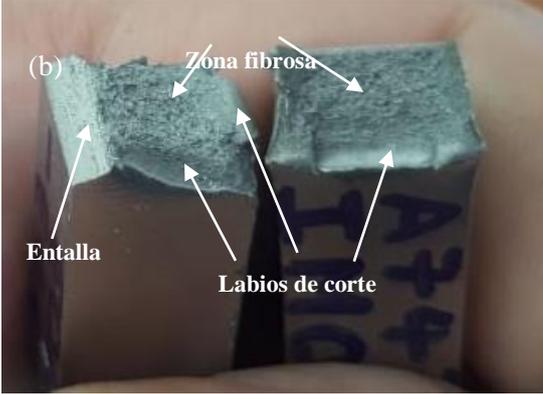
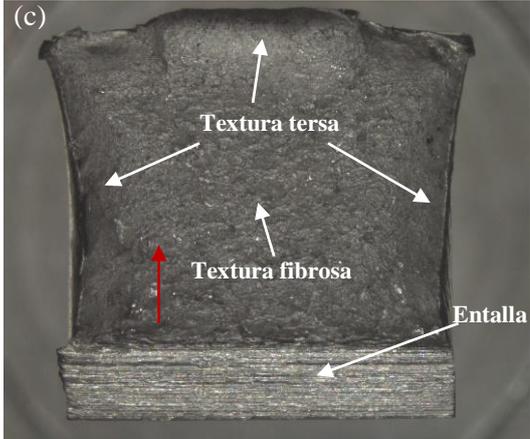
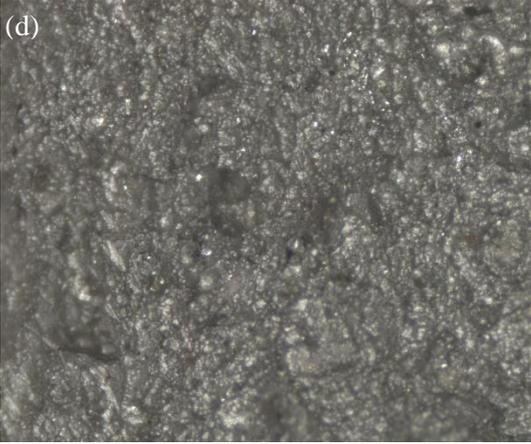
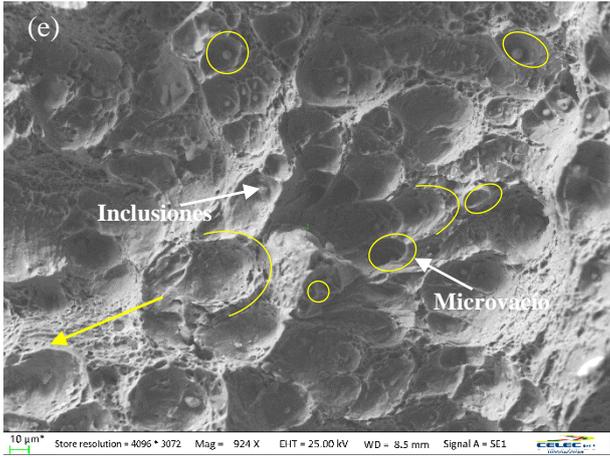
	REPORTE DE INSPECCIÓN FRACTOGRÁFICA			
	CÓDIGO: CIRT-REG-FRA-12	Hoja: 1	Fecha: 2020-04-07	
	AREA DE CONTROL DE CALIDAD- CIRT			
DATOS DE LA PROBETA				
Probeta: A743_IM03 Material: A743 CA-6NM			Tipo de ensayo: Impacto Código de reporte: CIRT- REG- IMP-01	
EQUIPOS DE INSPECCIÓN				
Inspección macroscópica			Inspección microscópica	
Equipo: Estereoscopio Modelo: SteREO Discovery.V12 (ZEISS) No. Serie: 3941000808			Equipo: Microscopio electrónico de barrido (MEB) Modelo: EVO MA25 36-38 (ZEISS) No. Serie: 8006013638	
ANÁLISIS MACROSCÓPICO				
 <p style="text-align: center;">Sección longitudinal de la probeta.</p>  <p style="text-align: center;">Sección transversal de la zona de fractura.</p>			<p>Las fotografías (a) y (b) presentan igual comportamiento que las fracturas de las probetas anteriores. Tiene labios de corte por ende la superficie de fractura no es completamente plana; la misma es coplanar al esfuerzo cortante.</p> <p>En la parte central de la probeta se tiene una textura fibrosa y los pequeños labios de corte que se encuentran alrededor poseen una textura tersa.</p> <p>A simple vista no se aprecia la formación de marcas que indiquen que ocurrió clivaje.</p> <p>La entalla que se señala en la fotografía (b) es mecanizada bajo la norma del ensayo de impacto y no debe considerarse como parte de la superficie de fractura.</p>	
 <p style="text-align: center;">Sección transversal de la fractura, vista con estereoscopio (MAG 7.6x).</p>			<p>Una inspección con el estereoscopio ayuda a identificar la formación de marcas características del clivaje, en este caso no existe la presencia de alguna de ellas lo que significa que se ha producido colapso plástico y en la superficie de fractura se nuclean microvacíos, los cuales pueden ser vistos a través de un microscopio electrónico de barrido (MEB).</p> <p>La textura fibrosa se muestra opaca y rugosa, contraria a la textura tersa que se presenta menos rugosa.</p> <p>El sentido de avance de la fractura está indicado por la flecha roja.</p>	

Tabla 26-4: Reporte fractográfico probeta A743_IM03 (continuación)

	<p>Macroscópicamente se tiene una fractura súbita dúctil.</p>
<p>ANÁLISIS MICROSCÓPICO</p>	
 <p>Micrograph (e) shows a fractured surface with various microvoids. A yellow arrow points to a crack direction. Labels 'Inclusiones' and 'Microvaño' are present. Technical data at the bottom: 10 μm, Store resolution = 4096 * 3072, Mag = 924 X, EHT = 25.00 kV, WD = 8.5 mm, Signal A = SE1, ELSC.</p>	<p>La carga de impacto ocasiona dos tipos de esfuerzos como son: el esfuerzo de flexión y el esfuerzo cortante, es por ello que se producen geometrías diferentes en los microvaños como se puede ver en la fotografía (e), las formas amarillos circulares corresponden al esfuerzo de flexión, y los óvalos pertenecen al esfuerzo cortante. La línea amarilla muestra la dirección de desgarre del material.</p> <p>La mayoría de microvaños se forman a partir del apilamiento de dislocaciones ya que en su interior no se encuentran partículas de segunda fase (inclusiones). Existen microvaños que están relacionados con inclusiones y se encuentran en muy poco porcentaje en toda la superficie de fractura. Independientemente del origen de los microvaños, estos siempre van a coalescer para formar la superficie de fractura.</p> <p>El material ASTM A743 CA-6NM muestra una fractura súbita dúctil.</p>

Realizado por: Carrión, Olmedo, 2020.

Fuente: Carrión, Olmedo, 2020.

Luego de haber realizado el análisis y caracterización fractográfico de las tres probetas del material ASTM A743 CA-6NM sometidas a carga de impacto, todas poseen las mismas características macroscópicas y microscópicas, las mismas quedan registradas en fotografías para ser usadas como modelos en caracterizaciones de elementos fracturados que sean construidos del mismo material.

CONCLUSIONES

- Mediante la información de las diferentes fuentes consultadas en cuanto al funcionamiento de máquinas para ensayos de fatiga por flexión rotativa se determinó que el diseño conceptual de este banco tiene el modelo de una viga rotativa con dos soportes principales con un punto de carga. Por otro lado, el banco de ensayos de torsión tiene un diseño horizontal con bancada rígida, y un control semiautomático.
- El diseño de los elementos que componen el banco de ensayos de fatiga por flexión rotativa está en función de la resistencia última a la tracción (Sut) del material a ensayar. Por tal motivo al momento de ensayar probetas en este banco se debe verificar que el Sut sea menor a 1818,91 MPa; debido a que su capacidad máxima de carga es de 50kg.
- En el análisis de vibraciones mecánicas del banco de flexión rotativa el valor de la frecuencia natural es de 50,509 rad/s la misma se compara con la frecuencia de trabajo del sistema que es de 180,118 rad/s y se determina que se encuentran alejadas en un 28%; considerando que lo recomendado es 20% se puede decir que no se presenta el fenómeno de resonancia.
- La capacidad del banco de ensayos de torsión está en función del diámetro y del Sut de la probeta a ensayar, por lo que es importante que el diámetro de la probeta esté entre 4 y 8 mm y el Sut sea igual o menor a 910MPa.
- El sistema de adquisición de datos está compuesto por un PLC, una caja de control y un Variador de frecuencia para controlar la velocidad del motor-reductor; para la medición del ángulo de giro se usa un encóder incremental. Mediante el software Labview se presenta la interfaz en la cual se muestra la tabla de resultados del ensayo de torsión y la gráfica de torque versus ángulo de giro.
- Al utilizar Excel para la obtención de resultados del ensayo de torsión no se guardaron de forma correcta los datos, por lo que se decidió usar ACCESS para la adquisición de estos resultados.
- Para verificar el correcto funcionamiento del banco de ensayos de torsión se realizaron pruebas en el acero AISI 1018, en el mismo se obtuvieron propiedades mecánicas como: resistencia a la fluencia cortante (Ssy), esfuerzo último a corte (Ssu) y el módulo de corte, para cada propiedad se determinó un porcentaje de error, obteniendo 7,8%, 3,8% y 1,7% respectivamente, los mismos representan una dispersión ligera de los datos obtenidos por lo que el banco de ensayos efectúa pruebas válidas cumpliendo con los requerimientos de la norma NTE INEN 140:2013 en cuanto a máquina para ensayos de torsión.
- Las medidas de las probetas para los ensayos de torsión, tracción e impacto se basan en las normas NTE INEN 140:2013, ASTM E8-E8M-15a y ASTM E23-07a, respectivamente. El

mecanizado de todas las probetas cumple con las tolerancias y acabado superficial que se establece en cada norma ya que esto influye en los resultados de los ensayos.

- En el banco de ensayos que se diseñó y construyó, se realizaron los ensayos de torsión para el material de interés, el acero ASTM A743 CA-6NM. Las propiedades mecánicas principales que se obtuvieron fueron: la resistencia a la fluencia cortante, esfuerzo último a corte y el módulo de corte; los valores promedio de dichas propiedades fueron 346,66 MPa, 739,2 MPa y 77,04 MPa respectivamente, mismas que son aproximadamente igual a los valores teóricos de cada propiedad establecida para este material, por lo que se considera que los ensayos efectuados son válidos y de esta manera el mecanismo de falla se genera correctamente para realizar el análisis fractográfico.
- Los resultados de los ensayos de tracción realizados en el acero ASTM A743 CA-6NM son válidos ya que el valor de las propiedades principales de este material como resistencia a la fluencia (S_y) cuyo rango es de 550-725 MPa y el esfuerzo último (S_{ut}) con un valor de 740-910 MPa se encuentran dentro de los rangos establecidos para este material. El valor promedio del S_y obtenido en el ensayo es de 635,13 MPa y del S_{ut} es 843,27 MPa.
- La resistencia al impacto que es una propiedad que se obtuvo en el ensayo de impacto del acero ASTM A743 CA-6NM no presenta una variación significativa en las tres probetas ensayadas y su valor promedio es de 122,018 J/cm².
- El análisis y caracterización se hizo de fallas catastróficas (fracturas súbitas) ya que según estadísticas son las que comúnmente los sectores productivos investigan debido a su impacto en la producción, disponibilidad y funcionalidad de equipos e instalaciones, y a sus consecuencias económicas, humanas y ambientales. El porcentaje de ocurrencia es de 82.6 % resultando mayor frente a las fallas no catastróficas.
- Con una muestra de tres probetas para la caracterización y análisis de los mecanismos de falla por torsión, tracción e impacto en el acero de las turbinas hidráulicas (ASTM A743 CA-6NM) se estableció características patrones macroscópicas y microscópicas usando el handbook "ASM INTERNATIONAL FAILURE ANALYSIS AND PREVENTION" para cada uno de los mecanismos de falla, las mismas quedaron registradas en fotografías.
- El mecanismo de falla por torsión para el material de las turbinas hidráulicas (ASTM A743 CA-6NM) se caracteriza macroscópicamente por no presentar reducción de área en la zona de fractura y por tener una superficie de fractura plana la cual es coplanar al esfuerzo cortante, en la cual a simple vista se puede notar una textura tersa en la zona central y una textura tersa con frotamiento en la periferia la cual es la primera en formarse; las dos se presentan un poco brillante y poco rugosas. Microscópicamente se caracteriza por tener microvacíos en forma de óvalos o elípticos que se encuentran inclinados o alargados en la dirección del desgarre o del

corte. Estos microvacíos coalescieron para formar la superficie de fractura. Bajo una carga de torsión el acero ASTM A743 CA-6NM muestra una fractura súbita dúctil.

- El mecanismo de falla por tracción para el acero ASTM A743 CA-6NM macroscópicamente presenta una reducción de área o encuellamiento en la zona de fractura, la superficie de fractura presenta una zona central con textura fibrosa la cual es la primera en formarse y resulta perpendicular al esfuerzo de tracción; alrededor de la textura fibrosa se tienen pequeños labios de corte con textura tersa que siguen la orientación del esfuerzo cortante máximo (45° aproximadamente respecto al eje de la pieza). La textura fibrosa se presenta opaca y rugosa. Microscópicamente se forman microvacíos con una geometría circular que a medida que aumenta la deformación estos crecen y se unen, de esta manera generan la superficie de fractura. La aplicación de una carga de tracción en el acero ASTM A743 CA-6NM provoca una fractura súbita dúctil.
- Para el mecanismo de falla por impacto del acero ASTM A743 CA-6NM macroscópicamente la deformación plástica no es muy notoria; la superficie de fractura es coplanar al esfuerzo cortante, no es completamente plana por que presenta unos pequeños labios de corte; en la parte central tiene una textura fibrosa que es la que prevalece en la superficie de fractura, alrededor de la textura fibrosa los labios de corte lucen una textura tersa. La textura fibrosa es opaca y rugosa, y la tersa es menos rugosa. La posición de la probeta y la manera de aplicación de la carga en el ensayo de impacto provoca flexión por impacto, de manera que internamente existen fuerzas de tracción para la descohesión del material, pero también coexisten fuerzas de corte debido a que la carga que se aplica es perpendicular al eje axial de la probeta; de esta manera microscópicamente se caracteriza por tener microvacíos con la combinación de dos geometrías, circulares y elípticos u óvalos, los circulares hacen referencia a una fuerza de tracción generada por la flexión y los elípticos implica una fuerza cortante. Estos microvacíos crecen rápidamente y coalescen para formar la superficie de fractura. Por todo lo dicho el acero ASTM A743 CA-6NM presenta una fractura súbita dúctil bajo la acción de una carga de impacto.
- En todos los mecanismos de falla analizados no existieron indicios que señalen que la fractura se produjo siguiendo los límites de grano por lo que la trayectoria de la grieta fue transgranularmente (atravesando los granos); en ninguna superficie de fractura hubo la presencia de marcas características del clivaje lo que significa que hubo colapso plástico ya que microscópicamente se formaron microvacíos distribuidos de una manera más o menos homogénea; esto sirvió como base para descartar la formación de fracturas súbitas frágiles y fracturas mixtas.

- Todas las características patrones identificadas servirán como información de apoyo, para establecer el mecanismo de falla que pudo ocasionar la fractura en partes de las turbinas hidráulicas o elementos industriales fracturados que hayan sido fabricados con el acero ASTM A743 CA-6NM. Al mismo tiempo esta información ayuda a la disminución de tiempo en el análisis fractográfico que realiza el Laboratorio de análisis de falla y desgaste del CIRT que contribuye a la óptima recuperación de las turbinas hidráulicas, ya que el análisis conduce a la fuente de falla que es el evento inicial de un mecanismo de falla, como pueden ser deficiencias en la fabricación, deficiencias de montaje, de operación, de mantenimiento, entre otras.

RECOMENDACIONES

- Generalmente la fatiga que se produce en los elementos mecánicos es por flexión rotativa, la cual se encuentra dentro de las fracturas progresivas, por lo cual se sugiere que el diseño conceptual propuesto del banco de ensayos por flexión rotativa sea considerado como una base para la posible construcción de un banco en el cual se pueda realizar este tipo de ensayo para realizar su respectivo análisis fractográfico.
- En el análisis de vibraciones mecánicas se recomienda realizar un estudio más profundo para diseñar de una manera óptima todos los elementos del sistema y con esto mitigar las posibles oscilaciones que se pueden presentar.
- Mediante el banco de ensayos de torsión que se diseñó y construyó se pueden realizar pruebas de fatiga por torsión para lo cual se recomienda realizar la programación respectiva que permita realizar dicho ensayo, esto con el objetivo de analizar y caracterizar una fractura progresiva (fractura por fatiga).
- Para el banco de ensayos de torsión se recomienda implementar un sensor de reacción estática para obtener un valor de torque más preciso.
- Los elementos mecánicos son diseñados para soportar cargas y deformaciones, bajo la acción del medio ambiente circundante, lo cual provoca que existan más mecanismos o modos de falla en el tiempo, es por ello que se recomienda que en futuras investigaciones se analicen y caractericen fracturas progresivas como fractura por fatiga, fractura por corrosión bajo esfuerzo, desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, corrosión generalizada, para que el CIRT cuente con una amplia información en cuanto a mecanismos de falla.
- Implementar un proceso de seguimiento del mecanismo de falla de las turbinas hidráulicas o partes industriales que lleguen fracturadas al CIRT con el objetivo de establecer la causa raíz de la falla para tener una bitácora de los eventos físicos o químicos que llevaron a la falla del material con el propósito de realizar una óptima recuperación y gestionar acciones preventivas para minimizar la recurrencia de las fallas.

GLOSARIO

- **Clivaje:** propiedad que presentan determinados minerales de dividirse fácilmente ante un efecto mecánico siguiendo planos determinados de debilidad siempre en concordancia con la simetría mineral. (Oxford Léxico, 2020)
- **Compuestos intermetálicos:** Un compuesto intermetálico es la combinación que resulta de mezclas homogéneas de dos o más metales fundidos. En el caso de una aleación binaria, por ejemplo, un compuesto intermetálico es una fase intermedia entre sus dos elementos constituyentes, y sus características son por tanto diferentes a la de estos. Por sus interesantes propiedades físicas y químicas, los compuestos intermetálicos ocupan un lugar preferente dentro del campo de la investigación aplicada, principalmente en aplicaciones estructurales (nuevos materiales en motores de vehículos de propulsión, turbomáquinas, etc.) y en aplicaciones funcionales (superconductores, acumuladores de hidrógeno, baterías Ni-MH, etc.). Es en este último campo, y concretamente en la acumulación de hidrógeno, donde estos compuestos están acaparando actualmente mucha atención. (UAM, 2010, p. 1)
- **Fragilización:** Pérdida de ductilidad de un metal o una aleación, que puede llevar a su rotura. (Oxford Léxico, 2020)
- **Impurezas:** Las impurezas son todos los elementos indeseables en la composición del acero. Se encuentran en los aceros debido a que en el proceso de fabricación el acero tiene contacto con diferentes tipos de minerales y combustibles. Las impurezas son indeseables debido a que afectan a las propiedades del acero, es por esto que se busca eliminar o reducir su contenido. (Andrade Víctor & Quezada Patricio, 2011, p. 46)
- **Inclusiones no metálicas:** Las inclusiones que, principalmente se encuentran en el acero son sulfuros de manganeso y hierro, óxidos y silicatos de hierro, manganeso, silicio y aluminio. (Andrade Víctor & Quezada Patricio, 2011, p. 45)
- **Macla:** cuerpo mineral formado por dos o más cristales simples de una misma especie mineral asociados simétricamente. (Oxford Léxico, 2020)

BIBLIOGRAFÍA

ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*. Cuarta. New York: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4987-2813-3, p. 229.

ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*. Cuarta. New York: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4987-2813-3, p. 244.

ARANA, José Luis; & GONZÁLEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. España: Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. ISBN 84-8373-455-9, p. 13.

ARANA, José Luis; & GONZÁLEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. España: Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. ISBN 84-8373-455-9, p. 15.

ARANA, José Luis; & GONZÁLEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. España: Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. ISBN 84-8373-455-9, pp. 143-145.

ARANA, José Luis; & GONZÁLEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. España: Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. ISBN 84-8373-455-9, pp. 156-158.

ARANA, José Luis; & GONZÁLEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. España: Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. ISBN 84-8373-455-9, p. 149.

ARANA, José Luis; & GONZÁLEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. España: Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. ISBN 84-8373-455-9, p. 151.

ASKELAND, Donald R; et al. *Ciencia e ingeniería de materiales* [en línea]. Sexta. México, 2013. [Consulta: 05 marzo 2020]. Disponible en: <https://oswaldoweb.files.wordpress.com/2016/04/ciencia-e-ingenieria-de-materiales-sexta-edicion3b3n.pdf>

ASKELAND, Donald R. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Tercera. México: Thomson, 2011. ISBN 0-534-93423-4, pp. 134-135.

ASKELAND, Donald R. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Tercera. México: Thomson, 2011. ISBN 0-534-93423-4, p. 137.

ASKELAND, Donald R. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Tercera. México: Thomson, 2011. ISBN 0-534-93423-4, p. 143-144.

ASTM E8-E8M. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

ASTM E23. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.

ASTM E-466. *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.*

ASM Handbook. *Fractography* [en línea]. Washington-USA: Scholarly Publishing, 1998. [Consulta: 15 enero 2020]. Disponible en: https://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/06365G/PUBLICATION

ASM Handbook. *Failure Analysis and Prevention* [en línea]. Washington-USA: Scholarly Publishing, 2002. [Consulta: 23 enero 2020]. Disponible en: https://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/06072G/PUBLICATION

AUZ MOGROVEJO, Juan José. Estudio del tratamiento térmico post soldadura del acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM y su incidencia en las propiedades mecánicas del material aplicado a la recuperación de rodets hidráulicos [En línea] (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad técnica de Ambato. Ambato- Ecuador. 2017. p 77. [Consulta: 19 marzo 2020]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25977>

BÁRCENES OLIVARES, Rosa Maricela. Repotenciación de la máquina para ensayos de resistencia a la fatiga del laboratorio de resistencia de materiales de la facultad de mecánica de la ESPOCH [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. 2019. p. 17. [Consulta: 09 agosto 2020]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/11527/1/15T00711.pdf>

BEER, Ferdinand P; et al. *Mecánica de Materiales* [en línea]. Quinta. México: McGRAW-HILL, 2010. [Consulta: 02 agosto 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/32222459/Mec%C3%A1nica_de_Materiales_quinta_edici%C3%B3n_-_Ferdinand_P._Beer_E._Russell_Johnston_Jr_John_T._DeWolf_David_F._Mazurek.pdf

CALLISTER, William D. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* España: Revestré, S.A, 2005, pp. 115-116.

CALLISTER, William D. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* España: Revestré, S.A, 2005, p. 129.

CAÑIZARES SILVA, Cristhian Fabián; & QUINCHUELA PAUCAR, Juan Carlos. Tecnologías para la recuperación por soldadura de álabes de turbinas hidráulicas construidas de acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540). (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba-Ecuador. 2017. P 19.

CASTILLO CUENCA, Ángel Vinicio. Diseño y construcción de un banco para ensayos de torsión. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. 2011. pp.31-36. [Consulta: 10 julio 2019]. Disponible en: <http://dspace.unl.edu.ec:9001/jspui/bitstream/123456789/12439/1/Castillo%20Cuenca%2C%20%C3%81nge1%20Vinicio.pdf>

CHANGO MORETA, David Misael; & SIZA SIMBAÑA, Roberto Marcelo. Diseño y construcción de una máquina para realizar ensayo de fatiga por flexión rotativa utilizando PC. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga, Ecuador. 2012. p. 27. [Consulta: 18 junio 2019]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5122/1/T-ESPEL-0899.pdf>

CUICHÁN SIMBA, Fausto Rodrigo; & DEUÑAS JARAMILLO, Wilson Fernando. Rediseño y construcción de la máquina de viga rotatoria sometida a flexión para ensayos de resistencia a la fatiga. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2008. pp. 2-6. [Consulta: 25 junio 2019]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1023>

CUICHÁN SIMBA, Fausto Rodrigo; & DEUÑAS JARAMILLO, Wilson Fernando. Rediseño y construcción de la máquina de viga rotatoria sometida a flexión para ensayos de resistencia a la fatiga. [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2008. pp. 17-18. [Consulta: 25 junio 2019]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1023>

ESPEJO MORA, Édgar; & HERNÁNDEZ ALBAÑIL, Héctor. *Análisis de fallas de estructuras y elementos mecánicos* [en línea]. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2017. [Consulta: 21 abril 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/book/415533130/Analisis-de-fallas-de-estructuras-y-elementos-mecanicos>

FRANCOIS, Dominique; et al. 2013. *Mechanical Behaviour of materials* [en línea]. New York London: Springer, 2013. [Consulta: 15 marzo 2020]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=cpqgF5zb-YMC&oi=fnd&pg=PR3&dq=Volume+II:+Fracture+Mechanics+and+Damage&ots=vbC4-KfLB5&sig=IjeybuqokTpsnCxlYuThQE4MRGQ#v=onepage&q=Volume%20II%3A%20Fracture%20Mechanics%20and%20Damage&f=false>

GARZÓN, José Miguel; et al. Diseño y construcción de un banco para pruebas de torsión [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de San Buenaventura. Bogotá DC. 2015. pp. 11-15. [Consulta: 10 julio 2019]. Disponible en: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/137799.pdf>

GUSQUI MARTÍNEZ, Estefanía Paulina; & RIVERA ENRIQUEZ, Marco Ivan. Diseño y construcción de un prototipo para la obtención de polvo metálico a partir de la viruta generada de los procesos de mecanizado del CIRT unidad de negocios Hydroagoyán [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. 2018. pp. 19-24. [Consulta: 10 julio 2019]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10179>

HIBBELER, Russell C. *Mecánica de Materiales*. 8ª ed. México: Pearson, 2011, ISBN 978-607-32-0559-7, pp.82-87.

JACOBSON, Bo; et al. *Elementos de máquinas*. México: McGRAW-HILL, 2000. ISBN 0-256-19069-09, pp.259-260.

JACOBSON, Bo; et al. *Elementos de máquinas*. México: McGRAW-HILL, 2000. ISBN 0-256-19069-09, p.271.

Máquina de prueba de torsión 210. *Test GmbH* [blog]. [Consulta: 14 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.test-gmbh.com/en/products/testing-machines/torsion-testing-machines/model-210/>

MEDINA, Edwin. (*Guía Laboratorio Mecánica de Materiales*) *Torsión* [en línea], p. 4. [Consulta: 14 agosto 2019]. Disponible en: <http://udistrital.edu.co:8080/documents/19625/239908/ENSAYO+DE+TORSION.pdf>

MOTT, Robert L. *Diseño de elementos de máquinas*. 4ª ed. México: PEARSON EDUCACION, 2006, p.172.

NISBETT, Keith J; & BUDYNAS, Richard G. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 8ª ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2008, pp. 95-96.

NISBETT, Keith J; & BUDYNAS, Richard G. 2008. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 8ª ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2008, pp. 274-276.

NTE INEN 140:2013. *Ensayo de torsión simple para alambre de acero.*

PACHECO VEGA, Juan Carlos; & ESPINOSA TORO, Alex Javier. Aplicación de la tecnología CNC en la modelación y fabricación de portaherramientas utilizados en los tornos convencionales del taller básico de la ESPOCH [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. Ecuador. 2016. pp. 55-56. [Consulta: 09 agosto 2020]. Disponible en: http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/5821/1/85T00405.pdf?fbclid=IwAR0NqLISJKsCIAq9rnx6mM_b3t-BV3oIhAozsLu28EJphJ0kdmz0j5KdvWA

POLANCO PACHECO, Christian Andrés. Ensayo de fatiga en flexión rotativa del acero AISI 1018 por el método esfuerzo-vida [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. Ecuador. 2011. pp. 26-29. [Consulta: 18 junio 2019]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/19051>

REYES REYES, Gustavo Adolfo. Guía para el mantenimiento y prácticas de laboratorio para tornos de filetear KENT-USA 1340A utilizados para el laboratorio de procesos de manufactura 1 [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 2011. pp. 131-132. [Consulta: 09 agosto 2020]. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0663_M.pdf?fbclid=IwAR29sWyMeE36RLptCBvBCPZYu0s-5nfzh-Ie16gbqkr3tSX5qrW1-RQD2BQ

SENATI. *Alineamiento y balanceo de máquinas y mecanismos* [en línea], 2013. [Consulta: 29 octubre 2019]. Disponible en: https://docplayer.es/72916579-Programa-de-complementacion-para-titulacion.html#show_full_text

SIEMENS. *Controlador programable S7-1200* [en línea], 2009. [Consulta: 9 agosto 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/25251779/S71200_MANUAL_DEL_SISTEMA_PDF

SIEMENS. *Convertidor Sinamics G120C* [en línea], 2014. [Consulta: 9 agosto 2020]. Disponible en: https://www.technical.cat/PDF/SIEMENS/MECATRONICA/manual_SINAMICS_G120C.pdf

SINGIRESU S. *Vibraciones Mecánicas* [en línea]. Quinta. México: Pearson, 2012. [Consulta: 8 agosto 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/40208944/VIBRACIONES_MEC%C3%81NICAS_RAO

SIMBAÑA CASTAÑEDA, Carlos Eduardo, 2012. Estudio de fatiga en ciclos altos en el acero AISI 1045 para determinar la ocurrencia de falla cumpliendo normas ASTM E-606 [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Técnica de Ambato. Ambato. Ecuador. 2012. pp. 40-41. [Consulta: 18 junio 2019]. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/3742>

STIOPIN, P. 1968. *Resistencia de materiales*. Moscú: MIR.MOSCU, 1968.

VANEGAS USECHE, Libardo Vicente. *Diseño de elementos de máquinas*. Pereira, [en línea]. Colombia: Univeridad Tecnológica de Pereira, 2018. [Consulta: 21 junio 2019]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8889/Dise%C3%B1o%20Elementos%20Maquinas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

VOGEL, Eugene. *ANSI/ASA S2.75-2017/Part 1 Shaft Alignment Methodology, Part 1: General Principles, Methods, Practices, and Tolerances* [en línea], 2018, pp. 2-4. [Consulta: 29 octubre 2019]. Disponible en:

https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/175032/07_Vogel.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

WHITE, Tomás Pérez; et al. *Resistencia de materiales* [en línea]. Universidad de Salamanca, 1992. [Consulta: 12 agosto 2019]. Disponible en:

[https://books.google.com.ec/books?id=CnYSoc1VsdK&pg=PA6&lpg=PA6&dq=resistencia+d](https://books.google.com.ec/books?id=CnYSoc1VsdK&pg=PA6&lpg=PA6&dq=resistencia+de+materiales+Perez+White&source=bl&ots=brF-Xj2OKg&sig=ACfU3U2pdSUNQmLzfJ1ENwCBSzQDqQ-IQw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjNr_3G1-DjAhVBvIkKHbi2CaMQ6AEwEXoECAoQAQ#v=onepage&q=resistencia%20de%20material)

[e+materiales+Perez+White&source=bl&ots=brF-](https://books.google.com.ec/books?id=CnYSoc1VsdK&pg=PA6&lpg=PA6&dq=resistencia+de+materiales+Perez+White&source=bl&ots=brF-Xj2OKg&sig=ACfU3U2pdSUNQmLzfJ1ENwCBSzQDqQ-IQw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjNr_3G1-DjAhVBvIkKHbi2CaMQ6AEwEXoECAoQAQ#v=onepage&q=resistencia%20de%20material)

[Xj2OKg&sig=ACfU3U2pdSUNQmLzfJ1ENwCBSzQDqQ-](https://books.google.com.ec/books?id=CnYSoc1VsdK&pg=PA6&lpg=PA6&dq=resistencia+de+materiales+Perez+White&source=bl&ots=brF-Xj2OKg&sig=ACfU3U2pdSUNQmLzfJ1ENwCBSzQDqQ-IQw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjNr_3G1-DjAhVBvIkKHbi2CaMQ6AEwEXoECAoQAQ#v=onepage&q=resistencia%20de%20material)

[IQw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjNr_3G1-](https://books.google.com.ec/books?id=CnYSoc1VsdK&pg=PA6&lpg=PA6&dq=resistencia+de+materiales+Perez+White&source=bl&ots=brF-Xj2OKg&sig=ACfU3U2pdSUNQmLzfJ1ENwCBSzQDqQ-IQw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjNr_3G1-DjAhVBvIkKHbi2CaMQ6AEwEXoECAoQAQ#v=onepage&q=resistencia%20de%20material)

[DjAhVBvIkKHbi2CaMQ6AEwEXoECAoQAQ#v=onepage&q=resistencia%20de%20material](https://books.google.com.ec/books?id=CnYSoc1VsdK&pg=PA6&lpg=PA6&dq=resistencia+de+materiales+Perez+White&source=bl&ots=brF-Xj2OKg&sig=ACfU3U2pdSUNQmLzfJ1ENwCBSzQDqQ-IQw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjNr_3G1-DjAhVBvIkKHbi2CaMQ6AEwEXoECAoQAQ#v=onepage&q=resistencia%20de%20material)

[es%20Perez%20White&f=true](https://books.google.com.ec/books?id=CnYSoc1VsdK&pg=PA6&lpg=PA6&dq=resistencia+de+materiales+Perez+White&source=bl&ots=brF-Xj2OKg&sig=ACfU3U2pdSUNQmLzfJ1ENwCBSzQDqQ-IQw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjNr_3G1-DjAhVBvIkKHbi2CaMQ6AEwEXoECAoQAQ#v=onepage&q=resistencia%20de%20material)