

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DEL ACERO UTILIZADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PANELES TIPO MABEY COMPACTO 100

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

LUIS JAVIER CÁRDENAS ABRIL

DIRECTOR: ING. JOSÉ PEREZ

CODIRECTOR: ING. XAVIER SANCHEZ

Sangolquí, 2012-05

CERTIFICACIÓN DE LA ELAVORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “CARACTERIZACIÓN DEL ACERO UTILIZADO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE PANELES TIPO MABEY COMPACTO 100”, fue realizado en su totalidad por el señor Luis Javier Cárdenas Abril como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Pérez
DIRECTOR

Ing. Xavier Sánchez
CODIRECTOR

Sangolquí, 2012 – 04 – 18

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“CARACTERIZACIÓN DEL ACERO UTILIZADO PARA LA CONSTRUCCIÓN
DE PANELES TIPO MABEY COMPACTO 100”**

ELABORADO POR:

Sr. Luis Javier Cárdenas Abril

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Xavier Sánchez

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Sangolquí, 2012 – 05

DEDICATORIA

El presente proyecto dedico a mi familia por su gran apoyo, colaboración y comprensión durante todo este tiempo depositando siempre en mi toda su confianza para salir siempre adelante y porque me enseñaron que para alcanzar los objetivos propuestos es necesario mantener siempre un pensamiento positivo, constancia y trabajar día a día venciendo el miedo y las dificultades.

LUIS JAVIER CÁRDENAS ABRIL

AGRADECIMIENTO

Primeramente quiero agradecer a Dios que ha guiado cada uno de mis pasos y me ha inspirado a ser una mejor persona, hijo, amigo y estudiante.

A mi familia que siempre ha sido un soporte diario y ejemplo de lucha constante que me ha servido para mejorar, persistir y lograr cada una de mis metas propuestas con esfuerzo y dedicación.

A mis amigos por brindarme su amistad y por los momentos compartidos durante toda la etapa universitaria.

A todos mis profesores que a lo largo de esta etapa universitaria, supieron brindarme sus conocimientos, experiencia y ayuda para ser un mejor profesional en especial a mi director el Ingeniero José Pérez y a mi codirector el Ingeniero Xavier Sánchez quienes con sus conocimientos, apoyo y comprensión han sabido guiarme durante toda la realización del proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELAVORACIÓN DEL PROYECTO	II
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
RESUMEN	XXII
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. ANTECEDENTES	2
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. GENERAL.....	3
1.4.2. ESPECÍFICOS.....	4
1.5. ALCANCE	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. PUENTES BAILEY.....	5
2.1.1. ESTÁNDAR	6
2.1.2. ESTÁNDAR ENSANCHADO.....	11
2.1.3. EXTRA ANCHO.....	13
2.2. PROPIEDADES METALGRÁFICAS	13
2.2.1. ESTRUCTURA DE LOS METALES	13
2.2.2. ESTRUCTURA DEL HIERRO PURO	15
2.2.3. DIAGRAMA DE FASES DEL HIERRO-CARBURO	16
2.2.4. ALEACIONES FERROSAS	18
2.2.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	24
2.2.6. MICROESTRUCTURA DE LA ALEACIÓN HIERRO – CARBONO .	28
2.2.7. MACROESTRUCTURA DE LA ALEACIÓN HIERRO-CARBONO ..	35
2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS	36
2.3.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	36

2.3.2.	MÓDULO DE POISSON.....	38
2.3.3.	RESISTENCIA A LA FLUENCIA	38
2.3.4.	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	39
2.3.5.	TENACIDAD.....	40
2.3.6.	DUCTILIDAD	40
2.3.7.	DUREZA.....	41
2.4.	ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	41
2.4.1.	ENSAYO DE TRACCIÓN	41
2.4.2.	ENSAYO DE DUREZA	45
2.5.	RECUBRIMIENTOS DEL ACERO: GALVANIZADO.....	49
2.6.	TRATAMIENTOS TÉRMICOS	53
2.6.1.	RECOCIDO	54
2.6.2.	TEMPLADO.....	55
2.6.3.	CEMENTADO.....	55
2.7.	NORMAS BS.968, ASTM, ISO, INEN, AISI, AWS	56
2.8.	SELECCIÓN DE MATERIALES.....	58
CAPÍTULO 3: PROCESO DE SELECCIÓN DE PROBETAS Y EXTRACCIÓN63		
3.1.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	63
3.1.1.	EQUIPOS Y MATERIALES	63
3.1.2.	VERIFICACIÓN DE LA PRENSA HIDRÁULICA.....	64
3.1.3.	CÁLCULO DEL CABLE DE ACERO	67
3.2.	SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS.....	71
3.2.1.	PANEL DEFORMADO.....	72
3.2.2.	PANEL IDEAL.....	76
3.3.	SELECCIÓN DE CORTE PARA PROBETAS.....	78
3.3.1.	CORTE CON GAS OXICOMBUSTIBLE	79
3.3.2.	CORTE POR ARCO DE PLASMA.....	80
3.3.3.	ELECTROEROSIÓN CON ALAMBRE	81
3.3.4.	ASERRADO MANUAL Y MECÁNICA	82
3.3.5.	SELECCIÓN DE CORTE.....	83
3.4.	EXTRACCIÓN DE PROBETAS BAJO NORMAS APLICABLES.....	84

CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN METALOGRÁFICA	87
4.1. INTRODUCCIÓN	87
4.2. EQUIPOS UTILIZADOS.....	87
4.3. ESTRUCTURA MICROGRÁFICA.....	89
4.3.1. NORMAS A APLICAR	89
4.3.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	89
4.3.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO MICROGRÁFICO	92
4.3.4. RESULTADOS	93
4.4. ESTRUCTURA MACROGRÁFICA.....	94
4.4.1. NORMAS A APLICAR	94
4.4.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	94
4.4.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO MACROGRÁFICO	95
4.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA	96
4.5.1. NORMAS A APLICAR	96
4.5.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	96
4.5.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA..	97
4.5.4. RESULTADOS	97
4.6. ESPESOR DE GALVANIZADO.....	98
4.6.1. NORMAS A APLICAR	98
4.6.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	98
4.6.3. PROCEDIMIENTO PARA CUANTIFICAR EL ESPESOR DEL GALVANIZADO	98
4.6.4. RESULTADOS	99
4.7. INCLUSIONES.....	100
4.7.1. NORMAS A APLICAR	100
4.7.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	100
4.7.3. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINACIÓN DE INCLUSIONES	101
4.7.4. RESULTADOS	101
4.8. CARACTERÍSTICA DE CHISPA.....	103
4.8.1. NORMAS A APLICAR	103
4.8.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	103
4.8.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE CHISPA	104
4.8.4. RESULTADOS	104

CAPÍTULO 5: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	107
5.1. INTRODUCCIÓN	107
5.2. EQUIPOS UTILIZADOS.....	107
5.2.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS	107
5.2.2. ENSAYOS MECÁNICOS.....	109
5.3. TENSIÓN	110
5.3.1. NORMAS A APLICAR	110
5.3.2. LOCALIZACIÓN DE PROBETAS	111
5.3.3. FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	113
5.3.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	121
5.3.5. RESULTADOS	122
5.4. DUREZA	123
5.4.1. NORMAS A APLICAR	123
5.4.2. FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	124
5.4.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	125
5.4.4. RESULTADOS	126
CAPÍTULO 6: CARACTERIZACIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	129
6.1. ENSAYO POR ULTRASONIDO.....	129
6.2. TINTAS PENETRANTES.....	139
6.2.1. EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS	141
6.2.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	141
6.2.3. RESULTADOS	142
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	145
7.1. INTRODUCCIÓN	145
7.2. MUÑÓN.....	146
7.3. BULÓN DE PANEL	153
7.4. PERFIL ESTRUCTURAL C.....	160
7.5. PERFIL DE ARRIOSTRAMIENTO.....	167
7.6. PLACA DE UNIÓN CENTRAL	175
7.7. GALVANIZADO.....	181

7.8. SOLDADURA.....	183
7.8.1. PROCESO.....	183
7.8.2. ANÁLISIS.....	185
7.9. EQUIVALENCIA DEL ACERO DEL PANEL MABEY COMPACTO CON LAS EXISTENTES EN EL PAÍS.....	100 192
7.10. REQUISITOS PARA LA FABRICACIÓN DE PUENTES.....	209
CAPÍTULO 8: ANÁLISIS ECONÓMICO.....	215
8.1. COSTOS.....	215
8.1.1. COSTOS DIRECTOS.....	215
8.1.2. COSTOS INDIRECTOS.....	216
8.1.3. COSTO TOTAL.....	217
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	219
9.1. CONCLUSIONES.....	219
9.2. RECOMENDACIONES.....	221
BIBLIOGRAFÍA.....	223

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición química del acero	25
Tabla 2.2. Módulo de elasticidad para diferentes tipos de enlaces.....	38
Tabla 3.1 Relación Presión Vs. Fuerza.....	65
Tabla 3.2 Cálculo de resultados.....	66
Tabla 3.3 Lectura de desplazamientos en los tres puntos del panel.....	71
Tabla 3.4 Comparación de desplazamientos en el eje Y	74
Tabla 3.5 Comparación de desplazamientos en el eje Z	75
Tabla 3.6 Comparación de desplazamientos en el eje Y panel ideal.....	77
Tabla 3.7 Comparación de desplazamientos en el eje Z panel ideal	78
Tabla 3.8 Aproximación de la HAZ por oxicorte.....	80
Tabla 3.9 Matriz de decisión selección de corte.....	84
Tabla 3.10 Matriz de decisión selección de norma.	85
Tabla 4.1 Composición química de diferentes elementos del panel Bailey.....	97
Tabla 4.2 Espesor de recubrimiento del panel.....	99
Tabla 5.1 Dimensión proporcional de una probeta estándar para muñón.....	114
Tabla 5.2 Tabla de procesos para probetas del muñón de panel	115
Tabla 5.3 Dimensión proporcional de una probeta estándar para bulón.....	116
Tabla 5.4 Tabla de procesos para probetas del bulón del panel.....	116
Tabla 5.5 Dimensión proporcional de probeta estándar perfil estructural C...	117
Tabla 5.6 Tabla de procesos para probetas del perfil estructural C.....	117
Tabla 5.7 Dimensión proporcional de una probeta estándar para perfil de arriostramiento.....	118
Tabla 5.8 Tabla de procesos para probetas perfil de arriostramiento	119
Tabla 5.9 Dimensión proporcional de una probeta estándar para placa de unión central.....	120
Tabla 5.10 Tabla de proceso para probetas de la placa de unión central.....	120
Tabla 5.11 Resultados ensayo de tracción muñón de panel.....	122
Tabla 5.12 Resultados ensayo de tracción bulón de panel.....	122
Tabla 5.13 Resultados ensayo de tracción perfil estructural C	122
Tabla 5.14 Resultados ensayo de tracción perfil de arriostramiento.....	123
Tabla 5.15 Resultados ensayo de tracción placa de unión central	123
Tabla 5.16 Resultados ensayo de dureza muñón de panel	126

Tabla 5.17 Resultados ensayo de dureza bulón de panel	126
Tabla 5.18 Resultados ensayo de dureza perfil estructural C.....	127
Tabla 5.19 Resultados ensayo de dureza perfil de arriostamiento	127
Tabla 5.20 Resultados ensayo de dureza placa de unión central.....	127
Tabla 6.1 Resultado de un END por tintas penetrantes	143
Tabla 7.1 Tamaño de grano ASTM del muñón de panel.....	146
Tabla 7.2 Media y desviación estándar inclusiones de muñón de panel.....	147
Tabla 7.3 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del muñón de panel.....	148
Tabla 7.4 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del muñón de panel.....	150
Tabla 7.5 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del muñón de panel.....	152
Tabla 7.6 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del muñón de panel.....	153
Tabla 7.7 Tamaño de grano ASTM del bulón de panel.....	153
Tabla 7.8 Media y desviación estándar inclusiones del bulón de panel.....	155
Tabla 7.9 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del bulón de panel.....	155
Tabla 7.10 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del bulón de panel	157
Tabla 7.11 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del bulón de panel.....	159
Tabla 7.12 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del bulón de panel.....	159
Tabla 7.13 Tamaño de grano ASTM del perfil estructural C	160
Tabla 7.14 Media y desviación estándar inclusiones del perfil estructural C .	161
Tabla 7.15 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del perfil estructural C	162
Tabla 7.16 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del perfil estructural C.....	164
Tabla 7.17 Fortalecimiento de la ferrita en base al contenido de vanadio	166

Tabla 7.18 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del perfil estructural C	167
Tabla 7.19 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del perfil estructural C	167
Tabla 7.20 Tamaño de grano ASTM del perfil de arriostamiento.....	168
Tabla 7.21 Media y desviación estándar inclusiones del perfil de arriostamiento	169
Tabla 7.22 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del perfil de arriostamiento.....	170
Tabla 7.23 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del perfil de arriostamiento	171
Tabla 7.24 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del perfil de arriostamiento.....	174
Tabla 7.25 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del perfil de arriostamiento.....	174
Tabla 7.26 Tamaño de grano ASTM de la placa de unión central	175
Tabla 7.27 Media y desviación estándar inclusiones placa de unión central .	176
Tabla 7.28 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa de la placa de unión central	177
Tabla 7.29 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción de la placa de unión central.....	178
Tabla 7.30 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza de la placa de unión central	181
Tabla 7.31 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza de la placa de unión central	181
Tabla 7.32 Espesor del recubrimiento.....	182
Tabla 7.33 Defectos en la soldadura.....	186
Tabla 7.34 Resumen de resultados	194
Tabla 7.35 Equivalencia del acero del muñón	197
Tabla 7.36 Resistencia a la corrosión del muñón.....	198
Tabla 7.37 Equivalencia del acero bulón de panel.....	199
Tabla 7.38 Resistencia a la corrosión bulón de panel.....	200
Tabla 7.39 Equivalencia del acero perfil estructural C	201

Tabla 7.40 Resistencia a la corrosión perfil estructural C	202
Tabla 7.41 Equivalencia del acero perfil de arriostramiento.....	203
Tabla 7.42 Resistencia a la corrosión perfil de arriostramiento.....	204
Tabla 7.43 Equivalencia del acero placa unión central	205
Tabla 7.44 Resistencia a la corrosión placa unión central	206
Tabla 8.1 Costos directos de materiales	215
Tabla 8.2 Costos directos de probetas.....	215
Tabla 8.3 Costos directos ensayos de laboratorio	216
Tabla 8.4 Total costos directos	216
Tabla 8.5 Costos indirectos.....	216
Tabla 8.6 Costos totales	217

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Puente Bailey	6
Figura 2.2 Panel Bailey	7
Figura 2.3 Puente Bailey SS	8
Figura 2.4 Puente Bailey DS	8
Figura 2.5 Puente Bailey TS	9
Figura 2.6 Puente Bailey DD	9
Figura 2.7 Puente Bailey TD	9
Figura 2.8 Puente Bailey DT y TT	10
Figura 2.9 Bulón de panel	10
Figura 2.10 Bastidor de arriostramiento	11
Figura 2.11 Bulón panel sin cabeza	12
Figura 2.12 Bastidor de arriostramiento ancho	12
Figura 2.13 Bastidor de arriostramiento E.A.	13
Figura 2.14 Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HCP)	14
Figura 2.15 Estructura cristalina BCC	16
Figura 2.16 Estructura cristalina FCC	16
Figura 2.17 Diagrama de fases hierro – carbono	18
Figura 2.18 Esfuerzo de fluencia por el método convencional.....	39
Figura 2.19 Ensayo de Tracción	42
Figura 2.20 Ensayo de dureza Brinell	45
Figura 2.21 Efecto de la cantidad de zinc en tiempo de servicio de galvanizado en diferentes ambientes	51
Figura 2.22 Sistema de designación bajo la norma AISI – SAE.....	62
Figura 3.1 Representación gráfica de Presión Vs. Fuerza de la prensa hidráulica	65
Figura 3.2 Ensayo de flexión del cordón superior del panel tipo Bailey	67
Figura 3.3 Análisis estático del cable	68
Figura 3.4 Información de cables metálicos.....	69
Figura 3.5 Propiedades físicas y mecánicas del cable de acero.....	70
Figura 3.6 Resistencia a la tracción para cables de acero arado (IPS).....	70
Figura 3.7 Panel Bailey deformado	72
Figura 3.8 Resultado de esfuerzos del panel.....	73

Figura 3.9 Resultado de la deformación del panel Bailey en el eje Y	74
Figura 3.10 Deformación esperada con aplicación de una carga puntual.....	75
Figura 3.11 Resultado de la deformación del panel en el eje Z	75
Figura 3.12 Panel Bailey ideal.....	76
Figura 3.13 Resultado de esfuerzo de un panel ideal	76
Figura 3.14 Resultado de la deformación de un panel ideal en el eje Y	77
Figura 3.15 Resultado de la deformación de un panel ideal en el eje Z.....	77
Figura 3.16 Resultado del factor de seguridad.....	78
Figura 3.17 Triscado de los dientes de una sierra de corte	83
Figura 4.1 Registro recomendado para moldes	91
Figura 4.2 Microestructura del muñón a) 100X, b) 200X c) 400X	93
Figura 4.3 Microestructura del bulón del panel a) 100X, b) 200X, c) 400X	93
Figura 4.4 Microestructura perfil estructural en C a) 100X, b) 200X, c) 400X..	93
Figura 4.5 Microestructura perfil de arriostamiento a) 100X, b) 200X, c) 400X	94
Figura 4.6 Microestructura placa de unión central a) 100X, b) 200X, c) 400X.	94
Figura 4.7 Corte transversal del muñón del panel.....	95
Figura 4.8 Inclusiones muñón a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 200X.....	101
Figura 4.9 Inclusiones bulón de panel a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 200X.....	102
Figura 4.10 Inclusiones perfil estructural C a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 200X.....	102
Figura 4.11 Inclusiones perfil de arriostamiento a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 500X	102
Figura 4.12 Inclusiones placa de unión central a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 1000X	103
Figura 4.13 Característica de chispa muñón.....	104
Figura 4.14 Característica de chispa bulón del panel	104
Figura 4.15 Característica de chispa perfil estructural C.....	104
Figura 4.16 Característica de chispa perfil de arriostamiento	105
Figura 4.17 Característica de chispa placa unión central.....	105
Figura 5.1 Barra rectangular de sección completa.....	111
Figura 5.2 Barra redonda de sección completa.....	112

Figura 5.3 Sección de un perfil estructural en C	112
Figura 5.4 Sección tubular hueca.....	112
Figura 5.5 Probeta de sección completa para productos planos.....	113
Figura 5.6 Probeta para ensayo de tracción del muñón de panel.....	114
Figura 5.7 Probeta para ensayo de tracción para bulón de panel.....	115
Figura 5.8 Probeta para ensayo de tracción para perfil estructural en C	116
Figura 5.9 Probeta para ensayo de tracción para perfil de arriostramiento....	118
Figura 5.10 Probeta para ensayo de tracción de la placa de unión central....	119
Figura 5.11 Espesores mínimos requeridos.....	124
Figura 6.1 Ondas sonoras longitudinales.....	130
Figura 6.2 Ondas sonoras transversales	131
Figura 6.3 Ondas sonoras superficiales.....	132
Figura 6.4 Representación esquemática de un ensayo por ultrasonido.....	133
Figura 6.5 Método convencional vs. Phased Array	134
Figura 6.6 Representación de defectos por el método de Phased Array	134
Figura 6.7 Criterios de aceptación para conexión no tubular cargada estáticamente	137
Figura 6.8 Criterios de aceptación para conexión no tubular cargada cíclicamente.....	137
Figura 6.9 Métodos alternativos de inspección de soldadura para UT.....	138
Figura 6.10 Tintas penetrantes, disposición de la soldadura	143
Figura 7.1 Micrografía del muñón de panel 100X	146
Figura 7.2 Inclusiones del muñón de panel 200X	147
Figura 7.3 Chispa característica del muñón de panel	149
Figura 7.4 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del muñón de panel	150
Figura 7.5 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del muñón de panel	151
Figura 7.6 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación del muñón de panel.....	152
Figura 7.7 Micrografía del bulón de panel 100X.....	153
Figura 7.8 Inclusiones del bulón de panel 500X.....	154
Figura 7.9 Chispa característica del bulón de panel	156

Figura 7.10 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del bulón de panel	157
Figura 7.11 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del bulón de panel	158
Figura 7.12 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación del bulón de panel	158
Figura 7.13 Micrografía del perfil estructural C 100X	160
Figura 7.14 Inclusiones del perfil estructural C 500X	161
Figura 7.15 Chispa característica del perfil estructural C	163
Figura 7.16 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del perfil estructural C	164
Figura 7.17 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del perfil estructural C	165
Figura 7.18 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación perfil estructural C	165
Figura 7.19 Micrografía del perfil de arriostamiento 200X	168
Figura 7.20 Inclusiones del perfil arriostamiento 1000X	169
Figura 7.21 Chispa característica del perfil de arriostamiento	171
Figura 7.22 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del perfil arriostamiento	172
Figura 7.23 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del perfil de arriostamiento	173
Figura 7.24 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación del perfil arriostamiento	173
Figura 7.25 Micrografía de la placa de unión central 100X	175
Figura 7.26 Inclusiones de la palca de unión central 2000X	176
Figura 7.27 Chispa característica de la placa de unión central	178
Figura 7.28 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal de la placa de unión central	179
Figura 7.29 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono de la placa de unión central	180
Figura 7.30 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación placa de unión central	180

Figura 7.31 Perfil estructural varias secciones.....	182
Figura 7.32 Espesor promedio mínimo de recubrimiento para TR.....	183
Figura 7.33 Espesor promedio mínimo de recubrimiento para PE, M, PUC ..	183
Figura 7.34 Pedazo de un electrodo de alambre	184
Figura 7.35 Superficie pulida del electrodo sólido de alambre.....	184
Figura 7.36 Sección transversal del muñón de panel	185
Figura 7.37 Nomenclatura sección transversal del muñón	185
Figura 7.38 Requisitos del material de relleno	211

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
DD	Panel Bailey Doble – Doble	-
DS	Panel Bailey Doble – Simple	-
DT	Panel Bailey Doble – Triple	-
SS	Panel Bailey Simple – Simple	-
TD	Panel Bailey Triple – Doble	-
TS	Panel Bailey Triple – Simple	-
TT	Panel Bailey Triple – Triple	-
A	Alargamiento porcentual	%
f	Frecuencia	Hz
Re	Resistencia a la fluencia	MPa
Rm	Resistencia última a la tracción	MPa
T	Período	s
V	Velocidad de onda	m/s
λ	Longitud de onda	m
\emptyset	Diámetro	mm

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: COMPOSICIÓN QUÍMICA ACEROS.....	227
ANEXO B: FOTOGRAFÍAS ENSAYOS MECÁNICOS.....	230
ANEXO C: RESULTADOS END POR TINTAS PENETRANTES.....	232
ANEXO D: SOLDADURA, CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE LA INSPECCIÓN VISUAL AWS D1.1.....	247
ANEXO E: NORMA BS. 968.....	250
ANEXO F: NORMA RTE INEN 037: 2009.....	252

RESUMEN

En el presente documento se realizó primeramente un análisis de deflexión en el cordón superior del panel bajo una carga puntal en el centro de la misma con el fin de medir la deformación que presenta el cordón del panel aplicando una determinada carga cuyos valores fueron comparados en una simulación realizada en un programa CAD seleccionando un material que más se ajuste a los valores obtenidos en laboratorio para un panel deformado y para un panel ideal. Posterior a ello se realizaron diferentes procedimientos de caracterización mecánica que incluyó ensayos de tracción y dureza para hallar diferentes propiedades mecánicas básicas del acero como la resistencia última a la tracción, resistencia de fluencia, alargamiento porcentual y dureza cuyos datos se obtuvieron de la máquina universal de pruebas y del durómetro Rockwell respectivamente del laboratorio de Mecánica de Materiales. Para conseguir estos resultados se tuvo que realizar un proceso de selección de corte a diferentes partes del panel para no dañar el material por consecuencia del calor que se genera y con ello poder extraer las probetas necesarias para luego maquinas en un taller de máquinas y herramientas en base a dimensiones estandarizadas bajo normas internacionales para su respectivo análisis. Se realizó también una caracterización metalográfica que incluye micrografía, macrografía, inclusiones, chispa característica, composición química y espesor del galvanizado realizados en los laboratorios de Metalurgia de la Escuela Politécnica del Ejército y por el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional bajo normas internacionales y en algunos casos bajo normas nacionales cuya información resultó indispensable para la realización de los mismos.

El principal motivo de los respectivos ensayos fue para determinar el acero con el que se construyen diferentes elementos estructurales del panel, material que fue adquirido y donado por la Compañía Puentes del Cuerpo de Ingenieros del Ejército bajo un proceso de selección en base a los resultados obtenidos en laboratorio sirviendo también para un futuro análisis por parte de estudiantes y profesores para su posible construcción en el país.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Los aceros son aleaciones de hierro con una combinación variable de carbono y de otros elementos metálicos y no metálicos que le dan al material diferentes cualidades mecánicas y metalográficas que son aprovechados por la industria para someterlos a diferentes procesos de manufactura, diseño y construcción y demás aplicaciones que sean útiles para el ser humano.

El hierro al constituirse como elemento base del acero, la misma conserva características metálicas del hierro en estado puro cuya estructura cristalina cambia a partir de una temperatura crítica punto en el cual, empieza a disolverse una cierta cantidad de carbono y con ello realizar tratamientos térmicos para alcanzar ciertas características metalográficas para mejorar las propiedades mecánicas del material.

Existen muchos factores que mejoran el comportamiento mecánico del material a más de los tratamientos térmicos. Los elementos de aleación que forman parte de la composición química del acero, es uno de los factores que dan características más específicas al material ya que cada elemento en determinada cantidad en porcentaje en peso, hace que el acero alcance ciertos niveles de dureza, ductilidad, resistencia, tenacidad y en cuanto a los procesos de manufactura, se requiere que los aceros sean conformables y soldables.

Asociaciones de ingenieros e institutos realizan publicaciones acerca de las especificaciones de los productos de acero, muchas de ellas son muy conocidas y respetadas de las que se pueden obtener información necesaria para realizar un análisis del acero mediante procedimientos específicos de laboratorio para caracterizar y determinar el tipo de material que es utilizado

para la construcción de los paneles tipo Mabey en base a los resultados obtenidos en diferentes ensayos mecánicos y metalográficos que hace referencia este documento.

1.2. ANTECEDENTES

Durante la II Guerra Mundial se desarrollaron pesados tanques de guerra los cuales permitieron a los ingenieros diseñar nuevos puentes capaces de soportar fuertes cargas. Uno de ellos, Sir Donald Bailey, quien trabajaba en la oficina de Guerra del Ejército Británico, diseñó el puente Bailey en 1940 cuyo objetivo era estandarizar los componentes que conforman la estructura para facilitar el transporte y el montaje sin uso de herramientas especiales y equipo pesado así como también, reconstruir o cambiar de lugar en apenas pocas horas incluso durante fuego enemigo. Este tipo de puentes fue muy utilizado por los ejércitos aliados de Italia y en el noroeste de Europa, donde el paso de los ríos fue un importante factor en el desarrollo de las batallas. Con el pasar del tiempo y del servicio al que estaba sometido el material, hizo que el este pierda los años de servicio viéndose en la necesidad de reemplazarlo bajo el mismo sistema de construcción tomando el nombre de panel Mabey convirtiéndose a lo largo del tiempo, en un sistema único prediseñado más popular del mundo.

El Ecuador al ser un país irregularmente geográfico y que durante el año presenta fenómenos naturales que incomunican a muchas comunidades por un período prolongado de tiempo evitando que la actividad económica se realice de una manera adecuada; el gobierno se ve en la necesidad de incrementar los trabajos viales así como la construcción de puentes a lo largo del territorio nacional de manera rápida y segura. Es por eso que el uso de puentes modulares tipo Mabey que al igual que los puentes Bailey, son fáciles de transportar y debido a sus características permite un rápido montaje y puesta en uso en lugares remotos o cuando se produzcan emergencias de tipo natural pero su costo de importación hacen que este tipo de estructuras sea demasiado alto.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

En el Ecuador hay empresas y grupos de investigación que se dedican al diseño y construcción de puentes modulares que debido a sus características, son fáciles de transportar e instalarlas en lugares remotos en un período corto de tiempo.

Los puentes Bailey utilizaban materiales de acero estructural de alta resistencia cuyas propiedades mecánicas cumplían generalmente con las especificaciones, mas no en su composición química que diferían ligeramente de la norma Inglesa BSS. 968. Con el tiempo, estos paneles al perder su vida útil, han sido reemplazados con una nueva versión llamada Mebey que en nuestro país no se conoce el tipo de acero que se utiliza para la construcción de este tipo de puentes por lo que se requiere realizar un estudio sobre las propiedades metalográficas y mecánicas del acero utilizado para la construcción de estos paneles con la finalidad de encontrar aceros equivalentes existentes en nuestro país para que puedan ser fabricados por empresas dedicadas a este tipo de construcción, también cabe mencionar que las instituciones como el Ministerio de Transporte y Obras Públicas deben tener conocimiento de las características de este tipo de acero con que son construidos los puentes de algunas carreteras y vías en el país para la elaboración de planes de mantenimiento preventivo y correctivo y a su vez permitir que estudiantes y profesores de universidades realicen estudios más profundos sobre este acero y su aplicabilidad.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. GENERAL

Someter al acero utilizado para la construcción de paneles Mabey Compacto 100 a ensayos destructivos y no destructivos permitiendo su caracterización metalográfica y mecánica obteniendo un rango de valores que permitan

conocer el tipo de acero que es utilizado en las construcciones de puentes estructurales.

1.4.2. ESPECÍFICOS

- Estudiar las normas para la realización de ensayos destructivos y no destructivos y selección de probetas.
- Extraer probetas de elementos estructurales que conforman el panel tipo Mabey.
- Realizar ensayos metalográficos, ensayos destructivos y no destructivos mediante procedimientos que especifica la norma.
- Analizar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y compararlas con los requisitos que pide la norma.
- Encontrar un acero equivalente a los utilizados en los paneles tipo Mabey mediante un estudio de aceros existentes en el país.

1.5. ALCANCE

El alcance de este proyecto de investigación es realizar ensayos a diferentes componentes que conforman el panel tipo Mabey enfocándose principalmente en los elementos estructurales como el muñón, perfil estructural en C, perfil de arriostramiento, placa central y bulón.

Las propiedades mecánicas que se tendrán del acero serán obtenidas por ensayos mecánicos de tensión y dureza.

Las propiedades metalúrgicas que se tendrán del acero serán obtenidas por ensayos metalográficos tales como: composición química, estructura micrográfica y macrográfica, inclusiones, características de chispa, espesor del galvanizado.

Una vez realizado los ensayos destructivos y adquiridos los valores correspondientes, se realizará un análisis estadístico para comprobar la validez de los datos y compararlos con los requisitos que exigen las normas determinando un acero tipo ASTM equivalente al acero utilizado para este tipo de construcción.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. PUENTES BAILEY

El puente Bailey es una estructura metálica compuesta de paneles prefabricados que fueron diseñados para uso militar durante la Segunda Guerra Mundial. En 1940, el británico Donald Coleman Bailey, quién durante muchos años, tuvo en mente desarrollar un puente armable y desarmable empleando herramientas sencillas y prácticas para que su montaje sea de manera fácil y rápida cuyo diseño y cálculo de resistencia de materiales permitiera soportar cargas de nuevos tanques de guerra que estaban desarrollándose en las primeras fases de la guerra. El equipo del puente Bailey consta de muchos componentes estructuralmente diseñados para ser transportados de manera práctica y sencilla en camiones hasta la zona en la que va a ser montado convirtiéndose de esta manera en uno de los mejores inventos de la época destacándose principalmente por:

- Velocidad de construcción
- Seguridad
- Instalación simple
- Versatilidad
- Bajo costo
- Facilidad de reparación.

Debido a la simplicidad del diseño, en julio de 1941 se permitió la producción en masa cerca de 490000 toneladas de material dando un aproximado de 320 Km de puentes en tierra y 64 Km para puentes flotantes que a lo largo del tiempo, continúan realizándose con fines militares y civiles con la necesidad de abrir caminos de difícil acceso en diferentes países del mundo.

Entre las características técnicas que presenta el sistema de puentes Bailey se tiene:

- Longitud máxima que se puede construir un puente Bailey sin apoyos intermedios oscila entre los 61 y 70 metros.
- La capacidad de carga que se logra con este material es de entre 60 a 90 toneladas dependiendo de la longitud del puente y el tipo de puente a emplear.
- El ancho de calzada se encuentra entre 3.15 metros y los 4.20 metros entre bordillos para una sola vía y para doble vía 7.35 metros.
- La longitud de los paneles es de 3.05 metros y 3.50 metros.
- El mantenimiento es mínimo debido a que todas las partes son galvanizadas para una máxima protección contra la corrosión.
- Los estribos pueden ser provisionales (gaviones) o en concreto, de acuerdo a las necesidades y condiciones del sitio seleccionado para su montaje.



Figura 2.1 Puente Bailey

2.1.1. ESTÁNDAR

Estos puentes poseen una gama estándar de componentes totalmente prediseñados que pueden transportarse en vehículos ligeros y ser operados manualmente.

Los componentes que más se destacan en la construcción de un puente Bailey son el panel y el bulón de panel, de tal manera que este documento se centrará en estos dos elementos estructurales para realizar los respectivos ensayos mecánicos y metalográficos.

Panel Bailey

El panel Bailey es un armazón soldado integrado por dos cordones de perfiles estructurales en C que se unen por montantes verticales y diagonales. A los cordones del panel se los denomina cordón superior y cordón inferior cuyos extremos están unidos por un muñón perforado y dos cartelas perforadas soldadas a los perfiles permitiendo así la conexión de un panel con otro de manera horizontal con el acoplamiento del muñón con las cartelas insertando el bulón de panel en las respectivas perforaciones.

Tanto el cordón superior como el cordón inferior, presentan cuatro placas que se distribuyen a lo largo de cada cordón con el nombre de palastros taladrados. Estos palastros facilitan el ensamble de otros paneles en forma vertical con la inserción de pernos de cordón en la respectiva perforación y como complemento de la estructura del puente se pueden colocar bastidores de arriostramiento para construir puentes de tipo Doble-Simple.

En los montantes verticales de los extremos del panel, se puede apreciar un par de perforaciones. El agujero que se encuentra cerca del cordón superior sirve para fijar con un perno de cordón, el tornapuntas que a su vez este se conecta con el travesero para darle una mayor estabilidad a la estructura. Esta perforación sirve también para fijar una placa de unión que se utiliza para unir el segundo y tercer panel cuando se trata de un puente de viga triple. La perforación cerca del cordón inferior se utiliza para fijar el travesero.

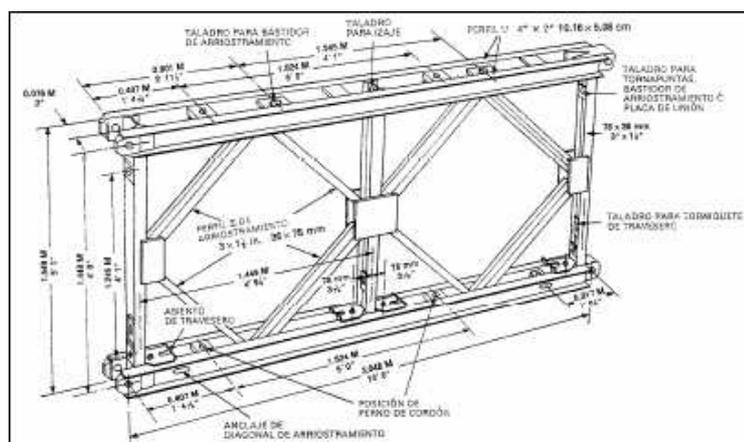


Figura 2.2 Panel Bailey

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed.

Inglaterra. 1965

Los complementos que presenta el panel Bailey como los palastros taladrados y los bastidores de arriostramiento son de gran utilidad para la construcción de varios tipos de puentes dependiendo del ancho de vía, longitud requerida, momentos flectores y esfuerzos cortantes que debe soportar el panel. De acuerdo a estas características, los puentes Bailey se pueden construir en siete tipos diferentes cuya designación con la primera letra hace referencia al número de paneles distribuidas uno al lado de otro mientras que la segunda letra hace énfasis al número pisos, por ejemplo, un puente Bailey tipo Simple – Simple (SS), es aquel que tiene una sola fila de paneles a cada lado de la estructura con un solo piso. Al colocar una fila adicional de paneles a lo largo del puente se la conoce como puente Bailey tipo Doble – Simple (DS). Cuando a esta misma estructura se emperna un piso adicional sobre los paneles existentes se la conoce como puente Bailey tipo Doble – Doble (DD).

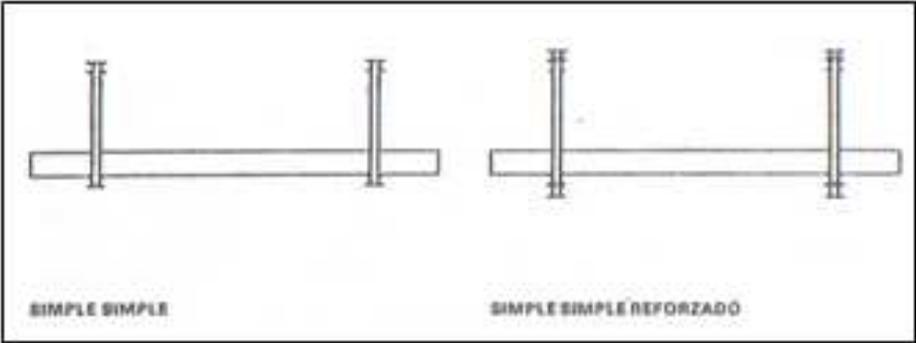


Figura 2.3 Puente Bailey SS

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

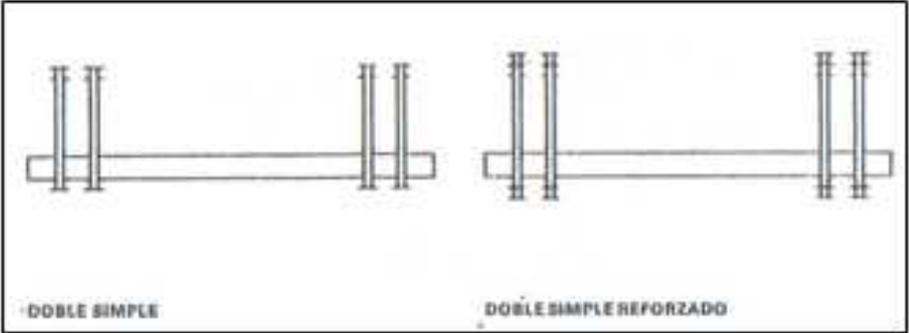


Figura 2.4 Puente Bailey DS

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

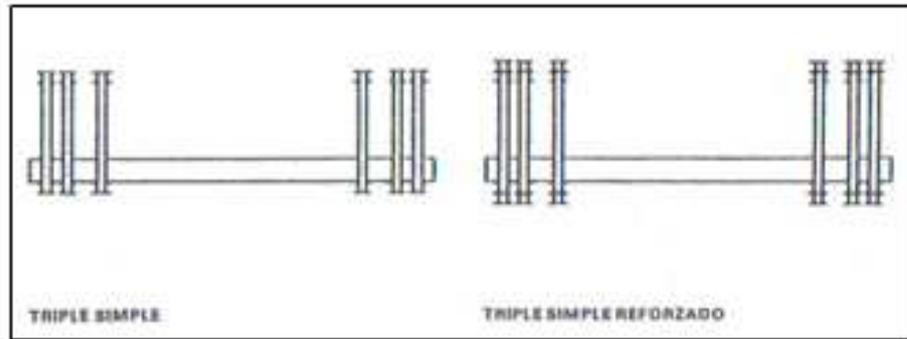


Figura 2.5 Puente Bailey TS

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

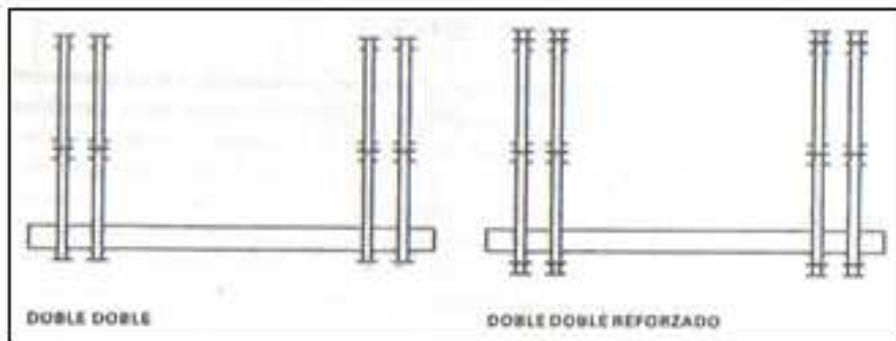


Figura 2.6 Puente Bailey DD

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

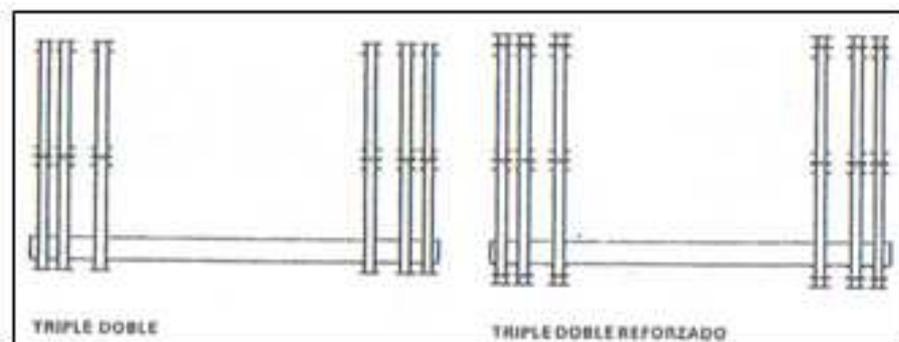


Figura 2.7 Puente Bailey TD

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

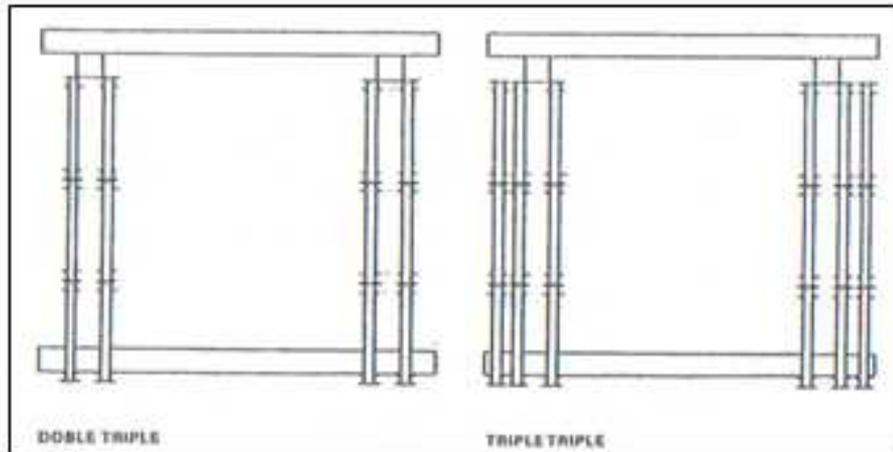


Figura 2.8 Puente Bailey DT y TT

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

Bulón de Panel

El bulón de panel está hecho de una aleación especial de acero tratado en caliente. El extremo del bulón está ligeramente conificado para facilitar el ingreso tanto en el muñón como en las cartelas perforadas del panel y cerca del otro extremo lleva un agujero para colocar el pasador de bulón. El acero del bulón puede estar constituido en su composición química principalmente por manganeso-molibdeno, níquel-cromo, níquel-cromo-molibdeno el cual le provee de las siguientes características:

Límite elástico: No menor a 50 ton. pulg² (78.5 kg/mm²)

Prueba de dureza: No menor de 40 lb. Pie.

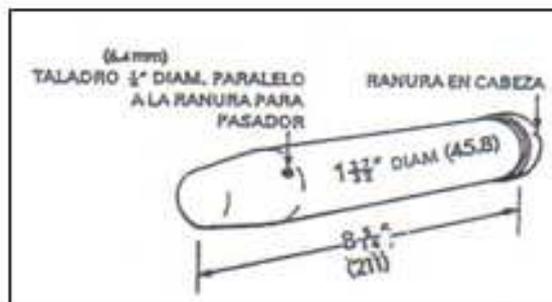


Figura 2.9 Bulón de panel

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

Bastidor de arriostramiento

Es un armazón soldado de perfiles y barras de acero dulce que posee una espiga cónica en cada una de sus cuatro esquinas. Este tipo de bastidor se emplea para arriostrar paneles entre sí de manera que se coloca en la parte superior sobre los cordones superiores de los paneles cuando se construyen puentes doble-simple y triple-doble, mientras que para construir puentes doble y triple alzado, este bastidor se coloca en la parte superior en lo más alto de la construcción y verticalmente en los montantes exteriores a un extremo de todos los paneles del segundo y tercer alzado.

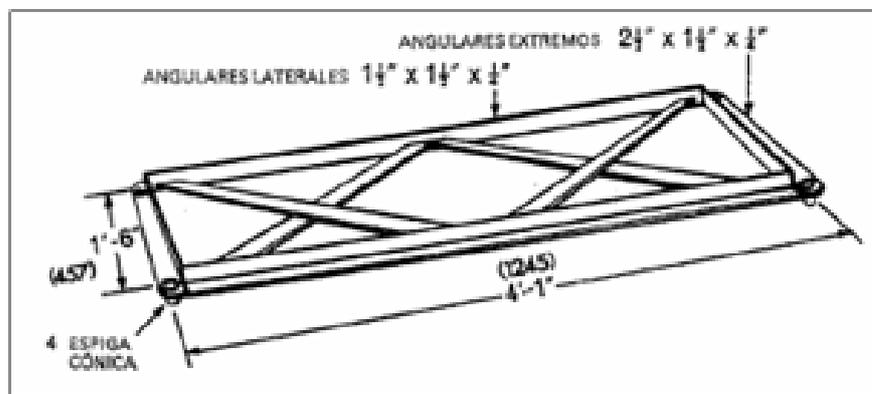


Figura 2.10 Bastidor de arriostramiento

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

2.1.2. ESTÁNDAR ENSANCHADO

Este tipo de puente posee un tablero inferior con un ancho de vía de 12 pies con 6 pulgadas a diferencia de un puente Estándar que posee un ancho de vía con menores dimensiones en el tablero inferior con 10 pies y 9 pulgadas.

Para conseguir este ancho de vía, es necesario reemplazar algunos componentes utilizados para la construcción del puente Bailey Estándar por otros componentes que tienen características similares. Tal es el caso del bulón que tiene como característica principal la eliminación de la cabeza del bulón. Este bulón de panel sin cabeza, es utilizado para unir de extremo a extremo los paneles en la posición 2 y 3 (parte central) del bastidor de

arriostamiento ancho. Este bastidor se emplea para construir puentes de viga cuádruple que puede ser colocado de manera horizontal sobre los cordones superiores del panel.

Las posiciones al que se hacen referencia en el bastidor de arriostamiento, presentan la siguiente configuración:

Posición 1 – 2 tiene una distancia de $8\frac{1}{2}$ " (220mm)

Posición 2 – 3 tiene una distancia de $9\frac{1}{2}$ " (240mm)

Posición 3 – 4 tiene una distancia de $8\frac{1}{2}$ " (220mm)

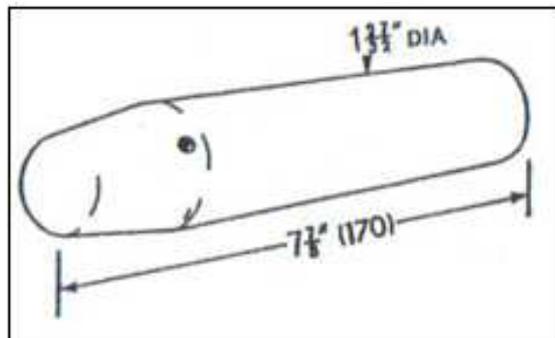


Figura 2.11 Bulón panel sin cabeza

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

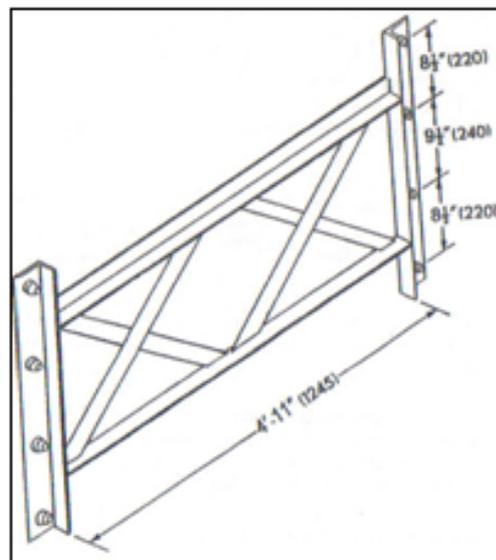


Figura 2.12 Bastidor de arriostamiento ancho

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

2.1.3. EXTRA ANCHO

Este es el más ancho de los puentes Bailey teniendo como ancho de vía 13 pies y 9 pulgadas con un ancho libre entre las vigas maestras laterales de 15 pies 8 pulgadas.

Al igual que los Puentes Estándar Ensanchados por tener una vía más ancha, se debe sustituir algunos componentes utilizados para la construcción de un puente Bailey Estándar. El principal cambio es el bastidor de arriostamiento E.A., cuya construcción es similar al bastidor de arriostamiento estándar con la diferencia que posee dos espigas cónicas adicionales (uno en cada lado) para adaptar una tercera viga que son conectados en el cordón de los paneles extremo a extremo por bulones de panel sin cabeza

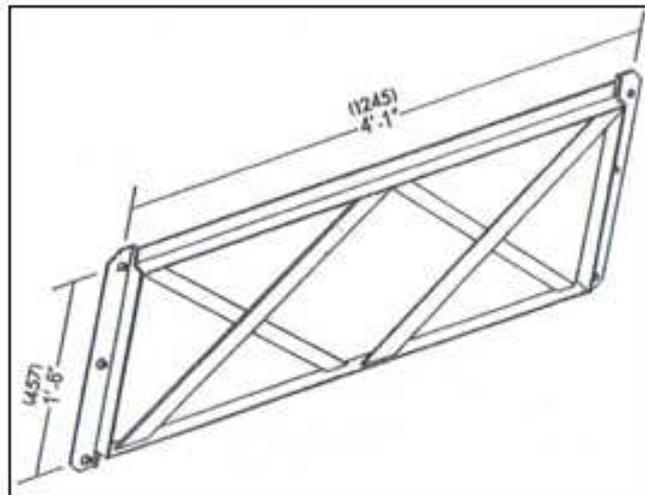


Figura 2.13 Bastidor de arriostamiento E.A.

Fuente: Bailey, Donald. Manual de puentes Bailey y Uniflotes. Primera ed. Inglaterra. 1965

2.2. PROPIEDADES METALGRÁFICAS

2.2.1. ESTRUCTURA DE LOS METALES

Todos los materiales se encuentran constituidos por átomos que están distribuidos de manera geométrica en el espacio siguiendo un patrón determinado que depende del material y del estado que se encuentre. Esta

distribución atómica puede darse de manera que no tenga un patrón definido, es decir, que su arreglo atómico sea de corto enlace cuyos átomos se enlazan con otros formando moléculas siguiendo una distribución amorfa. Cuando los materiales presentan este tipo de arreglo atómico se los llama materiales amorfos y tal es el caso del vidrio que es considerado como un material líquido solidificado.

Por otro lado, existen otros materiales como los metales, aleaciones y algunos cerámicos que tiene un arreglo atómico de largo alcance, es decir, que los átomos están ordenados según una disposición que se repite en sus tres dimensiones formando una estructura cristalina o red espacial. Los materiales que presentan este tipo de arreglo atómico se los denominan materiales cristalinos.

Estos materiales pueden adoptar alguna de las catorce redes cristalinas de Bravais pero la gran mayoría se cristalizan solamente en tres estructuras que son; cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC), hexagonal compacta (HCP). Esta última estructura cristalina tiene dos puntos de red por celda unitaria, uno por las ocho esquinas y otro por el centro de la celda. Como característica principal de la estructura cristalina HCP, al igual que la estructura FCC, tiene un factor de empaquetamiento de 0.74%, lo que significa que los materiales que tienen este valor poseen niveles de energía menores y más estables debido a que al solidificarse tanto para estructura HCP como para FCC, liberan más energía a medida que los átomos se aproximan y se enlazan fuertemente entre sí.

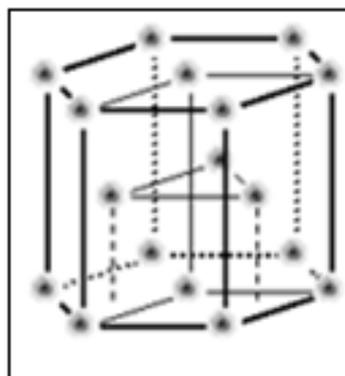


Figura 2.14 Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HCP)

Fuente: www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r7353.DOC

2.2.2. ESTRUCTURA DEL HIERRO PURO

El hierro al ser un metal puro, como característica principal presenta más de una estructura cristalina (elemento alotrópico) en estado sólido a diferentes incrementos de temperatura cambiando siempre a la forma más estable en cada nivel de energía. A temperatura ambiente hasta los 912°C, el hierro presenta una estructura cristalina BCC conocida como ferrita o hierro α .

En esta estructura podemos ver la presencia de ocho átomos más un átomo central. Cada uno de los átomos que se encuentran en las esquinas del cubo representa un punto de red que es adyacente a otras celdas unitarias constituyéndose $1/8$ de punto de red por cada celda unitaria. Al multiplicar este valor por las ocho esquinas de la celda unitaria más el átomo central, la estructura cristalina posee 2 átomos por cada celda unitaria. Otra característica de esta estructura es el factor de empaquetamiento cuyo valor es de 0.68%, lo que significa que los átomos ocupan el 68% de la celda unitaria mientras que el 32% constituye el espacio vacío haciéndola una estructura cristalina no muy compacta.

A medida que aumentamos la temperatura hasta los 1394°C, el hierro presenta una estructura cristalina FCC que toma el nombre de hierro γ o austenita. En esta estructura podemos ver que cada punto de red representa $1/8$ de átomo por cada celda unitaria y $1/2$ átomo por cada una de las caras del cubo lo cual hace que cada celda unitaria tenga 4 átomos. Como característica principal es el factor de empaquetamiento de 0.74% permitiendo que esta estructura cristalina sea más compacta con relación a la estructura cristalina BCC.

Entre las temperaturas de 1394°C hasta 1538°C retorna a la estructura BCC y por encima de la temperatura de 1538°C que es el punto de fusión del hierro, pierde la estructura cristalina al encontrarse en estado líquido.

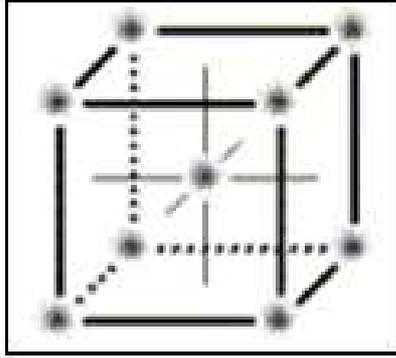


Figura 2.15 Estructura cristalina BCC

Fuente: www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r7353.DOC

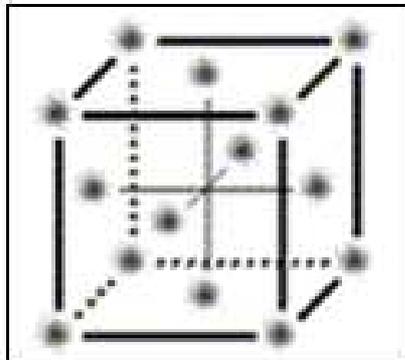


Figura 2.16 Estructura cristalina FCC

Fuente: www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r7353.DOC

2.2.3. DIAGRAMA DE FASES DEL HIERRO-CARBURO

El diagrama de fases en equilibrio es un mapa que permite identificar la relación que existe entre la temperatura, composición y fases presentes en una aleación bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lento.

El diagrama de fases hierro – carburo es el de mayor aplicación ya que representa las aleaciones más frecuentes y utilizadas tecnológicamente como son el acero y otras aleaciones ferrosas que poseen un contenido de carbono máximo del 4.3% en peso y con ello llevar a cabo algún tratamiento térmico que permita tener un material con una constitución metálica definida con propiedades mecánicas específicas. En este diagrama podemos apreciar

primero la máxima solubilidad de carbono cuando se encuentra a diferentes temperaturas, por ejemplo, la solución de ferrita α presenta una solubilidad máxima de carbono del 0.0218% a una temperatura de 727°C donde presenta una estructura cristalina BCC. A la temperatura donde se forma la austenita hasta la temperatura de equilibrio de 1148°C, presenta una estructura cristalina FCC con una solubilidad máxima de carbono del 2.11% y a una temperatura de 1495°C presenta una solubilidad máxima de carbono del 0.09% donde el hierro tiene una estructura cristalina BCC.

Este cambio de solubilidad de carbono en cada una de las fases se da principalmente por los vacíos intersticiales que presenta cada estructura cristalina por lo que en la fase austenítica con una estructura cristalina FCC, disuelve en mayor medida los átomos de carbono que en la fase de ferrita BCC lo que hace posible endurecer el acero cuando se aplica un tratamiento térmico.

Existen aleaciones que son totalmente o parcialmente insolubles en estado sólido que con frecuencia estas aleaciones para una determinada concentración, presentan un punto de solidificación total a una temperatura constante. Este punto se conoce como punto eutectoide donde se produce la formación de dos sólidos como la ferrita α y cementita Fe_3C a una concentración de 0.77% de carbono a una temperatura eutectoide de 727°C.

Los aceros que tienen un contenido de carbono de 0.77% en peso se los llama aceros eutectoides que presenta como constituyente perlita pura mientras que, para materiales cuyo contenido de carbono sea menor a 0.77% en peso se los denomina aceros hipoeutectoides teniendo como constituyentes perlita y ferrita y para aceros con un contenido mayor a 0.77% se los llama hipereutectoide que presenta perlita y cementita como constituyentes metálicos.

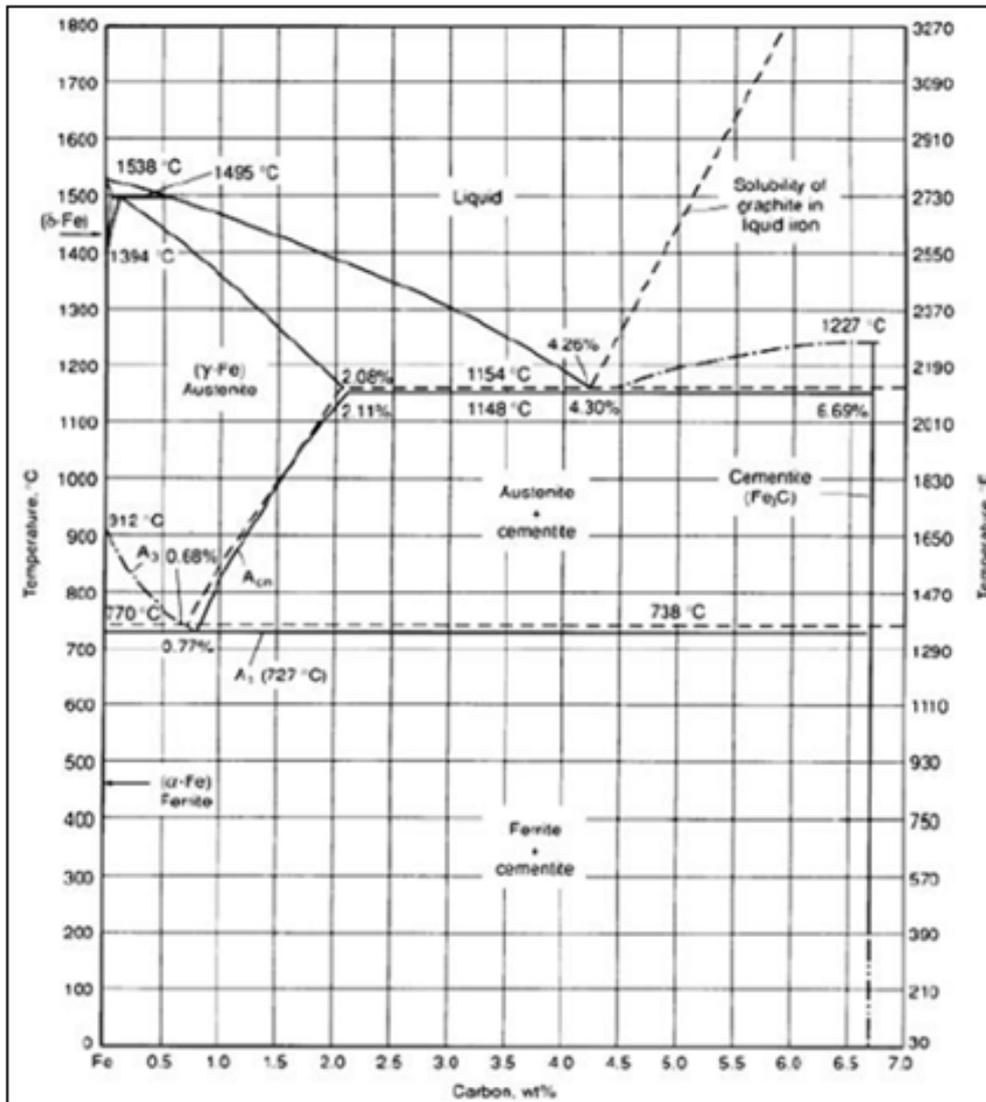


Figura 2.17 Diagrama de fases hierro – carbono

Fuente: Schmid, Kalpakjian Serope. Manufactura Ingeniería y Tecnología. 4ed. Prentice Hall. México. 2002.

2.2.4. ALEACIONES FERROSAS

Los aceros son aleaciones ferrosas que están constituidos principalmente de hierro y carbono con un máximo de 2% en peso aunque la mayoría de los aceros que se producen tienen un contenido máximo de 0.2% en peso de carbono. Este tipo de aleaciones son los más utilizados en el mercado ya que son de bajo costo y también por su gran aplicabilidad por las propiedades mecánicas que presentan.

Existe otro tipo de aleación ferrosa como es el hierro colado que tiene un contenido de carbono comprendido entre 2% y 4.3% pero su aplicabilidad es limitada ya que es una aleación muy frágil.

Las aleaciones ferrosas presentan también otros elementos denominados componentes secundarios presentándose en menor cantidad formando parte de la composición química y de acuerdo al porcentaje en peso de cada uno, tienen influencia en el comportamiento mecánico. Entre los elementos que posee el acero son: el manganeso, cromo, níquel, molibdeno, cobre, vanadio, titanio, niobio, plomo, aluminio, calcio como elementos metálicos; silicio, boro, azufre y fósforo como elementos no metálicos.

Clasificación de los aceros

El acero se clasifica de acuerdo al contenido de carbono que presenta en la composición química y demás aleaciones metálicas y no metálicas presentes en la aleación y de acuerdo al porcentaje en peso, permiten tener un amplio rango de propiedades mecánicas clasificándose de la siguiente manera:

Aceros al carbono

Los aceros al carbono constituyen el 90% total de la producción debido a que al aumentar el contenido de carbono, permite mejorar las propiedades mecánicas. Según el contenido del carbono se pueden encontrar aceros de bajo contenido de carbono con un máximo de 0.25% con una resistencia mecánica hasta 55 kg/mm² (539 MPa) con una dureza máxima de 160 HB, son fácilmente soldables, dúctiles y tenaces. Estos aceros son utilizados para fabricar carrocería de automóviles, perfiles estructurales, tuberías. Al ser un acero de bajo contenido de carbono, presenta ferrita α y perlita como constituyentes metálicos.

Los aceros de medio contenido de carbono presentan concentraciones de carbono entre 0.25% a 0.60% en peso con una resistencia de 75kg/mm² (735

MPa) con una dureza hasta 300 HB. Por su contenido de carbono pueden ser tratados térmicamente por templado y revenido mejorando así las propiedades mecánicas. Estos aceros se utilizan principalmente para elementos que requieren una elevada resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad como por ejemplo, transmisiones, cilindros de motores, ejes, pernos, tornillos.

Por último los aceros que tienen un alto contenido de carbono que varía entre 0.6% y 1.4% en peso siendo estos más resistentes que el resto de aceros al carbono con 80 kg/mm^2 (780 MPa), son menos dúctiles y son utilizados principalmente para fabricar herramientas de corte.

Aceros aleados

A diferencia de los aceros al carbono, los aceros aleados se caracterizan por mejorar las propiedades mecánicas con la inserción de cantidades importantes de otros elementos metálicos como el níquel, cromo, vanadio, cobre, molibdeno, titanio, niobio o elevar el contenido de elementos no metálicos como el fósforo, silicio y azufre. La aplicación de estos aceros se utiliza para elementos mecánicos que requieran mayor dureza, mayor resistencia a la corrosión, al desgaste, impacto, altas temperaturas y que tengan una mayor penetración de temple.

Aceros de alta resistencia y baja aleación

Los aceros de alta resistencia y baja aleación son especialmente utilizados en la industria automotriz ya que proporciona mejores propiedades mecánicas que un acero convencional. Comúnmente este tipo de aceros son de bajo contenido de carbono con un contenido de manganeso mayor de 1.5% en peso y dependiendo del porcentaje de otros elementos metálicos como el niobio, vanadio o titanio en concentraciones menores al 0.1% en peso, pueden darle al acero una mayor resistencia mecánica, mayor tenacidad, ductilidad. Elementos como el cobre, silicio, níquel y fósforo aumentan la resistencia a la corrosión.

La aplicación de los aceros de alta resistencia y baja aleación se da para el diseño y construcción de engranes y ejes.

Aceros inoxidable

El acero inoxidable es una aleación de hierro carbono, cromo y otros elementos aleantes como el níquel, molibdeno, manganeso, silicio, titanio. Tiene una concentración mínima del 11% en peso de cromo que junto con el oxígeno, forma una capa de alta resistencia que evita la corrosión del acero en muchos ambientes lo que hace que este material sea muy versátil. Los aceros inoxidables se clasifican de acuerdo a la microestructura que pueden ser martensíticos, ferríticos o austeníticos.

Los aceros inoxidables martensíticos se obtienen mediante tratamientos térmicos como el templado que a 1200°C produce 100% austenita. Posterior al templado se hace un revenido para alcanzar una dureza entre 45 HRC a 60 HRC dependiendo del contenido de carbono y también mejora la resistencia a la corrosión. El contenido de carbono que presentan los aceros inoxidables martensíticos varía entre 0.15% a 1% en peso de carbono mientras que el contenido de cromo se encuentra entre 12% al 18% en peso cuya aplicación se da para la fabricación de ejes para bombas, álabes de turbinas a gas y vapor así como también para instrumental médico y cuchillería.

Los aceros inoxidables ferríticos se obtienen por medio de un tratamiento térmico por recocido presentando como principales elementos aleantes el hierro, carbono y cromo, tienen una buena ductilidad y son resistentes a la corrosión por su contenido de carbono menor al 0.12% en peso y más del 30% en peso de cromo que además es un elemento estabilizador de ferrita. Los aceros inoxidables ferríticos se utilizan para la fabricación de tubos de escape, moldes para vidrio.

Los aceros inoxidables austeníticos son aleaciones de hierro, cromo, níquel y carbono cuyas concentraciones oscilan entre 16% y 25% en peso de cromo, carbono entre 0.03% a 0.08% en peso y entre 7% a 20% en peso de un

elemento estabilizador de austenita a temperatura ambiente como es el níquel. Los aceros inoxidable austeníticos permiten ser trabajados en frío ya que presentan gran ductilidad, tenacidad, resistencia al impacto y obtener resistencias mayores que un acero ferrítico.

Por último se tiene aceros inoxidable endurecidos por precipitación que presentan hierro, cromo, níquel y carbono pero se diferencian de otros aceros al poseer otros elementos aleantes como el aluminio, niobio o tantalio para lograr un endurecimiento mediante un tratamiento térmico por envejecimiento a una temperatura comprendida entre 455°C y 565°C a partir de una matriz de martensita. Esta matriz de martensita se obtiene llevando al acero a la temperatura donde se forma la austenita para luego llevar a cabo un temple a una temperatura menor o igual a 15°C. El límite elástico que se logra obtener oscila entre 515 y 1415 MPa y la resistencia mecánica entre 860 y 1520 MPa.

Tipos de fundiciones

Las fundiciones al igual que los aceros, están compuestas básicamente de hierro y carbono pero difieren en el contenido de carbono que oscila entre el 2% al 4.3% en peso. Al poseer un alto contenido de carbono, hace que estos materiales sean frágiles y por ende las propiedades mecánicas son inferiores con relación a los aceros de uso común. Estas aleaciones pasan al estado líquido entre 1150°C y 1300°C siendo la técnica de fundición la mejor para fabricar piezas geométricas. Como constituyentes, las fundiciones presentan cementita que bajo ciertas condiciones se descompone en ferrita y grafito.

Fundición blanca

La fundición blanca o hierro blanco tiene un contenido de carbono relativamente bajo que oscila entre 2.5% y 3% en peso y 1.5% en peso de silicio. Debido a la cantidad de cementita como constituyente principal, hace que este tipo de fundiciones sean extremadamente duras pero a la vez son demasiado frágiles al grado que son prácticamente difíciles de maquinarse por lo

que su aplicación se limita para superficies que requieran de alta dureza, resistente al desgaste sin un alto grado de ductilidad. Se funde a partir de los 1100°C, presenta una dureza Brinell entre 375 y 600, resistencia a la tracción entre 130 y 500 MPa y resistencia a la compresión entre 1.4 y 1.7 GPa.

Fundición gris

La fundición gris presenta un contenido de carbono comprendido entre 3.25% y 3.50% en peso con un porcentaje en peso de silicio de 1.8 a 2.3%. El grafito presente en la estructura aparece principalmente en forma de hojuelas rodeadas por una matriz de ferrita, perlita o martensita que presenta propiedades interesantes ya que las hojuelas de grafito permiten amortiguar las vibraciones causadas por fricciones internas y en cuanto a la maquinabilidad actúan como rompedoras de viruta. Por las características antes señaladas, hace que este material sea de uso común en la industria especialmente para la construcción de bastidores, monobloques de motores y estructuras de máquinas herramientas.

Fundición maleable

Este material se obtiene al someter un hierro blanco a un proceso de tratamiento térmico por recocido durante varias horas en un ambiente con monóxido y dióxido de carbono a una temperatura entre 800°C y 900°C.

Este proceso se realiza con el fin de descomponer la cementita durante el proceso de solidificación en austenita y la formación de nódulos de grafito permitiendo obtener una buena resistencia mecánica y ductilidad. Este tipo de fundición es utilizado para el diseño y construcción de engranajes de transmisión y partes de válvulas.

Fundición nodular

El hierro nodular posee un contenido de carbono comprendido entre 3.5% y 3.8% en peso con un porcentaje en peso de manganeso entre 0.3 a 1%.

El hierro nodular se obtiene mediante la inclusión de elementos nodulizantes como el magnesio o cerio al hierro líquido a una temperatura aproximadamente

de 1500°C. Al introducir estos elementos, permiten el crecimiento del grafito en forma de esferas durante el proceso de solidificación mejorando las propiedades mecánicas como la resistencia, ductilidad y tenacidad. La aplicación de un hierro nodular se da en engranajes de alta resistencia, fabricación de válvulas, cigüeñales y pistones.

Fundición de grafito compacto

Una fundición de grafito compacto presenta en su estructura grafito que tiene la forma entre hojuelas y esferas que se obtiene mediante un proceso de subnodulación del material fundido. Las propiedades que se tienen de este material son comparadas con un hierro gris y con un hierro nodular, es decir, que este material tiene la capacidad de absorber vibraciones y presenta una mayor resistencia y ductilidad que un hierro gris.

2.2.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA

La presencia de elementos metálicos y no metálicos en la composición química del acero permite que tenga características mecánicas y metalográficas específicas para una determinada aplicación. Estos elementos se pueden encontrar en porcentaje en peso mediante un análisis de composición química cuya interpretación permite determinar el tipo de acero al que corresponde y los principales elementos que forman la aleación.

El panel tipo Bailey utilizado para la construcción de puentes armables, están hechos de un acero de alta resistencia que a su debida época cumplían con las especificaciones de la norma BS.968 refiriéndose a la norma con el nombre de “Acero estructural de alta resistencia para puentes o para fines generales (Fusión de calidad de soldadura)” destacándose principalmente en la composición química.

Tabla 2.1 Composición química del acero

Composición Química	
Aleación	Máximo %
Carbono	0,20
Silicio	0.35
Manganeso	1.5
Cromo	0.5
Azufre	0.05
Fósforo	0.05

Fuente: Norma Británica BS.968 1941

Cada uno de los aleantes afecta de manera significativa en las propiedades mecánicas del acero por lo que es de gran importancia tener un conocimiento de cada uno de los elementos que lo conforman y cómo estos afectan de acuerdo al porcentaje en peso presentes en el material.

Carbono.- el carbono es una de las aleaciones más importantes en la composición química del acero ya que durante el proceso de solidificación, es el formador de diferentes constituyentes metálicos tales como cementita, perlita, esferoidita, bainita, martensita. De acuerdo al contenido de carbono, se puede realizar cambios en la microestructura para otorgándole un amplio rango de propiedades mecánicas como resistencia, dureza y ductilidad. Tal es el caso de la ductilidad y la tenacidad que decrece cuando aumenta el contenido de carbono, mientras que la dureza actúa proporcionalmente al contenido de carbono.

Silicio.- el silicio es uno de los principales elementos desoxidantes usados en el proceso de fabricación de aceros. En cantidades menores de silicio (0.05%) aumenta ligeramente la resistencia al óxido sin causar una grave pérdida de ductilidad, mientras que en mayor cantidad de silicio comprendida entre 0.15-0.30% en peso, aumenta la resistencia del acero al óxido. Para aceros que tienen alto contenido de silicio, generalmente son difíciles de procesar.

Manganeso.- al igual que el carbono, el manganeso es un elemento que se presenta en todos los aceros comerciales. Como características metalográficas tenemos que el manganeso reduce la temperatura a la cual se forma la martensita por lo que aumenta la posibilidad de tener austenita retenida en aceros templados, también es formador de perlita fina. En cuanto a las características mecánicas, el manganeso aumenta ligeramente la resistencia de la ferrita y en gran medida aumenta la dureza.

Cromo.- el cromo es usado en aceros de bajo contenido de carbono para aumentar la resistencia a la corrosión y al óxido, aumenta la resistencia a temperaturas altas, aumenta la templabilidad y aumenta la resistencia a la abrasión en aceros de alto contenido de carbono.

Azufre.- es considerado como un elemento perjudicial en las aleaciones de acero ya que deteriora la calidad de la superficie y causa dificultad en la soldadura formando porosidades. Al reaccionar con el manganeso, previene la formación de sulfuros de hierro en los bordes de grano. En algunos aceros el azufre es añadido hasta un 0.25% con el fin de mejorar la maquinabilidad.

Fósforo.- al igual que el azufre, es considerado como un elemento perjudicial en aleaciones de acero ya que disminuye severamente la tenacidad y la ductilidad, aunque aumenta la resistencia y la templabilidad del acero. El fósforo puede ser añadido deliberadamente para mejorar la maquinabilidad o para darle mayor resistencia a la corrosión.

Existen otros aleantes que forman parte de la composición química del acero otorgándole ciertas características especiales y que es muy importante a tomarlos en cuenta:

Níquel.- esta aleación es utilizada principalmente en aceros de baja aleación. Como características mecánicas, el níquel mejora la tenacidad a bajas temperaturas, endurece a la ferrita y como característica principal cuando el níquel se combina con el cromo y con el molibdeno, le dan al acero alta

resistencia, tenacidad y ductilidad. Cuando al acero se le somete a un proceso de enfriamiento luego de un tratamiento térmico, el níquel reduce la formación de grietas.

Cobre.- la cantidad de cobre presente en el acero oscila entre 0.2% a 0,5% en peso. Como característica se tiene que el cobre mejorar la resistencia a la corrosión atmosférica pero al mismo tiempo, es un elemento perjudicial cuando el acero se lo somete a un proceso de trabajo en caliente ya que durante el proceso, el cobre se incrusta en los bordes de grano.

Aluminio.- esta aleación permite controlar el tamaño de grano cuando el acero se le somete a un proceso de tratamiento térmico o cuando se utiliza para un proceso de trabajo en caliente. Los aceros que presentan un tamaño de grano fino tienen una gran tenacidad.

Molibdeno.- el molibdeno está presente en el acero entre 0.15% a 0.30%. Cuando el acero se encuentra en un proceso de solidificación, la cantidad presente en el acero permite incrementar la templabilidad y retardar la formación de perlita como constituyente metálico. En cuanto a las propiedades mecánicas, el molibdeno es el único elemento aleante que permite incrementar la resistencia a la tracción del acero a temperaturas altas y también aumenta la resistencia a la fluencia.

Vanadio.- el vanadio permite controlar el crecimiento del grano del acero cuando se le somete a un tratamiento térmico mejorando así la resistencia y tenacidad especialmente para aceros templados y revenidos. La templabilidad del acero se incrementa cuando el vanadio presente en el acero llega hasta un 0.05% en peso, mientras que para aceros que presentan mayor cantidad de vanadio, la templabilidad se reduce debido a que forma carburos que son difícilmente solubles en la austenita.

2.2.6. MICROESTRUCTURA DE LA ALEACIÓN HIERRO – CARBONO

Constituyentes metálicos

Un examen micrográfico permite identificar los microconstituyentes que presenta el material estableciendo de manera práctica y sencilla el comportamiento mecánico que tuviere el material cuando se utilice para un fin específico. Al realizar este tipo de ensayos se puede tener información muy valiosa en cuanto a la historia completa del material cuando ha pasado por procesos de tratamiento mecánico y térmico. Entre los constituyentes metálicos que se puede encontrar en un acero son los siguientes:

Ferrita.- los aceros ferríticos se obtienen solamente cuando en su composición química presentan un porcentaje bajo de carbono. Los aceros ferríticos se caracterizan por presentar límites de ferrita en su microestructura y microscópicamente se muestra como granos poligonales claros. En aceros que tienen un contenido de carbono menor al 0.6%, la ferrita se presenta con una red o malla que limita los granos de perlita, mientras que, en aceros con un contenido de carbono entre 0,6 a 0,85% de carbono se presenta en forma de agujas o bandas circulares orientados en la dirección de los planos cristalográficos de la austenita. En cuanto a las propiedades mecánicas, al presentar una solubilidad máxima del 0.0218% a una temperatura de 727°C tienen una buena ductilidad, dureza de 90 Brinell y una resistencia a la tracción de 28 kg/mm² (272,4 MPa) con un alargamiento del 40%.

Estos aceros al cristalizar en una estructura BCC, presentan una transición de dúctil a frágil cuando existe una disminución de temperatura o cuando se aumenta la velocidad de deformación.

Austenita.- A temperaturas comprendidas entre 1394°C y 912°C durante el proceso de solidificación se presenta el hierro en su segunda transformación alotrópica denominada hierro gama (Fe_γ).

En esta fase, el hierro presenta una estructura cristaliza FCC permitiendo que la máxima solubilidad en estado sólido del carbono sea 2.11% a una temperatura de 1148°C.

Como características mecánicas, los aceros austeníticos presentan gran ductilidad, maleabilidad, plasticidad con una dureza que alcanza los 300 Brinell, resistencia a la tracción de 100 kg/mm² (980 MPa) con un alargamiento del 30%.

Cementita.- conocido también como carburo de hierro (Fe₃C), contiene 6.67% en peso de carbono. Entre sus características mecánicas presenta una dureza Brinell de 700 HB cristalizando en una red ortorrómbica dándole una característica de un material muy duro pero frágil.

En aceros con un contenido de carbono mayor al 0,9%, se presenta la cementita de un blanco brillante formando una red que envuelve a la perlita. En una matriz de ferrita, la cementita se presenta en forma de glóbulos o granos dispersos en toda la matriz.

Martensita.- la martensita se forma por un proceso de enfriamiento rápido desde un estado austenítico.

Como propiedades mecánicas presenta una dureza entre 50 y 68 HRC, resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm² (1666 – 2450 MPa) con un alargamiento que varía entre 0,5 a 2,5%.

Dependiendo de la cantidad de carbono que presente el acero, la microestructura de la martensita cambia, por ejemplo, para aceros que tienen un contenido de carbono menores a 0.6% en peso, presentan una forma de cintas mientras que para aceros mayores a 0.6% de carbono tiene una forma laminar.

La estructura cristalina de la martensita es una red tetragonal debida por la inserción de átomos de carbono haciendo que el material sea sumamente duro pero a la vez frágil.

Perlita.- la estructura cristalina llamada perlita es el resultado de un proceso de enfriamiento lento de un acero eutectoide (0.77% en peso de carbono) justo por

debajo de la temperatura eutectoide donde se forma una estructura laminar de placas alternas de ferrita alfa en un 88% y cementita en un 12%. Como características mecánicas presentan una dureza Brinell de 250 HB, resistencia a la tracción de 80 kg/mm^2 (784 MPa) con un alargamiento del 15%.

Bainita.- la bainita es una estructura cristalina intermedia entre perlita y la martensita que se obtiene por una transformación isotérmica realizado en aceros eutectoides en condición austenítica por un proceso de temple en caliente desde los 550°C hasta los 250°C .

Durante el proceso de temple en caliente en ese rango de temperaturas, se producen dos tipos de estructura entre la cuales se destaca la Bainita superior compuesta por una matriz de ferrita a una temperatura comprendida entre 550°C y 350°C mientras que la Bainita inferior se logra entre 350°C a 250°C con un aspecto similar a la martensita. Presenta una dureza entre 40 a 60 HRC.

Para determinar el tipo de constituyentes metálicos, es necesario definir el tamaño de la muestra y el tipo de corte que se deba realizar para no alterar la microestructura y para lograrlo, se realiza un proceso normalizado aplicado en laboratorio bajo las siguientes normas:

- *ASTM E 3 – 01: Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas.*

El objetivo principal de la norma es revelar los diferentes constituyentes y estructura de metales y aleaciones por medio de un examen metalográfico que implica la selección de probetas metalográficas haciendo referencia a la parte más representativa del material para el análisis. Una sección transversal perpendicular al eje axial permite tener información sobre la variación de la estructura desde el centro a la superficie, distribución de inclusiones no metálicas, corrosión, mientras que, una sección longitudinal paralela al eje axial revela la cantidad de inclusiones presente en el acero, el

grado de deformación plástica de acuerdo a la distribución granular e información del tipo de tratamiento térmico realizado

También hace referencia al tamaño de la probeta con un área superficial entre 12 a 25 mm² así como también los procedimientos de corte, desbaste y pulido como hace referencia la tabla 5 en la que se especifica el tipo de lija a utilizar, refrigerante y el tiempo de pulido para lograr un acabado tipo espejo y poder facilitar el análisis al exponer la muestra a un microscopio metalúrgico.

- *ASTM E 407 – 07: Práctica estándar de micro ataque para metales y aleaciones.*

Esta norma provee de diferentes soluciones químicas y procedimientos que se clasifican en tres tablas diferentes para realizar un ataque químico a metales y aleaciones. La Tabla N°1 es una lista alfabética de metales y aleaciones con el respectivo ataque químico correspondiente.

La Tabla N°2 es un listado numérico de soluciones químicas que están relacionadas con la tabla anterior en el que se indica la composición y el procedimiento general para realizar un ataque químico. Por último la Tabla N°3 contiene una lista alfabética de las soluciones químicas con su respectivo código de referencia.

Formación del grano en el acero

La forma y el tamaño de grano se definen durante la transición que sufre el metal al cambio de fases de líquido a sólido bajo un proceso de solidificación que se inicia con la formación de núcleos estables en la primera fase llamada nucleación para luego pasar a una segunda fase en la que crece el núcleo hasta dar origen a cristales finalizando con el crecimiento granular.

La nucleación se da cuando existe una liberación de energía, es decir, que a medida que los átomos pierden energía durante el proceso líquido – sólido,

esta es disipada al exterior en forma de calor hasta alcanzar una temperatura por debajo del punto de congelación y lograr una frontera estable en el cual se formen pequeños núcleos. A medida que el metal se solidifica, los átomos tienden a perder energía formando nuevos núcleos o se unen a aquellos ya existentes constituyendo cristales en sus tres direcciones. El crecimiento de los núcleos dependerá la forma en la que se disipe el calor del metal para generar un crecimiento planar o dendrítico.

Un crecimiento planar se da cuando el líquido se enfría a la misma temperatura o por encima de la temperatura de solidificación aproximadamente 1538°C. Este paso es de vital importancia ya que durante la solidificación, las protuberancias que puedan surgir durante el proceso, sean disueltas parcialmente por el líquido hasta formar soluciones homogéneas.

En un crecimiento dendrítico pasa todo lo contrario ya que al sub-enfriar el líquido por debajo de la temperatura de solidificación, empiezan a formar soluciones sólidas que crecen en forma de ramificaciones llamadas dendritas.

Estas dendritas crecerán una vez que el líquido alcance la temperatura de solidificación para posteriormente seguir un crecimiento planar.

Tamaño de Grano.

El factor principal para determinar el tamaño de grano se da principalmente por la rapidez de enfriamiento del acero. A velocidades bajas de enfriamiento, los átomos que pierdan energía, se unirán a los núcleos ya formados estableciendo una estructura granular de grano grueso, mientras que, a elevadas velocidades de enfriamiento, los átomos formará una gran cantidad de núcleos formando una estructura granular de grano pequeño dando lugar a un tamaño de grano fino.

El tamaño del grano tiene un importante efecto en las propiedades mecánicas del metal, por ejemplo, los materiales que presenten un tamaño de grano fino en su estructura, mostraran mayor resistencia al impacto, mayor dureza, mayor resistencia a la tracción y se distorsionan menos durante el temple así como

también son menos susceptibles al agrietamiento en comparación a aquellos materiales de grano grueso.

Existen diferentes procedimientos para determinar el tamaño de grano para materiales y aleaciones que son recomendados por la norma ASTM E 112 como son el método de comparación de imagen que también se menciona en la norma INEN 1481:87, método planimétrico y por el método de intersección.

El *método por comparación de imagen* es un procedimiento en el cual se realiza un barrido a toda la superficie del material con una amplitud de 100X, se toma la mejor muestra y se compara con un patrón de estructura similar seleccionando el tamaño de grano por el número correspondiente al índice del patrón coincidente. La norma ASTM E 112 presenta en la tabla1, una sugerencia para seleccionar una carta de comparación para cada material, por ejemplo, para aceros ferríticos se toma en cuenta la carta número 1 para un lente con aumento de 100X.

El número o índice de tamaño de grano ASTM se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$N = 2^{n-1} \quad 2.1$$

Donde:

N = es el número de granos por pulgada cuadrada

n = es el número de referencia al índice de tamaño de grano ASTM

A pesar de que este es un método de prueba y error, maneja una precisión ± 1 unidad de tamaño de grano.

El *método planimétrico* es un método en el cual se traza una circunferencia que tenga un área de 5000 mm² (d= 79.8mm) de la mejor imagen que se pueda obtener del microscopio. Una vez trazado el círculo, se cuenta el número de granos presentes dentro del círculo y se cuentan los granos que son intersecados por la línea de la circunferencia aplicando la siguiente fórmula:

$$N_A = f * \left(N_{Inside} + \frac{N_{Intercepted}}{2} \right) \quad 2.2$$

Donde:

N_A = es el tamaño promedio de grano por mm^2

f = es el factor multiplicativo de Jeffrie

N_{Inside} = es el número de granos dentro del círculo trazado

$N_{Intercepted}$ = es el número de granos interceptados por la línea de circunferencia.

El factor de corrección de Jeffrie se lo obtiene de la tabla 5 de la norma ASTM E 112 para cada aumento del lente microscópico.

Para tener una buena exactitud en el resultado, la norma establece que el número de granos dentro del círculo trazado debe ser aproximadamente de 50 con el cual se logra una precisión $\pm 0,25$ unidades de tamaño de grano.

El *método por intersección* es un procedimiento mediante el cual se traza en una fotomicrografía, una o más líneas rectas en el cual se cuenta el número de intersecciones tomando en cuenta que si los extremos de la línea no interseca completamente al grano, se tomará como medio grano. La cantidad de granos por milímetro será obtenida mediante la división entre la cantidad promedio de granos intersecados y la longitud de la línea en milímetros. La exactitud de este método puede llegar a un $\pm 0,25$ unidades de tamaño de grado dependiendo del número de líneas que se utilice, por ejemplo, la norma hace referencia a cuatro líneas en diferentes posiciones con las respectivas medidas en milímetros o se puede tomar una de las líneas como patrón y trazar otras tres líneas paralelas con la misma longitud.

El tamaño de grano G, resultará de la siguiente ecuación:

$$G = 10.00 + 2 \log_2 * N_L \quad 2.3$$

Donde:

N_L = es la cantidad de granos por milímetro.

2.2.7. MACROESTRUCTURA DE LA ALEACIÓN HIERRO-CARBONO

Un estudio macrográfico permite identificar ciertas características estructurales del metal entre las que se encuentra la orientación de las fibras que se presentan luego de que el material haya pasado por un proceso mecánico, grietas, presencia de porosidades, inclusiones, penetración de la soldadura, zonas afectadas por el calor, profundidad del tratamiento térmico superficial. En este documento se enfocará principalmente en un análisis del cordón de soldadura del panel debido a que es una tecnología muy compleja por sus diversos factores que intervienen de las cuales algunos pueden ser controlados como la intensidad de corriente, tipo de electrodo, en tanto que, otras variables son muy complejas de controlar entre ellas la habilidad del soldador.

Lograr una junta soldada sin defectos es muy difícil conseguirla, pero se establecen una serie de criterios que indica la norma AWS D1.1 para la aceptación de los cordones de soldadura y no provoquen efectos adversos de importancia en la operación del conjunto soldado. Para realizar este análisis es importante recurrir a la norma *ASTM A 340 – 00: Métodos de prueba estándar para ensayo macrográfico de metales y aleaciones*.

Esta norma describe los procedimientos específicos para cada metal y aleación para revelar la macroestructura en un ensayo macrográfico.

Los metales que hace referencia esta norma son aluminio, aleaciones de aluminio, berilio, aleaciones de berilio, cobre, aleaciones de cobre, hierro y acero cuya composición química, cantidad y procedimiento de la solución para un ataque químico se especifican en la tabla 5. Para aceros inoxidable, plomo, aleaciones de plomo, magnesio, aleaciones de magnesio y otros metales y aleaciones, los procedimientos se describen en cada una de las tablas adjuntas a esta norma.

El significado de esta norma es revelar las heterogeneidades que presentan los metales y aleaciones especialmente en el estudio de una junta soldada en la

que se define penetración, fusión con el metal base, porosidad, grietas y zonas afectadas por el calor.

2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS

Las características mecánicas de un material están estrechamente relacionadas con las características metalográficas en cuanto al tamaño de grano, composición química, tratamiento térmico que posee el material para mejorar el comportamiento mecánico. Muchos materiales cuando están en servicio, están sujetos a fuerzas y cargas cuyas propiedades mecánicas, que previamente deben ser estudiados, son necesarias cuantificar para diseñar elementos mecánicos de tal forma que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido, no sean excesivos y el material no se fracture.

Existen diferentes tipos de ensayos mecánicos que se le somete a un material para determinar el comportamiento mecánico pero que para este documento, se realizarán ensayos de tracción y ensayos de dureza para determinar las principales propiedades mecánicas. Los resultados que se obtengan de estos ensayos serán comparados con otro material y así poder determinar el acero que se asemeje al que se utiliza para la construcción de estos paneles.

2.3.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD

En un diagrama esfuerzo–deformación que se la obtiene mediante un ensayo de tracción, la relación entre esfuerzo (σ) y deformación unitaria (ϵ) se la conoce como el módulo de elasticidad o módulo de Young que no es más que la pendiente de la recta en la zona elástica cuya ecuación viene representada por la ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \qquad 2.4$$

El valor del módulo de elasticidad indica la rigidez que presenta el material, puesto que un material más rígido requerirá de una fuerza mayor para

deformarlo en el rango elástico. Generalmente, el valor del módulo de elasticidad varía ligeramente cuando se añade al material elementos de aleación o cuando se somete a un tratamiento térmico, sin embargo, este valor cambia significativamente cuando existen incrementos de temperatura. A nivel atómico, el módulo de elasticidad está relacionado con las fuerzas de unión entre átomos del material ya que los enlaces atómicos actúan como resortes que necesitan de una fuerza para separar los átomos o alargar el enlace entre los mismos desde la posición de equilibrio que son representados de la siguiente manera:

$$F = S_o * (r - r_o) \quad 2.5$$

Donde:

S = rigidez del enlace atómico

r_o = es el radio atómico

Si tomamos en consideración el esfuerzo que se necesita para separar los átomos en una unidad de área en una celda unitaria cúbica simple, se tiene la siguiente expresión matemática:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{S_o * (r - r_o)}{r_o^2} \quad 2.6$$

De esta ecuación se puede dar cuenta de lo siguiente:

$$\varepsilon = \frac{r - r_o}{r_o} \quad 2.7$$

Reemplazando la ecuación de la deformación unitaria en la ecuación de esfuerzo, se obtiene que:

$$\sigma = \frac{S_o}{r_o} * \varepsilon \quad 2.8$$

Donde:

$E = \frac{S_o}{r_o}$ = es el módulo de Young o módulo de elasticidad.

Los valores de rigidez de enlace atómico S_o vienen representados en la siguiente tabla por lo que el módulo de elasticidad resultará un valor estimado.

Tabla 2.2. Módulo de elasticidad para diferentes tipos de enlaces

Tipo de enlace	S _o , N·m ⁻¹	E estimado a partir de (S _o /r _o), GN/m ²
Covalente, enlace, C - C	180	1000
Iónico puro, enlace, Na - Cl	9 - 21	30 - 70
Metálico puro, enlace, Cu - Cu	15 - 40	30 - 150
Puente de hidrógeno, H ₂ O	2	8
De van der Waals (ceras, muchos polímeros)	1	2

Fuente: Mangonon, Pat. Ciencia de Materiales Selección y Diseño. Primera Edición. Pearson Education. México. 2001

2.3.2. MÓDULO DE POISSON

En un ensayo de tracción, un cuerpo se deformará en dirección de la fuerza axial, sin embargo, cuando este elemento de prueba se deforma axialmente, también existen deformaciones laterales que tienen una relación constante con respecto a las deformaciones longitudinales siempre y cuando se encuentre dentro del rango elástico. Por esta razón, el módulo de Poisson se define como la relación que existe entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria axial que sufre el material cuando es sometida a una fuerza axial representada en la siguiente ecuación:

$$\mu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} = \frac{\frac{\Delta d}{d_o}}{\frac{\Delta l}{l_o}} \quad 2.9$$

2.3.3. RESISTENCIA A LA FLUENCIA

La resistencia a la fluencia se define como el esfuerzo correspondiente al límite elástico en un diagrama esfuerzo-deformación, es decir, cuando realizamos un ensayo de tracción, al metal se le somete una fuerza de forma progresiva en el cual tiende a sufrir un alargamiento y una reducción en su área transversal.

Cuando el material se encuentra en una zona elástica, actúa como un resorte, es decir, que regresa a las medidas originales cuando se quita la fuerza aplicada, pero si continuamos aplicando esta fuerza, el material llega a un punto en donde empieza una transición entre la zona elástica y la zona plástica que al momento de retirar la fuerza en ese punto, el metal queda deformado plásticamente. Ese punto de transición se la conoce como punto de fluencia y la fuerza en ese punto se la conoce como resistencia a la fluencia. Para determinar este valor se utiliza un método convencional a partir del diagrama esfuerzo – deformación en la que se traza una línea paralela a la porción inicial del comportamiento elástico del material a una distancia del 0,2% respecto del origen. El valor que se obtiene del esfuerzo de fluencia, es aquel en la que la recta corta a la curva esfuerzo – deformación.

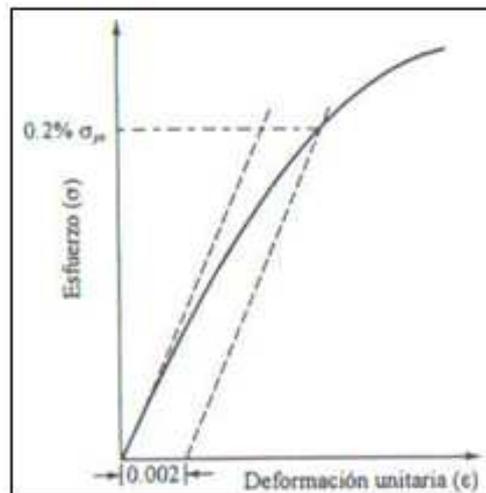


Figura 2.18 Esfuerzo de fluencia por el método convencional

Fuente: Shaffer, Saxena, Antolovich, Sanders, Warner. Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería. Primera Edición. McGraw Hill. México. 2000

2.3.4. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La resistencia a la tracción se define como el esfuerzo máximo obtenido en un diagrama esfuerzo-deformación. Al realizar un ensayo de tracción, al aplicar una carga de manera progresiva, pasa de una zona elástica a una zona plástica cuya deformación no permanece uniforme y en algún punto del material se deformará más que en otras. Este punto de transición donde

empieza la estricción o a formarse un cuello de botella, será la resistencia máxima obtenida ya que al reducirse el área transversal, se requerirá una fuerza menor para continuar con la deformación del material hasta llegar al punto de fractura.

2.3.5. TENACIDAD

La tenacidad de un material se define como el área bajo la curva en un diagrama esfuerzo-deformación unitaria que representa la energía que absorbe el material antes de fracturarse.

$$U = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon \quad 2.10$$

2.3.6. DUCTILIDAD

La ductilidad es el porcentaje de deformación que presenta un material antes de que se produzca la fractura, que para los diseñadores, es un valor importante en cuanto a la elongación que tenga el material cuando se le someta a procesos mecánicos como extrusión y laminado.

La elongación o porcentaje de alargamiento es la diferencia entre marcas antes y después del ensayo permitiendo de esta manera saber cuánto se estiró el material durante la prueba.

$$\epsilon = \frac{l - l_o}{l_o} * 100 \quad 2.11$$

La reducción de área o porcentaje de adelgazamiento describe la disminución del área transversal durante el ensayo.

$$RA = \frac{A_o - A_F}{A_o} * 100 \quad 2.12$$

2.3.7. DUREZA

La dureza de un material se define como la resistencia que presenta un material a la deformación plástica.

Mediante ensayos de dureza, se puede también pronosticar con exactitud otras propiedades del material tales como la resistencia última a la tracción, resistencia a la fatiga y la resistencia a la abrasión por fricción solamente con tener datos de dureza.

Existen varios procedimientos para medir la dureza de un material en la que se deben tomar en consideración dos aspectos importantes en cada uno de los equipos como es el tipo de penetrador y la carga aplicada. Para un ensayo de dureza Rockwell se utiliza el método de medición de la profundidad del penetrador en el cual se utiliza un penetrador de diamante cónico cuando se trata de materiales duros que están dentro de una escala C, mientras que, para materiales suaves que se encuentran dentro de una escala B, se utiliza una esfera de acero con un diámetro de 1/16". La carga aplicada para un ensayo de dureza Rockwell va desde 15 kgf hasta 150 kgf.

Para el ensayo de dureza Brinell se utiliza el método de medición del área cuyo penetrador es una esfera de acero de 10 mm de diámetro. En este ensayo se aplican cargas que van desde 500 kgf hasta 3000 kgf.

En el caso de los aceros, la resistencia última mínima está relacionada directamente con el índice de Dureza Brinell cuya fórmula es:

$$S_u = \begin{cases} 0.45BHN & Ksi \\ 500BHN & \text{---} Psi \end{cases} \quad 2.13$$

2.4. ENSAYOS DESTRUCTIVOS

2.4.1. ENSAYO DE TRACCIÓN

La prueba de tracción es uno de los más utilizados en el área de mecánica de materiales debido a que se obtienen las propiedades mecánicas principales del

material como la resistencia última a la tracción, porcentaje de alargamiento, resistencia a la fluencia, módulo de Young entre otras propiedades que pueden ser aplicados para el diseño de distintos elementos mecánicos además del comportamiento que tiene el material bajo un diagrama esfuerzo-deformación con solo aplicar una fuerza axial.

Para realizar un ensayo de tensión, se utiliza una máquina universal de pruebas el cual aplica una carga axial de manera uniforme y continua con una velocidad de deformación que va desde 0,05 a 500 mm/min (0,002 a 20 in/min) con una precisión del 0,1% y una carga que va desde 10 gf hasta 45000 kg o más con una precisión del 0,5%. En la celda de carga se coloca la probeta sujetada en los extremos por dos mordazas en la que una de ellas actúa como un soporte fijo estacionario mientras que la otra mordaza actúa como soporte fijo que hace las veces de un actuador. El procedimiento que se utiliza para el ensayo de tracción se realiza de acuerdo al manual de la máquina.

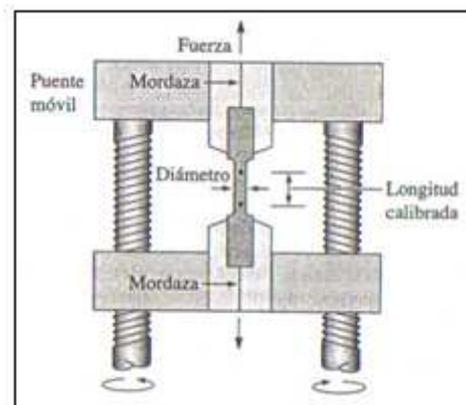


Figura 2.19 Ensayo de Tracción

Fuente: Askeland, Donald. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4ed. Editorial Thomson. México. 2004

La selección de la geometría y el tamaño de la probeta será de vital importancia para los resultados que se desea obtener, por ejemplo, si la probeta es de una geometría plana quiere decir que ese material va a ser utilizado para ser una placa delgada o una lámina mientras que para una geometría con sección redonda será utilizado para piezas forjadas y barras extruidas.

La galga extensométrica es uno de los instrumentos adicionales en un ensayo de tracción ya que al aplicar una carga axial a una probeta en la máquina universal de ensayos, se aprecia que la probeta sufre una deformación dentro del rango elástico cuyos valores pueden ser analizados estadísticamente.

La prueba de tensión no solo se utiliza para materiales metálicos sino también para aleaciones, plásticos y cerámicos aunque este último puede fracturarse mientras se está alienado por lo que su aplicación no es muy frecuente. Para realizar el ensayo existen varias normas en la que se puede extraer la suficiente información sobre el equipo necesario y las propiedades del material que se puede obtener con este ensayo:

- *ASTM E 8/E 8M – 09 Método de prueba estándar para ensayo de tensión de materiales metálicos*

Esta norma provee información acerca de la resistencia y ductilidad de los materiales bajo una carga axial cuyos resultados bajo probetas con dimensiones estandarizadas, servirán para determinar la resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área en condiciones de temperatura ambiente.

Para lograr resultados confiables, esta norma indica los requerimientos que debe tener una máquina universal de ensayos, velocidad con la que se realiza el ensayo y las dimensiones de una probeta estándar.

- *ASTM A 370 – 05 Métodos de prueba estándar y definiciones para ensayos mecánicos para materiales de acero*

Esta norma hace referencia a los procedimientos y definiciones para realizar ensayos mecánicos para aceros fundidos y forjados y aleaciones de acero.

Las distintas pruebas que se realizan bajo esta norma como un ensayo de tracción, ensayo de doblado, ensayo de dureza Rockwell o Brinell, ensayo

de impacto, son utilizados para obtener resultados reproducibles y comparables del material.

Para un ensayo a tracción, esta norma hace una breve descripción del principio de operación de una máquina universal de ensayos en la que resalta la velocidad con la que se aplica la carga durante la prueba. También hace referencia sobre las dimensiones y tolerancias que debe tener una probeta estándar y la determinación de las propiedades mecánicas que se obtiene con este ensayo.

- *ASTM E 6: Terminología estándar referentes a los métodos de ensayos mecánicos.*

Esta norma abarca la terminología de los principales conceptos referentes a las propiedades que se obtienen mediante los ensayos mecánicos para materiales. Las definiciones generales se interpretan cuando sea necesario para que sean particularmente aplicables y factibles para su uso en normas. Estas definiciones se publicarán para fomentar la uniformidad de la terminología en las especificaciones.

- *NTE INEN 109: Ensayo de tracción para materiales metálicos a temperatura ambiente*

El objetivo de esta norma es especificar el método de ensayo de tracción de materiales metálicos y define las propiedades metálicas que se pueden determinar a temperatura ambiente comprendida entre +10°C y +35°C.

También hace referencia en cuanto a la preparación de la probeta, simbología y designaciones, procedimiento para realizar el ensayo de tracción e informe de resultados.

Al final presenta anexos que hace referencia a los tipos de probetas para láminas, flejes y productos planos con espesores entre 0.1mm a 3.0mm; tipos de probetas de ensayo para alambres, barras y secciones de diámetro

o espesor inferior a 4mm; tipos de probetas usadas para láminas y placas, productos planos de espesor iguales o mayor que 3mm, alambres, barras y secciones de diámetro o espesor igual o mayor a 4mm.

- *NTE ISO 377: 2009: Acero y productos de acero. Localización y preparación de muestras para ensayos mecánicos.*

Esta norma específica requisitos para la identificación, ubicación, preparación de muestras destinadas para ensayos mecánicos en secciones de acero, barras, varillas, productos planos y productos tubulares.

Esta norma es aplicable a muestras y probetas que son para el uso en pruebas que se llevan a cabo de conformidad con los métodos especificados en la norma de ensayo.

2.4.2. ENSAYO DE DUREZA

Para medir la dureza de un material se han desarrollado diferentes técnicas que utilizan un pequeño penetrador que se introduce sobre la superficie del material bajo condiciones de carga y velocidad de penetración controlada cuyos resultados se la puede obtener de forma directa o midiendo el tamaño de la huella resultante y calcular el valor de la dureza adquirida.

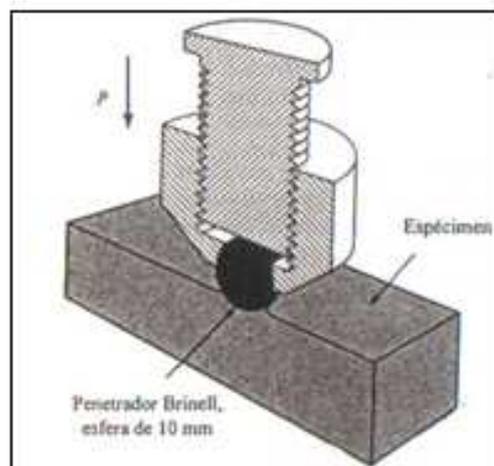


Figura 2.20 Ensayo de dureza Brinell

Fuente: Shaffer, Saxena, Antolovich, Sanders, Warner. Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería. Primera Edición. McGraw Hill. México. 2000

Una de las técnicas más utilizadas es el ensayo de dureza Brinell que opera con una esfera de acero templado de 10 mm de diámetro bajo una carga constante que suele ser entre 500 kgf y 3000 kgf durante un determinado tiempo entre 10 a 30 segundos sobre la superficie. El cálculo de la dureza se la puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$HB = BHN = \frac{2F}{(\pi * D[D - \sqrt{D^2 - d^2}])} \left[\frac{kg}{mm^2} \right] \quad 2.14$$

Donde:

F = es la carga aplicada

D = es el diámetro del penetrador

d = es el diámetro de la huella

Otra forma para determinar la dureza Brinell es con el uso de tablas que se la puede encontrar en la norma ASTM A 370 – 05 el cual muestra valores que han sido previamente calculadas con una esfera de diámetro 10 mm para diferentes diámetros de huella que van desde 2 mm hasta 6.99 mm en intervalos de 0,01 con una carga específica que va desde 500 kgf hasta 3000 kgf en intervalos de 500 kgf. Un aspecto a tomar en consideración para realizar el ensayo, es el espesor mínima en milímetros y en pulgadas de la probeta para diferentes cargas que hace referencia la Tabla 5 de la norma ASTM E 10 – 10 para métodos de prueba estándar para ensayos de dureza Brinell de materiales metálicos.

Otro método para el cálculo de la dureza de un material es por medio de un ensayo de dureza Rockwell. Este ensayo se utiliza con más frecuencia debido a que se obtiene de manera automática mediante la medición de la profundidad de penetración para luego convertirlo en un valor de dureza Rockwell. Este ensayo de dureza utiliza una pequeña esfera de acero que se la emplea para materiales de baja resistencia y un cono de diamante para materiales más duros.

Las escalas de dureza Rockwell para diferentes materiales se designan con las letras A, B, C, D, E, F, G, H, K, L, M, P, R, S, V para diferentes escalas con su penetrador respectivo por ejemplo, para aleaciones de cobre, aceros suaves o de baja resistencia, hierro maleable y aleaciones de aluminio, se utiliza una escala Rockwell B cuyo penetrador es una esfera de acero de diámetro 1/16" con una carga máxima de 100 kgf. La designación que se da a cada escala con su respectivo penetrador, se la encuentra en la tabla 5 de la norma ASTM E 18 – 05.

Existe otro método para medir la dureza del material y es el ensayo Vickers el cual usa un penetrador de diamante en forma de diamante que es utilizado para materiales muy duros en el cual se puede hacer ensayo de micro y macro dureza. Este tipo de ensayo es utilizado para materiales que presentan mayor dureza superficial con respecto al núcleo o que en distintas áreas del material presentan diferentes índices de dureza. Las normas que son utilizadas para realizar un ensayo de dureza se tiene:

- *ASTM E 18 – 05: Método de prueba estándar para ensayo de dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell de materiales metálicos.*

La norma cubre métodos de ensayo de dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell en la que hace una descripción general de los equipos y el procedimiento para ambos ensayos de dureza que se especifica en la sección A. Incluye también métodos para verificación de los equipos de dureza en la sección B y métodos estandarizados de calibración para los equipos de dureza que se describen en la sección C de esta norma.

- *ASTM E 140 – 07: Tablas de conversión de dureza estándar para materiales relacionados entre dureza Brinell, dureza Vickers, dureza Rockwell, dureza Superficial, dureza Knoop.*

Esta norma presenta tablas de conversión de dureza para diferentes materiales de acero no austeníticos, aceros austeníticos, chapas de acero

inoxidable austenítica, perfiles de acero inoxidable austenítica, aleaciones de níquel con un contenido mayor al 50%, materiales de cobre, aleaciones de hierro blanco y materiales de aluminio.

Los valores de conversión pueden ser tomados directamente de las tablas antes ya mencionadas o se lo puede hacer mediante ecuaciones que se muestran en los apéndices X1 y X2 para aceros no austeníticos, X3 para aleaciones de níquel, X4 para cartuchos de latón, X5 para chapas de acero inoxidable austenítica, X6 para perfiles de acero inoxidable austenítica, X7 para materiales de cobre, X8 para hierro blanco maleable y X9 para materiales de aluminio. Estos resultados variarán al tratamiento térmico que fue sometido el material, estructura del grano, materiales de aleación entre otras.

- *ASTM A 370 – 05 Métodos de prueba estándar y definiciones para ensayos mecánicos para materiales de acero*

Esta norma hace referencia a los procedimientos y definiciones para realizar ensayos mecánicos para aceros fundidos y forjados, aleaciones de acero.

Las distintas pruebas que se realizan bajo esta norma son descritas y utilizadas para determinar las propiedades mecánicas requeridas en las especificaciones del producto para obtener resultados reproducibles y comparables.

Para un ensayo de dureza, esta norma hace una descripción del equipo necesario y procedimientos para realizar un ensayo de dureza Rockwell y Brinell. Presenta también tablas de conversión de dureza Rockwell C y Rockwell B para diferentes valores de dureza Vickers, dureza Brinell, dureza Knoop, para diferentes escalas de dureza Rockwell, dureza superficial Rockwell y una aproximación de la resistencia última a la tensión expresada en MPa con diferentes cargas y penetradores para aceros austeníticos y no austeníticos. Para la dureza Brinell presenta tablas para diferentes huellas

en la superficie con una esfera de diámetro 10 mm con cargas de 500, 1500, y 3000 kgf.

- *NTE INEN 125 Primera revisión: Determinación de la dureza Rockwell*

Esta norma establece el método para determinar la dureza Rockwell en las escalas B, B', C, A, D, E, F, G, H y K para materiales metálicos.

La norma provee de información necesaria referente a los equipos en especial la superficie de la probeta el cual debe estar exento de rayas que influyan en la lectura del resultado y el procedimiento para efectuar el ensayo a temperatura ambiente entre 0°C a 40°C o cuando sea necesario bajo temperaturas controladas que deberá llevarse a cabo a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ en climas moderados y $27 \pm 2^\circ\text{C}$ para climas tropicales.

- *NTE INEN 0123: Determinación de la dureza Brinell*

Esta norma establece el método para determinar la dureza Brinell en materiales metálicos cuya dureza no sea mayor a 450 HB que se obtiene mediante la división de una carga F expresada en kilogramos fuerza por el área de la huella expresada en milímetros cuadrados considerando una superficie como un casquete esférico de una esfera de diámetro D.

La norma indica el equipo necesario para el ensayo poniendo énfasis en el los diámetros de las esferas con las respectivas tolerancias, preparación de la probeta y un procedimiento que se lo hace a temperatura ambiente entre 0°C a 40°C o cuando sea necesario bajo temperaturas controladas que deberá llevarse a cabo a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ en climas moderados y $27 \pm 2^\circ\text{C}$ para climas tropicales.

2.5. RECUBRIMIENTOS DEL ACERO: GALVANIZADO

La galvanización es un proceso mediante el cual se obtiene un recubrimiento por inmersión en un baño de zinc fundido a una temperatura comprendida entre 440° C y 460°C sobre materiales de hierro o acero durante un tiempo

determinado cuya calidad de recubrimiento dependerá factores como la composición química, temperatura del baño de zinc y del espesor del material base.

Del recubrimiento se obtienen varias capas de hierro – zinc producto de una reacción químico – metalográfico denominadas gamma que presenta una composición 18% de hierro y 82% de zinc, delta con porcentaje de hierro del 12% y zinc al 88% y zeta con 6% de hierro y un 94% de zinc mientras que la última capa contiene zinc puro con el nombre de eta. El espesor de las distintas capas depende de la composición y del espesor del material base pero suelen estar comprendidos entre 45 μm para aceros con espesor de 1,5 mm hasta 200 μm con espesores mayores a 6 mm.

Estas capas que rodea al material base, tienen características de protección muy importantes debido a que las capas gama, delta y zeta se encuentran entre el material base y la capa de zinc puro, presentan una dureza más alta que el acero y aunque sean más frágiles, se obtiene una mayor resistencia a los golpes y rozamientos sin desprenderse.

La capa externa de zinc en conjunto con las demás capas, aportan un alto grado de protección contra la corrosión atmosférica de manera que esta capa aísla el material base de un medio ambiente que puede ser bastante agresivo en la que el zinc actúa como la parte anódica de la corrosión mientras que el material base se comporta como cátodo. El tiempo de servicio del recubrimiento, dependerá del espesor del galvanizado y del medio ambiente en el que se encuentre, por ejemplo, para un clima tropical, se depositan 600 g/cm^2 con un espesor de galvanizado aproximado de 3,3 en milésimas de pulgada (mils), se espera que el galvanizado tenga un tiempo de servicio aproximadamente de 35 años.

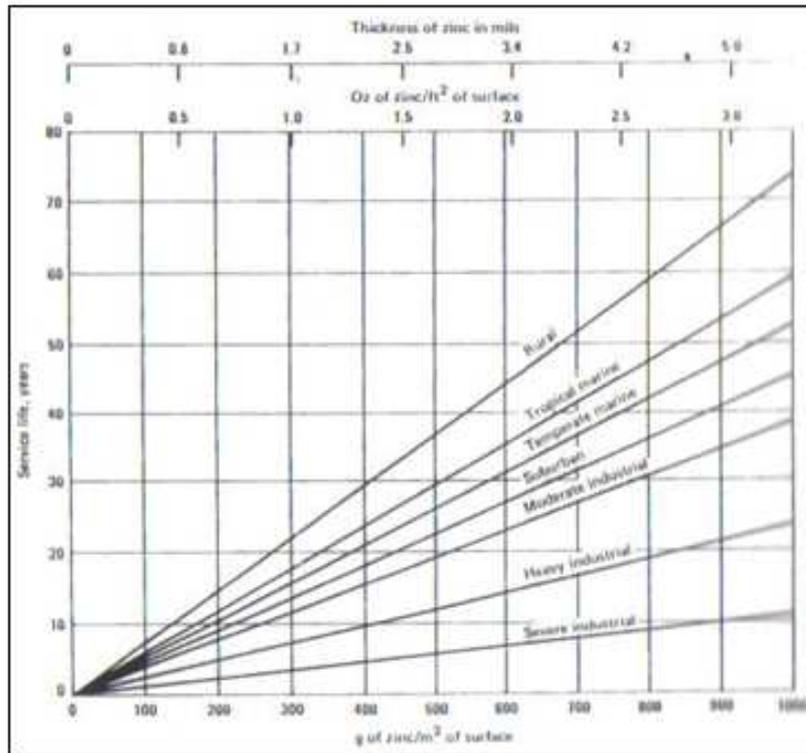


Figura 2.21 Efecto de la cantidad de zinc en tiempo de servicio de galvanizado en diferentes ambientes

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons and Steels Volume 1. 9ed. Estados Unidos. 1978

Hay normas que se han desarrollado para realizar un proceso de galvanizado en caliente para generar un recubrimiento de alta calidad que serán descritos en este documento con fines de conocimiento general y cuando se requiera acudir a ellas.

- *ASTM A 123/A 123M-08: Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products*

Esta norma cubre los requisitos para el recubrimiento de zinc por el proceso de inmersión en caliente de productos de hierro y de acero laminado a partir de prensado y forjado, piezas de fundición, placas de acero, acero estructural y cables. Los requisitos al que hace referencia esta norma es el espesor mínimo de recubrimiento tomando en cuenta el tipo de acero y

espesor, acabado, apariencia que hace referencia a depósitos de zinc que se puedan producir en el proceso y adherencia.

Esta especificación no se aplica para tubería, cables o chapas de acero galvanizado que presenten espesores menores a 0.76 mm.

- *ASTM A143 / A143M - 07 Norma Práctica para la protección y procedimientos para detectar la fragilidad de galvanizado por inmersión en caliente para productos de acero estructural.*

Esta norma abarca procedimientos que se pueden realizar para salvaguardar la posible fragilidad del galvanizado en aceros estructurales cuando se realiza el proceso por inmersión demostrando que los procedimientos han sido satisfactorios.

Esta norma no pretende abarcar toda la seguridad que se requiere para el proceso ya que es responsabilidad del ingeniero establecer normas de seguridad y salud adicionales que puedan ser aplicables durante el proceso.

- *ASTM E 376 – 03 “Práctica estándar para medir el espesor de revestimiento por campo magnético o por corrientes de Foucault (electromagnetismo)”*

En esta norma cubre dos métodos para medir el espesor de recubrimiento ya sea por corrientes de Foucault (electromagnetismo) utilizados por instrumentos electrónicos cuyo principio de funcionamiento se basa en una variación en la impedancia en presencia de dos metales diferentes, mientras que el método por medio de un campo magnético utiliza una atracción magnética entre un imán y el revestimiento un sustrato o por medio de una resistencia del flujo magnético que pasa a través de un recubrimiento o sustrato. Se puede encontrar información sobre las posibles interferencias que pueden existir al momento de realizar una medición, calibración y estandarización, procedimiento y precauciones que se deben tomar en

cuenta durante el ensayo, aunque todo lo anterior depende de las características propias del instrumento de medición.

- *NTE INEN 2483: 2009. Recubrimiento de zinc (galvanizado por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero. Requisitos.*

Esta norma establece los requisitos para recubrimiento de zinc por el proceso de inmersión en caliente de productos de hierro y acero obtenidos por un proceso de laminación, forja, flejes, planchas, fundiciones y barras.

Para aplicar esta norma se puede encontrar algunas definiciones, disposiciones generales, espesor de recubrimiento, acabado, inspección, rotulado, métodos para medir el espesor y adherencia de zinc en el acero.

En el inciso 8.1.1 de la norma hace referencia a la medición del espesor del recubrimiento por medición magnética.

- *NTE INEN 1196: Recubrimiento de Zinc. Determinación del espesor de recubrimiento, método del goteo*

Esta norma establece el método del goteo para determinar el espesor de recubrimientos de zinc sobre el material base de acero recubierto electrolíticamente o por inmersión en caliente. Provee de información sobre el instrumental a utilizar, reactivos y procedimiento de ensayo.

2.6. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El tratamiento térmico es un proceso que permite modificar la microestructura del material mediante procesos de calentamiento y enfriamiento lento para obtener propiedades mecánicas deseadas como la resistencia a la tracción, dureza, ductilidad, tenacidad. El proceso consiste en calentar a los metales o aleaciones en estado sólido a temperaturas preestablecidas, mantener a esa temperatura durante un intervalo de tiempo hasta que se forme la estructura cristalina deseada y posteriormente enfriarlo a una velocidad conveniente para obtener un tamaño de grano óptimo con propiedades mecánicas específicas.

2.6.1. RECOCIDO

El tratamiento térmico por recocido consiste en calentar al metal a una temperatura adecuada, mantenerla durante un tiempo determinado y luego enfriarlo lentamente

El recocido se emplea básicamente para reducir la dureza y fragilidad; alterar la microestructura para obtener las propiedades mecánicas deseadas; ablandar el material y con ello mejorar la maquinabilidad; para recristalizar los metales que son trabajados en frío; aliviar los esfuerzos residuales inducidos después de haber sometido al metal a un proceso de trabajo en frío.

Para el caso de los aceros, existen tres tratamientos de recocido con el fin de lograr aplicaciones específicas manejando ciertos rangos de temperatura.

El *Recocido subcrítico* o llamado también *recocido de proceso*, permite aliviar esfuerzos y llevar al metal a un proceso de recristalización cuando el material es sometido a trabajos en frío. Para aliviar esfuerzos, se le somete al metal a una temperatura inferior al de recristalización, mantenerlo a esta temperatura durante un período de tiempo y luego enfriarlo lentamente de manera uniforme. Esta temperatura se da en un rango de 595°C y 675°C.

En un proceso de recristalización, el metal es calentado a una temperatura entre 11°C a 22°C inferior a la temperatura crítica, mantenerla a esa temperatura durante un período de tiempo y enfriarla normalmente por aire con el fin de recuperar la estructura de grano original cuando este ha pasado por un proceso de trabajo en frío.

El *Recocido intercrítico* es un proceso por el cual el metal se lleva a una temperatura de 55°C por encima de la temperatura crítica y después se enfría a una temperatura 55°C por debajo de la temperatura crítica.

El objetivo de este proceso es formar una estructura cristalina llamada *esferoidita* que tiene propiedades de mínima dureza, ductilidad máxima, maquinabilidad máxima y son menos propensas a concentraciones de esfuerzo.

El *Recocido completo* es un proceso mediante el cual se lleva al acero a una estructura idónea para llevar a tratamientos posteriores a piezas de acero forjadas. El acero se lleva a una temperatura de austenitización completa que se da a 962°C, mantenerla a esa temperatura y luego llevarla a un enfriamiento lento por debajo de la temperatura crítica más baja formado así una estructura cristalina llamada perlita.

2.6.2. TEMPLADO

El templado consiste en calentar el acero a una temperatura en donde la ferrita se transforma en austenita y mediante un enfriamiento rápido hasta una temperatura menor o igual a 200°C, la austenita se transforma en martensita obteniendo un endurecimiento total del acero proporcionándole mayor dureza y resistencia mecánica. Posterior a este proceso se realiza comúnmente un revenido con el fin de aliviar las tensiones internas formadas durante el temple.

A más de mejorar las propiedades mecánicas, se da la transformación alotrópica del hierro que pasa de una estructura cristalina FCC, a una estructura tetragonal centrada en las caras (TCC) característica principal de la martensita debido a la deformación que se produce en la red cristalina por la inserción de los átomos de carbono. Por esta razón se debe el aumento de la dureza en el acero precisamente a la tensión que se produce en los cristales.

2.6.3. CEMENTADO

El cementado es un proceso de endurecimiento superficial que le proporciona al acero diferentes propiedades mecánicas a más de la dureza superficial. Las cantidades de carbono depositadas en la superficie otorgará al acero mayor resistencia a la compresión y resistencia a la fatiga mientras que el núcleo proporcionará dureza y tenacidad. Este proceso se realiza para aleaciones de acero de bajo contenido de carbono menores al 0.3% en peso en un ambiente líquido o gaseoso a una temperatura adecuada logrando en la superficie un constituyente martensítico o perlítico muy duro después de un proceso de

enfriamiento, mientras que, en el interior del material puede tener un constituyente perlítico, bainítico, martensítico o incluso ferrítico dependiendo del contenido de carbono depositado. Para ello, el acero se calienta a una temperatura controlada en un rango de 850°C y 950°C aunque también se la puede llevar a temperaturas entre 790°C a 1095°C dependiendo de la dureza superficial al que se quiere llegar. Por lo general la dureza que se obtiene al realizar este proceso está comprendida entre 57 a 62 HRC en la superficie y 25 a 45 HRC en el núcleo. Luego de realizar el proceso de endurecimiento, se realiza un templeado a una temperatura comprendida entre 120°C a 180°C con el fin de mejorar la tenacidad y prevenir posibles cambios en las propiedades mecánicas.

2.7. NORMAS BS.968, ASTM, ISO, INEN, AISI, AWS

Para llevar a cabo un correcto análisis sobre el material del que están hechos los componentes que serán analizadas en este documento, se utilizará la información necesaria de diferentes normas para seguir una serie de procedimientos en cada uno de los ensayos mecánicos y metalográficos para lograr buenos resultados. Existen muchas normas que pueden ser utilizadas como por ejemplo la norma ASTM, ISO, INEN, AISI, AWS, en el cual cada una de ellas cumple con los procedimientos necesarios para el análisis de un material, sin embargo, existen otros aspectos a tomar en cuenta para la correcta selección de una determinada norma.

La American Society of Testing and Materials conocido por sus siglas ASTM, es una organización reconocida a nivel mundial constituida por más de 30000 miembros en 135 países que desarrollan una amplia gama de normas internacionales aplicadas en diferentes áreas de la industria como la química, automovilística, construcción, energía, materiales, petróleos entre otras. Por su alta calidad técnica y relevancia en el mercado, las normas ASTM se utilizan para investigación y desarrollo, pruebas de productos y sistemas de calidad.

La Organización Internacional de Estandarización con sus siglas en inglés ISO, es una organización que está conformada por miembros de 165 países cuyo objetivo principal es desarrollar estándares universales de calidad de los procesos permitiendo alcanzar, mantener y mejorar la calidad de los productos y servicios enfocándose a satisfacer las necesidades del cliente. La norma ISO también posee normas técnicas referentes a ensayos mecánicos y metalográficos pero su contenido no es tan detallado como la ASTM.

La norma INEN es una organización del sector público que se encuentra al servicio de la industria ecuatoriana el cual provee de normas técnicas para elevar la calidad de los productos y mejorar la competitividad a nivel nacional e internacional. En lo referente a los ensayos mecánicos y metalográficos, el INEN tiene su propia oficina de investigación para el estudio los materiales cuyos procedimientos se basa en normas internacionales como la ASTM, ISO entre las más importantes.

La American Iron and Steel Institute conocida como AISI, tienen como objetivo principal la clasificación de los aceros y aleaciones de materiales no ferrosos bajo un sistema de cuatro dígitos. Esta organización con sede en Estados Unidos, sirve de portavoz para la industria de los diferentes avances que se da en el acero en cuanto a su aplicación y tecnología de fabricación.

La AWS (American Welding Society), es una organización que tiene como objetivo principal proveer de nuevas tecnologías y aplicaciones en la industria de la soldadura a nivel mundial. La norma AWS es reconocida a nivel mundial ya que ofrece una serie de programas de certificación para la identificación del personal calificado en soldadura además de la elaboración de códigos y normas que detallan procedimientos que deben ser tomados en cuenta durante un proceso de soldadura.

Existe un caso particular sobre la norma inglesa BS.968 que a inicios de la segunda guerra mundial fue utilizada para la construcción de diferentes componentes del puente Bailey en el que se menciona principalmente la

composición química que debe tener el acero y las propiedades mecánicas como carga a la rotura y límites elásticos de diferentes elementos estructurales. En los años de 1943 y 1962, se realizaron cambios en cuanto a los requerimientos que debe tener el acero referente al porcentaje en peso de diferentes aleaciones que forman parte de la composición química del material, también se realizaron cambios en cuanto a las propiedades mecánicas como la resistencia la fluencia. En 1968, la norma BS. 968 es reemplazado por la norma BS.4360 que se aplica para aceros, soldabilidad, perfiles metálicos, materiales laminados, composición química, defectos en la superficie, tolerancias dimensionales de forma, longitud, anchura, espesor, selección de muestras para ensayos mecánicos para obtener resultados de resistencia a la tracción, límite elástico, resistencia al impacto, elongación.

Posteriormente esta norma es reemplazado por diferentes normas como la BS EN 10029.29: 1991 que corresponde a los requisitos necesarios para tolerancias de laminado en caliente para aceros y aceros inoxidable con espesores comprendidos entre 3 y 250 mm, ancho nominal mayores a 600 mm y especificaciones mínimas de esfuerzo de fluencia menores 700 N/mm^2 que en el 2010 es reemplazada por la misma denominación en la versión 2010.

Otras normas que reemplazan a la norma BS.4360 es la norma BS 7668: 1994 cuya especificación hace énfasis a la soldadura de aceros estructurales, composición química, ensayos mecánicos, soldabilidad. Esta norma es reemplazada por la versión del 2004.

Las normas BS EN 10113-1:1993, BS EN 10113-2:1993, BS EN 10113-3:1993 también reemplazan a la norma BS. 4360 en el cual se describe para realizar ensayos mecánicos de tracción e impacto, composición química, selección de muestras para ensayos y soldabilidad.

En el año del 2004, las normas BS EN 10113:1993 son reemplazadas por las normas BS EN 10025:2004 que en la actualidad se encuentra en vigencia.

2.8. SELECCIÓN DE MATERIALES

La selección de materiales forma parte de un procedimiento en el cual, el diseñador toma la oportuna decisión de seleccionar el tipo de material con

características específicas tanto mecánicas como metalográficas para someterlo a distintos procesos de manufactura o para cualquier diseño estructural que se desee realizar para satisfacer alguna necesidad o problema.

Se conoce que el acero es una aleación de hierro y carbono que se la obtiene a partir de dos materias primas fundamentales como son el arrabio o como la chatarra metálica y dependiendo del tipo de materia prima, se determina la técnica a utilizar. Comúnmente se utiliza la chatarra metálica ya que a más de ser un proceso ecológico, se utilizan hornos de arco eléctrico que no requieren de combustible para su funcionamiento y permite obtener un acero de mejor calidad. La chatarra se coloca en el horno junto con agentes reactivos como la cal en donde se aplica una corriente eléctrica para fundir completamente los materiales y por una reacción química, se elimina el contenido de azufre pasando a la escoria en forma de sulfuro de calcio. Una vez que se haya fundido completamente todos los elementos, se adicionan ferroaleaciones que contienen los elementos de aleación necesarios para el acero y cumplir con las especificaciones de los proveedores.

EL acero se puede clasificar en base a la composición química ya sea por el contenido de carbono o por elementos de aleación contenidas en el material. De acuerdo al contenido de carbono comúnmente se lo clasifica en aceros de bajo, medio y alto contenido de carbono, mientras que, los aceros aleados se clasifican de acuerdo al elemento principal presente, por ejemplo, se tienen aceros a base de níquel o aceros a base de cromo que son elementos característicos de los aceros inoxidable. Se clasifican también de acuerdo al trabajo mecánico ya sean laminados en caliente o laminados en frío o también de acuerdo a la forma del producto encontrándose en el mercado como barras, tubos, chapas o perfiles estructurales.

La designación que se le da por las características que presenta, el acero puede clasificarse de acuerdo al tipo, grado y clase refiriéndose respectivamente a prácticas de desoxidación, composición química y el nivel de resistencia que tenga el acero. La norma AISI – SAE realiza una clasificación

de acuerdo al contenido de carbono y al elemento de aleación más representativo que forman parte de la composición química basándose en un sistema de nominación ya sea por un número representativo, letra o símbolo para referirse a un acero en particular.

Los aceros al carbono son representados en varios grupos en base al contenido de manganeso máximo del 1%, resultados o resultados y refosforados bajo una designación XYZW. Para los dígitos (XY) se le asigna el número 10 indicando la cantidad de manganeso presente, mientras que, los dígitos (ZW) representará el contenido de carbono multiplicado por 100 por ejemplo, un acero 1010 tendrá un contenido de carbono del 0,10% en peso con un contenido de manganeso entre 0.3 a 0.6%. Por otra parte, los aceros con manganeso entre 1 al 1.65% se los agrupa con la numeración 15 teniendo como resultado para un acero 1513, un contenido de carbono del 0.13% con un porcentaje de manganeso entre 1.10 a 1.40%. Estos aceros se los utiliza para productos semiterminados por forja, barras laminadas en frío y en caliente, alambón, tubos con y sin costura, perfiles estructurales y chapas de acero.

Los aceros con designación 11 y 12 son aceros al carbono resultados y aceros al carbono resultados y refosforados respectivamente siguiendo con la designación antes especificada. Estos aceros son utilizados específicamente para materiales que requieran mejorar la maquinabilidad.

Las aleaciones de acero son materiales que tienen una mayor cantidad de aleaciones como el manganeso, silicio, cobre, molibdeno en comparación a los aceros al carbono permitiendo mejorar las propiedades mecánicas, procesos de fabricación entre otras características.

Estos aceros utilizan la misma designación antes señalada clasificándolos de acuerdo al elemento de aleación más representativo cuyos primeros dos dígitos (XY) representan la aleación a la que pertenece, mientras que, los siguientes dos dígitos indicarán el contenido de carbono multiplicado por 100 como por ejemplo, el acero bajo la designación 1330 representa un material a base de manganeso máximo del 1,75% en peso con un contenido de carbono del

0,30% en peso, de igual manera para un acero con designación 4340 representará a un material a base de níquel-cromo-molibdeno con un contenido de carbono del 0,40% en peso. Para aceros que presentan alta resistencia con baja aleación, son designados bajo un sistema de tres dígitos XYZ cuyo primer dígito (X) hace referencia a un acero de alta resistencia y baja aleación, mientras que, los siguientes dígitos (YZ) indicarán la resistencia mínima a la fluencia.

La norma ASTM en cambio presenta una completa especificación de los materiales para diferentes propósitos, es decir, a más de la incorporación en algunos casos de la norma AISI – SAE para indicar la composición química, se indican valores de resistencia mecánica, requerimientos de fabricación y aplicabilidad. Estos materiales pueden ser identificados bajo una representación que hace la misma norma, por ejemplo, para materiales ferrosos se asigna con una letra A que va a continuación de la norma es decir, para un acero al carbono estructural la norma lo especifica como un acero ASTM A 36.

Refiriéndose a los elementos estructurales que presenta el panel y que se analizarán en este documento, la norma ASTM específica para placas y perfiles estructurales diferentes tipos de acero tales como el A 36, A 283, A 284, A 529, A 573, A 678 que son aceros al carbono, mientras que, para aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) se tiene un acero A 242, A 440, A 441, A 514, A 572, A 588, A 633, A 656, A 699 y A 710.

De igual manera para poder seleccionar correctamente el material con el que es elaborado el bulón del panel, la norma ASTM A 29 provee de información necesaria acerca de los requerimientos generales para los aceros al carbono y aleaciones, productos forjados en frío y en caliente de barras de acero en la que incorpora la designación de composición química que hace la norma AISI – SAE para barras de acero al carbono y aceros aleados.

Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content	Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content	Numerals and digits	Type of steel and nominal alloy content
Carbon Steels		Nickel-Chromium-Molybdenum Steels		Chromium Steels	
10XX(a)	Plain carbon (Mn 1.00% max)	43XX	Ni 1.82; Cr 0.50 and 0.80; Mo 0.25	50XXX	Cr 0.50
11XX	Reulfurized	43BVXX	Ni 1.82; Cr 0.50; Mo 0.12 and 0.25; V 0.03 min	51XXX	Cr 1.02
12XX	Reulfurized and rephosphorized	47XX	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 and 0.35	52XXX	Cr 1.45
15XX	Plain carbon (max Mn range—1.00 to 1.65%)	81XX	Ni 0.30; Cr 0.40; Mo 0.12	Chromium-Vanadium Steels	
Manganese Steels		86XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20	61XX	Cr 0.60, 0.80 and 0.95; V 0.10 and 0.15 min
13XX	Mn 1.75	87XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.25	Tungsten-Chromium Steel	
Nickel Steels		88XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35	72XX	W 1.75; Cr 0.75
23XX	Ni 3.50	93XX	Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12	Silicon-Manganese Steels	
25XX	Ni 5.00	94XX	Ni 0.40; Cr 0.40; Mo 0.12	92XX	Si 1.40 and 2.00; Mn 0.65, 0.82 and 0.95; Cr 0.00 and 0.55
Nickel-Chromium Steels		97XX	Ni 0.55; Cr 0.20; Mo 0.20	High-Strength Low-Alloy Steels	
31XX	Ni 1.25; Cr 0.65 and 0.80	98XX	Ni 1.00; Cr 0.80; Mo 0.25	9XX	Various SAE grades
32XX	Ni 1.75; Cr 1.07	Nickel-Molybdenum Steels		Boron Steels	
33XX	Ni 3.50; Cr 1.50 and 1.57	46XX	Ni 0.85 and 1.82; Mo 0.20 and 0.25	XXBXX	B denotes boron steel
34XX	Ni 3.00; Cr 0.77	48XX	Ni 3.50; Mo 0.25	Leaded Steels	
Molybdenum Steels		Chromium Steels		XXLXX	L denotes leaded steel
40XX	Mo 0.20 and 0.25	50XX	Cr 0.27, 0.40, 0.50 and 0.65		
44XX	Mo 0.40 and 0.52	51XX	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 and 1.05		
Chromium-Molybdenum Steels					
41XX	Cr 0.50, 0.60 and 0.85; Mo 0.12, 0.20, 0.25 and 0.30				

(a) XX in the last two digits of these designations indicates that the carbon content (in hundredths of a percent) is to be inserted.

Figura 2.22 Sistema de designación bajo la norma AISI – SAE

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons and Steels Volume 1. 9ed. Estados Unidos. 1978

CAPÍTULO 3

PROCESO DE SELECCIÓN DE PROBETAS Y EXTRACCIÓN

3.1. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3.1.1. EQUIPOS Y MATERIALES

Para un análisis estructural del panel, se utilizaron diferentes equipos del laboratorio de Mecánica de Materiales y otros materiales para poder determinar el comportamiento que presenta el panel a la deflexión del cordón superior aplicando una determinada carga. Los equipos utilizados para el respectivo ensayo son los siguientes:

Comparador de reloj

Marca: Fowler

Modelo: s/n

Apreciación: 0.001 pulg

Rango: 0 – 1”

Utilidad: Este instrumento de medición nos indica los desplazamientos en los ejes de coordenadas +Y y –Z del muñón perforado y de las cartelas perforadas del cordón inferior del panel Bailey.

Comparador de reloj

Marca: TecQuipment

Modelo: s/n

Apreciación: 0.1 mm

Rango: 0 – 26,5 mm

Utilidad: Indica el desplazamiento en el eje de coordenadas –Y en la parte central del cordón superior del panel.

Prensa hidráulica

Marca: s/n

Modelo: s/n

Serie: s/n

Capacidad: carga aproximada 10 Ton

Materiales

- Cable de acero de 5/8 de diámetro serie 6 X 7.
- Grilletes para reforzar el cable

3.1.2. VERIFICACIÓN DE LA PRENSA HIDRÁULICA

Los equipos de laboratorio deben ser verificados y calibrados para demostrar su buen funcionamiento cumpliendo con las especificaciones pertinentes a los ensayos y análisis, es decir, se deben realizar los respectivos controles para asegurar su buen funcionamiento. Normalmente los controles que se realizan en el laboratorio consiste en la calibración y/o verificación de los mismos de tal manera que, realizar un proceso de verificación a la prensa hidráulica, evidenciará de manera objetiva de que el equipo de laboratorio satisfaga los requisitos de carga para poder aplicarlo en el análisis de deflexión de viga del panel.

La verificación de la prensa hidráulica se da aplicando una carga estática en la máquina universal de ensayos del laboratorio de Mecánica de Materiales en el cual, se hace un aumento progresivo de la fuerza hasta llegar a una lectura de 9000 kg. Durante este proceso, se toman 10 lecturas del manómetro empezando con una presión de 500 Psi hasta llegar a una lectura de 3500 Psi con aumentos de 500 y en cada unas de las mismas, se da la lectura respectiva de la fuerza que indica el dial de la máquina universal de ensayos. A partir de los 3500 Psi, se procede a la lectura de los datos que indica el dial del manómetro de la prensa hidráulica cuando en la máquina universal de pruebas se aplica una carga de 8000 Kg, 8500 Kg y 9000 Kg. Este último procedimiento se realiza con el fin de conseguir una lectura más precisa del manómetro de la

prensa hidráulica para saber hasta dónde se puede aplicar la carga cuando se deba realizar el ensayo de flexión en el panel Bailey. Los datos recolectados a partir de este procedimiento son los siguientes:

Tabla 3.1 Relación Presión Vs. Fuerza

Presión (Psi)	Fuerza (Kg)
500	1270
1000	2270
1500	3270
2000	4340
2500	5420
3000	6470
3500	7490
3750	8000
3900	8500
4200	9000

Fuente: Propia

Los datos de este ensayo determinan la tendencia que tiene la fuerza aplicada por la máquina universal de ensayos en función de la presión que ejerce la prensa hidráulica mostrados en la siguiente figura:

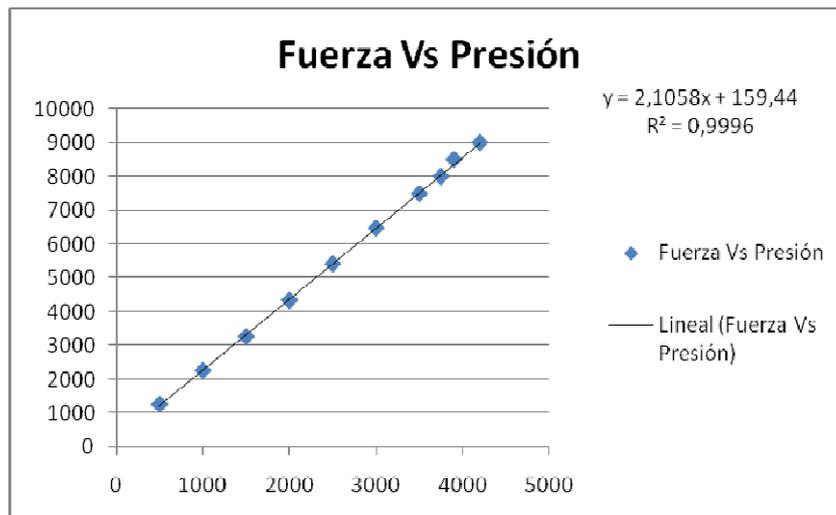


Figura 3.1 Representación gráfica de Presión Vs. Fuerza de la prensa hidráulica

Fuente: Propia

Al graficar los datos obtenidos en laboratorio, se muestra claramente una tendencia lineal que se ajusta a la forma $Y = aX + b$ de manera que se realizará un ajuste de la curva por una regresión lineal por mínimos cuadrados para obtener los valores tanto de “a” como de “b” de la siguiente manera:

$$a = \frac{n \sum (XY) - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad 3.1$$

$$b = \frac{\sum X^2 \sum Y - \sum X \sum XY}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad 3.2$$

Donde:

Y = la fuerza real ejercida sobre la prensa hidráulica

X = la presión que da lectura el manómetro de la prensa hidráulica.

Tabla 3.2 Cálculo de resultados

	Presión (Psi)	Fuerza (Kg)	XY	X²	Y²
	500	1270	635000	250000	1612900
	1000	2270	2270000	1000000	5152900
	1500	3270	4905000	2250000	10692900
	2000	4340	8680000	4000000	18835600
	2500	5420	13550000	6250000	29376400
	3000	6470	19410000	9000000	41860900
	3500	7490	26215000	12250000	56100100
	3750	8000	30000000	14062500	64000000
	3900	8500	33150000	15210000	72250000
	4200	9000	37800000	17640000	81000000
Σ	25850	56030	176615000	81912500	380881700

Fuente: Propia

Los valores correspondientes a las ecuaciones 3.1 y 3.2 son 2,1058 y 159,4382 de “a” y “b” respectivamente de tal forma que la ecuación que más se ajusta a la curva es de la forma $Y = 2,1058X + 159,4382$. Si se reemplaza en la ecuación de la curva el valor de 5000 (Psi) siendo la máxima lectura que se puede obtener del manómetro, se tiene un valor matemático de la máxima

capacidad de carga que tendría la prensa hidráulica con un valor de $Y = 10688,44$ lo que aproximadamente representa 10000 Kg (10 Ton).

Para saber el ajuste de la distribución de los puntos si es o no el adecuado, el coeficiente de correlación lineal indica tal característica tomando en cuenta que mientras más se aproxime a la unidad, el ajuste de los puntos es más representativo

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] * [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} = 0,9998 \quad 3.3$$

3.1.3. CÁLCULO DEL CABLE DE ACERO

Para aplicar una fuerza de 9000 Kg, se coloca en la parte superior del cordón del panel una prensa hidráulica tal como se indica en la figura 3.2. La fuerza ejercida por la prensa, se transmitirá a través de un cable que pasará por la parte superior del vástago de la prensa y a su vez por las perforaciones tanto de las cartelas como del muñón del cordón inferior del panel formando dos puntos más de contacto donde se ejercerá la fuerza. La carga aplicada por la prensa hidráulica se transmitirá al cable en los tres puntos antes ya especificados por lo que es indispensable determinar el cable apropiado para realizar este ensayo, de tal forma que se establece el diámetro como única variable a calcular para que el mismo pueda resistir una carga antes ya mencionada sobre el cordón.



Figura 3.2 Ensayo de flexión del cordón superior del panel tipo Bailey

Fuente: Propia

Para este análisis se procede a realizar un estudio estático en la sección donde se realiza la fuerza generada por la prensa hidráulica en el centro del panel cuyo diagrama de cuerpo libre se muestra de la siguiente manera:

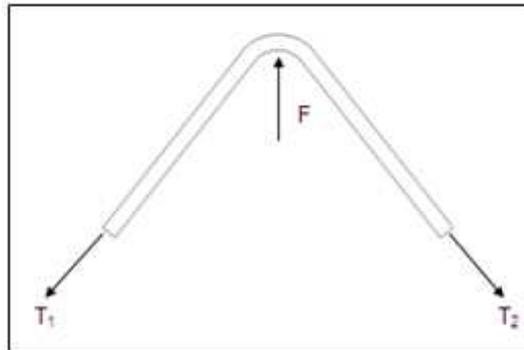


Figura 3.3 Análisis estático del cable

Fuente: Propia

Datos:

$$F = 9000 \text{ kg}$$

$$\alpha = 52^\circ$$

Resolución:

$$\sum F_y = 0$$

$$F = T_{y1} + T_{y2}$$

$$F = T_1 \cdot \sin(52^\circ) + T_1 \cdot \sin(52^\circ) \quad \text{siendo } T_1 = T_2 \text{ al tratarse del mismo cable}$$

$$F = 2 \cdot T_1 \cdot \sin(52^\circ)$$

$$F = 4 \cdot T_1 \cdot \sin(52^\circ) \quad \text{se multiplica por dos}$$

$$T_1 = 2855.29 \text{ kg}$$

$$T_{y1} = 2250 \text{ kg}$$

$$T_{x1} = 1757.89 \text{ kg}$$

De acuerdo a la ecuación del factor de seguridad que debe tener el cable:

$$n_s = \sigma_{perm} / \sigma_t \quad 3.4$$

Donde:

σ_{perm} = esfuerzo permisible del cable

σ_t = esfuerzo de tensión del cable

El cable a seleccionar es un cable de acero arado con clasificación 6x7 con una resistencia a la tensión de 88 kpsi que tiene como características alta resistencia a la abrasión y al mismo tiempo es bastante flexible. Esta última es de mucha importancia ya que el cable debe pasar por las perforaciones tanto del muñón como de las cartelas puntos donde se produce la fuerza por acción de la tensión del cable. El factor de seguridad a considerar para el cable es un valor equivalente a 2 debido a que solamente se ocupará para este ensayo.

CABLE	PESO POR PIE lb	DIÁMETRO MÍNIMO DE POLEA in	TAMAÑOS ESTÁNDARES d, in	MATERIAL	TAMAÑO DE ALAMBRES EXTERIORES	MÓDULO DE ELASTICIDAD* Mod	RESISTENCIA T kpsi
6 x 7 de arrastre	1.50d ²	42d	1-1½	Acero monitor	d#9	14	100
				Acero de arado	d#9	14	88
6 x 19 de izaje normal	1.60d ²	26d-34d	1-2½	Acero de arado dúctil	d#13	12	76
				Acero monitor	d#13-d#16	12	106
				Acero de arado	d#13-d#16	12	93
6 x 37, flexible especial	1.55d ²	18d	1-3½	Acero de arado dúctil	d#13-d#16	12	80
				Acero monitor	d#22	11	100
8 x 19, flexible extra	1.45d ²	21d-26d	1-1½	Acero de arado	d#22	11	88
				Acero monitor	d#15-d#19	10	92
7 x 7, para avión	1.70d ²	—	½-1	Acero de arado	d#15-d#19	10	80
				Acero resistente a la corrosión	—	—	124
7 x 9, para avión	1.75d ²	—	1-1½	Acero al carbono	—	—	124
				Acero resistente a la corrosión	—	—	135
De 19 alambres, para avión	2.15d ²	—	½-¾	Acero al carbono	—	—	143
				Acero resistente a la corrosión	—	—	165
				Acero al carbono	—	—	165

Figura 3.4 Información de cables metálicos

Fuente: Hamrock, Bernard. Schmid, Steven. Jacobson, Bo. Elementos de Máquinas. Primera ed. Editorial McGraw-Hill.1999. México

$$\sigma_t = 40000 / 2$$

$$\sigma_t = 20000 \text{ [kg/pulg}^2\text{]}$$

El esfuerzo de tensión del cable viene dado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = F_t/A_m \tag{3.5}$$

Donde:

F_t = Fuerza que soporta el cable

A_m = área de la sección transversal para cables estándar de izaje y de arrastre con valor igual a $0.38d^2$

Reemplazando los valores en la ecuación 3.5 se tiene:

$$20000 = 2250/0.38d^2$$

$$d = 0.544 \text{ pulg.} = 13,82 \text{ mm.}$$

De acuerdo con el resultado obtenido y tomando en cuenta la disponibilidad que hay en el mercado, se selecciona un cable de acero arado con las siguientes características técnicas:

PESO APROXIMADO EN LIBRAS / PIES							RESISTENCIA DE ROTURA - TONELADAS DE 2.000 LIBRAS															
DIAM. PULG.	6x7		6x19		6x36		8x19		8x19		18x7		6x7		6x19		6x36		8x19		18x7	
	6x36		6x36		19x7		IPS		EIPS		IPS		IPS		IPS		EIPS		IPS		EIPS	
	F.C.	F.C.	IWRC	F.C.	IWRC	-	F.C.	GAL V F.C.	F.C.	IWRC	F.C.	IWRC	GAL V F.C.	GAL V IWRC	F.C.	IWRC	IWRC	-	-	-	-	
3/16	.056	.059	.065				1,50	1,35	1,70			1,55	1,67	1,40	1,50							
1/4	.094	.10	.11	.098		108	2,64	2,38	3,02	3,40	2,74	2,94	2,47	2,65	2,35					2,51	2,77	
5/16	.15	.16	.18	.15	.18	169	4,10	3,69	4,60	5,27	4,26	4,58	3,83	4,12	3,65					3,90	4,30	
3/8	.21	.24	.26	.22	.26	24	5,86	5,27	6,71	7,55	6,10	6,56	5,49	5,90	5,24	5,76	6,63	5,59		5,59	6,15	
7/16	.29	.32	.35	.30	.36	33	7,93	7,14	9,09	10,2	8,27	8,89	7,44	8,09	7,09	7,80	8,97	7,58		7,58	8,33	
1/2	.38	.42	.46	.39	.47	43	10,3	9,27	11,8	13,3	10,7	11,5	9,63	10,3	9,23	10,1	11,6	9,85		9,85	10,8	
9/16	.48	.53	.58	.50	.60	55	13,0	11,7	14,9	16,8	13,5	14,5	12,2	13,0	11,6	12,8	14,7	12,4		12,4	13,6	
5/8	.59	.66	.72	.61	.73	68	15,9	14,3	18,3	20,6	16,7	17,9	15,0	16,1	14,3	15,7	18,1	15,3		15,3	16,8	
3/4	.84	.94	1,04	.88	1,06	97	22,7	20,4	26,2	29,4	23,8	26,6	21,4	23,0	20,5	22,5	25,9	21,8		21,8	24,0	
7/8	1,15	1,29	1,42	1,20	1,44	1,32	30,7	27,6	35,4	39,8	32,2	34,6	29,0	31,1	27,7	30,5	35,0	29,5		29,5	32,5	

Figura 3.5 Propiedades físicas y mecánicas del cable de acero

Fuente: <http://www.induferro.com/28.html>

Denominación Americana	Resistencia a Tracción (Kg / mm ²)	Características Técnicas
PS (Plow Steel)	160 / 180 (1670 MPa)	Resistencia aproximada a la tracción de 160-180 kg/mm ² . Usado en la fabricación de cables donde, al uso para el cual se destina, es más importante la flexibilidad de que la resistencia a la tracción.
IPS (Improved Plow Steel)	180/200 (1770 MPa)	Resistencia a la tracción de 180-200kg/mm ² . Condiciones mejores que las del tipo anterior, siendo indicado para la fabricación de cables donde se requieran las características de tracción, abrasión y torsión, simultáneamente.
EIPS (Extra Improved Plow Steel)	200 / 230 (1870 MPa)	Resistencia a la tracción aproximada de 200-230 kg/mm ² . Son los alambres más resistentes empleados en la fabricación de cables de acero, sin perjuicio de las características de tracción y flexión. No esta indicado para los cables que se destinan al uso en elevadores, puentes colgantes y perforación por percusión, donde son más apropiados los cables de menor resistencia a la tracción y menos rígidos.

Figura 3.6 Resistencia a la tracción para cables de acero arado (IPS)

Fuente: <http://www.induferro.com/28.html>

Seleccionado los equipos y materiales para el ensayo de flexión del cordón superior del panel, se aplica una carga de 9000 kg en el centro del cordón alcanzando los siguientes resultados finales:

Tabla 3.3 Lectura de desplazamientos en los tres puntos del panel

Desplazamientos puntuales del panel								
Muñón				Cordón Inferior	Cartelas			
Y(pulg)	Y(mm)	+Z(pulg)	+Z(mm)	-Y (mm)	Y(pulg)	Y(mm)	-Z(pulg)	-Z(mm)
0,022	0,559	0,002	0,051	0,9	0,028	0,711	0,004	0,102
0,021	0,533	0,003	0,076	0,9	0,026	0,660	0,006	0,152
0,021	0,533	0,002	0,051	1	0,024	0,610	0,005	0,127
0,021	0,533	0,002	0,051	1	0,025	0,635	0,007	0,178
0,022	0,559	0,001	0,025	1	0,025	0,635	0,005	0,127
0,023	0,584	0,002	0,051	0,9	0,024	0,610	0,006	0,152
0,021	0,533	0,002	0,051	1	0,023	0,584	0,005	0,127
0,021	0,533	0,002	0,051	1	0,024	0,610	0,006	0,152
0,022	0,559	0,002	0,051	1	0,025	0,635	0,005	0,127
0,022	0,559	0,002	0,051	1	0,024	0,610	0,005	0,127
0,022	0,549	0,002	0,051	0,97	0,025	0,630	0,005	0,137

Fuente: Propia

3.2. SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS

La simulación del panel se lo realizará en un programa CAD para determinar el comportamiento que tiene bajo la aplicación de una fuerza determinada en la parte central del cordón superior. En las condiciones que se encuentra el panel, es necesario realizar dos simulaciones en Simulation Express de SolidWorks tanto para un panel sin ningún tipo de deformación y para un panel con una deformación plástica en uno de los cordones debido a que en la realidad, el panel presenta una deformación plástica en el cordón inferior por lo que los datos adquiridos anteriormente no serán los mismos que tener un panel sin

deformación. Los resultados de los desplazamientos que se obtengan de la simulación serán analizados y comparados con los resultados del ensayo.

3.2.1. PANEL DEFORMADO

En la figura 3.7 se aprecia la deformación plástica que presenta el panel en el cordón inferior de tal manera que, el estudio estático bajo las condiciones en que se encuentra, se aplica una carga de 9000 Kg en el sentido inverso a lo explicado anteriormente con un acero de similares características con una resistencia última a la tensión de 630 MPa y una resistencia a la fluencia de 530 MPa con el fin de determinar de manera más precisa el comportamiento que presenta el cordón superior cuando se aplica dicha carga.

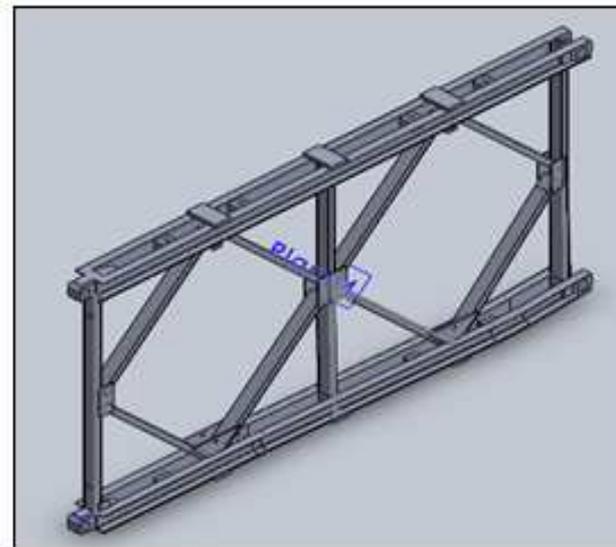


Figura 3.7 Panel Bailey deformado

Fuente: Propia

Esfuerzos

La figura 3.8 se muestra el resultado de los esfuerzos en N/mm^2 (MPa) con su respectiva representación en colores. El criterio para calcular los esfuerzos se basa en la teoría de la energía de distorsión máxima o también llamado de Von Mises para materiales dúctiles que son calculados en el software en base a un

análisis numérico que realiza una serie de iteraciones para tener un valor más exacto del resultado.

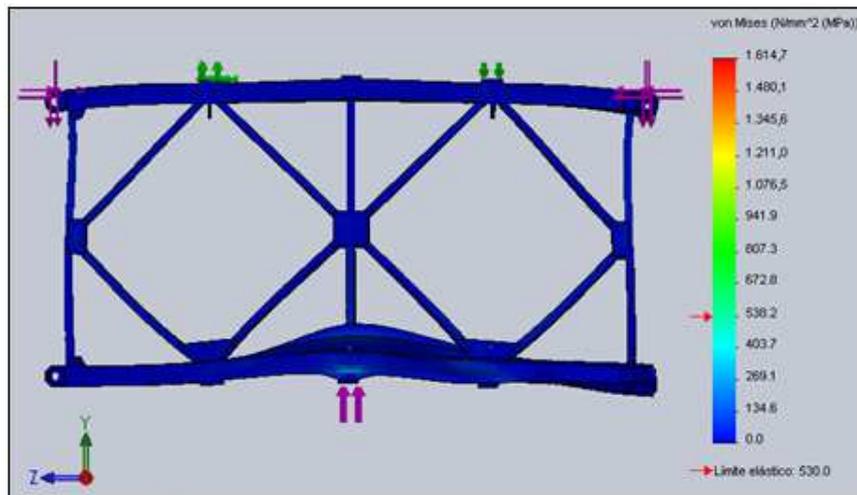


Figura 3.8 Resultado de esfuerzos del panel

Fuente: Propia

Deformación en Y

Tal como se mencionó anteriormente, se aprecia claramente que se aplica una carga de 9000Kg al cordón inferior del panel poniendo en consideración el comportamiento que presenta el cordón superior sin ningún tipo de deformación. En los extremos tanto del muñón como de las cartelas, se colocaron dos comparadores de reloj (uno en cada extremo del panel), para determinar la tendencia que tendría el cordón al aplicarse dicha carga. En la figura 3.9 se aprecia que el muñón y las cartelas se desplazan en el sentido positivo del eje de ordenadas (Y), aunque no de la misma manera como se espera, ya que la sección que más deformación plástica que presenta el panel, se encuentra próximo a las cartelas (parte izquierda de la figura 3.9). Con estos datos, se hace una comparación entre el ensayo realizado en laboratorio con lo realizado en Simulation Express en el cual se observa que en ambos ensayos, las cartelas tienen un mayor desplazamiento con relación al muñón, mientras que, el muñón aparentemente se desplaza de igual manera lo que pone en manifiesto que la simulación del panel se ajusta a la realidad.

Tabla 3.4 Comparación de desplazamientos en el eje Y

	Deformación Y (mm)		
	Muñón	Cartelas	Cordón Inferior
En laboratorio	0,549	0,630	(-)0,970
Simulation Express	0,464	0,645	(-)0,545
Error %	18,318	2,326	77,981

Fuente: Propia

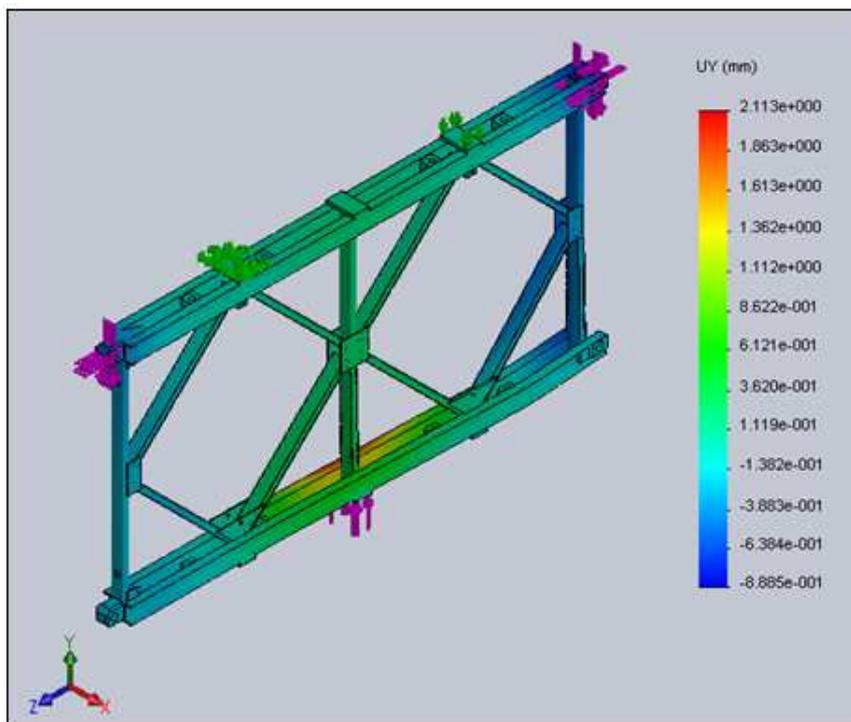


Figura 3.9 Resultado de la deformación del panel Bailey en el eje Y

Fuente: Propia

Deformación en Z

De igual manera, se utilizó dos comparadores de reloj (uno en cada extremo del panel) para determinar el desplazamiento del cordón superior en el eje Z. Con esta simulación y complementado con los datos anteriores, se ratifica la tendencia que tiene el cordón en su desplazamiento.

De la misma manera se hace una comparación de los resultados obtenidos tanto en Simulation Express como en el laboratorio.

Tabla 3.5 Comparación de desplazamientos en el eje Z

	Deformación Z (mm)	
	Muñón	Cartelas
En laboratorio	0,051	(-)0,137
Simulation Express	0,042	(-)0,149
Error %	21,428	8,054

Fuente: Propia

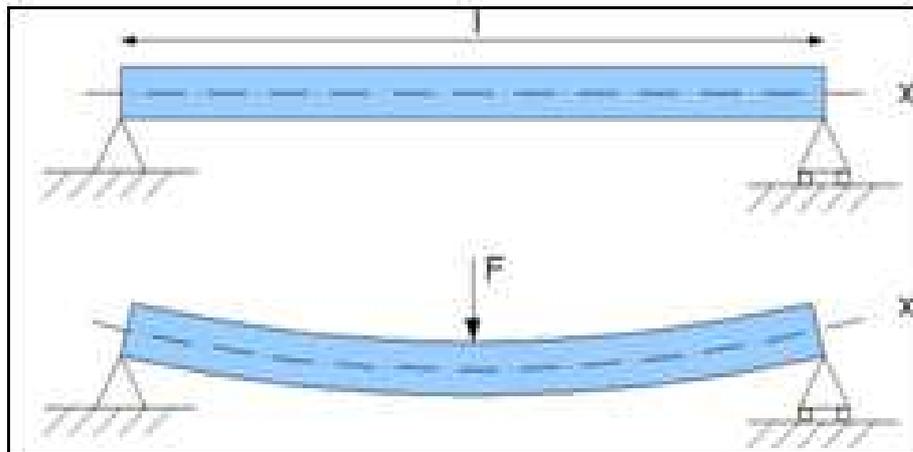


Figura 3.10 Deformación esperada con aplicación de una carga puntual

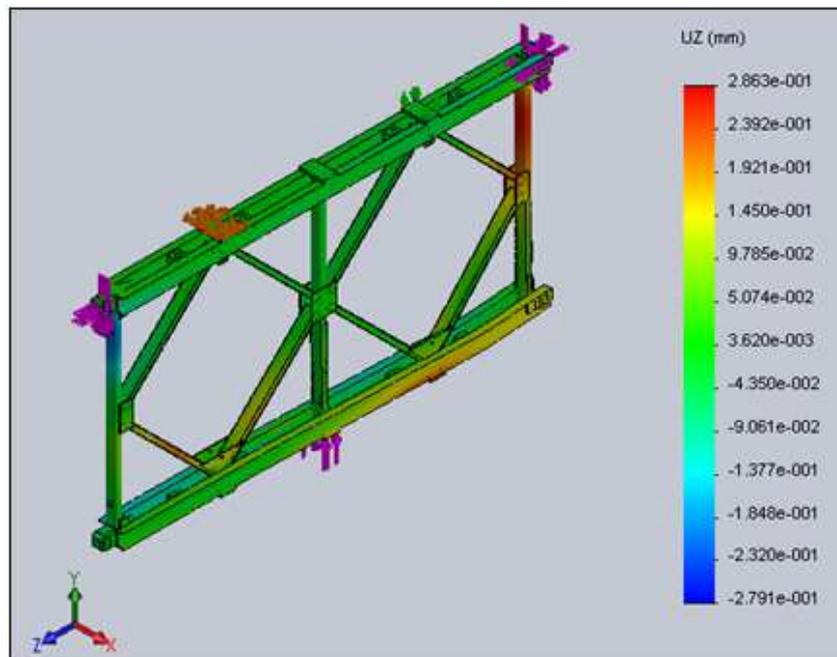


Figura 3.11 Resultado de la deformación del panel en el eje Z

Fuente: Propia

3.2.2. PANEL IDEAL

En la figura 3.12 se presenta la forma de un panel ideal en el cual se muestran en gráficas siguientes los resultados de los valores de desplazamiento en los ejes Y y Z, esfuerzos y factor de seguridad con su respectiva representación en colores para identificar valores críticos y en especial los valores que han sido tomadas laboratorio.



Figura 3.12 Panel Bailey ideal

Fuente: Propia

Esfuerzos

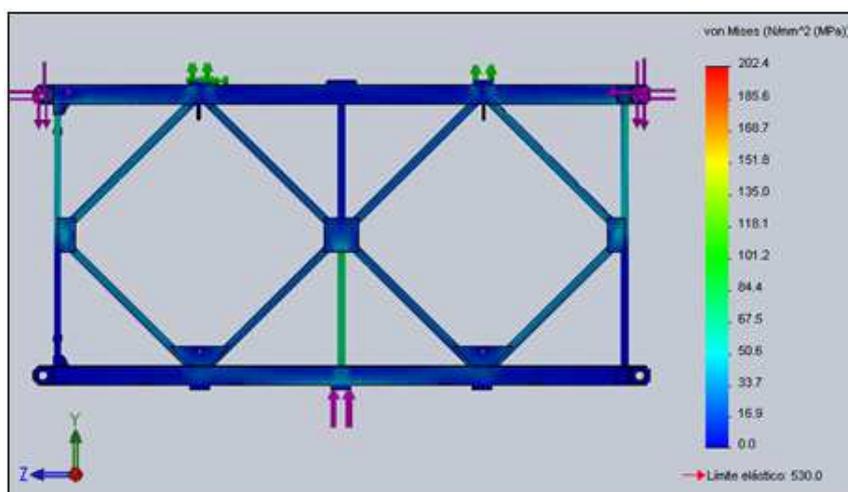


Figura 3.13 Resultado de esfuerzo de un panel ideal

Fuente: Propia

Deformación en Y

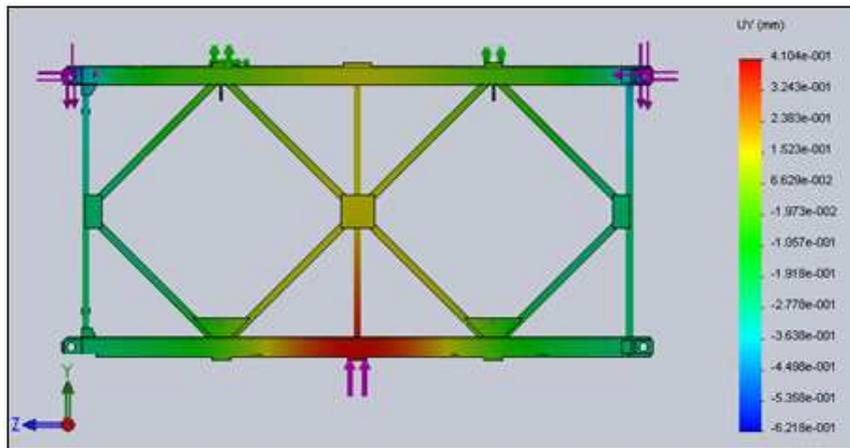


Figura 3.14 Resultado de la deformación de un panel ideal en el eje Y

Fuente: Propia

Tabla 3.6 Comparación de desplazamientos en el eje Y panel ideal

		Deformación Y (mm)		
		Muñón	Cartelas	Cordón Inferior
En laboratorio		0,549	0,630	(-)0,970
Simulation	Deformado	0,464	0,645	(-)0,545
Express	Ideal	0,492	0,560	(-)0,390

Fuente: Propia

Deformación en Z

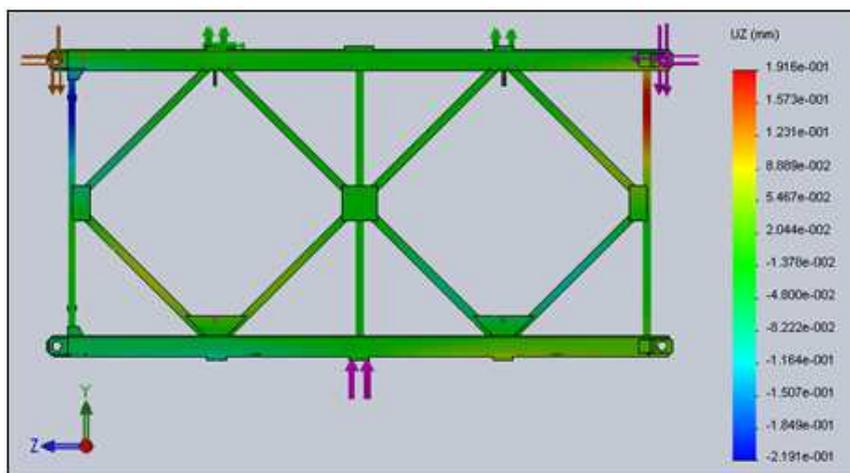


Figura 3.15 Resultado de la deformación de un panel ideal en el eje Z

Fuente: Propia

Tabla 3.7 Comparación de desplazamientos en el eje Z panel ideal

		Deformación Z (mm)	
		Muñón	Cartelas
En laboratorio		0,051	(-)0,137
Simulation	Deformado	0,042	(-)0,149
Express	Ideal	0,0535	(-)0,0739

Fuente: Propia

Factor de seguridad

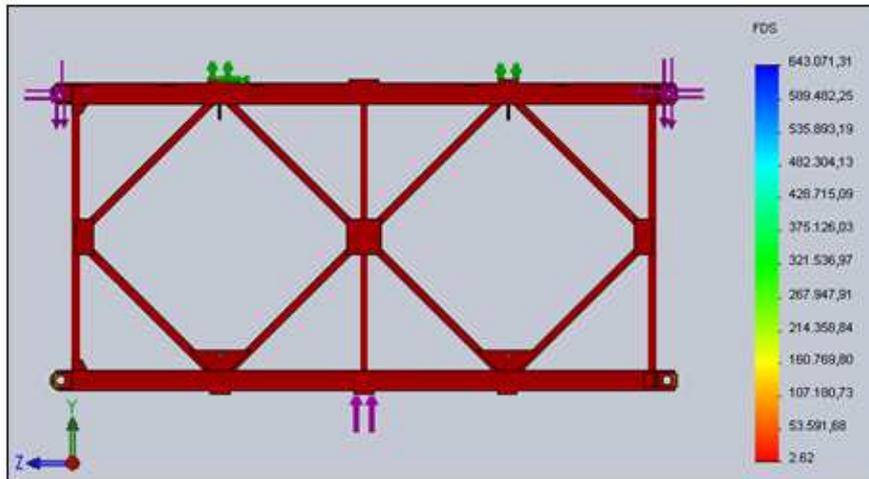


Figura 3.16 Resultado del factor de seguridad

Fuente: Propia

3.3. SELECCIÓN DE CORTE PARA PROBETAS

Seleccionar el tipo de corte para la extracción de probetas en diferentes elementos estructurales del panel tanto para ensayos mecánicos y metalográficos, se debe prestar atención el incremento de temperatura que se da durante el proceso de corte por la fricción existente entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte. Cuando se presentan altas temperaturas en esa zona de trabajo, los cristales del material ganan energía de tal manera que se reordenan los granos cristalinos tratando siempre de permanecer estables y como consecuencia de ese nuevo ordenamiento, se produce un cambio en las propiedades mecánicas y metalográficas del material.

Existen diferentes procesos para cortar un material ya sea por un corte térmico, aserrado manual, discos de corte u otros procesos que son muy utilizados en la industria metalmeccánica que tienen sus ventajas y desventajas. El laboratorio de Máquinas y Herramientas cuenta con diversos equipos de corte entre las que se destacan el oxicorte y el corte con plasma, sierras manuales y mecánicas, discos de corte de tal forma que, conocer estos procesos servirá para seleccionar el corte más adecuado.

3.3.1. CORTE CON GAS OXICOMBUSTIBLE

El corte con gas oxicombustible o también llamado oxicorte con sus siglas en ingles OFC, es un tipo de corte térmico que separa el material mediante una reacción química del oxígeno con el metal base a temperaturas elevadas cuya temperatura se mantiene por una flama de gas que arde en oxígeno.

El corte por este método se basa principalmente cuando el oxígeno en estado puro se combina con el hierro (oxidación del acero) cuando este se calienta hasta una temperatura de inflamación de 1100°C aproximadamente. Para lograr el oxicorte, se requiere precalentar el metal hasta una temperatura adecuada para comenzar el proceso. Cuando se llega a ese punto, se inyecta un chorro de oxígeno para combustionar el metal. Esta combustión es una reacción química exotérmica que genera calor el cual es aprovechado para continuar con el corte por fusión del metal. Con este método es posible cortar materiales de acero de bajo contenido de carbono, hierros fundidos y piezas de acero colado con un espesor máximo de 300 mm dejando una ranura entre 1.5 mm a 10 mm. Cuando existe la presencia de elementos aleantes en concentraciones altas, puede afectar la capacidad de corte del material; el manganeso, silicio, fósforo y azufre en concentraciones normales, afectan poco la capacidad de corte debido a que estos elementos funden a temperaturas menores que sus óxidos.

Los efectos en la metalurgia del acero por este método va desde la transformación de la perlita en carburos esferoizados en la ferrita hasta la

transformación de microconstituyentes más duros que depende mucho de ciertas variables como por ejemplo, la velocidad de corte, la velocidad de enfriamiento, el contenido de carbono y elementos de aleación presentes en el acero. La zona afectada por el calor con las siglas en inglés HAZ, puede llegar entre 0,8 a 6,4 mm de profundidad en planchas de acero con espesores entre 9,5 a 150 mm. La siguiente tabla muestra una aproximación en milímetros y en pulgadas sobre la zona afectada por el calor del material base.

Tabla 3.8 Aproximación de la HAZ por oxicorte

Espesor de la placa		HAZ	
mm	in	mm	In
Aceros de bajo contenido de carbono			
<13	<1/2	<0,8	<1/32
13	1/2	0,8	1/32
150	6	3,2	1/8
Aceros de alto contenido de carbono			
<13	<1/2	<0,8	<1/32
13	1/2	0,8 – 1,6	1/32 – 1/16
150	6	3,2 – 6,4	1/8 – 1/4

Fuente: ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering volume 6. 9ed.
Estados Unidos. 2004

3.3.2. CORTE POR ARCO DE PLASMA

El corte con plasma con sus siglas en inglés PAC, es un proceso de corte por arco restringido que utiliza una tobera calibrada para la constricción de un gas ionizado que se encuentra a muy alta temperatura para fundir un área localizada del metal base y que al mismo tiempo elimina el metal fundido por un chorro de gas que sale a alta velocidad. Una columna de plasma puede alcanzar temperaturas de hasta 27000°C en la zona más caliente y hasta 16650°C en la zona de corte. Los gases usados para crear plasma es un factor importante, no solo por los aspectos técnicos, sino por los costos de operación que eso representa. Entre los gases más usados en la industria se encuentra el

aire comprimido, oxígeno, nitrógeno y una combinación de argón e hidrógeno en una mezcla de 80% y 20% respectivamente. Los equipos que utilizan aire comprimido como gas, tienen un costo más barato, proporciona cortes más rápidos y pueden utilizarse en la mayoría de los materiales eléctricamente conductivos como el aluminio, latón, bronce, cobre, acero galvanizado, acero revestido o pintado.

Los efectos metalúrgicos que se obtiene por este método son menos dañinos a comparación de un proceso realizado por oxicorte, por ejemplo, si las profundidades de la zona afectada por el calor por un material que ha sido cortado por oxicorte son alrededor del 1,78 mm, en un proceso de corte por plasma la profundidad de la zona afectada por el calor será tan solo de 0,51mm, es decir, aproximadamente 3,5 veces menor la profundidad de la zona afectada por el calor en el metal base. Esta zona tendrá un efecto general en cuanto a la resistencia, resistencia a la corrosión y la susceptibilidad al agrietamiento de la superficie.

Claro está que las profundidades antes señaladas dependen mucho de varios factores que deben ser tomados en cuenta como la intensidad de corriente y la velocidad del plasma aunque de esta también depende de otros factores como el tipo de gas a utilizar, presión, corriente eléctrica, tamaño y forma del orificio y la distancia de la boquilla a la pieza de trabajo.

3.3.3. ELECTROEROSIÓN CON ALAMBRE

El corte por electroerosión con alambre, es un proceso de corte térmico que se obtiene por una descarga eléctrica entre un alambre de diámetro pequeño y la pieza de trabajo. Este método es conocido como corte por descarga eléctrica con alambre o corte por hilo con sus siglas en inglés EDWC que utiliza un alambre que actúa como un electrodo que puede ser de materiales como latón, cobre, tungsteno y molibdeno o alambres recubiertos con zinc o latón con un diámetro que varía entre 0,076 y 0,30 mm, La selección del diámetro del alambre dependerá de la anchura de ranura y del tipo de acabado que se

desea tener, por ejemplo, alambres con un diámetro de 0,30mm es utilizado para cortes de desbaste, mientras que, alambres con un diámetro de 0,20 mm son utilizados para cortes de acabado. El principio de funcionamiento de una máquina de cote por electroerosión es cuando un alambre suministrado por un carrete de alimentación, avanza lentamente y de forma continua cortando la pieza de trabajo y se conecta con un carrete de recuperación para lograr un corte constate. Los materiales que se pueden cortar por este método deben ser eléctricamente conductivos y deben tener un espesor máximo de 300 mm.

La zona afectada por el calor presenta una profundidad inferior a 0,03 mm lo cual hace que este proceso sea una muy buena alternativa a pesar de que es un corte electro – térmico además de que no produce cambios significativos sobre las propiedades mecánicas.

3.3.4. ASERRADO MANUAL Y MECÁNICA

El aserrado es un proceso de corte que utiliza una hoja metálica con dientes pequeños que remueve el material por cada recorrido de la herramienta. Esta hoja metálica se la conoce comúnmente como sierra que por lo general, presenta un espaciado entre dientes de 0,08 a 1,25 dientes por mm lo que en pulgadas representa entre 2 a 32 dientes. El número de dientes de la sierra dependerá del espesor del material que se vaya a cortar ya que como regla general, deben estar en contacto por lo menos 2 o 3 dientes para evitar que se enganchen y se rompan. Para materiales que tienen espesores relativamente delgados, se deberá utilizar una sierra con dientes más finos y de mayor número por unidad de longitud.

En cuanto a los efectos metalúrgicos en el material, la hoja de corte presenta un triscado en los dientes, es decir, que los dientes se encuentran unos a la derecha y otros hacia la izquierda como se muestra en la figura 3.17 y no en forma recta. Esta disposición de los dientes hace que la sierra proporcione una ranura suficientemente ancha para que la hoja se mueva libremente dentro de

la pieza de trabajo sin pegarse y sin generar tanta resistencia a la fricción reduciendo así el calor que se genera durante el proceso.

Para un aserrado mecánico, las hojas de corte mecánicas tienen un espesor de 1,2 mm a 2,5 mm con una longitud máxima de 610 mm que trabajan con velocidades de corte de vaivén en un rango de 30 a 180 por minuto. Al utilizar este método de corte mecánico, es importante el uso de un refrigerante a base de aceite y demás aditivos mezclados en agua para disipar el calor que genera la fricción entre la pieza de trabajo y la hoja de corte y así evitar cambios en la estructura metalográfica del material.

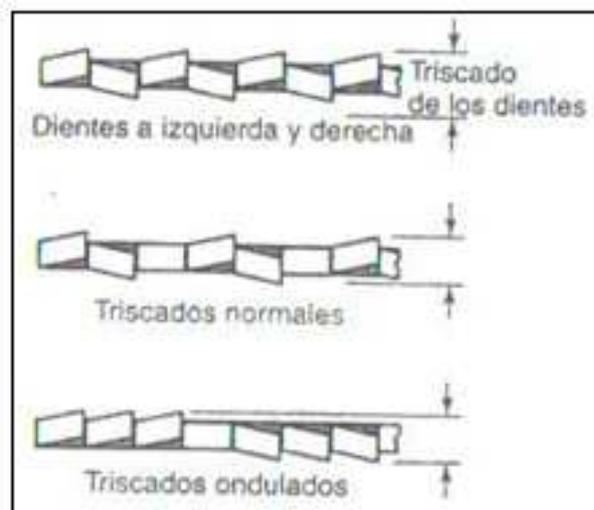


Figura 3.17 Triscado de los dientes de una sierra de corte

Fuente: Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5ed. Pearson Education. Mexico. 2008

3.3.5. SELECCIÓN DE CORTE

A continuación se seleccionará el tipo de corte a realizarse en el panel con una matriz de decisión comparándolos por separado ambos procesos, por una parte se hará un análisis de un proceso de corte térmico y por otra parte se hará un análisis de un proceso de corte por aserrado en base a los siguientes parámetros mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 3.9 Matriz de decisión selección de corte

Parámetros	Corte térmico			Aserrado	
	OFC	PAC	EDWC	Manual	Mecánico
Velocidad operación	3	5	1	1	5
HAZ	1	3	5	5	5
Calidad del corte	1	3	5	3	3
Costo operación	3	5	1	1	3
Disponibilidad	5	3	1	5	3
Total	13	19	13	15	19

Fuente: Propia

Cada uno de los parámetros serán evaluados de acuerdo a una escala de medición de la siguiente manera: 1 = cuando se tiene niveles bajos de velocidad de operación, calidad de corte, disponibilidad y niveles altos en la zona de afectación en el material y costo de operación; 3 = cuando se refiere a niveles aceptables entre los procesos de corte; 5 = lo contrario a lo indicado para un valor de 1.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la matriz de decisión, los procesos de corte térmico por plasma y corte por aserrado mecánico se podrían utilizar para la extracción de las probetas de los diferentes elementos estructurales del panel, sin embargo, para muestras metalográficas al ser piezas muy pequeñas es conveniente utilizar un proceso de corte por aserrado manual, mientras que, a pesar del elevado costo que implica un proceso de corte térmico por EDWC, se utilizará únicamente para extraer probetas para un ensayo de tracción del bulón de panel puesto que este elemento es el único ejemplar en buenas condiciones.

3.4. EXTRACCIÓN DE PROBETAS BAJO NORMAS APLICABLES

Seleccionado el procedimiento adecuado para el corte del material, la extracción de las probetas de los diferentes elementos estructurales del panel

se basará de acuerdo a la información que poseen diferentes normas en la que se indica el dimensionamiento de la probeta y los procesos necesarios especialmente de corte para no alterar las propiedades metalográficas y mecánicas. En el capítulo anterior se dio a conocer una serie de normas que tienen relación con diferentes ensayos mecánicos y metalográficos en las que se plantea de manera rápida y concisa, lo que significa y lo que se espera obtener como resultados. En esta sección se dará a conocer las normas que se utilizarán para dar lugar a los procesos de caracterización del acero en el cual, se hará una comparación entre diferentes normas bajo parámetros básicos para luego en una matriz de decisión, seleccionar la norma más adecuada para los respectivos ensayos.

Los parámetros que se utilizarán para un procesos de selección, será en base a una escala de medición de la siguiente manera: 1 = se refiere a la norma que tenga menos aplicación en áreas de investigación, información técnica, disponibilidad, dificultad con el idioma y mayor costo adquisitivo; 3 = se refiere a la buena aceptabilidad de la norma en todos sus factores a analizar; 5 = lo contrario a lo indicado para un valor de 1.

Tabla 3.10 Matriz de decisión selección de norma.

FACTOR	NORMA		
	ASTM	INEN	ISO
Campo de aplicación	5	3	3
Información técnica	5	3	3
Disponibilidad	3	5	3
Idioma	3	5	3
Costo	3	5	1
Total	19	21	13

Fuente: Propia

Con los resultados obtenidos en la matriz de decisión, se podría utilizar la norma INEN para realizar los respectivos ensayos mecánicos y metalográficos

para los diferentes elementos estructurales del panel, sin embargo, para el presente documento se hará uso de la norma ASTM para el desarrollo del mismo ya que posee información más detallada y precisa para la realización de los respectivos ensayos pese a que su disponibilidad, idioma y poder adquisitivo sea mayor respecto a las normas INEN. Esta última se utilizará también cuando las circunstancias lo ameriten sirviendo de complemento ya que la información que poseen algunas de estas normas, su contenido está basado en algunas normas ASTM así como también de las normas ISO.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA

4.1. INTRODUCCIÓN

La metalografía es una herramienta muy utilizada en ciencia de los materiales que permite estudiar y caracterizar diferentes materiales con ayuda de distintas técnicas realizadas en laboratorio que se inicia desde la preparación de la muestra con procesos de desbaste y pulido hasta la realización de un ataque químico para revelar y observar con un microscopio metalúrgico, los microconstituyentes del material que posteriormente servirán para un análisis e interpretación de los mismos.

En este capítulo se desarrollarán diferentes procesos para poner en manifiesto el acero con el que es utilizado para la construcción de los paneles Mabey al revelar la estructura micrográfica, composición química, inclusiones y otras técnicas como la macrografía y una chispa característica que nos permita extraer los suficientes datos para determinar a qué acero corresponde y saber a qué procesos mecánicos que ha sido sometido el material.

Para cada uno de los ensayos realizados, se especificarán las normas que fueron aplicadas, así como también y de manera detallada, los diferentes procedimientos para la elaboración de las probetas y los pasos a seguir en cada ensayo. Los resultados que se obtengan, serán mostrados al final de cada ensayo realizado.

4.2. EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos de laboratorio utilizados para la caracterización metalográfica de los diferentes elementos estructurales del panel fueron los siguientes:

Prensa hidráulica

Marca: Buehler

Modelo: 20 – 1310 – 115

Serie: 331 – FN – 6357

Capacidad: 3 toneladas de presión

Utilidad: preparar moldes con resina fenólica cuando se tiene muestras muy pequeñas que dificulten realizar un proceso de desbaste en las pulidoras manuales.

Pulidora manual

Marca: Buehler Handimet I

Modelo: 16 – 31 – 1471

Serie: 326 – HG – 7039

Utilidad: permite realizar un proceso de desbaste fino con las 4 superficies planas que posee el equipo con lijas 150, 240, 360, 600 y 1000

Pulidora de disco

Marca: Buehler Ecomet I

Características: Velocidad de giro 360 rpm

Disco de nylon

Alúmina 0,03 micrones (abrasivo)

Utilidad: dar un acabado tipo espejo a las superficies planas de las muestras.

Microscopio metalúrgico

Marca: Olympus

Características: Lente ocular 10X

Lente objetivo: 5X, 10X, 20X, 40X

Amplificación: 2000X

Cantidad de luz: variable

Utilidad: observar los microconstituyentes e inclusiones del material con diferentes ampliaciones de 100X, 200X y 400X

4.3. ESTRUCTURA MICROGRÁFICA

4.3.1. NORMAS A APLICAR

Para identificar los microconstituyentes presentes en el acero, se utilizarán diferentes normas que contienen la información necesaria para la selección y preparación de probetas, procedimiento de ensayo y ataque químico adecuado para revelar la microestructura del acero. Entre las normas que se hace referencia son las siguientes:

- ASTM E 3 – 01: Guía estándar para la preparación de muestras metalográficas.
- ASTM E 407 – 07: Práctica estándar de micro ataque para metales y aleaciones.

4.3.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La preparación de las muestras se realizará conforme indica la norma ASTM E 3 – 01 para diferentes elementos estructurales del panel. Esta norma no especifica un tamaño específico pero si se menciona un área superficial comprendida entre 12 a 25 mm². Para el respectivo análisis, se seleccionó una muestra cuadrada de máximo 10 mm para los siguientes elementos estructurales:

- 1 probeta transversal del muñón de panel.
- 1 probeta transversal del bulón de panel.
- 1 probeta transversal del perfil de arriostramiento.
- 1 probeta transversal del perfil estructural en C.
- 1 probeta transversal de la placa de unión central de los perfiles de arriostramiento.

Preparación en resina fenólica

La prensa hidráulica está diseñada para comprimir y crear moldes con diferentes materiales como resinas fenólicas, ftalato de dialilo, epoxy, que son materiales termoestables utilizados para este tipo de aplicaciones. Al ser muestras muy pequeñas, estas deben estar puestas en baquelita o resina fenólica cuyo material cuenta el laboratorio de Metalurgia realizando el siguiente procedimiento:

- Colocar la superficie de la muestra que va a ser pulida sobre un molde base dentro de un molde cilíndrico.
- Cubrir la muestra con suficiente resina fenólica.
- Insertar el vástago en el molde cilíndrico con una ligera presión tomando en cuenta que la superficie donde se encuentra un orificio, quede en la parte superior.
- Colocar el conjunto en la prensa hidráulica y cubrir el molde cilíndrico con un calentador automático.
- Encender el calentador automático dejándolo por un cierto intervalo de tiempo.
- Llevar el molde hasta una presión de precarga y esperar hasta que el foco de color rojo del calentador automático se apague.
- Una vez que el foco se apaga, llevar a una presión de 4200 psi y en lo posible permanecer constante durante 7 minutos.
- Luego de ese tiempo, liberar la presión y apagar el calentador automático.
- Retirar el molde de la prensa y dejar enfriar mediante un enfriador con aletas.
- Frío el molde, colocar nuevamente en la prensa y realizar la presión necesaria para retirar la muestra del molde cilíndrico.

Este procedimiento se realiza para cada una de las muestras seleccionadas.

Las condiciones de presión, temperatura y tiempo son propias de la prensa hidráulica indicados en la siguiente figura:

Material	Temperature	Pressure	Time (at indicated temperature)			
			1" Mold (2.5cm)		1 1/4" Mold (3.8cm)	
Phenolic Resin	280°-300°F (138°-149°C)	4200 PSI ▲	Powder 5 min.	PREMOLD™ 3-4 min.	Powder 7 min.	PREMOLD™ 5-6 min.
Diallyl Phthalate	280°-290°F (138°-143°C)	3000 PSI ◐	7-8 min.	—	9-10 min.	—
PLASTIMET®	285°-300°F (140°-149°C)	3000— 4200 PSI ▲	4 min.	—	5 min.	—
TRANSOPTIC™ Powder (Heating Cycle)	Room Temp. to 280°-300°F (138°-149°C)	100 PSI	Approximately 20 min.			
(Cooling Cycle)	Maximum to 100°F (38°C)	4200 PSI	Approximately 20 min.			

Figura 4.1 Registro recomendado para moldes

Fuente: Manual de la prensa hidráulica Buehler

Desbaste y pulido

Una superficie en lo posible exenta de rayas se consigue al seguir una secuencia progresiva de desbaste empezando con lijas de tengan un mayor tamaño de grano abrasivo como un 150, hasta una lija de menor tamaño abrasivo como una lija número 1000. Para mejores resultados, los papeles abrasivos no deben estar desgastados ya que su efectividad en el desbaste no sería el correcto y como resultado se tendría una superficie pobre. Un aspecto a tomar en cuenta durante el proceso, es controlar el flujo de agua durante el desbaste porque muy poca cantidad del mismo producirá una excesiva acumulación de pequeñas partículas del material lo que reducirá la calidad de la preparación, así mismo, una excesiva cantidad de flujo hará que la muestra patine sobre la superficie del papel abrasivo lo que también resultaría una pobre calidad de la superficie de la muestra.

Con lo expuesto anteriormente y una vez colocadas las muestras en baquelita, se realiza el siguiente proceso para obtener una superficie en lo posible exenta de rayas resumida en los siguientes pasos:

- Pulir las muestras en un solo sentido con diferentes abrasivos en presencia de agua empezando con una lija de numeración 150, 280, 360, 600 terminando con una lija de 1000.

- Se debe aplicar una presión firme y uniforme para lograr que toda la superficie esté en contacto en cada uno de los papeles abrasivos.
- De preferencia, llevar a cabo el proceso en una sola dirección para no generar curvaturas en la superficie.
- Al hacer el cambio del papel abrasivo, rotar la muestra 90° para darnos cuenta de cómo va el proceso de desbaste.
- Este procedimiento se realiza para todas las probetas.
- Llevar las muestras a los discos de nylon con la respectiva alúmina para terminar con el proceso de pulido y conseguir un acabado tipo espejo.

4.3.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO MICROGRÁFICO

En este punto se revelará la microestructura del acero cuyas imágenes proyectadas por el microscopio, dependerán del estado en la que se encuentren los lentes y de las condiciones en las que esté la superficie de la muestra luego de haber pasado por un proceso de desbaste y pulido.

Las imágenes obtenidas serán captadas por una cámara que a su vez estará conectada a una tarjeta de video del computador para proyectarlas en un software que permita guardar las mejores imágenes de la microestructura para su posterior análisis. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Preparar la solución para el ataque químico en proporciones que indica la norma ASTM A 407 – 07. Por lo general se utiliza nital al 3% en una proporción de 3 ml de ácido nítrico (HNO_3) en 100 ml de etanol al 95%.
- Una vez preparada la solución, verter una porción del mismo en una cápsula petri y sumergir la superficie de la muestra durante 2s aproximadamente para no dañar la superficie.
- Esperado ese tiempo, enjuagar con abundante agua y secar con una secadora para evitar que la superficie de la muestra se dañe.
- Observar en el microscopio metalúrgico los constituyentes metálicos del acero con aumentos de 100X, 200X y 400X para el respectivo análisis.

En caso de que la microestructura no esté bien definida, se debe atacar nuevamente durante un tiempo prudencial para que la superficie de la muestra no se queme y repetir el mismo procedimiento hasta que la microestructura esté bien definida.

4.3.4. RESULTADOS

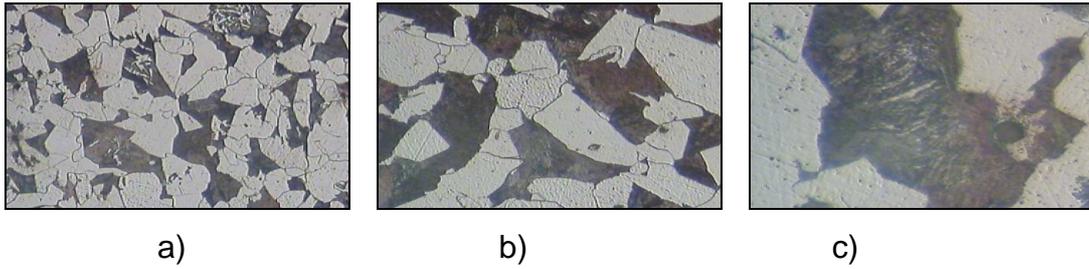


Figura 4.2 Microestructura del muñón a) 100X, b) 200X c) 400X

Fuente: Propia

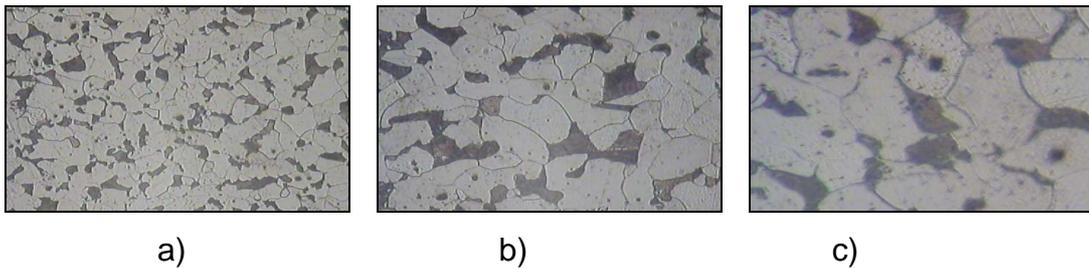


Figura 4.3 Microestructura del bulón del panel a) 100X, b) 200X, c) 400X

Fuente: Propia

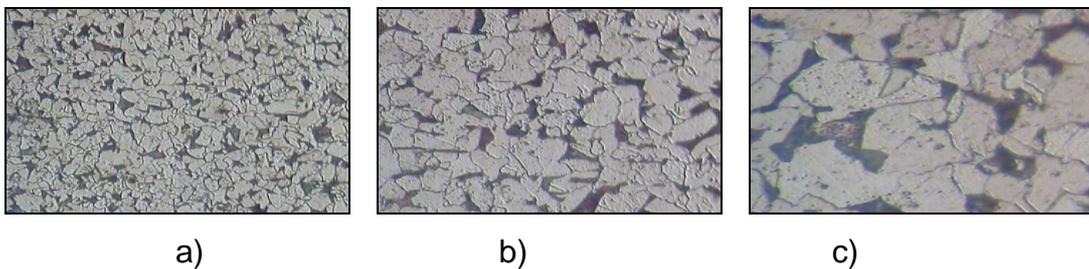


Figura 4.4 Microestructura perfil estructural en C a) 100X, b) 200X, c) 400X

Fuente: Propia

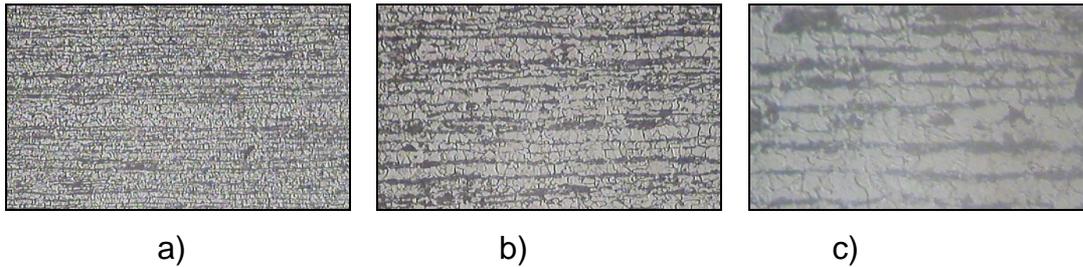


Figura 4.5 Microestructura perfil de arriostamiento a) 100X, b) 200X, c) 400X

Fuente: Propia

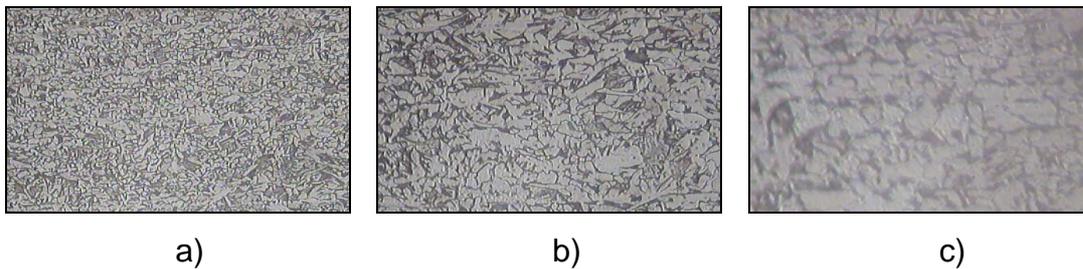


Figura 4.6 Microestructura placa de unión central a) 100X, b) 200X, c) 400X

Fuente: Propia

4.4. ESTRUCTURA MACROGRÁFICA

4.4.1. NORMAS A APLICAR

La norma ASTM E 340 – 00 describe los procedimientos que se debe tomar en cuenta para revelar la macroestructura del acero que consiste en realizar un proceso de desbaste y pulido y atacar químicamente la superficie de la muestra para determinar diferentes características que tiene el material, mismas que pueden ser observadas a simple vista para el estudio de la soldadura revelando la penetración de la soldadura, porosidad y las zonas afectadas por el calor en el metal base.

4.4.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La norma no especifica el tamaño que deben tener la muestras para realizar un estudio macrográfico, pero si da algunas recomendaciones sobre el corte que

se debe hacer de acuerdo al proceso mecánico que han sido sometido el material. Para el análisis de una junta soldadura, el corte se lo realiza en forma perpendicular a la dirección del cordón de soldadura para así detectar lo descrito anteriormente.

La preparación de la muestra consiste en realizar un corte perpendicular en una sección del muñón donde convergen varias juntas soldadas con una sierra mecánica de vaivén con su respectivo refrigerante para no alterar las propiedades del acero.

4.4.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO MACROGRÁFICO

El procedimiento que se utiliza para un ensayo macrográfico, es el mismo que fue realizado anteriormente para un ensayo micrográfico que consiste en un proceso de desbaste con papeles abrasivos de diferente numeración y posteriormente se realiza un ataque químico con una solución de nital del 1 al 3% con una brocha en toda la superficie de la muestra.



Figura 4.7 Corte transversal del muñón del panel

Fuente: Propia

4.5. COMPOSICIÓN QUÍMICA

4.5.1. NORMAS A APLICAR

Para el análisis de composición química, se contó con el apoyo del Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional con el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. El equipo funciona por medio de un arco eléctrico que calienta la muestra a temperaturas elevadas para excitar los átomos. Esta chispa hace que los átomos emitan una luz en varias longitudes de onda que son detectadas por un sistema óptico propio de la máquina que cuenta con sensores CCD de alta resolución, múltiples detectores ópticos, tecnología ClearSpectrum y un montaje Paschen – Runge que en conjunto forman el firmware de la máquina cuya información es transmitida a un computador. Por otra parte, la norma estándar que más se aproxima para un análisis de composición química de materiales metálicos es la ASTM A 415 – 99, aunque cabe recordar que toda la información se puede encontrar en los manuales de la máquina.

4.5.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

El tamaño de las muestras no se especifica en ninguna norma pero por requerimientos propios de la máquina, las muestras deben tener máximo una dimensión de 20 mm de ancho, 20 mm de largo con un espesor propia del material. Para lograr esas dimensiones, se realiza el corte de los elementos estructurales seleccionados con una sierra manual y se lija para tener una superficie plana en lo posible sin rayaduras para lograr resultados confiables.

Las muestras seleccionadas para un análisis de composición química son:

- 1 probeta del muñón de panel.
- 1 probeta del bulón de panel.
- 1 probeta del perfil de arriostramiento.
- 1 probeta del perfil estructural en C.
- 1 probeta de la placa de unión de los perfiles de arriostramiento.

4.5.3. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA

- Calibrar el equipo mediante los procedimientos y parámetros que indica el manual de la máquina.
- Identificar cada muestra con el nombre de cada elemento estructural del panel.
- Montar la muestra en el sistema óptico de la máquina y generar las chispas necesarias hasta conseguir una buena quema.
- Los resultados que se obtenga de la máquina, serán analizados por medio de un software en la que se indican los componentes en porcentajes en peso.

4.5.4. RESULTADOS

Tabla 4.1 Composición química de diferentes elementos del panel Bailey

Metales	Muñón del Panel	Perfil estructural	Placa de unión central	Bulón del panel	Perfil de arriostramiento
	%	%	%	%	%
Carbono (C)	0,239	0,134	0,204	0,211	0,209
Silicio (Si)	0,242	0,284	0,010	0,164	0,172
Manganeso (Mn)	1,214	1,241	0,793	0,497	1,278
Cromo (Cr)	0,071	0,024	0,015	0,019	0,012
Níquel (Ni)	0,158	0,019	0,011	0,005	0,013
Fósforo (P)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Azufre (S)	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
Cobre (Co)	0,234	0,033	0,009	0,021	0,033
Aluminio (Al)	0,015	0,020	0,046	0,005	0,037
Molibdeno (Mo)	0,059	0,010	0,010	0,010	0,010
Titanio (Ti)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Vanadio (V)	0,005	0,125	0,005	0,005	0,072
Hierro (Fe)	97,520	97,890	98,690	98,860	97,940

Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva EPN

4.6. ESPESOR DE GALVANIZADO

4.6.1. NORMAS A APLICAR

Para cuantificar el espesor que tiene el galvanizado en los elementos estructurales del panel, se utilizó la norma NTE INEN 2483: 2009 Recubrimientos de zinc (Galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero. Requisitos. Este ensayo se la puede considerar no destructivo en el cual se utilizan instrumentos de medición que cumplen con normas internacionales como la norma ASTM E 376 para medir el espesor del recubrimiento.

4.6.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las normas seleccionadas para determinar el espesor del recubrimiento, no mencionan un tipo de probeta para poder realizar el ensayo, más bien al tratarse de un control de calidad, las muestras utilizadas serán de un lote en especial que cumplan los espesores de recubrimiento promedio mínimo según lo que indica la norma ASTM A 123. Al tratarse de un estudio de los materiales del panel, se determinará el espesor utilizado para el recubrimiento mas no para un control de calidad de los siguientes elementos:

- Muñón del panel
- Perfil estructural en C
- Perfil de arriostramiento
- Placa de unión central del panel

4.6.3. PROCEDIMIENTO PARA CUANTIFICAR EL ESPESOR DEL GALVANIZADO

Para cuantificar el espesor del galvanizado, el procedimiento será el siguiente:

- Para materiales que tengan un área superficial igual o menor a $0,1 \text{ m}^2$, se tomará no menos de 5 mediciones en puntos ampliamente dispersos de modo que represente toda el área de inspección. En este punto se

encuentran los elementos como el muñón, perfil de arriostramiento y placa de unión central.

- Para materiales que tienen un área superficial mayor a 0,1 m² se tomarán segmentos que tengan un área menor a la indicada. Como se trata del perfil estructural en C como elemento de mayor tamaño, se tomarán tres segmentos de tal manera que en cada segmento se tomará mínimo tres mediciones en puntos ampliamente dispersos de modo que represente toda el área de inspección.
- Teniendo estos parámetros, se procede a encender el equipo presionando tecla ON/OFF hasta que el logo ELCOMETER aparezca.
- Seleccionar el idioma utilizando las teclas direccionales.
- Conectar la sonda girando el enchufe para alinearlos con la toma del medidor.
- Enroscar la sonda en el sentido de las agujas del reloj
- Sostener la sonda por el mango
- Colocar la sonda hacia abajo colocando sobre la superficie en forma perpendicular.
- Levantar la punta de la sonda y volver a colocar en la superficie.

4.6.4. RESULTADOS

Tabla 4.2 Espesor de recubrimiento del panel

Nº	Muñón		Perfil de arriostramiento		Placa de unión central	
	mils	mm	mils	mm	mils	mm
1	6,600	0,168	9,300	0,236	3,330	0,085
2	6,700	0,170	9,500	0,241	2,960	0,075
3	6,600	0,168	9,400	0,239	3,230	0,082
4	6,300	0,160	9,300	0,236	2,990	0,076
5	6,700	0,170	9,300	0,236	3,170	0,081
6	6,500	0,165	9,300	0,236	3,240	0,082
7	6,600	0,168	9,200	0,234	3,140	0,080
	6,571	0,167	9,329	0,237	3,151	0,080

Fuente: Propia

Tabla 4.2 Espesor de recubrimiento del panel (continuación)

Nº	Perfil estructural C					
	S1		S2		S3	
	mils	mm	mils	mm	mils	mm
1	9,700	0,246	9,300	0,236	8,100	0,206
2	9,200	0,234	9,100	0,231	8,600	0,218
3	9,700	0,246	9,300	0,236	8,700	0,221
4	9,500	0,241	9,300	0,236	8,300	0,211
5	9,600	0,244	9,400	0,239	7,900	0,201
6	9,200	0,234	9,200	0,234	8,400	0,213
7	9,700	0,246	9,400	0,239	8,300	0,211
	9,514	0,242	9,286	0,236	8,329	0,212

Fuente: Propia

4.7. INCLUSIONES

4.7.1. NORMAS A APLICAR

Para determinar las inclusiones de cada material, la norma NTE INEN 1482, contiene información en la que se indica el procedimiento para la preparación de las muestras y una serie de fotografías referenciales para identificar las imágenes obtenidas con la ayuda de un microscopio metalúrgico si las inclusiones son óxidos o silicatos.

4.7.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

El tamaño de las muestras son las mismas que se utilizaron para realizar el ensayo micrográfico de los siguientes elementos estructurales del panel:

- 1 probeta del muñón de panel.
- 1 probeta del bulón de panel.
- 1 probeta del perfil de arriostramiento.
- 1 probeta del perfil estructural en C.
- 1 probeta de la placa de unión de los perfiles de arriostramiento.

Para la preparación de cada una de las muestras se realizó el siguiente procedimiento:

- Colocadas las muestras en resina fenólica o baquelita, pulir en un solo sentido con diferentes abrasivos en presencia de un flujo adecuado de agua empezando con una lija de numeración 150, 280, 360, 600 terminando con una lija de 1000 para eliminar en lo posible las rayaduras.
- Se debe aplicar una presión firme y uniforme para lograr que toda la superficie este en contacto en cada uno de los papeles abrasivos.
- Llevar a cabo el proceso en una sola dirección para no generar curvaturas en la superficie.
- Rotar 90° la muestra en cada cambio de papel abrasivo para darnos cuenta de cómo va el proceso del desbaste.
- Llevar las muestras a los discos de nylon con la respectiva alúmina para terminar con el proceso de pulido para dar un acabado tipo espejo.

4.7.3. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINACIÓN DE INCLUSIONES

- Preparada las muestras, llevar al microscopio metalúrgico y observarlas con un lente de aumento 100X
- Comparar las imágenes obtenidas con imágenes patrón de acuerdo a la norma INEN 1482.

4.7.4. RESULTADOS

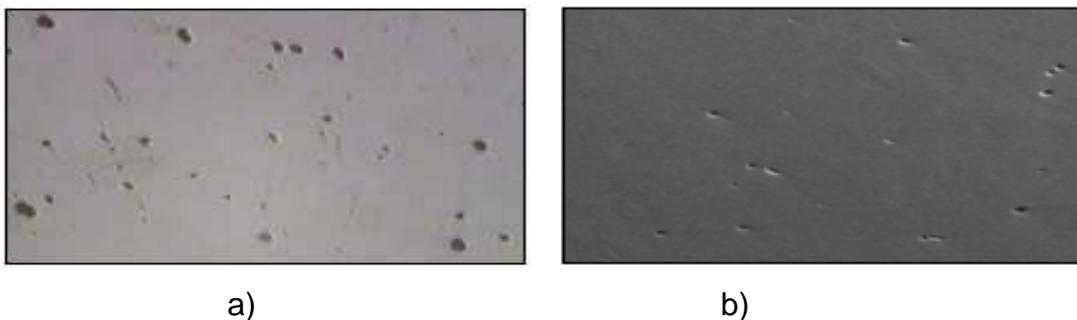
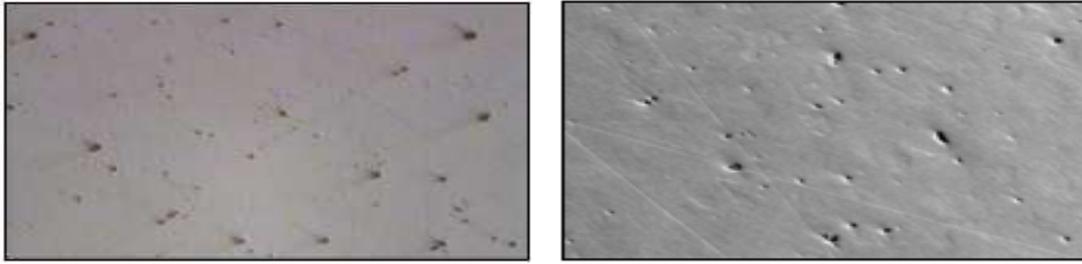


Figura 4.8 Inclusiones muñón a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 200X

Fuente: Propia

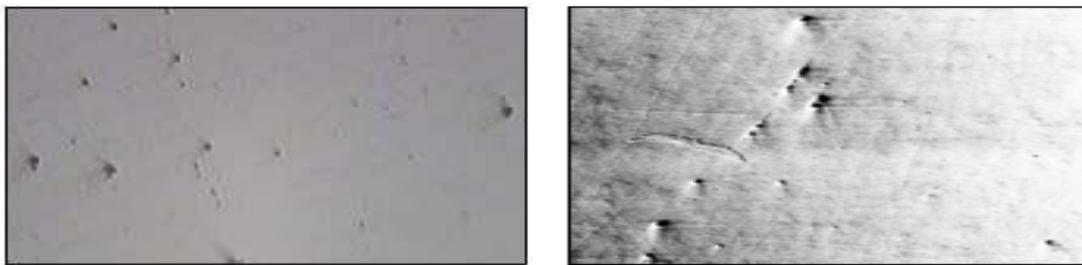


a)

b)

Figura 4.9 Inclusiones bulón de panel a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 200X

Fuente: Propia

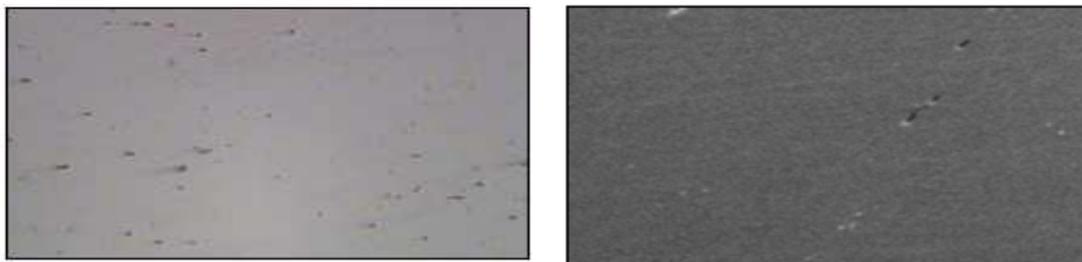


a)

b)

Figura 4.10 Inclusiones perfil estructural C a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 200X

Fuente: Propia



a)

b)

Figura 4.11 Inclusiones perfil de arriostamiento a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 500X

Fuente: Propia

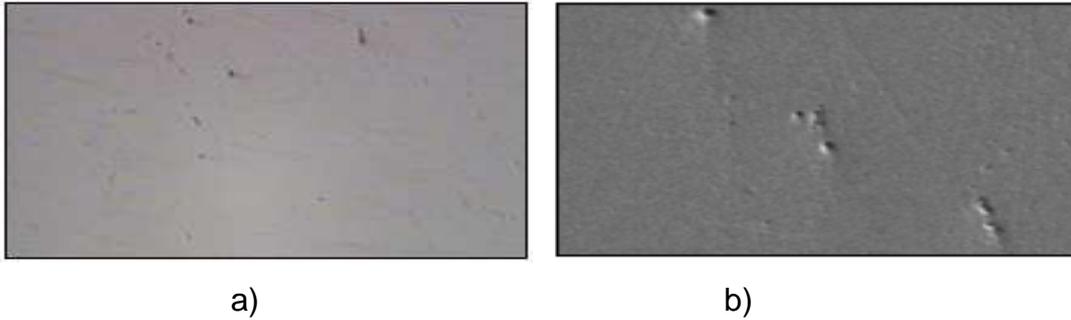


Figura 4.12 Inclusiones placa de unión central a) microscopio metalúrgico 100X, b) microscopio electrónico 1000X

Fuente: Propia

4.8. CARACTERÍSTICA DE CHISPA

4.8.1. NORMAS A APLICAR

No existe una norma para realizar un proceso de caracterización por chispa, pero se tiene una guía que se utiliza en el laboratorio de Metalurgia en el cual hace referencia a las características que presenta el acero cuando es colocado en una piedra de esmeril.

4.8.2. PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las muestras para realizar este ensayo deben ser cortadas con ayuda de una sierra manual cuyo tamaño permita sujetar con facilidad la probeta sin representar algún riesgo. Los materiales utilizados para este ensayo son los siguientes:

- 1 probeta del muñón del panel.
- 1 probeta del bulón del panel.
- 1 probeta del perfil de arriostramiento.
- 1 probeta del perfil estructural en C.
- 1 probeta de la placa de unión de los perfiles de arriostramiento.

4.8.3. PROCEDIMIENTO PARA EL ENSAYO DE CHISPA

- Utilizar de preferencia gafas protectoras.
- Evitar acercarse demasiado a la piedra del esmeril.
- Colocar el flexómetro en dirección de la chispa.
- Acercar el acero a la piedra del esmeril para obtener una chispa.
- Tomar imágenes del procedimiento con ayuda de una cámara fotográfica.

4.8.4. RESULTADOS

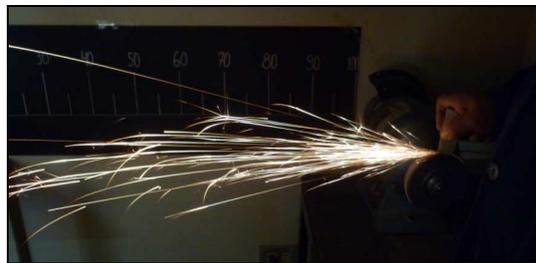


Figura 4.13 Característica de chispa muñón

Fuente: Propia



Figura 4.14 Característica de chispa bulón del panel

Fuente: Propia

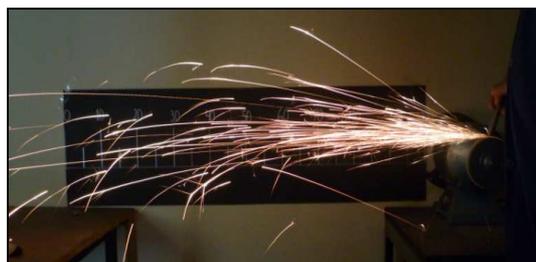


Figura 4.15 Característica de chispa perfil estructural C

Fuente: Propia

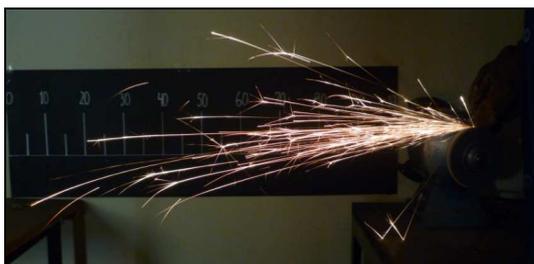


Figura 4.16 Característica de chispa perfil de arriostamiento

Fuente: Propia

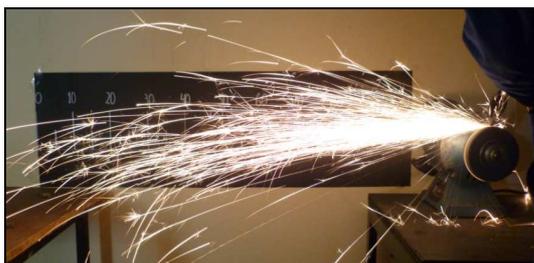


Figura 4.17 Característica de chispa placa unión central

Fuente: Propia

CAPÍTULO 5

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

5.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo pretende realizar un estudio sobre las propiedades mecánicas que presentan diferentes elementos estructurales del panel así como definir las curvas características que expliquen el comportamiento del acero y los valores de resistencia bajo la acción de influencias externas. Estos valores de resistencia y el rendimiento del material bajo condiciones de carga, se logra realizando diferentes ensayos mecánicos pero en especial, realizar un ensayo a tracción nos permite definir muchas de estas propiedades como la resistencia última a la tensión, resistencia a la fluencia, porcentaje de elongación, entre otras, permitiendo establecer una base para poder comparar con otros materiales y determinar qué tipo de acero es al que corresponde.

Para ello se realizarán ensayos de tracción y dureza en la que se especificarán las normas y los procedimientos a realizar en cada ensayo y se detallarán también los equipos y el procedimiento para la fabricación de las probetas. Los resultados que se obtengan de cada uno de los ensayos, se detallarán en el capítulo 7.

5.2. EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos que fueron utilizados para la caracterización mecánica de los diferentes elementos estructurales del panel son los siguientes:

5.2.1. PREPARACIÓN DE PROBETAS

Cortadora con plasma

Marca: Hypertherm

Modelo: Powermay1000

Serie: G3

Características técnicas:

Tipo de fuente: corriente constante

Tipo de corriente: corriente continua (DC)

Voltaje de entrada: 200 – 600V

Corriente: 22 – 50A monofásico

11 – 80A trifásico

Capacidad de corte: 25mm

Presión: 80 – 90 psi

Gases de trabajo: aire/nitrógeno

Sierra mecánica de dos velocidades

Marca: Hartle

Modelo: s/n

Serie: 426021243

Características técnicas:

Potencia: motor de 3HP

Frecuencia: 60Hz

Voltaje: 220V

Fresadora

Marca: Bridgeport

Modelo: 5018 – H4

Serie: 319231179V

Características técnicas:

Motor eléctrico: 2/1 HP

Voltaje: 220V

Frecuencia: 60 Hz

RPM: 3240/1680

Rectificadora de superficies planas

Marca: Jones Shipman

Modelo: I400

Serie: BO9062

Características técnicas:

Motor principal: trifásico

Potencia: 2 HP del motor del cabezal

Voltaje: 220/230V

Frecuencia: 60 Hz

RPM: 1720/3940

5.2.2. ENSAYOS MECÁNICOS

Máquina de ensayos universales

Marca: Amsler

Modelo: FM – 1033

Manual: MRM – 29

Capacidad de tracción: 10 ton

Utilidad: este equipo de laboratorio permite realizar ensayos de tracción, compresión, dureza Brinell, doblado y obtener valores de las constantes elásticas del material como el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Calibrador

Marca: Fowler

Modelo: s/n

Serie: 87962

Rango: 0 – 150 mm

Apreciación: 0,01 mm

Utilidad: esta herramienta de medición se utilizará para tomar todas las medidas de las probetas de tal manera que cumplan con las especificaciones que pide la norma para los ensayos mecánicos que se realicen en laboratorio.

Micrómetro digital

Marca: Mitutoyo

Modelo: s/n

Serie: 315 – 351

Rango: 0 – 25 mm

Apreciación: 0,001 mm

Utilidad: tomar todas las medidas referenciales de las probetas previo a un ensayo de tracción.

Durómetro Rockwell

Marca: Rams

Modelo: 10RR10

Serie: s/n

Capacidad máxima: 100B, 100C

Apreciación: 1B, 1C

Utilidad: el durómetro Rockwell nos permite medir la dureza de materiales suaves en escala Rockwell B (RB) y para materiales duros en escala Rockwell C (RC).

5.3. TENSION

5.3.1. NORMAS A APLICAR

Para realizar un ensayo a tensión, las probetas para cada elemento estructural del panel deberán ser seleccionadas y fabricadas de acuerdo a las siguientes normas:

- ASTM A 370 – 05 “Métodos de prueba estándar y definiciones para ensayos mecánicos para materiales de acero”.
- ASTM E 8 – 03 “Métodos de prueba estándar para un ensayo a tensión de materiales metálicos”
- NTE ISO 377: 2009: Acero y productos de acero. Localización y preparación de muestras para ensayos mecánicos.

5.3.2. LOCALIZACIÓN DE PROBETAS

La orientación y localización de las probetas puede influenciar en los resultados que se obtenga por este ensayo de tal manera que para realizar un ensayo de tracción, la localización de la probeta para cada elemento del panel se indicará conforme indica la norma NTE ISO 377: 2009 para secciones, barras redondas, secciones rectangulares huecas, barras rectangulares y productos planos.

El número de probetas serán tomadas de los siguientes elementos estructurales:

- 3 probetas del muñón de panel
- 3 probetas del perfil estructural en C
- 3 probetas del perfil de arriostramiento
- 3 probetas del bulón de panel
- 2 probetas de la placa de unión central. (referencia)

Para el muñón del panel, la localización de las muestras se hizo conforme al anexo A5.1 para barras rectangulares como se puede mostrar en la siguiente figura.

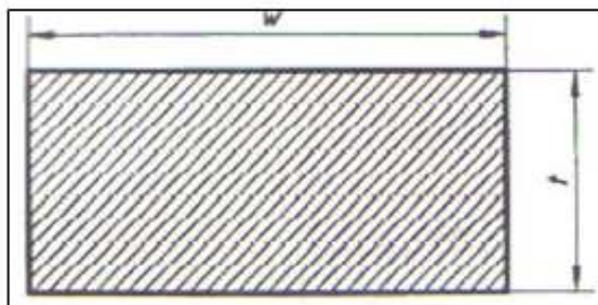


Figura 5.1 Barra rectangular de sección completa

Fuente: NTE INEN – ISO 377: 2009

Para barras redondas como el bulón del panel, se hace uso del anexo A3.1 para localizar la probeta según como lo indica la siguiente figura.

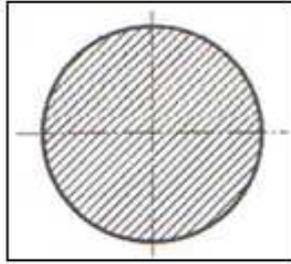


Figura 5.2 Barra redonda de sección completa

Fuente: NTE INEN – ISO 377: 2009

La localización de la muestra para el perfil estructural en C, se basó en el anexo A.2.1 como se indica en la siguiente figura. Para secciones con alas inclinadas tal y como se tiene en el perfil estructural en C, la norma establece que las probetas se pueden tomar del alma o puede ser también del ala inclinada o patín, pero esta debe ser maquinada.

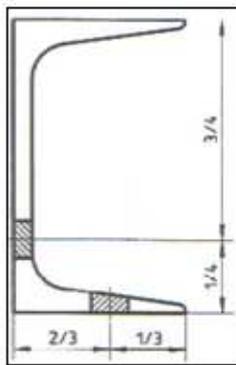


Figura 5.3 Sección de un perfil estructural en C

Fuente: NTE INEN – ISO 377: 2009

En el caso del perfil de arriostramiento, la localización de las probetas se basará conforme indica el anexo A.7.2.1 de acuerdo a la siguiente figura.

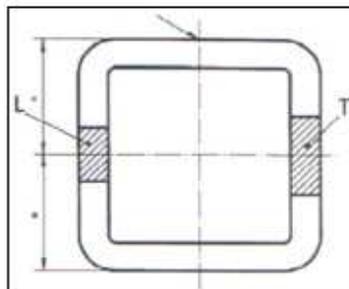


Figura 5.4 Sección tubular hueca

Fuente: NTE INEN – ISO 377: 2009

En chapas de acero, la localización de las probetas para la placa de unión central será conforme lo indica el anexo A 6.1 para productos planos.

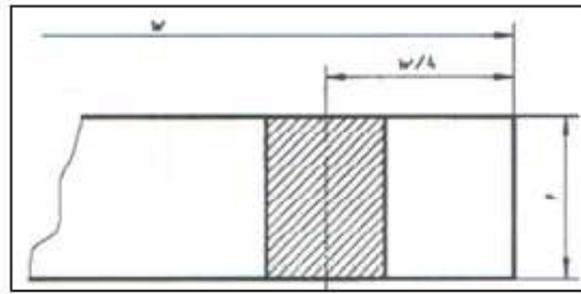


Figura 5.5 Probeta de sección completa para productos planos

Fuente: NTE INEN – ISO 377: 2009

Debido a que la placa central se encuentra soldada a los perfiles de arriostamiento, se debe tomar en cuenta el área afectada por el calor que se produjo durante el proceso de soldadura ya que de no hacerlo, pueden incidir en los resultados que se obtenga del ensayo. Es por ello que el número de probetas que se pudieron extraer de la placa central fueron 2 por lo que los resultados obtenidos son solamente referenciales.

5.3.3. FABRICACIÓN DE PROBETAS

La norma ASTM A 370 – 05 proporciona las dimensiones que debe tener la probeta con sus respectivas tolerancias. Se la puede complementar con la norma ASTM E 8 – 03 en el cual hace referencia a los procedimientos a tomar en cuenta para la determinación de las propiedades mecánicas del material como por ejemplo la velocidad que se utiliza para realizar un ensayo a tracción. Antes de proceder con la extracción de las probetas, se debe realizar una inspección a todo el panel tomando en cuenta deformaciones o procesos de manufactura realizados anteriormente. La soldadura al ser un proceso de fusión localizada, la zona fundida tendrá un cambio en la estructura granular que se extiende a lo largo de cierta distancia en el metal base conocida como HAZ (zona afectada por el calor). Así mismo los gases disueltos por el proceso, reaccionan con los elementos que compone la pieza, más aún elementos del

propio material base pueden reaccionar entre sí formando compuestos diferentes a los originales.

Tomando en cuenta estos aspectos, se realizan cortes a cada elemento del panel a una distancia de por los menos 50 mm de la soldadura para no dañar la misma para ensayos macrográficos posteriores y de la misma forma para no afectar el resto del material base por el calor que se genera durante el proceso de corte.

Muñón de panel

Las probetas que se lograron extraer del muñón del panel fueron 3 con las siguientes dimensiones:

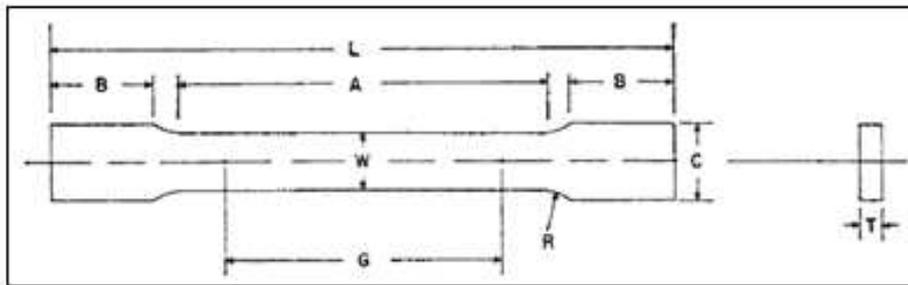


Figura 5.6 Probeta para ensayo de tracción del muñón de panel

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.1 Dimensión proporcional de una probeta estándar para muñón

	Dimensiones (mm)
G	25,0 ± 0,08
W	6,25 ± 0,05
T	espesor del material
R	6
L	100
A	32
B	32
C	10

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.2 Tabla de procesos para probetas del muñón de panel

Nombre: Probeta muñón de panel		Código: X151111M	Cant. : 3
Material: s/n		T. aproximando: 3 h	
Nº	Descripción	Máquinas y Herramientas	
1	Corte sección transversal muñón	Sierra mecánica Hartle, sierra 14"x1¼" con 10 dientes por pulg.	
2	Trazo de medidas	Calibrador, trazador	
3	Extracción de probetas	Sierra manual de 12" con 18 dientes por pulg.	
4	Fresar superficies irregulares	Fresadora Bridgeport, fresa 8 mm	
5	Trazo de medidas según norma	Calibrador, trazador	
6	Frezar probeta según medidas	Fresadora Bridgeport, fresa de 8mm	
7	Verificar medidas	Calibrador	
8	Limar parte central de la probeta hasta la tolerancia mínima	Limas para desbaste fino	
9	Verificar medidas	Calibrador	
10	Marcar según norma	Calibrado, punzón, martillo	

Fuente: Propia

Bulón de panel

Las dimensiones y tolerancias de las probetas se muestran en la siguiente tabla:

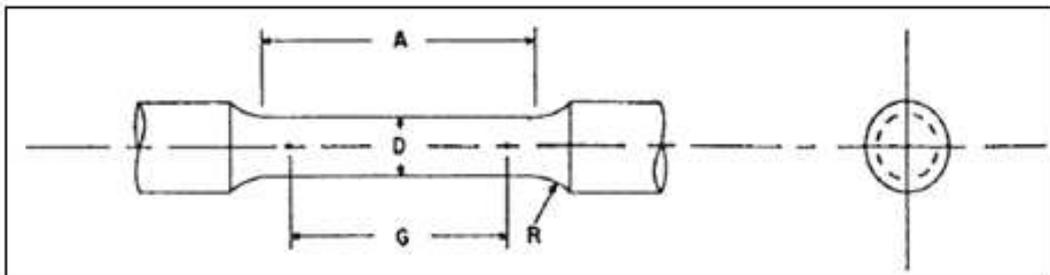


Figura 5.7 Probeta para ensayo de tracción para bulón de panel

Fuente: ASTM E 8 – 03

Tabla 5.3 Dimensión proporcional de una probeta estándar para bulón

	Dimensiones (mm)
G	35,0 ± 0,10
D	8,75 ± 0.18
R	6
A	45

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.4 Tabla de procesos para probetas del bulón del panel

Nombre: Probeta bulón de panel		Código: X151111B	Cant. : 3
Material: s/n		T. aproximando: 5 h	
Nº	Descripción	Máquinas y Herramientas	
1	Trazar medidas diámetro probeta	Calibrador, trazador	
2	Cortar el bulón	Hilo de corte	
3	Trazar medidas según norma	Calibrador, trazador	
4	Tornear probeta según norma	Torno horizontal	
5	Verificar medidas	Calibrador	
6	Marcar según norma	Calibrador, punzón, martillo	

Fuente: Propia

Perfil Estructural C

El tamaño de las probetas está especificado en la norma ASTM A 370 – 05 con las siguientes dimensiones y tolerancias:

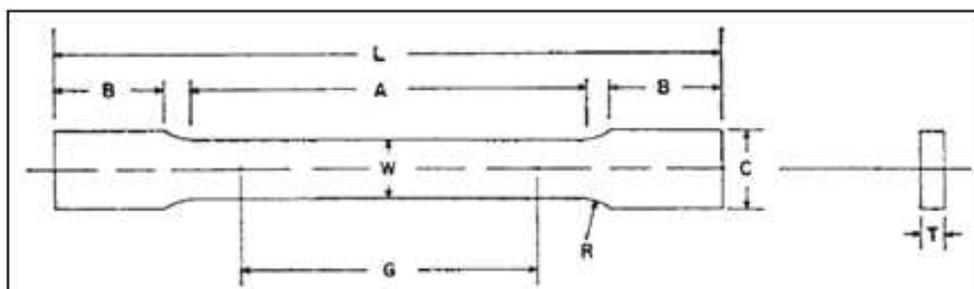


Figura 5.8 Probeta para ensayo de tracción para perfil estructural en C

Fuente: ASTM E 8 – 03

Tabla 5.5 Dimensión proporcional de probeta estándar perfil estructural C

	Dimensiones (mm)
G	50,0 ± 0,10
W	12,5 ± 0,25
T	espesor del material
R	13
L	200
A	60
B	50
C	20

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.6 Tabla de procesos para probetas del perfil estructural C

Nombre: Probeta perfil estructural C		Código: X151111PE	Cant. : 3
Material: s/n		T. aproximando: 3 h	
Nº	Descripción	Máquinas y Herramientas	
1	Corte perfil estructural panel	Plasma Hypertherm, electrodos de tungsteno	
2	Trazar medidas	Calibrador, trazador	
3	Cortar las zonas afectas por el calor	Sierra mecánica Hartle, sierra 14"x1¼" con 10 dientes por pulgada	
4	Trazar medidas	Trazar medidas	
5	Extraer probetas	Sierra mecánica Hartle, sierra 14"x1¼" con 10 dientes por pulgada	
6	Fresar superficies irregulares	Fresadora Bridgeport, fresa de 8mm	
7	Trazar medidas según norma	Calibrador, trazador	
8	Fresar probetas según medidas	Fresadora Bridgeport, fresa de 8mm	
9	Verificar medidas	Calibrador	
10	Limar sección central hasta la tolerancia mínima	Lima para desbaste fino	
11	Verificar medidas	Calibrador	
12	Marcar según norma	Calibrador, punzón, martillo	

Fuente: Propia

Perfil de arriostramiento

Las medidas de las probetas extraídas del perfil de arriostramiento se muestran en la siguiente tabla:

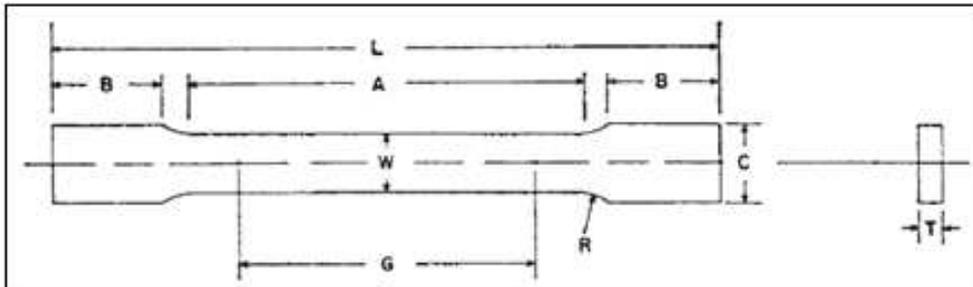


Figura 5.9 Probeta para ensayo de tracción para perfil de arriostramiento

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.7 Dimensión proporcional de una probeta estándar para perfil de arriostramiento

	Dimensiones (mm)
G	50,0 ± 0,10
W	12,5 ± 0,25
T	espesor del material
R	13
L	200
A	60
B	50
C	20

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.8 Tabla de procesos para probetas perfil de arriostramiento

Nombre: Probeta perfil arriostramiento		Código: X151111TR	Cant. : 3
Material: s/n		T. aproximando: 3 h	
Nº	Descripción	Máquinas y Herramientas	
1	Cortar perfil de arriostramiento del panel	Plasma Hypertherm, electrodos de tungsteno	
2	Trazar medidas	Calibrador, trazador	
3	Cortar las zonas afectas por el calor	Sierra mecánica Hartle, sierra 14"x1¼" con 10 dientes por pulgada	
4	Trazar medidas ancho probeta	Calibrador, trazador	
5	Extraer probetas	Sierra mecánica Hartle, sierra 14"x1¼" con 10 dientes por pulgada	
6	Fresar superficies irregulares	Fresadora Bridgeport, fresa de 8mm	
7	Trazar medidas según norma	Calibrador, trazador	
8	Fresar probeta según medida	Fresadora Bridgeport, fresa de 8mm	
9	Verificar medidas	Calibrador	
10	Limar sección central hasta la tolerancia mínima	Limas para desbaste fino	
11	Verificar medidas	Calibrador	
12	Marcar según norma	Calibrador, punzón, martillo	

Fuente: Propia

Placa de unión central

Las dimensiones de las probetas para la placa de unión central del panel son las siguientes:

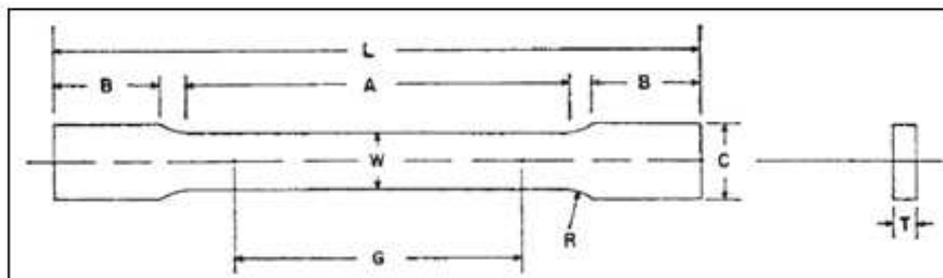


Figura 5.10 Probeta para ensayo de tracción de la placa de unión central

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.9 Dimensión proporcional de una probeta estándar para placa de unión central

	Dimensiones (mm)
G	25,0 ± 0,08
W	6,25 ± 0,05
T	espesor del material
R	6
L	100
A	32
B	32
C	10

Fuente: ASTM E 8 - 03

Tabla 5.10 Tabla de proceso para probetas de la placa de unión central

Nombre: Probeta placa unión central		Código: X151111PUC	Cant. : 3
Material: s/n		T. aproximando: 3 h	
Nº	Descripción	Máquinas y Herramientas	
1	Ubicación de corte de la placa	Inspección visual	
2	Corte placa de unión central del panel	Sierra mecánica Hartle, sierra 14"x1¼" con 10 dientes por pulgada	
3	Trazar medidas según norma	Calibrador, trazador	
4	Extraer probetas	Sierra mecánica Hartle, sierra 14"x1¼" con 10 dientes por pulgada	
5	Fresar superficies irregulares	Fresadora Bridgeport, fresa de 8mm	
6	Trazar medidas según norma	Calibrador, trazador	
7	Fresar probetas según norma	Fresadora Bridgeport, fresa de 8mm	
8	Verificar medidas	Calibrador	
9	Limar parte central hasta la tolerancia mínima	Limas para desbaste fino	
10	Verificar medidas	Calibrador	
11	Marcar según norma	Calibrador, punzón, martillo	

Fuente: Propia

5.3.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El procedimiento utilizado fue en base al manual de la máquina universal de ensayos del laboratorio de Mecánica de Materiales en el cual, se detalla las condiciones generales de ensayo. Los demás pasos fuera del manual, se detallan de la siguiente manera:

- Tomar las medidas tanto en ancho como en espesor de la garganta de la probeta con un calibrador y micrómetro respectivamente especialmente en el centro de la misma, ya que es esa sección debe presentar las tolerancias mínimas para que la rotura se realice entre marcas de la parte central de la probeta y con ello lograr mejores resultados.
- Con un calibrador tomar las medidas entre marcas de la parte central de la probeta.
- Codificar cada una de las probetas para poder identificarlas luego del ensayo. Cada probeta presenta una numeración X151111Y donde la letra X representa el número de la probeta, los dos siguientes dígitos representan el día, el mes y la fecha en que se realizó el ensayo y por último, la letra Y que hace referencia al elemento del panel, por ejemplo, M = muñón del panel, PE = perfil estructural en C, PUC = placa de unión central, B = bulón de panel y TR = tubo rectangular o perfil de arriostamiento del panel.
- Se toma la medida del peso del cabezal de la máquina aplicando una fuerza hasta que el mismo se mueva. Este valor servirá para restar de los valores que se obtenga en cada ensayo.
- El procedimiento de aplicación de carga se realizará de acuerdo al manual de la máquina.
- Culminado el ensayo, se retiran los pedazos de la mordaza y se mide la elongación entre marcas con un calibrador cuyas puntas estén de manera perpendicular a la superficie de la probeta. Esta medición se logra uniendo los pedazos de manera manual procurando que coincidan las partes fracturadas.
- Dar lectura de la fuerza de acuerdo a lo que indica el dial de la máquina. Este dato es la resistencia última a la tracción que tiene el material.

- Los demás datos como la resistencia a la fluencia se toman de acuerdo a la gráfica que da la máquina. En algunas gráficas es fácilmente determinar la resistencia de fluencia porque presenta dos puntos de fuerza tanto superior como inferior pero se toma este último debido a que el material en ese punto empieza a fluir en el rango plástico, por otro lado, la gráfica que presenta por ejemplo el bulón, no se determina de forma directa la resistencia a la fluencia sino que se traza una línea paralela a la recta en el rango elástico de tal manera que el cruce entre la recta y la curva característica del material será el punto de fluencia.

5.3.5. RESULTADOS

Tabla 5.11 Resultados ensayo de tracción muñón de panel

Probeta	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
1151111M	439,717	575,853	20,587
2151111M	469,620	585,998	18,747
3151111M	466,784	571,093	21,940

Fuente: Propia

Tabla 5.12 Resultados ensayo de tracción bulón de panel

Probeta	Re (MPa)	Rm (Mpa)	A (%)
1151111B	480,546	554,730	20,700
2151111B	491,044	557,289	19,416
3151111B	476,158	556,198	20,281

Fuente: Propia

Tabla 5.13 Resultados ensayo de tracción perfil estructural C

Probeta	Re (MPa)	Rm (Mpa)	A (%)
1151111PE	502,137	642,957	21,848
2151111PE	502,791	627,995	20,457
3151111PE	502,378	628,796	20,241

Fuente: Propia

Tabla 5.14 Resultados ensayo de tracción perfil de arriostramiento

Probeta	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
1151111TR	524,727	624,873	21,877
2151111TR	521,838	625,589	21,615
3151111TR	511,170	608,821	22,244

Fuente: Propia

Tabla 5.15 Resultados ensayo de tracción placa de unión central

Probeta	Re (MPa)	Rm (Mpa)	A (%)
1151111PUC	353,588	497,943	26,631
2151111PUC	355,718	491,152	26,254

Fuente: Propia

5.4. DUREZA

5.4.1. NORMAS A APLICAR

La norma que se aplicará para realizar un ensayo de dureza Rockwell será bajo los procedimientos que indica la norma ASTM E 18 – 05: Método de prueba estándar para ensayo de dureza Rockwell y dureza superficial Rockwell de materiales metálicos.

La selección de este método de ensayo se debe a que resulta fácil determinar si un material es duro o suave, es decir, de acuerdo a la carga aplicada se puede saber si el dato que se obtiene se encuentra dentro de una escala de medición de dureza, por ejemplo, para un material duro se utiliza una escala Rockwell C, mientras que para un material semiduro se utiliza una escala Rockwell B. Esto sucedió al momento de tomar lectura del dato obtenido en una muestra del perfil estructural cuyo resultado final estuvo fuera de la escala cuando se utilizó una escala de medición Rockwell C y debido a eso, se tuvo que utilizar otra escala de medición como un Rockwell B para la respectiva toma de datos. Otros factores que permitieron la selección de este

procedimiento es que no se desperdicia material e incluso es posible reutilizar la pieza además, que no implica de mayores cálculos porque el resultado se lo obtiene de forma directa.

5.4.2. FABRICACIÓN DE PROBETAS

La norma ASTM E 18 – 05 no especifica las dimensiones que debe tener la probeta para realizar este ensayo, pero si hace énfasis en el espesor mínimo que debe tener para que no exista ninguna deformación visible en la parte posterior de la pieza. La figura 5.11 muestra los espesores mínimos para una escala Rockwell B.

Minimum Thickness		Rockwell Scale		
		F		B
in.	mm	Hardness Reading	Approximate Hardness B-Scale ^a	Hardness Reading
0.022	0.56	...	...	...
0.024	0.61	98	72	94
0.026	0.66	91	60	87
0.028	0.71	85	49	80
0.030	0.76	77	35	71
0.032	0.81	69	21	62
0.034	0.86	...	...	52
0.036	0.91	...	...	40
0.038	0.96	...	...	28
0.040	1.02	...	...	...

Figura 5.11 Espesores mínimos requeridos

Fuente: ASTM E 18 – 05

Las probetas utilizadas son piezas restantes de cada uno de los elementos estructurales del panel tomando en cuenta que ninguna de ellas hayan sido alteradas por procesos de manufactura antes realizadas y cumpliendo con el espesor mínimo que hace referencia la norma.

Para lograr mejores resultados, la superficie de cada una de las probetas se sometió a un proceso de desbaste con papeles abrasivos con numeración 240 y 360 para poder eliminar óxidos, materiales extraños como el galvanizado e irregularidades superficiales. En cada proceso se utilizó un flujo continuo de agua para no alterar la condición original del material por calentamiento consecuencia del desbaste.

5.4.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Antes de proceder con la medición de la dureza de los materiales en estudio, se debe primero calibrar el Durómetro Rockwell del laboratorio de Mecánica de Materiales de la siguiente manera:

- Colocar la placa de calibración en el porta muestra
- Verificar que el selector de carga se encuentra en la escala B
- Verificar que el penetrador sea el correcto, para una escala Rockwell B se utiliza una esfera de diámetro 1/16"
- Acercar la probeta hasta que haga contacto con la esfera o hasta que el indicador del dial se mueva ligeramente.
- A partir de allí, girar dos vueltas y colocar el indicador en la posición cero del dial.
- Empujar el aplicador de carga hacia atrás lentamente
- Esperar entre 10 a 15 segundos hasta que la esfera deje de penetrar en la placa de calibración.
- Regresar el aplicador de carga a la posición inicial lentamente y dar lectura del resultado. Esta lectura debe estar entre $88,16 \pm 1$.
- Si la lectura se encuentra dentro del valor establecido, el Durómetro Rockwell estará calibrada, caso contrario se deberá regular el selector de carga en + o - y realizar el mismo procedimiento hasta lograr la lectura que marca la placa de calibración.

Calibrado el Durómetro Rockwell, se procede con la toma de al menos cinco datos de cada uno de las probetas de los diferentes elementos estructurales del panel mediante el siguiente procedimiento:

- Colocar la probeta en el porta muestra
- Acercar la probeta hasta que haga contacto con la esfera o hasta que el indicador del dial se mueva ligeramente.

- A partir de allí, girar dos vueltas y colocar el indicador en la posición cero del dial.
- Empujar lentamente el aplicador de carga hacia atrás
- Esperar entre 10 a 15 segundos hasta que la esfera deje de penetrar en la probeta.
- Regresar el aplicador de carga a la posición inicial lentamente
- Dar lectura del dial en la escala seleccionada.
- Realizar el mismo procedimiento de al menos 5 lecturas para cada elemento estructural.

5.4.4. RESULTADOS

Tabla 5.16 Resultados ensayo de dureza muñón de panel

Nº	Rockwell B
1	85,0
2	84,5
3	85,0
4	84,0
5	84,0
6	83,0
7	85,0

Fuente: Propia

Tabla 5.17 Resultados ensayo de dureza bulón de panel

Nº	Rockwell B
1	85,5
2	86,5
3	86,5
4	86,5
5	88,0
6	87,0
7	87,0

Fuente: Propia

Tabla 5.18 Resultados ensayo de dureza perfil estructural C

Nº	Rockwell B
1	94,0
2	93,0
3	93,0
4	93,5
5	93,0
6	93,0
7	94,0

Fuente: Propia

Tabla 5.19 Resultados ensayo de dureza perfil de arriostramiento

Nº	Rockwell B
1	87,5
2	88,0
3	88,0
4	86,5
5	88,0
6	88,0
7	87,5

Fuente: Propia

Tabla 5.20 Resultados ensayo de dureza placa de unión central

Nº	Rockwell B
1	77,5
2	78,0
3	78,0
4	78,5
5	78,0
6	78,0
7	78,5

Fuente: Propia

CAPÍTULO 6

CARACTERIZACIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

6.1. ENSAYO POR ULTRASONIDO

El Ultrasonido es un método de ensayo no destructivo que utiliza ondas sonoras de alta frecuencia entre 0,1 y 25 MHz que viajan a través del material para detectar fallas internas o defectos superficiales. El equipo utilizado para la aplicación de esta técnica, debe ser capaz de generar, emitir y captar haces de ondas bien definidas para encontrar en su trayectoria un cambio en las propiedades físicas del medio en el cual se propagan. El sonido que recorre dentro del material, es reflejado, detectado y analizado para determinar la presencia y la localización de discontinuidades.

Para realizar la inspección, es necesario utilizar una fuente de emisión de ondas sonoras. El transductor es un mecanismo construido con un cristal determinado que generalmente es de cuarzo, sulfato de litio (SO_4Li) y de cerámicas polarizadas como el titanato de bario (TiO_3Ba), metaniobiato de plomo ($\text{Nb}_2\text{O}_6\text{Pb}$) que transforma la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa conocida como efecto piezoeléctrico. La piezoelectricidad es un fenómeno que tienen algunos cristales que al momento de aplicarles una fuerza exterior, se deforman y producen un diferencial de potencial; de la misma manera, también es posible el efecto contrario en el cual, aplicando una tensión determinada se produce la deformación de los cristales.

La propagación del sonido se realiza a una cierta velocidad característica que depende mucho de las propiedades del medio en la que viaja más no de las características de onda. Cuando el sonido se propaga en un medio elástico, existirá una interacción de partículas atómicas donde estas, al ser desplazadas desde su posición de equilibrio, se originan fuerzas interatómicas entre los átomos o moléculas adyacentes el cual, desplazan al resto de partículas del

material en forma de ondas ultrasónicas extremadamente pequeño. La amplitud de estas ondas y la velocidad, dependerán del medio en que estas se propaguen ya sea en un medio sólido, líquido o gaseoso tomando en cuenta que a mayores distancias interatómicas, existirá menores fuerzas de atracción entre ellas.

Las partículas se pueden desplazar en diferentes direcciones de acuerdo a como se propaga el sonido en el material manifestándose en ondas longitudinales, transversales y superficiales que son utilizadas para determinadas aplicaciones.

Las ondas longitudinales que a menudo se las conoce como ondas de compresión, son ondas que viajan a través del material desplazando las moléculas unas con otras en una trayectoria paralela a la propagación del haz sonoro a velocidades de onda relativamente altas con longitudes de onda corta. Para materiales sólidos como el acero, la velocidad de onda alcanza un valor de 6000 m/s, mientras que, en un medio líquido como el agua, la velocidad característica es de 1500 m/s y en un medio gaseoso como el aire la velocidad de onda es de 330 m/s. La aplicación de estas ondas permite identificar inclusiones y discontinuidades de tipo laminar en materiales base.

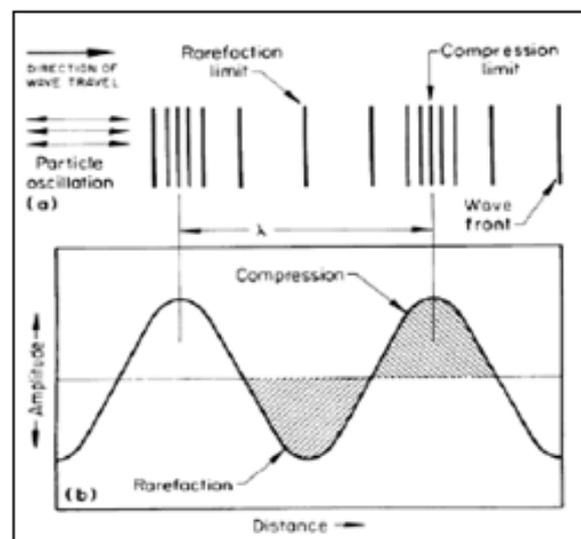


Figura 6.1 Ondas sonoras longitudinales

Fuente: ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control volume 17. 9ed. Estados Unidos. 2004

A diferencia de las ondas longitudinales, las ondas transversales o llamadas también ondas de corte, generan un movimiento de partículas atómicas en dirección perpendicular a la propagación del haz sonoro. Las velocidades de onda producidas son aproximadamente la mitad de las ondas longitudinales debido a que las partículas atómicas requieren mayor fuerza de atracción con sus adyacentes. Como la longitud de onda transversal es más pequeña que las ondas longitudinales a determinada frecuencia, es más sensible a defectos pequeños y tienen mayor capacidad de penetración.

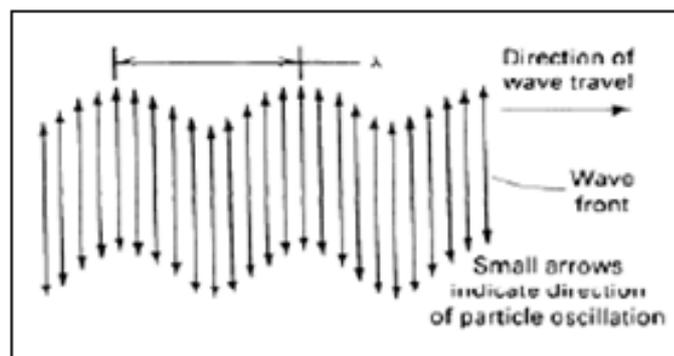


Figura 6.2 Ondas sonoras transversales

Fuente: ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control volume 17. 9ed. Estados Unidos. 2004

La frecuencia de una onda se la puede definir como el número de vibraciones completas u oscilaciones que se realiza en un intervalo de tiempo llamado período. De acuerdo al Sistema Internacional, la frecuencia se mide en hercios (Hz) que representa el número de ciclos por segundo tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{T} \quad 6.1$$

Existe una relación entre la frecuencia, longitud de onda y velocidad de onda que viene representada de la siguiente manera:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad 6.2$$

A partir de esta ecuación, la frecuencia es directamente proporcional a la velocidad de propagación de onda e inversamente proporcional a la longitud de onda, lo que quiere decir, que a menor longitud de onda se tendrá una mayor

frecuencia con lo cual aumentaría la capacidad de inspección por ultrasonido para detectar discontinuidades muy pequeñas al utilizar longitudes de onda corta, por lo que, la aplicación de las ondas transversales se da principalmente para determinar discontinuidades en la soldadura.

Las ondas superficiales o también conocidas como Rayleigh, son ondas que se propagan en la superficie del material de manera similar a las ondas de la superficie del agua. Estas ondas al tener poco movimiento en la superficie, no se las utiliza para la inspección de juntas soldadas.

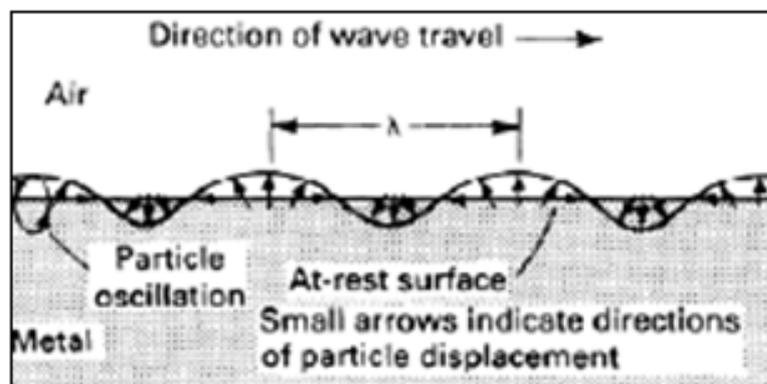


Figura 6.3 Ondas sonoras superficiales

Fuente: ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control volume 17. 9ed. Estados Unidos. 2004

En la inspección de materiales por ultrasonido, existen diferentes técnicas que son utilizados comúnmente en la industria como son el método de pulso – eco, transmisión-recepción y por inmersión.

Específicamente para una inspección de juntas soldadas, el método más utilizado es la técnica de pulso – eco debido a que se pueden generar pulsos eléctricos en intervalos regulares de tiempo que son introducidos en el material y de encontrar alguna irregularidad o defecto interno, parte de esta señal eléctrica o toda, es reflejada en una dirección específica a un transductor de recepción generando el efecto piezoeléctrico de los cristales descritos anteriormente. Este efecto se origina al momento de estimular el cristal piezoeléctrico mediante una corriente, que a su vez genera un movimiento en forma de onda mecánica que viaja a través del material. Cuando esta onda

mecánica llega a chocar con alguna discontinuidad interna, esta rebota y regresa al palpador donde choca con el cristal piezoeléctrico haciendo que el mismo se deforme y transmita una señal eléctrica que se la puede ver en un monitor para posteriormente realizar un análisis de la señal obtenida.

La imagen proyectada en la pantalla aparecen dos picos, el de la izquierda conocida como eco principal, corresponde a la reflexión del ultrasonido al momento de pasar del transductor a la pieza y el pico de la derecha o eco de fondo, corresponde a la superficie posterior de la pieza. De existir una discontinuidad, se mostrará en la pantalla una reflexión entre los dos picos cuya anchura y amplitud de este pico intermedio dependerá de la anchura y orientación de la discontinuidad.

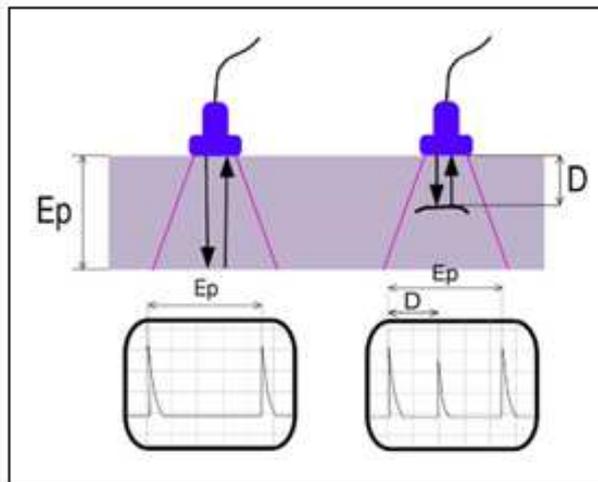


Figura 6.4 Representación esquemática de un ensayo por ultrasonido

Fuente: <http://www.mnve.mil.ve> por CC. Gherson P. Buitrago Muñoz

Una inspección computarizada y de última generación que utiliza el mismo principio de funcionamiento de un pulso – eco es el Phased – Array. A diferencia del método anterior, el Phased – Array utiliza un palpador el cual puede orientar múltiples ángulos a partir de un punto focal permitiendo tener una cobertura totalmente amplia del material y específicamente del cordón de soldadura para detectar zonas críticas como la falta de fusión en la raíz del cordón sin necesidad de utilizar uno o varios palpadores adicionales o explorar en una trayectoria zig – zag.

Los transductores utilizan el mismo principio que un pulso – eco con la diferencia de que el elemento piezoeléctrico se encuentra dividido entre 16 a 256 elementos agrupándose en el orden de 4 a 32, para generar pulsos de ondas retardadas y crear una serie de ondas puntuales que se combinan para formar un frente de onda único en un ángulo seleccionado para lograr un mayor enfoque y área de cobertura. De encontrar alguna grieta o porosidad interna, las ondas sonoras regresan a un detector de señal de la misma manera con la que salieron las ondas siendo estas procesadas por un software en el cual, cada señal recibida representará la reflexión de la onda en forma de un componente en particular.

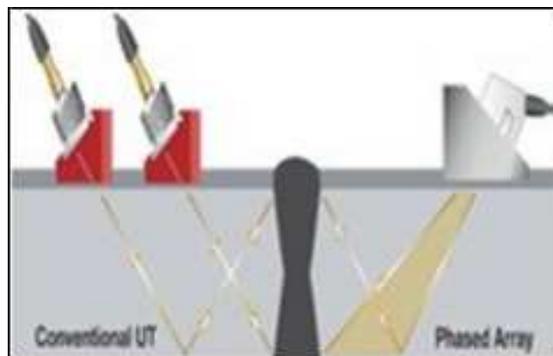


Figura 6.5 Método convencional vs. Phased Array

Fuente: <http://www.hightech.net.ve/servicios/1-ensayos-no-destructivos/phased-array>

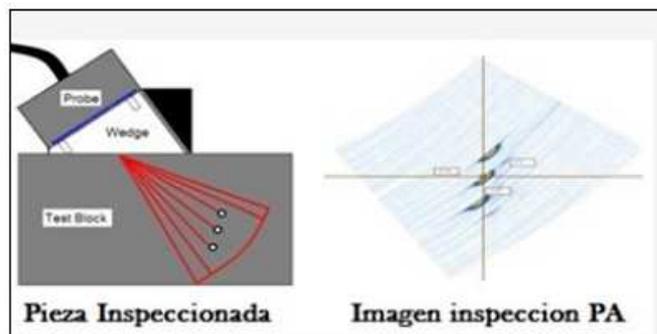


Figura 6.6 Representación de defectos por el método de Phased Array

Fuente: <http://www.hightech.net.ve/servicios/1-ensayos-no-destructivos/phased-array>

Las ventajas principales al usar el método de inspección por Phased Array frente al método tradicional de inspección pulso – eco son la variación del

ángulo de transmisión de ondas para aumentar la capacidad de localización de defectos, capacidad de escaneo y focalización de áreas específicas, mayor sensibilidad para detectar pequeños defectos, mayor cobertura volumétrica, facilidad de calibración e interpretación de datos y lo más sobresaliente es que puede reemplazar a un ensayo radiográfico en el cual se eliminaría la manipulación de fuentes radiactivas que son perjudiciales para los operarios. De manera general, la aplicación de un ensayo por ultrasonido a más de inspeccionar cordones de soldadura para detectar defectos internos, fallas superficiales, inclusiones de escoria, porosidades, fusión incompleta, penetración incompleta de la junta, se da también para la medición de espesores y detectar zonas corroídas., aunque también con menor frecuencia, sirve para determinar propiedades físicas, estructura, tamaño de grano y las constantes elásticas del material.

En un ensayo no destructivo, el inspector deberá emitir un criterio de aceptación de las discontinuidades encontradas en la soldadura en base a normas preestablecidas como indica la norma AWS D1.1 del código de soldadura para aceros estructurales. Estos criterios de aceptación son establecidos en función de los conocimientos, experiencia práctica y la responsabilidad que tiene el individuo para realizar una inspección. Este proceso incorpora una etapa de aprendizaje dividido en tres niveles para que el individuo adquiera los conocimientos y habilidades necesarias para efectuar un ensayo no destructivo específico en el cual, no podrá emitir ningún reporte de resultados sin antes ser evaluados por una persona calificada y certificada quien será el responsable del trabajo realizado.

Nivel I

Es la persona que ha sido capacitado y a demostrado estar debidamente calificado para realizar correctamente la calibración de un equipo de inspección, aplicar criterios de aceptación o rechazo bajo procedimientos preestablecidos siempre bajo la instrucción de un Nivel II o III.

Nivel II

Es la persona que ha sido preparado y ha demostrado estar calificado para realizar correctamente las actividades de un Nivel I. También estará en la capacidad de establecer procedimientos de calibración y de interpretar los resultados obtenidos conforme lo que indica la norma. Debe estar familiarizado con los alcances y limitaciones de la técnica y será también responsable de la capacitación para un Nivel I. Tendrá también la capacidad de formular instrucciones de inspección, organizar y emitir reportes de resultados de las pruebas efectuadas.

Nivel III

Es la persona que ha sido preparado y ha demostrado estar calificado para realizar correctamente las actividades de un Nivel I y II. Puede ser responsable de las pruebas realizadas por un ensayo no destructivo para los cuales esté certificado y debe ser capaz de interpretar y evaluar los resultados en base a criterios establecidos por códigos y normas.

A más de lo anterior, la persona de un Nivel III deberá tener un conocimiento general sobre los materiales, métodos y tecnologías de fabricación que le permitan seleccionar el método de inspección adecuado. Tendrá también la capacidad de elaborar procedimientos de inspección no destructiva a más de la aplicación e interpretación de procedimientos ya calificados.

En este documento se pretendió realizar una inspección por ultrasonido para determinar defectos internos en la soldadura del panel bajo los procedimientos que indica la norma AWS D1.5 del código de soldadura para puentes según lo que indica la sección 6. Los criterios de aceptación de los resultados para un ensayo por ultrasonido se indican en las tablas 6.2 y 6.3 de la norma en las figuras 37 y 38 respectivamente para un espesor de soldadura mínimo de 8mm hasta 200mm.

Discontinuity Severity Class	Weld Size ^a in inches [mm] and Search Unit Angle										
	5/16 through 3/4 [8-20]	> 3/4 through 1-1/2 [20-38]	> 1-1/2 through 2-1/2 [38-65]			> 2-1/2 through 4 [65-100]			> 4 through 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Class A	+5 & lower	+2 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower	-5 & lower	-2 & lower	0 & lower	-7 & lower	-4 & lower	-1 & lower
Class B	+6	+3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1
Class C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 to +2	+1 +2	+3 +4	-4 to +2	-1 to +2	+2 +3
Class D	+8 & up	+5 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up	+3 & up	+3 & up	+5 & up	+3 & up	+3 & up	+4 & up

Figura 6.7 Criterios de aceptación para conexión no tubular cargada estáticamente

Fuente: Norma AWS D1.1. Structural Welding Code Steel. 21ed. 2008 pag.

234

Discontinuity Severity Class	Weld Size ^a in inches [mm] and Search Unit Angle										
	5/16 through 3/4 [8-20]	> 3/4 through 1-1/2 [20-38]	> 1-1/2 through 2-1/2 [38-65]			> 2-1/2 through 4 [65-100]			> 4 through 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Class A	+10 & lower	+8 & lower	+4 & lower	+7 & lower	+9 & lower	+1 & lower	+4 & lower	+6 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower
Class B	+11	+9	+5 +6	+8 +9	+10 +11	+2 +3	+5 +6	+7 +8	-1 0	+2 +3	+4 +5
Class C	+12	+10	+7 +8	+10 +11	+12 +13	+4 +5	+7 +8	+9 +10	+1 +2	+4 +5	+6 +7
Class D	+13 & up	+11 & up	+9 & up	+12 & up	+14 & up	+6 & up	+9 & up	+11 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up

Figura 6.8 Criterios de aceptación para conexión no tubular cargada cíclicamente

Fuente: Norma AWS D1.1. Structural Welding Code Steel. 21ed. 2008 pag.

235

La norma AWS D1.1 presenta en la tabla 6.7 métodos de inspección alternativos necesarios para lograr la cobertura completa de la soldadura si la misma es inaccesible cuando son soldaduras a tope, en T, soldadura de esquina y soldadura por electrogas y electroslag con los respectivos espesores mínimos del material base.

Esquema de Procedimiento																		
Espesor del Material, pulgadas [mm]																		
	5/16[8]	>1-1/2 [38]	>1-3/4[45]	>2-1/2[60]	>3-1/2[90]	>4-1/2[110]	>5[130]	>6-1/2[160]	>7[180]									
Tipo de Soldadura	a	a	a	a	a	a	a	a	a									
	1/1/2[38]	1-3/4[45]	2-1/2[60]	3-1/2[90]	4-1/2[110]	5[130]	6-1/2[160]	7[180]	8[200]									
Soldadura a Tope	1	0	1	F	0	F	0	F	0	F	0	F	0	F	12	F		
Soldadura en T	1	0	1	0	4	0	5	0	7	0	10	0	11	0	13	0	--	--
Soldadura de Esquina	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	--	--	
Electrodo y Electroslag	1	0	1	0	0	1**	0	0	0	P3	0	P3	0	P3	0	P3	0	P3
				1G	1G	P1	6		11		11		11		11		11	
				4	3	P3	7		15		15		15		15		15**	

Figura 6.9 Métodos alternativos de inspección de soldadura para UT

Fuente: Norma AWS D1.1. Structural Welding Code Steel. 21ed. 2008 pag.

Con lo expuesto anteriormente, el ensayo por ultrasonido para la inspección de soldaduras del panel no se pudieron realizar debido a que tanto los espesores del mismo como el del material base son inferiores a lo que indica la norma para poder emitir un criterio según los datos que se obtenga del ensayo. Cuando se presenta estos casos, la norma hace referencia en la sección 6 parte F que para espesores inferiores a 8mm y mayores a 200mm, las pruebas deberían realizarse según lo que indica el anexo K, mismo que menciona métodos alternativos para un examen por ultrasonido el cual, describe técnicas alternativas que presentan procedimientos escritos calificados, calificaciones

especiales para un operador de pruebas de ultrasonido y métodos especiales de calibración necesarios para lograr la exactitud requerida en cuanto a la medición de irregularidades cuyos criterios de aceptación serán sujetos a la aprobación y responsabilidad del Ingeniero a cargo del ensayo.

Con lo anterior y con la experiencia que eso implica, se decidió realizar una inspección no destructiva por tintas penetrantes para verificar el estado de la soldadura del panel y con ello emitir un criterio de acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo.

6.2. TINTAS PENETRANTES

Un ensayo por tintas penetrantes es un método no destructivo que tiene como objetivo detectar las discontinuidades abiertas en la superficie de las piezas por la penetración de un líquido que se lo deja actuar por un tiempo determinado para que este se introduzca en el material y con un revelador, detectar la presencia de discontinuidades presentes en la superficie.

Se puede realizar este método en todos los materiales metálicos ya sean ferrosos o no ferrosos con la única condición de que no sean porosos debido a que esto puede confundir defecto con textura normal. La inspección de la soldadura que compete a este documento, se usa principalmente para detectar porosidades, grietas, traslapes en las juntas soldadas, costuras y laminaciones abiertas a la superficie del metal base.

Antes de realizar un proceso por tintas penetrantes, es importante tomar en cuenta las características que deben tener los productos utilizados y seleccionar en lo posible los líquidos ideales para este ensayo.

Para los líquidos penetrantes, la principal característica es su poder de penetración que permita introducirse en grietas muy finas y permanecer en las más gruesas. Otros factores a tomar en cuenta para que los líquidos aplicados sean aptos para el ensayo deben cumplir con las siguientes características:

- El líquido debe ser de volatilidad baja, es decir, que no debe evaporarse con demasiada rapidez.

- Que se pueda eliminar de la superficie con facilidad sin que la operación de limpieza afecte al líquido retenido en la discontinuidad.
- Permanecer en estado fluido para que el líquido salga con facilidad al aplicar el revelador.
- Conservar el color por un tiempo suficiente.
- No debe ser un agente corrosivo.
- No tener un olor tóxico
- No ser inflamable

El conjunto de todas estas características difícilmente se pueden encontrar en una sola sustancia puesto que los líquidos que se encuentran en el mercado, son mezclas de muy diversa composición química que se aproximan más o menos a las características requeridas por un penetrante que pudiera estimarse como ideal.

Los reveladores son líquidos que ponen en manifiesto los sitios en las que el líquido penetrante ha sido retenido por la grieta. La forma de actuar del revelador es como un papel secante en la que extrae el líquido de la discontinuidad por acción de capilaridad, en el cual, el líquido asciende a través del revelador y se difunde en la capa superficial.

Existen reveladores que se pueden aplicar sobre una superficie por aspersion o por brocha dependiendo del tipo de revelador a utilizar.

Un revelador seco o de polvo seco está compuesto de polvo, talco, yeso, sílice amorfa, que son granos muy finos capaces de adherirse con facilidad sobre la superficie metálica formando una capa fina y continua. Es importante que este tipo de revelador no tenga tendencia a flotar en el aire aunque esto resulta ser muy complicado.

Los reveladores húmedos son suspensiones acuosas o no acuosas de polvo contenidas en agua, alcohol o disolventes orgánicos que pueden acceder a cualquier superficie del material. Estos reveladores tienen la ventaja de que al aplicarlos no forman nubes de polvo.

Al igual que el líquido penetrante, el revelador debe tener ciertas características para que se pueda revelar las discontinuidades de mejor manera y para ello debe presentar:

- Gran capacidad de absorción.
- Contener granos de polvo muy fino para conseguir una buena definición del contorno.
- Debe ser de fácil aplicación dejando una capa continua de espesor uniforme.
- El color debe contrastar con el del líquido penetrante.
- Que se pueda eliminar de la superficie fácilmente.
- No ser tóxico.
- No ser un agente corrosivo.

6.2.1. EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Definidas las características que deben tener los productos, los equipos y materiales que fueron utilizados son los siguientes:

- Removedor acuoso o cleaner ADROX 9PR551.
- Tinta penetrante de color rojo ADROX 996P.
- Revelador húmedo no acuoso ADROX 901B.
- Papel tipo toalla para eliminar el líquido de la superficie del material base.
- Cepillo mecánico de cerdas de media dureza.

6.2.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Los pasos a seguir en una inspección por tintas penetrantes consta de los siguientes puntos:

Limpieza de la superficie.- este paso previo consiste en remover de la superficie todo material contaminante del material base para que no afecte la penetración del líquido. Esto se logra con la utilización de un cepillo mecánico

de cerdas para eliminar la pintura que presenta el panel sin producir rayaduras en la superficie. Luego de remover la pintura, se rocía el cleaner ADROX 9PR551 sobre la superficie y con un papel tipo toalla remover y secar el material depositado.

Aplicación del penetrante.- la aplicación del líquido penetrante de color rojo ADROX 996P, se lo realiza por aspersion a una distancia aproximada de 20 cm cubriendo por completo la superficie a examinar de manera uniforme y una vez depositado, dejar actuar durante 15 a 20 minutos.

Eliminación del exceso de penetrante.- transcurrido el tipo indicado de penetración, utilizar suficiente papel tipo toalla para remover el exceso del líquido penetrante de la superficie con movimientos de derecha a izquierda y viceversa. Este punto es crítico debido a que al existir líquido restante en la superficie, la difusión del líquido penetrante pueda confundirse al momento de aplicar el revelador sin tener buenos resultados. Por lo anterior, es importante rociar el papel tipo toalla con cleaner y limpiar la superficie a ser analizada.

Aplicación del revelador.- la aplicación del revelador ADROX 901B se realizará tan pronto como se limpie la superficie pero primero, se debe agitar para homogenizar el contenido y posteriormente rociar a una distancia aproximada de 20 cm sobre la superficie y esperar entre 15 a 20 minutos para proceder con la interpretación de los resultados.

Limpieza de la superficie.- terminado el ensayo, es necesario remover las superficies con un papel tipo toalla para no provocar una mala apariencia o que estas reaccionen con el material.

6.2.3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos por este ensayo serán mostrados siguiendo un parámetro de ubicación de cada una de las fotografías de las soldaduras que une el perfil de arriostramiento con el perfil estructural como se indica en la

figura 6.10. Esto permitirá identificar la existencia de porosidades o grietas que tengan las soldaduras en las respectivas posiciones.

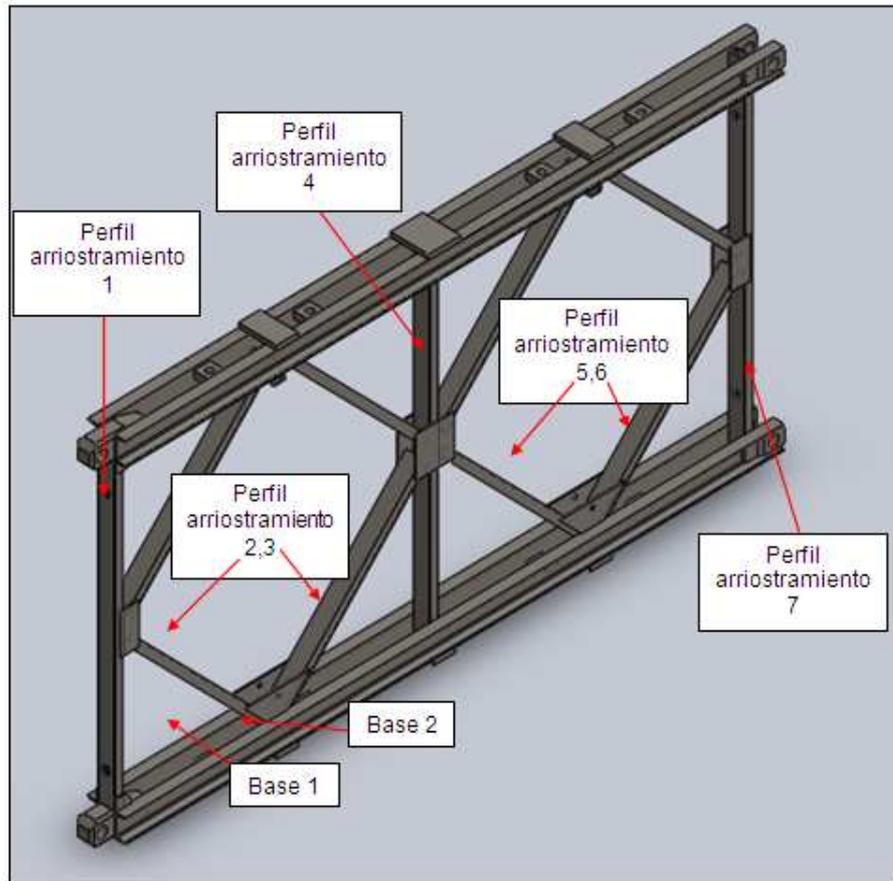


Figura 6.10 Tintas penetrantes, disposición de la soldadura

Fuente: Propia

Tabla 6.1 Resultado de un END por tintas penetrantes

BASE 1		
Ubicación	t. de revelado	Observación
Perfil arriostramiento1	15 min.	Porosidad superficial $\varnothing = 2$ mm
Perfil arriostramiento2	17 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 3	17 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 4	15 min.	Porosidad superficial $\varnothing = 4$ mm
Perfil arriostramiento 5	15 min.	Porosidad superficial $\varnothing = 4$ mm
Perfil arriostramiento 6	15 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 7	20 min.	Sin novedad

Fuente: Propia

Tabla 6.1 Resultado de un END por tintas penetrantes (continuación)

BASE 2		
Ubicación	t. de revelado	Observación
Perfil arriostramiento1	17 min.	Porosidad superficial $\varnothing = 9$ mm
Perfil arriostramiento2	15 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 3	15 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 4	17 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 5	15 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 6	15 min.	Sin novedad
Perfil arriostramiento 7	15 min.	Sin novedad

Fuente: Propia

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. INTRODUCCIÓN

Realizados los respectivos ensayos en los laboratorios de Metalurgia y Mecánica de Materiales, en este capítulo se procederá a analizar los resultados alcanzados de cada uno de los elementos del panel y de acuerdo a las características, encontrar un acero equivalente para la construcción de los mismos. A partir de una caracterización metalográfica se podrá cuantificar el tamaño de grano de forma manual según lo que indica la norma ASTM E 112 por el método planimétrico y por el método de intersección. Por otra parte se analizará la calidad de la soldadura específicamente en una sección del muñón mediante una inspección visual tomando como referencia las indicaciones que hace la norma AWS D1.1 para poder emitir un criterio de acuerdo a lo observado, mientras que, de forma cualitativa, revelar características propias de los materiales mediante un ensayo de chispa para identificar los procesos mecánicos al que fueron sometidos cada uno de los elementos de análisis. Por otro lado, el uso del microscopio electrónico permitirá observar con mayor detenimiento el tamaño de las inclusiones presentes en el material y con los resultados que se obtenga de composición química, identificar y comparar elementos de aleación que se encuentren con mayor representatividad en cada uno de los elementos con los valores alcanzados luego de haber realizado un ensayo de espectrometría por chispa. Para comprender de mejor manera, los datos de composición química están representados como D1, D2, D3 y D4 que hace mención al número de ensayos realizados por cada elemento estructural.

Por último una caracterización mecánica permitirá determinar de forma cuantitativa la resistencia que tienen los materiales al aplicárseles una carga axial de tal forma que sirva de complemento de los resultados anteriores con el fin de seleccionar de manera más sencilla uno o varios aceros equivalentes utilizados para la construcción de estos elementos estructurales.

7.2. MUÑÓN

ESTRUCTURA MICROGRÁFICA

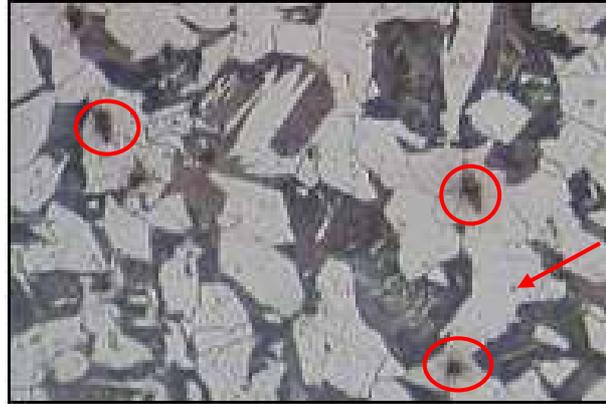


Figura 7.1 Micrografía del muñón de panel 100X

Fuente: Propia

Tabla 7.1 Tamaño de grano ASTM del muñón de panel

	Método ASTM		
	Planimétrico	Intersección	Comparación
Tamaño de grano ASTM	3,63	3,62	3

Fuente: Propia

- Los valores del tamaño de grano ASTM tanto por el método planimétrico como por el método de intersección, indica la confiabilidad y la exactitud de ambos procedimientos más no por el método por comparación de imagen ratificando de esta manera lo que hace énfasis la norma sobre la confiabilidad de los resultados alcanzados por los tres métodos.
- Con los datos obtenidos por los métodos planimétrico e intersección, el tamaño de grano promedio ASTM es aproximadamente 3,5.
- Para este tamaño de grano se tiene que el diámetro promedio del grano es aproximadamente de 106,8 μm .

- La cantidad de granos por milímetro cuadrado (No./mm²) es de 87,68 para una amplificación de 1X equivalente a 5,66 granos por pulgada cuadrada para una amplificación de 100X.
- La estructura micrográfica está basado en una matriz ferrita – perlita que se representan de color blanco y negro respectivamente con un tamaño de grano grueso.
- Las zonas oscuras en forma de manchas señaladas por círculos de color rojo indican presencia de inclusiones.
- Por el alto contenido de carbono hace que este elemento estructural presente gran cantidad de perlita en una matriz ferrítica afectando la resistencia del material.
- Pequeñas manchas que aparecen en la ferrita indicada con flecha color rojo, son carburos formados por elementos residuales como el cromo, molibdeno y silicio, este último en pequeñas cantidades.

INCLUSIONES

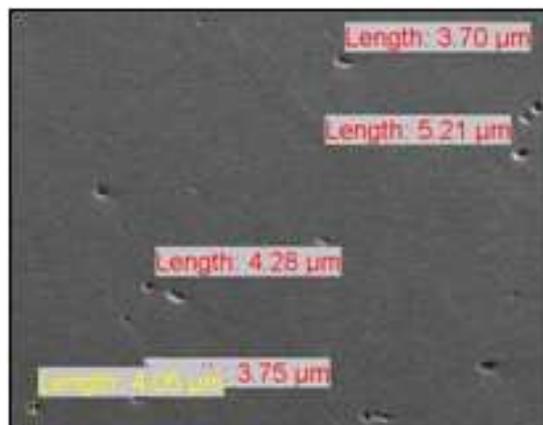


Figura 7.2 Inclusiones del muñón de panel 200X

Fuente: Propia

Tabla 7.2 Media y desviación estándar inclusiones de muñón de panel

Media (\bar{x}) µm	4,2
Desviación estándar (σ)	0,6

Fuente: Propia

- El tamaño promedio de las inclusiones calculado automáticamente por el programa es de 4,2 μm en una amplificación 200X
- Por la forma circular de las porosidades que se las puede observar en la imagen, las inclusiones son de tipo óxido ratificando así lo expuesto anteriormente.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Tabla 7.3 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del muñón de panel

Composición Química muñón							
Espectrometría por chispa		Microscopio Electrónico					
Elemento	D1	D1	D2	D3	D4	\bar{x}	σ
	%	%	%	%	%	%	
Carbono (C)	0,239	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Silicio (Si)	0,242	0,47	0,92	0,50	0,51	0,60	0,19
Manganeso (Mn)	1,214	0,82	1,66	0,72	0,00	0,80	0,59
Cromo (Cr)	0,071	0,02	0,06	0,00	0,00	0,02	0,02
Níquel (Ni)	0,158	0,00	0,73	0,32	0,29	0,34	0,26
Fósforo (P)	<0,005	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01
Azufre (S)	<0,150	0,23	0,74	0,17	0,01	0,29	0,27
Cobre (Cu)	0,234	0,42	0,00	0,22	0,32	0,24	0,16
Aluminio (Al)	0,015	0,00	0,00	0,14	0,15	0,07	0,07
Molibdeno (Mo)	0,059	0,11	0,00	0,00	0,28	0,10	0,11
Titanio (Ti)	<0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vanadio (V)	<0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hierro (Fe)	97,52	98,22	98,63	97,92	98,44	98,30	0,26

Fuente: Propia

- Los porcentajes en peso tanto del silicio, manganeso, níquel y cobre hacen que estos materiales se presenten en grandes cantidades respecto a otros

aleantes por lo que serán de vital importancia tomarlos en cuenta los efectos que estos producen en el comportamiento mecánico.

- Los porcentajes de cromo, molibdeno y aluminio al encontrarse en pequeñas cantidades respecto a los mencionados en el inciso anterior, son elementos residuales que pueden no tomarse en cuenta al momento de seleccionar el material adecuado bajo normas ya mencionadas.
- Tanto el vanadio como el titanio no se encuentran presentes en el material puesto que indican valores en cero.
- La cantidad de aluminio presente en el muñón se debe a que anteriormente la superficie de la muestra fue pulidora en presencia de alúmina cuyo efecto fue determinante al analizar la muestra en un microscopio electrónico.

CARACTERÍSTICA DE CHISPA



Figura 7.3 Chispa característica del muñón de panel

Fuente: Propia

- Se puede observar la presencia de líneas continuas alcanzando 700 mm de longitud con pocos estallidos de carbono que terminan en forma de puntas.
- El color de la chispa es de un blanco amarillento en todo el flujo con un escaso color anaranjado al término del haz.
- Antes de los estallidos de carbono se observa una luz intensa en el flujo donde hay más concentración de chispa
- Por el color y la forma del haz de chispa hace que este material sea un acero de bajo contenido de carbono aleado con manganeso y silicio.

ENSAYO DE TRACCIÓN

Tabla 7.4 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del muñón de panel

	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
Media (\bar{x})	458,7	577,7	20,4
Desviación estándar (σ)	13,478	6,216	1,309

Fuente: Propia

- Se puede ver que los valores promedios de resistencia a la fluencia y resistencia última a la tracción son de 458,7 MPa y 577,7 MPa respectivamente con un alargamiento porcentual del 20,4%.
- El resultado correspondiente a la resistencia a la fluencia se obtuvo a partir de la figura 7,4 en la que representa la gráfica de la curva característica de carga – deformación unitaria del muñón desplazando una recta paralela a la recta en el rango elástico 0,2% hasta que la misma corte la curva característica.

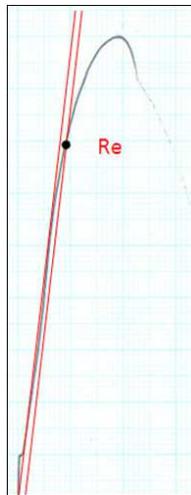


Figura 7.4 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del muñón de panel

Fuente: Propia

De acuerdo con los resultados de composición química, se analizará de manera gráfica la influencia que tienen los elementos de aleación en la resistencia a la fluencia de manera aproximada.

En la figura 7.5, se muestra una representación gráfica de la resistencia a la fluencia, resistencia última a la tracción y dureza respecto al contenido de carbono en porcentaje en peso. El muñón presenta un contenido de carbono de 0,239% y a partir de ese punto, se traza una línea perpendicular hasta que cruce con las curvas de las propiedades mecánicas antes especificadas de la siguiente manera:

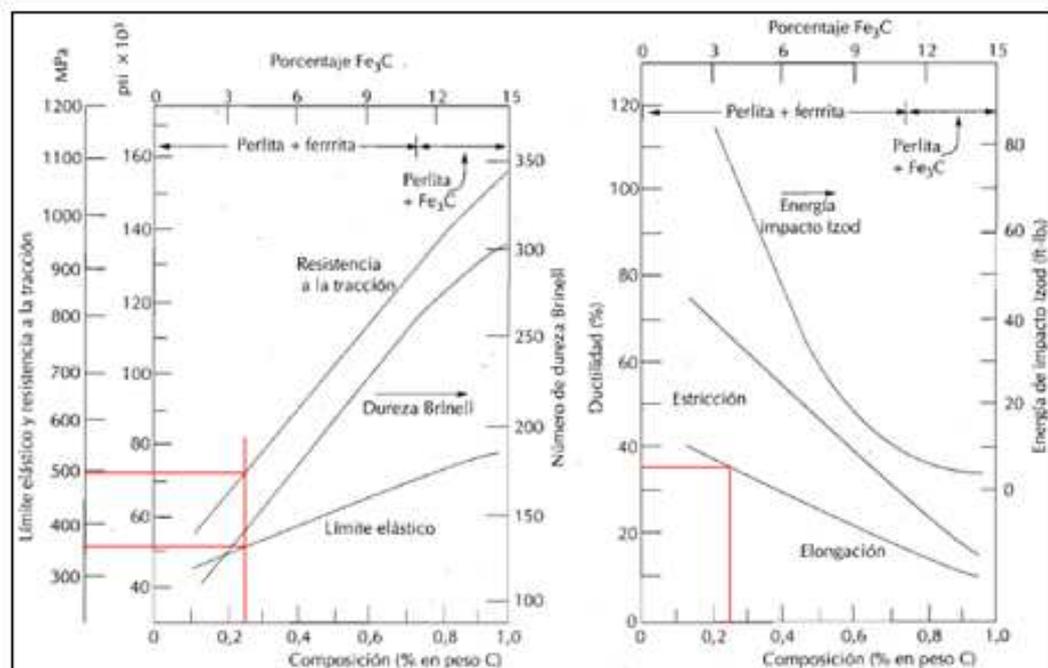


Figura 7.5 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del muñón de panel

Fuente: Callister, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed Reverté. España. 1996

Aproximadamente los valores que se pueden obtener de la gráfica para la resistencia a la fluencia y resistencia a la tracción son 360 MPa y 500 MPa respectivamente en una estructura perlita + ferrita con un porcentaje de alargamiento del 35%.

La figura 7.6 en cambio representa la variación de la resistencia a la fluencia de acuerdo al contenido en porcentaje en peso de cada aleación presente en el material. Los elementos más representativos de acuerdo a un análisis de composición química son el silicio (azul), manganeso (rojo), cobre (verde) y níquel aunque este último puede ser descartado debido a que a partir de un

porcentaje en peso mayor al 2%, muestra un cambio mínimo en la resistencia a la fluencia.

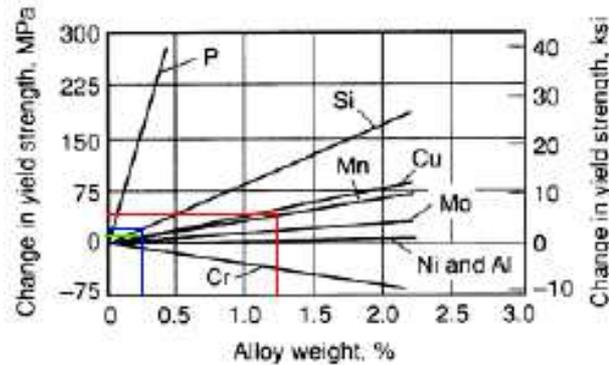


Figura 7.6 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación del muñón de panel

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys volume 1. 9 ed. Estados Unidos. 2004

Los valores aproximados que se pueden obtener de la gráfica de acuerdo a los resultados logrados por un ensayo de espectrometría por chispa son 10,7 MPa, 21,4 MPa y 42,8 MPa para los elementos de cobre (verde), silicio (azul), manganeso (rojo) respectivamente. Estos valores sumados al valor obtenido de la gráfica anterior, se tiene una resistencia a la fluencia aproximadamente de 440 MPa muy aproximado al valor obtenido en un ensayo de tracción.

ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL B

Con los datos obtenidos de dureza, se puede comparar la resistencia última a la tracción obtenida en laboratorio a partir de su equivalencia en dureza Brinell misma que está estrechamente relacionada mediante la siguiente ecuación misma que será utilizada para todos los elementos estructurales en análisis.

$$R_m = 500BHN \text{ (Ksi)} \quad 7.1$$

Tabla 7.5 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del muñón de panel

Media (\bar{x})	84,4
Desviación estándar (σ)	0,7

Fuente: Propia

Tabla 7.6 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del muñón de panel

Rockwell B	Rmt ₁	HRB	Rmt ₂	Rmp	Error ₁	Error ₂
	MPa		MPa	Mpa	%	%
84,4	562,0	163,2	563,4	577,6	2,8	2,5

Fuente: Propia

- La media aritmética de los datos obtenidos es de 84,4 RB.
- La resistencia última a la tracción para este valor de dureza es de 562 MPa que da un error porcentual del 2,8% comparándolo con el valor obtenido en un ensayo de tracción.
- La resistencia última a la tracción a partir del resultado de dureza Brinell es de 563,4 MPa dando como error porcentual del 2,5% cumpliendo así la estrecha relación que tienen ambos métodos.

7.3. BULÓN DE PANEL

ESTRUCTURA MICROGRÁFICA



Figura 7.7 Micrografía del bulón de panel 100X

Fuente: Propia

Tabla 7.7 Tamaño de grano ASTM del bulón de panel

	Método ASTM	
	Planimétrico	Intersección
Tamaño de grano ASTM	4,04	4,45

Fuente: Propia

- Los datos obtenidos por ambos métodos revela que el tamaño de grano promedio ASTM es aproximadamente 4.
- Para este número ASTM se obtiene un diámetro promedio del grano aproximadamente de 89.8 μm .
- La cantidad de granos por milímetro cuadrado ($\text{No.}/\text{mm}^2$) es de 124 para una amplificación de 1X equivalente a 8 granos por pulgada cuadrada para una amplificación de 100X.
- La estructura micrográfica está basado en una matriz ferrita – perlita que se representan de color blanco y negro respectivamente con un tamaño de grano grueso.
- A diferencia de la estructura micrográfica del muñón del panel, aunque amabas son de grano grueso, la perlita se encuentra en menor cantidad y tamaño.
- Al presentar una estructura granular de grano grueso, este elemento estructural tendrá menor resistencia a la tracción y menor dureza con respecto a materiales que tengan una estructura granular de grano fino.
- Los círculos de color rojo muestran la presencia de inclusiones que se manifiestan en forma de manchas oscuras difuminadas.
- Pequeños puntos en la ferrita muestran la formación de carburos en pocas cantidades de aleaciones como el cobre y el silicio.

INCLUSIONES

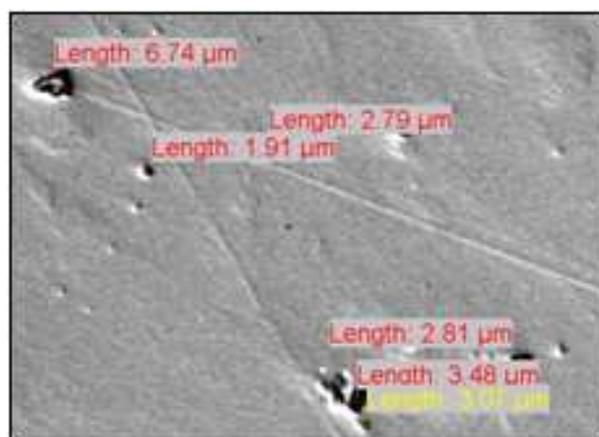


Figura 7.8 Inclusiones del bulón de panel 500X

Fuente: Propia

Tabla 7.8 Media y desviación estándar inclusiones del bulón de panel

Media (\bar{x}) μm	3,5
Desviación estándar (σ)	1,5

Fuente: Propia

- El tamaño promedio de las inclusiones de mayor diámetro calculado automáticamente por el programa es de 3,5 μm en una amplificación 500X
- Por la forma circular que se observa en la imagen, las inclusiones son de tipo óxido ratificando de esta manera lo expuesto anteriormente.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Tabla 7.9 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del bulón de panel

Composición Química bulón del panel							
Espectrometría por chispa		Microscopio Electrónico					
Elemento	D1	D1	D2	D3	D4	\bar{x}	σ
	%	%	%	%	%	%	
Carbono (C)	0,211	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Silicio (Si)	0,164	0,34	0,38	0,31	0,39	0,36	0,03
Manganeso (Mn)	0,487	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Cromo (Cr)	0,019	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Níquel (Ni)	0,005	0,07	0,08	0,10	0,07	0,08	0,01
Fósforo (P)	<0,005	0,04	0,00	0,00	0,06	0,03	0,03
Azufre (S)	<0,150	0,04	0,02	0,08	0,05	0,05	0,02
Cobre (Cu)	0,021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aluminio (Al)	<0,005	0,20	0,14	0,23	0,25	0,21	0,04
Molibdeno (Mo)	<0,010	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01	0,02
Titanio (Ti)	<0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vanadio (V)	<0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hierro (Fe)	98,86	99,31	99,39	99,27	99,12	99,27	0,10

Fuente: Propia

- Los elementos como el níquel y el molibdeno al encontrarse en pequeñas cantidades, son elementos residuales que pueden ser descartados al momento de realizar un proceso de selección de un material apropiado puesto que estos elementos no inciden mucho en el comportamiento mecánico.
- Elementos como el titanio, vanadio al presentar valores en cero hace que su presencia en el material sea nulo.
- Para seleccionar un material adecuado, se puede tomar en cuenta la cantidad de silicio o la cantidad de manganeso presente en el material puesto que en ambos ensayos los resultados tienen un valor de cero.
- La cantidad de aluminio presente en el muñón se debe a que anteriormente la superficie de la muestra fue pulida en presencia de alúmina cuyo efecto fue determinante al analizar la muestra en un microscopio electrónico.

ENSAYO DE CHISPA



Figura 7.9 Chispa característica del bulón de panel

Fuente: Propia

- La chispa presenta líneas continuas alcanzando 800 mm de longitud con algunos destellos de carbono al término del haz presentándose en forma de espigas.
- El color de la chispa es de un tono amarillento en la mayor concentración del haz que termina en un tono ligeramente anaranjado al final de la misma.
- Las características de forma y color del haz son propias de un acero de bajo contenido de carbono.

- Por la longitud del haz de chispa hace que este elemento sea de bajo contenido de carbono.

ENSAYO DE TRACCIÓN

Tabla 7.10 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del bulón de panel

	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
Media (\bar{x})	482,6	556,1	20,1
Desviación estándar (σ)	4,4	1,1	0,5

Fuente: Propia

- Se puede ver que los valores promedios de resistencia a la fluencia y resistencia última a la tracción son de 482,6 MPa y 556,1 MPa respectivamente.
- El resultado correspondiente a la resistencia a la fluencia se obtuvo a partir de la figura 7.10 que representa la gráfica de la curva característica de carga – deformación unitaria del bulón de panel realizando el mismo procedimiento del anterior elemento estructural puesto que ambas gráficas tienen similares características.

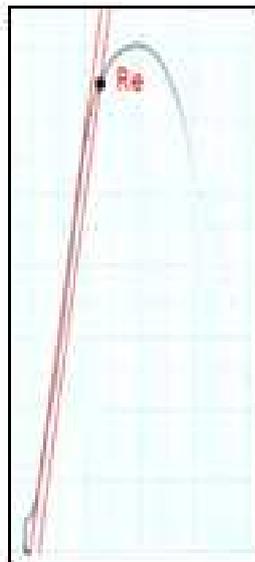


Figura 7.10 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del bulón de panel

Fuente: Propia

Mediante un análisis gráfico se puede obtener valores aproximados de resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia de 475 MPa y 350 MPa respectivamente con un alargamiento porcentual del 37% en una estructura ferrita + perlita como se indica a continuación:

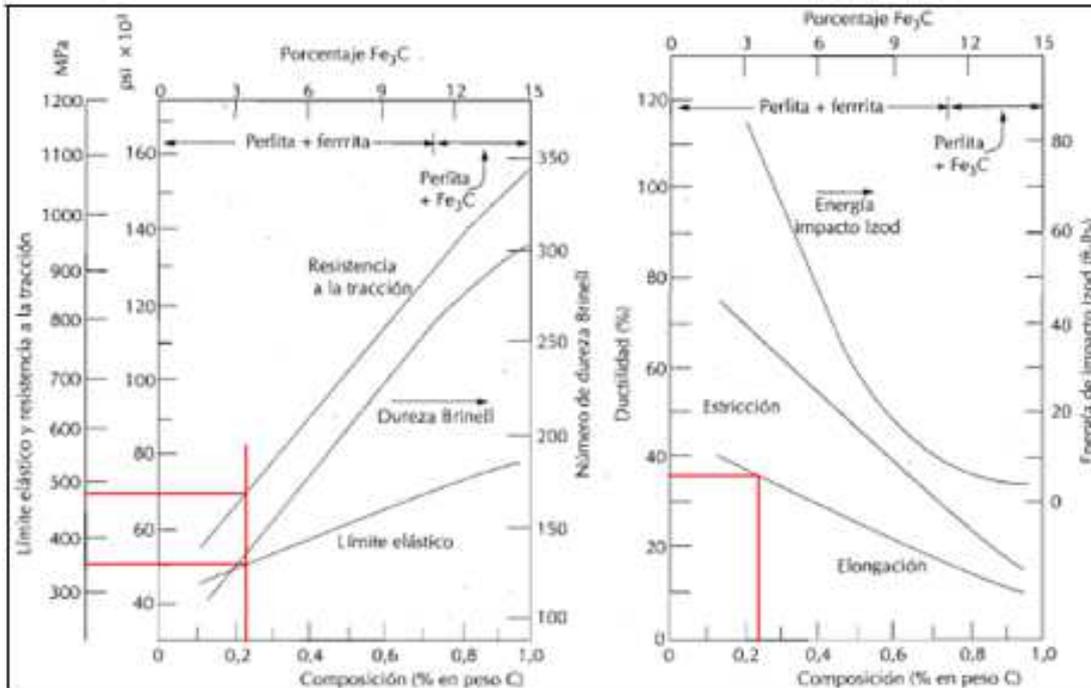


Figura 7.11 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del bulón de panel

Fuente: Callister, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed Reverté. España. 1996

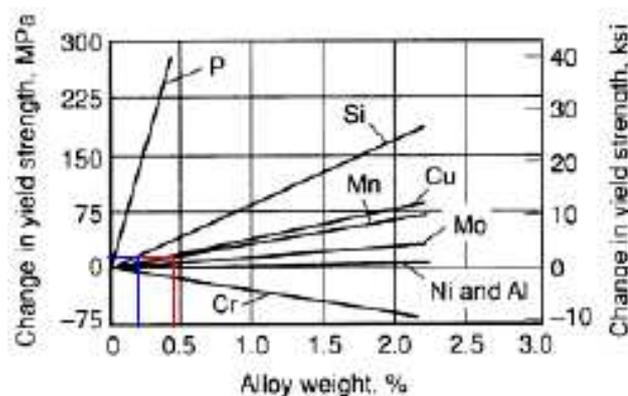


Figura 7.12 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación del bulón de panel

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys volume 1. 9 ed. Estados Unidos. 2004

De acuerdo al porcentaje en peso de los elementos de aleación, el silicio (azul) y el manganeso (rojo) refuerzan cada uno a la ferrita en 16 MPa que sumados con el valor obtenido en la figura anterior, la resistencia a la fluencia para este material es de 382 MPa.

ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL B

Tabla 7.11 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del bulón de panel

Media (\bar{x})	86,7
Desviación estándar (σ)	0,7

Fuente: Propia

Tabla 7.12 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del bulón de panel

Rockwell B	Rmt₁	HRB	Rmt₂	Rmp	Error₁	Error₂
	MPa		MPa	Mpa	%	%
86,7	584,0	171,1	590,7	556,1	4,8	5,9

Fuente: Propia

- El bulón del panel presenta una media aritmética de 86,7 RB.
- Para este valor, la resistencia a la tracción es de 584 MPa que da un error porcentual del 4,8% comparándolo con el valor obtenido en un ensayo de tracción.
- La resistencia última a la tracción a partir del resultado de dureza Brinell es de 590,7 MPa dando como error porcentual del 5,9% cumpliendo en cierta forma la estrecha relación que tienen ambos métodos.

7.4. PERFIL ESTRUCTURAL C

ESTRUCTURA MICROGRÁFICA



Figura 7.13 Micrografía del perfil estructural C 100X

Fuente: Propia

Tabla 7.13 Tamaño de grano ASTM del perfil estructural C

	Método ASTM	
	Planimétrico	Intersección
Tamaño de grano ASTM	4,89	4,99

Fuente: Propia

- Los datos obtenidos por ambos métodos, el tamaño de grano promedio ASTM es aproximadamente 5.
- Para este número ASTM se obtiene un diámetro promedio del grano aproximadamente de 63.5 μm .
- La cantidad de granos por milímetro cuadrado (No./mm^2) es de 248 para una amplificación de 1X equivalente a 16 granos por pulgada cuadrada para una amplificación de 100X.
- La estructura micrográfica está basado en una matriz ferrita – perlita que se representan de color blanco y negro respectivamente con una estructura granular de grano fino.
- Relacionando con el inciso anterior, este elemento estructural presentará una mayor resistencia a la tracción y mayor dureza respecto a los anteriores

elementos estructurales que presentan una estructura granular de grano grueso.

- Los círculos de color rojo indican la presencia de inclusiones en el material aunque no en gran cantidad como se muestran en anteriores microfotografías.
- En la ferrita existe la presencia de pequeños carburos en forma de puntos negros que son causados por elementos como el silicio, cromo y en especial del vanadio que refuerzan a este microconstituyente.

INCLUSIONES

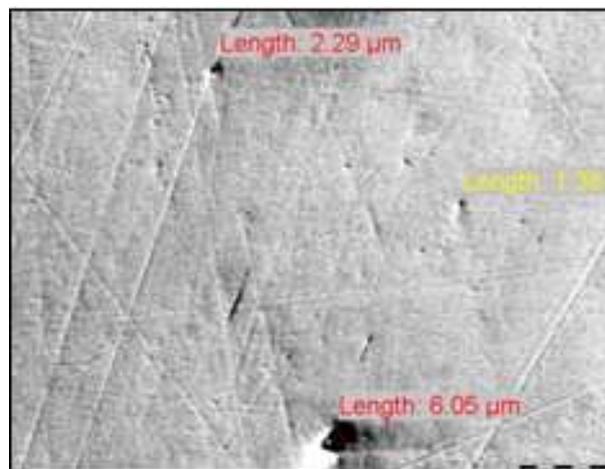


Figura 7.14 Inclusiones del perfil estructural C 500X

Fuente: Propia

Tabla 7.14 Media y desviación estándar inclusiones del perfil estructural C

Media (\bar{x}) μm	3,2
Desviación estándar (σ)	2,0

Fuente: Propia

- El tamaño promedio de las inclusiones de mayor diámetro calculado automáticamente por el programa es de 3,2 μm con una amplificación 500X
- Por la forma circular que se observa en la imagen, las inclusiones son de tipo óxido ratificando lo dicho anteriormente.

- Las imágenes mostradas tanto micrográfica como de inclusiones hace que este elemento estructural tenga menos defectología no metálica puesto que en la micrografía no se muestran en grandes cantidades respecto a casos anteriores.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Tabla 7.15 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del perfil estructural C

Composición Química perfil estructural C							
Espectrometría por chispa		Microscopio Electrónico					
Elemento	D1	D1	D2	D3	D4	\bar{x}	σ
	%	%	%	%	%	%	
Carbono (C)	0,134	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Silicio (Si)	0,284	0,59	0,47	0,55	0,46	0,52	0,05
Manganeso (Mn)	1,241	0,63	0,79	0,51	0,81	0,69	0,12
Cromo (Cr)	0,024	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Níquel (Ni)	0,019	0,14	0,19	0,04	0,08	0,11	0,06
Fósforo (P)	<0,005	0,04	0,00	0,00	0,09	0,03	0,04
Azufre (S)	<0,150	0,07	0,00	0,04	0,00	0,03	0,03
Cobre (Cu)	0,033	0,00	0,07	0,07	0,24	0,10	0,09
Aluminio (Al)	0,02	0,44	0,42	0,31	0,29	0,37	0,07
Molibdeno (Mo)	<0,010	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Titanio (Ti)	<0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vanadio (V)	0,125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hierro (Fe)	97,89	98,08	98,06	98,48	98,02	98,16	0,19

Fuente: Propia

- Elementos como el silicio y el manganeso, están presentes en mayor cantidad con respecto a otros aleantes por lo que será de gran importancia tomarlos en cuenta la influencia que tienen en el comportamiento mecánico sin dejar de lado la cantidad de vanadio presente en el material.

- Elementos como el níquel y el cobre al estar en menor cantidad, pueden no ser tomados en cuenta en un proceso de selección de un material adecuado puesto que los mismos son elementos residuales que no representan mayor influencia al comportamiento mecánico, no así elementos como el titanio, molibdeno y cromo que presentan valores en cero por lo que la presencia en el material sea prácticamente nula.
- La cantidad de aluminio presente en el muñón se debe a que anteriormente la superficie de la muestra fue pulidora en presencia de alúmina cuyo efecto fue determinante al analizar la muestra en un microscopio electrónico.

ENSAYO DE CHISPA

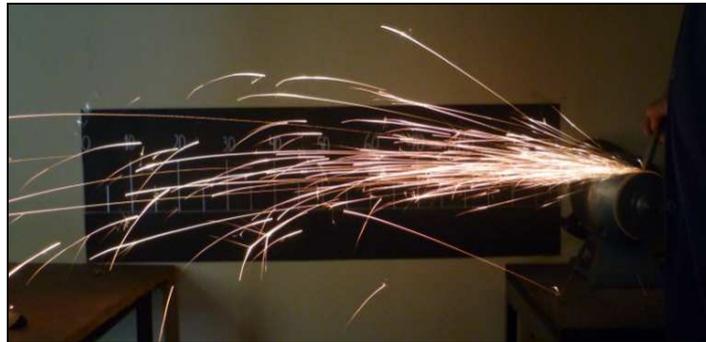


Figura 7.15 Chispa característica del perfil estructural C

Fuente: Propia

- La chispa presenta un flujo continuo de líneas alcanzando 800 mm de longitud con pocos destellos de carbono al final del haz.
- Donde hay más concentración de chispa presenta un color amarillento y al final del haz cambia a un color anaranjado.
- Presenta una amplia longitud de chispa característica de un acero de bajo contenido de carbono.
- El color anaranjado indica que este material sea un acero que ha sido trabajado en caliente.

ENSAYO DE TRACCIÓN

Tabla 7.16 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del perfil estructural C

	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
Media (\bar{x})	502,4	633,3	20,9
Desviación estándar (σ)	0,3	6,9	0,7

Fuente: Propia

- Se puede ver que los valores promedios de resistencia a la fluencia y resistencia última a la tracción son de 502,4 MPa y 633,3 MPa respectivamente.
- El resultado correspondiente a la resistencia a la fluencia se obtuvo a partir de la figura 7.16 que representa la gráfica de la curva característica de carga – deformación unitaria del perfil estructural C de manera directa.



Figura 7.16 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del perfil estructural C

Fuente: Propia

Realizando el mismo análisis para determinar el comportamiento mecánico que tiene el perfil estructural C de acuerdo a los elementos aleantes que presenta en su composición química se obtiene que para una estructura perlita + ferrita, los valores aproximados de resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia

son de 400 MPa y 325 MPa respectivamente con un alargamiento porcentual del 40%, por otra parte, los elementos de aleación como el silicio (azul), manganeso (rojo) representados en la figura 7.18, fortalecen a la ferrita con un valor aproximado de 64 MPa en la resistencia a la fluencia como se indica a continuación:

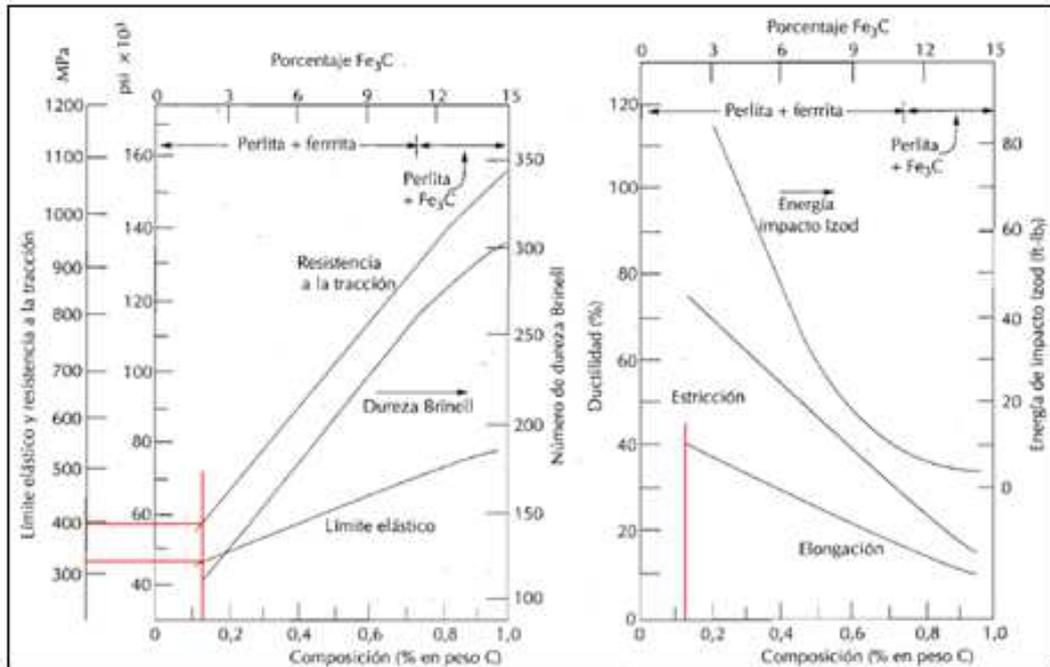


Figura 7.17 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del perfil estructural C

Fuente: Callister, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed Reverté. España. 1996

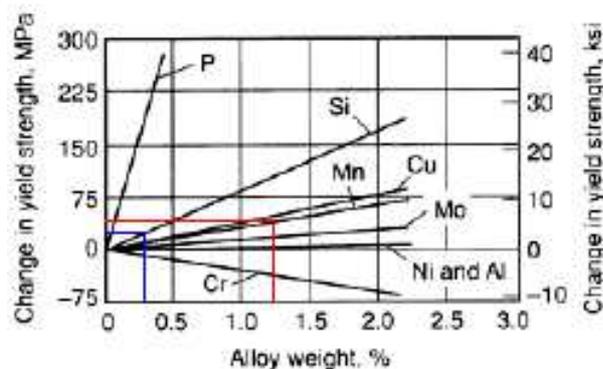


Figura 7.18 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación perfil estructural C

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys volume 1. 9 ed. Estados Unidos. 2004

El valor aproximado de resistencia a la fluencia obtenida gráficamente y sumado al anterior es de 389 MPa muy lejos del valor obtenido en el ensayo de tracción que arrojó un valor de 502,4 MPa. La diferencia de valores se debe por una parte a que este elemento estructural presenta una estructura micrográfica de granos finos, lo cual quiere decir que al momento de aplicar una fuerza axial, la perlita rodea a la ferrita restringiendo la deformación de una fase más blanda sirviendo de barrera para el movimiento de dislocaciones en los límites de grano, por otra parte y como se dijo anteriormente, la cantidad de vanadio presente en el material se debe tomar en consideración ya que este elemento refuerza también a la ferrita durante un proceso de enfriamiento precipitándose en partículas muy finas después de haber pasado por un proceso de laminación en caliente fortaleciéndolo entre 5 a 15 MPa por cada 0,01% en peso de vanadio que depende también del contenido de manganeso, rapidez de enfriamiento y del tamaño de grano. Por esta razón los valores antes mostrados para el perfil estructural C al realizar un análisis gráfico de los demás elementos de aleación, el vanadio también tiene incidencia en el comportamiento mecánico de tal manera que la diferencia antes expuesta se debe también a la presencia de esta aleación. Un ejemplo se muestra en la siguiente tabla para un acero al 0,08% de carbono y 0,30% de silicio.

Tabla 7.17 Fortalecimiento de la ferrita en base al contenido de vanadio

Vanadio	Re		Cambio del Re	
	MPa	ksi	MPa	ksi
0,3 % Mn				
0,00	297	43	0	0
0,08	352	51	55	8
0,14	380	55	83	12
1,2% Mn				
0,00	331	48	0	0
0,08	462	67	131	19
0,14	552	80	221	31

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys volume 1. 9 ed. USA. 2004

ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL B

Tabla 7.18 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del perfil estructural C

Media (\bar{x})	93,4
Desviación estándar (σ)	0,4

Fuente: Propia

Tabla 7.19 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del perfil estructural C

Rockwell B	Rmt₁	HRB	Rmt₂	Rmp	Error₁	Error₂
	MPa		MPa	Mpa	%	%
93,4	660,0	197,0	680,1	633,3	4,1	6,9

Fuente: Propia

- La media aritmética obtenida para este material es de 93,4 RB
- La resistencia última a la tracción para este valor de dureza es de 660 MPa que da un error porcentual del 4,05% comparándolo con el valor obtenido en un ensayo de tracción.
- La resistencia última a la tracción a partir del resultado de dureza Brinell es de 680,1 MPa dando como error porcentual del 6,9% comparado con el obtenido en laboratorio.

7.5. PERFIL DE ARRIOSTRAMIENTO

ESTRUCTURA MICROGRÁFICA

Cuando un aumento de 100X no es satisfactorio, la norma ASTM E 112 establece una estimación del tamaño de grano utilizando otros aumentos con un factor de corrección que se suma al valor del tamaño de grano determinado.

La ecuación para calcular el factor de corrección es el siguiente:

$$Q = 2 * \log_2 \left(\frac{M}{Mb} \right) \quad 7.2$$

Donde:

Q = factor de corrección

M = aumento utilizado para la observación del tamaño de grano

Mb = aumento base de 100X

Por la dificultad que presenta distinguir los granos en la estructura metalográfica del perfil de arriostamiento para un aumento de 100X, se procede a realizar el mismo análisis pero con un aumento de 200X obteniendo lo siguiente:



Figura 7.19 Micrografía del perfil de arriostamiento 200X

Fuente: Propia

Tabla 7.20 Tamaño de grano ASTM del perfil de arriostamiento

	Método ASTM		
	Intersección	F. corrección	G
Tamaño de grano ASTM	4,88	2	6,88

Fuente: Propia

- El valor obtenido por el método de intersección sumando el factor de corrección, el tamaño del grano promedio ASTM es aproximadamente 7.
- Para este número ASTM se obtiene un diámetro promedio del grano aproximadamente de 31,8 μm.

- La cantidad de granos por milímetro cuadrado (No./mm²) es de 992 para una amplificación de 1X equivalente a 64 granos por pulgada cuadrada para una amplificación de 100X.
- La estructura micrográfica está basado en una matriz ferrita – perlita que se representan de color blanco y negro respectivamente con una estructura granular de grano fino.
- Este material al presenta una estructura granular de grano fino, tendrá mayor resistencia a la tracción y mayor dureza en relación a materiales que tengan una estructura granular de grano grueso.
- La microestructura revela que este elemento estructural es un acero laminado por la forma alargada tanto de la ferrita como el de la perlita.
- No se puede ver defectología alguna en la microestructura como inclusiones u algún otro defecto importante que tenga incidencia en la resistencia del material.

INCLUSIONES

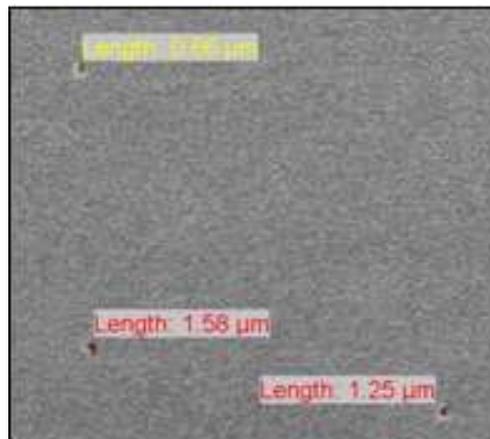


Figura 7.20 Inclusiones del perfil arriostamiento 1000X

Fuente: Propia

Tabla 7.21 Media y desviación estándar inclusiones del perfil de arriostamiento

Media (\bar{x}) μm	1,2
Desviación estándar (σ)	0,4

Fuente: Propia

- El tamaño promedio de las inclusiones calculado automáticamente por el programa es de 1,2 μm en una amplificación 1000X
- Por la forma circular que se observa en la imagen, las inclusiones son de tipo óxido.
- Se puede ver claramente que este elemento estructural no presenta mucha defectología no metálica pese a que se encuentra en un aumento de 1000X.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Tabla 7.22 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa del perfil de arriostramiento

Composición Química perfil de arriostramiento						
Espectrometría por chispa		Microscopio Electrónico				
Elemento	D1	D1	D2	D3	\bar{x}	σ
	%	%	%	%	%	
Carbono (C)	0,209	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Silicio (Si)	0,172	0,00	0,41	0,90	0,44	0,37
Manganeso (Mn)	1,278	1,66	1,58	0,27	1,17	0,64
Cromo (Cr)	0,012	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Níquel (Ni)	0,013	1,24	0,00	0,16	0,47	0,55
Fósforo (P)	<0,005	0,03	0,25	0,00	0,09	0,11
Azufre (S)	<0,150	0,20	0,31	0,19	0,23	0,05
Cobre (Cu)	0,033	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Aluminio (Al)	0,037	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Molibdeno (Mo)	<0,010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Titanio (Ti)	<0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vanadio (V)	0,072	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hierro (Fe)	97,94	96,87	97,46	98,83	97,72	0,82

Fuente: Propia

- Los valores en porcentaje en peso del silicio, manganeso y níquel se encuentran con mayor representatividad en el material por lo que serán tomados en cuenta para determinar el comportamiento mecánico basándose

en su porcentaje en peso sin dejar de lado la cantidad de vanadio presente en el material.

- Elementos como el titanio, molibdeno, cobre y cromo presentan un valor de cero en su porcentaje en peso por lo que la presencia de estos elementos es nula.

ENSAYO DE CHISPA

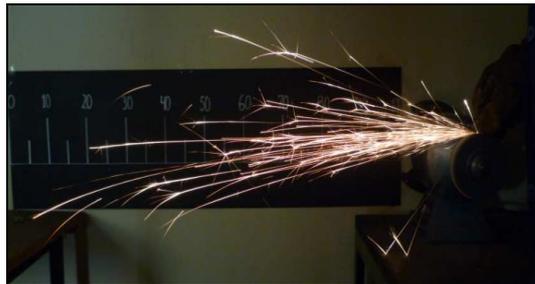


Figura 7.21 Chispa característica del perfil de arriostramiento

Fuente: Propia

- La chispa presenta un flujo continuo de líneas alcanzado 700 mm de longitud con pocos destellos de carbono en forma de púas.
- El color de la chispa es un tono amarillento con un tono anaranjado al final del haz.
- Por la longitud de chispa de este elemento estructural hace que sea un material de bajo contenido de carbono.
- Las características de forma y color hace que este material sea un acero trabajado en caliente.

ENSAYO DE TRACCIÓN

Tabla 7.23 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción del perfil de arriostramiento

	Re (MPa)	Rm (MPa)	A (%)
Media (\bar{x})	519,2	619,8	21,9
Desviación estándar (σ)	5,8	7,7	0,3

Fuente: Propia

- Los valores promedios de resistencia a la fluencia y resistencia última a la tracción son de 519,2 MPa y 619,8 MPa respectivamente con un alargamiento porcentual del 21,9%.
- El resultado correspondiente a la resistencia a la fluencia se obtuvo a partir de la figura 7.22 que representa la gráfica de la curva característica de carga – deformación unitaria del perfil de arriostramiento sin tener la necesidad de realizar el mismo procedimiento utilizado para el muñón de panel ya que se lo puede obtener de forma directa.

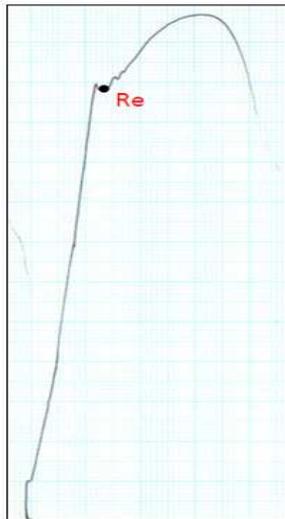


Figura 7.22 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal del perfil arriostramiento

Fuente: Propia

De igual manera, la resistencia a la tracción y resistencia a la fluencia del material en una estructura perlita + ferrita aproximadamente es de 475 MPa y 350 MPa respectivamente con un alargamiento porcentual del 37% como se indica en la figura 23, por otra parte, elementos de aleación como el silicio (azul) y manganeso (rojo) refuerzan a la ferrita variando la resistencia a la fluencia aproximadamente 59 MPa que sumados al valor anterior da un total de 409 MPa como se indica en las siguientes figuras:

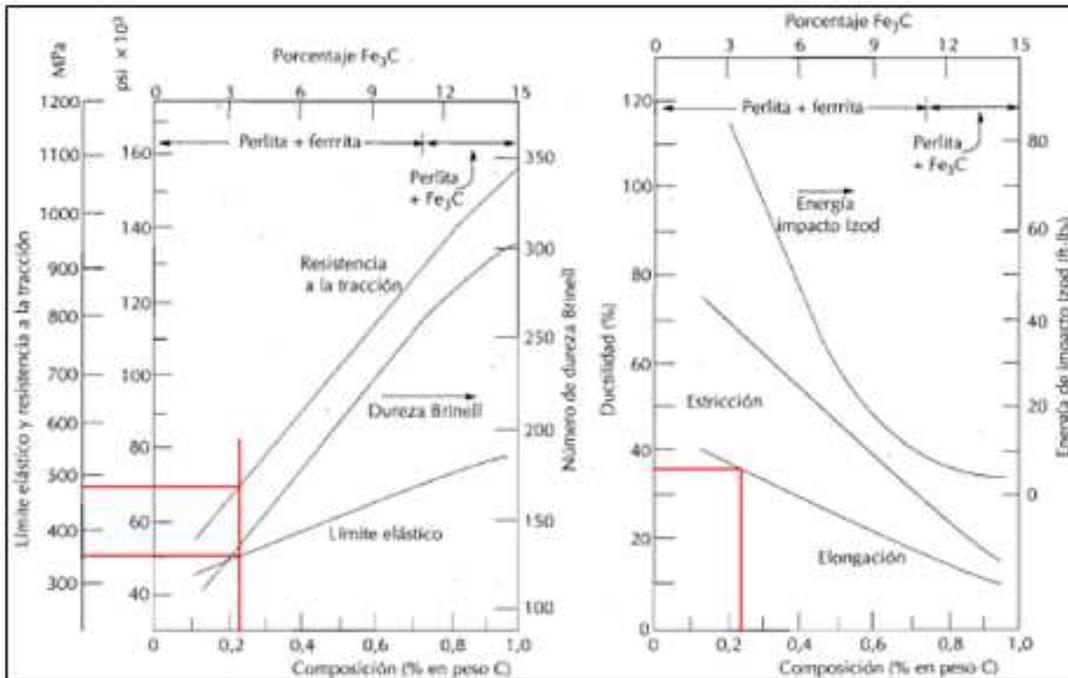


Figura 7.23 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono del perfil de arriostramiento

Fuente: Callister, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed Reverté. España. 1996

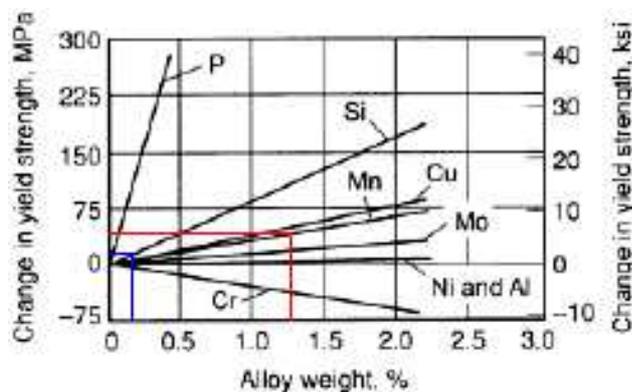


Figura 7.24 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación del perfil arriostramiento

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys volume 1. 9 ed. Estados Unidos. 2004

La diferencia de valores se debe por una parte a que este elemento estructural presenta una estructura micrográfica de granos finos, es decir, que al momento de aplicar una fuerza axial, la perlita rodea a la ferrita restringiendo la

deformación de una fase más blanda sirviendo de barrera para el movimiento de dislocaciones en los límites de grano, por otra parte y como se dijo anteriormente, la cantidad de vanadio presente en el material se debe tomar en consideración ya que este elemento refuerza también a la ferrita durante un proceso de enfriamiento precipitándose en partículas muy finas después de haber pasado por un proceso de laminación en caliente fortaleciéndolo entre 5 a 15 MPa por cada 0,01% en peso de vanadio que depende también del contenido de manganeso, rapidez de enfriamiento y del tamaño de grano. Por esta razón los valores antes mostrados para el perfil de arriostamiento al realizar un análisis gráfico de los demás elementos de aleación, el vanadio también tiene incidencia en el comportamiento mecánico de tal manera que la diferencia antes expuesta se debe también a la presencia de esta aleación.

ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL B

Tabla 7.24 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza del perfil de arriostamiento

Media (\bar{x})	87,6
Desviación estándar (σ)	0,5

Fuente: Propia

Tabla 7.25 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza del perfil de arriostamiento

Rockwell B	Rmt₁	HRB	Rmt₂	Rmp	Error₁	Error₂
	MPa		MPa	Mpa	%	%
87,6	590,0	171,1	590,7	619,8	5,0	4,9

Fuente: Propia

- El perfil de arriostamiento o tubo rectangular del panel Bailey, presenta una media aritmética de 87,6 RB.
- Para este valor de dureza, la resistencia última a la tracción es de 590 MPa dando un error porcentual del 5,0% comparándolo con el obtenido en un ensayo de tracción.

- La resistencia última a la tracción a partir del resultado de dureza Brinell es de 590,7 MPa dando como error porcentual de 4,9% comparado con el obtenido en laboratorio cumpliendo así la estrecha relación de ambas propiedades mecánicas.

7.6. PLACA DE UNIÓN CENTRAL

ESTRUCTURA MICROGRÁFICA

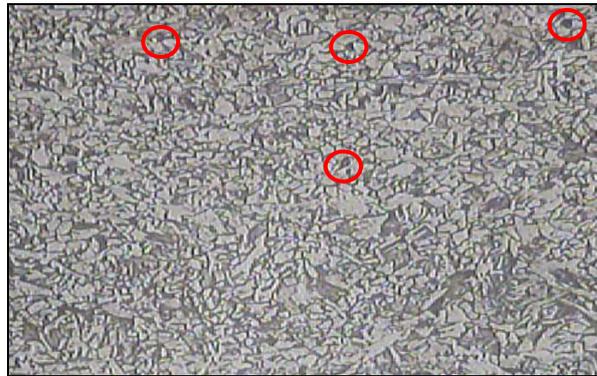


Figura 7.25 Micrografía de la placa de unión central 100X

Fuente: Propia

Tabla 7.26 Tamaño de grano ASTM de la placa de unión central

	Método ASTM	
	Planimétrico	Intersección
Tamaño de grano ASTM	5,83	6,13

Fuente: Propia

- Por ambos métodos se tiene que el tamaño de grano promedio ASTM es aproximadamente 6.
- Para este número ASTM obtiene un diámetro promedio del grano aproximadamente de 44,9 μm .
- La cantidad de granos por milímetro cuadrado (No./mm^2) es de 496 para una amplificación de 1X equivalente a 32 granos por pulgada cuadrada para una amplificación de 100X.

- La estructura micrográfica está basado en una matriz ferrita – perlita que se representan de color blanco y negro respectivamente con una estructura granular de grano fino.
- Por la estructura granular que presenta, tendrá mayor resistencia a la tracción con respecto a materiales con una estructura granular de grano grueso.
- En la microfotografía se puede observar claramente pequeñas defectologías de forma circular en un aumento de 200X cuyo análisis se realizará a continuación.

INCLUSIONES

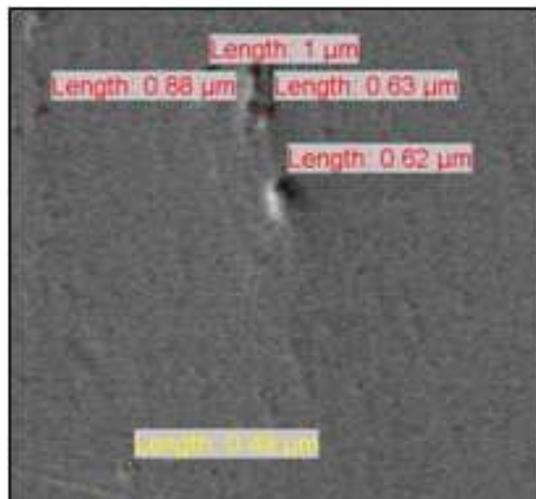


Figura 7.26 Inclusiones de la palca de unión central 2000X

Fuente: Propia

Tabla 7.27 Media y desviación estándar inclusiones placa de unión central

Media (\bar{x})µm	0,7
Desviación estándar (σ)	0,2

Fuente: Propia

- El tamaño promedio de las inclusiones calculado automáticamente por el programa es de 0,72 µm en una amplificación 2000X

- Por la forma circular que se observa en la imagen, las inclusiones son de tipo óxido ratificando lo expuesto anteriormente.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Tabla 7.28 Resultados de composición química por microscopio electrónico y espectrometría por chispa de la placa de unión central

Composición Química placa de unión central							
Espectrometría por chispa		Microscopio Electrónico					
Elemento	D1	D1	D2	D3	D4	\bar{x}	σ
	%	%	%	%	%	%	
Carbono (C)	0,204	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Silicio (Si)	<0,010	0,24	0,20	0,25	0,25	0,24	0,02
Manganeso (Mn)	0,793	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cromo (Cr)	0,015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Níquel (Ni)	0,011	0,02	0,10	0,00	0,02	0,04	0,04
Fósforo (P)	<0,005	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Azufre (S)	<0,150	0,00	0,06	0,00	0,12	0,05	0,05
Cobre (Cu)	0,009	0,00	0,01	0,00	0,09	0,03	0,04
Aluminio (Al)	0,046	0,22	0,12	0,17	0,12	0,16	0,04
Molibdeno (Mo)	<0,010	0,09	0,00	0,00	0,00	0,02	0,04
Titanio (Ti)	<0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vanadio (V)	<0,005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hierro (Fe)	98,69	99,43	99,52	99,58	99,39	99,48	0,07

Fuente: Propia

- Elementos como el níquel, cobre, molibdeno son elementos residuales que al estar en menor cantidad, pueden no ser tomados en cuenta en un proceso de selección de un material adecuado puesto que no tienen mayor incidencia en el comportamiento mecánico más no así los elementos como el titanio, vanadio, fósforo y cromo que presentan valores en cero haciendo que su presencia en el material sea nula.

- Para una selección adecuada, se puede tomar en cuenta el porcentaje en peso tanto del silicio como del manganeso ya que ambos tienen influencia en el comportamiento mecánico del material.
- La cantidad de aluminio presente en el muñón se debe a que anteriormente la superficie de la muestra fue pulidora en presencia de alúmina cuyo efecto fue determinante al analizar la muestra en un microscopio electrónico

ENSAYO DE CHISPA

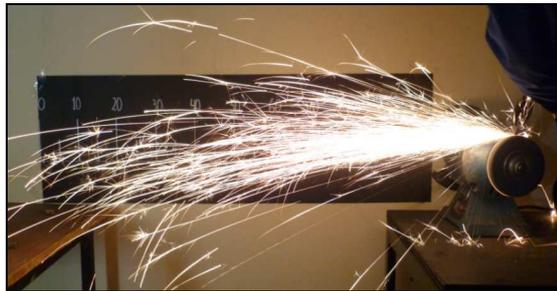


Figura 7.27 Chispa característica de la placa de unión central

Fuente: Propia

- La chispa presenta muchas explosiones de carbono terminados en forma de púas desde el comienzo del haz de chispa alcanzando 800 mm de longitud.
- El color de la chispa es blanca amarillenta.
- Por la forma de las chispas, longitud y color del haz hace que este elemento estructural sea de bajo contenido de carbono aleado con manganeso.

ENSAYO DE TRACCIÓN

Tabla 7.29 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de tracción de la placa de unión central

	Re (MPa)	Rm (Mpa)	A (%)
Media (\bar{x})	354,7	494,,6	26,4
Desviación estándar (σ)	1,1	3,4	0,2

Fuente: Propia

- Se puede ver que los valores promedios de resistencia a la fluencia y resistencia última a la tracción son de 354,7 MPa y 494,6 MPa respectivamente.
- El resultado correspondiente a la resistencia a la fluencia se obtuvo a partir de la figura 7.14 en la que representa la gráfica de la curva característica de carga – deformación unitaria del perfil estructural sin tener la necesidad de realizar el mismo procedimiento utilizado para el muñón del panel ya que los valores se pueden obtener directamente.

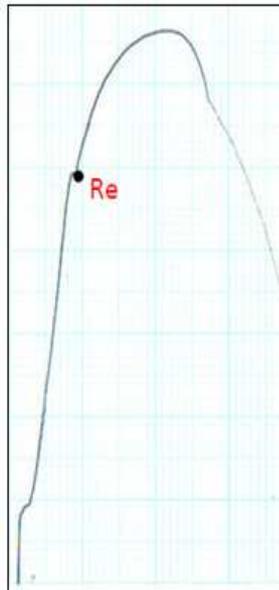


Figura 7.28 Diagrama Carga – Desplazamiento del cabezal de la placa de unión central

Fuente: Propia

Según la figura 7.29, la placa de unión central presenta una resistencia a la tracción y resistencia de fluencia aproximadamente de 462,5 MPa y 343,8 MPa respectivamente para un alargamiento porcentual del 37,5% en la fase de perlita + ferrita, por otra parte, el principal elemento de aleación para este elemento estructural es el manganeso (rojo) que fortalece a la ferrita variando la resistencia a la fluencia en 21,4 MPa como se indica en la figura 7.30 que sumado con el valor anterior, da como resultado una resistencia a la fluencia aproximadamente de 365, 2 MPa muy cercano al obtenido en laboratorio.

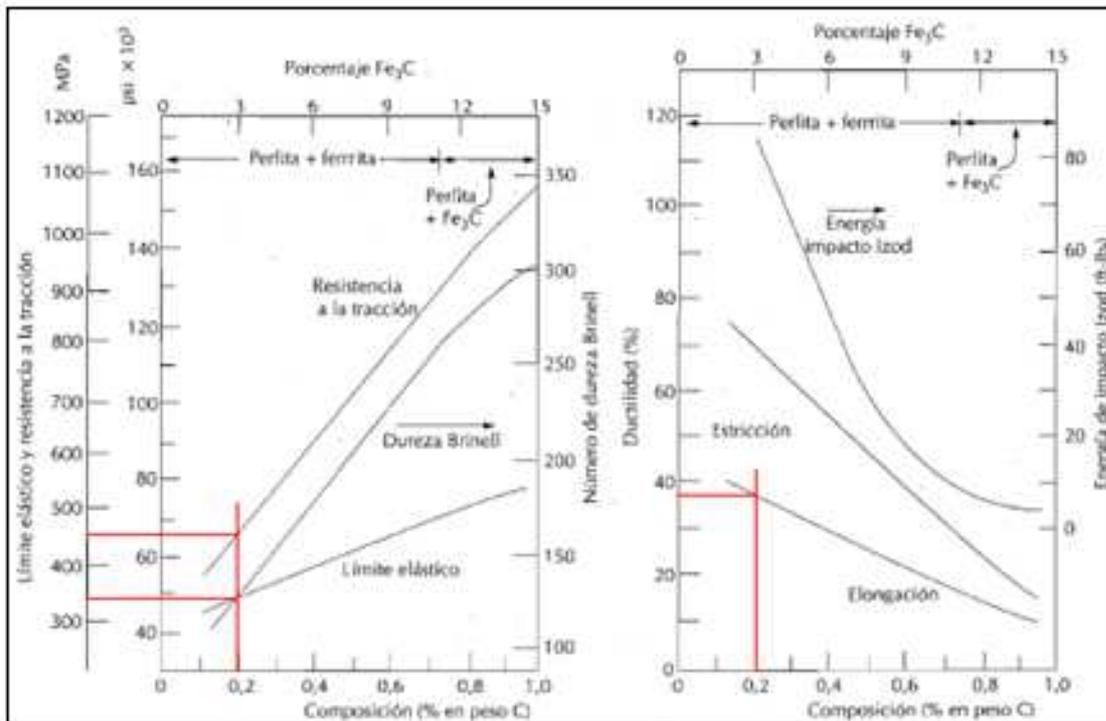


Figura 7.29 Representación del Re, Rm y A de acuerdo al contenido de carbono de la placa de unión central

Fuente: Callister, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed Reverté. España. 1996

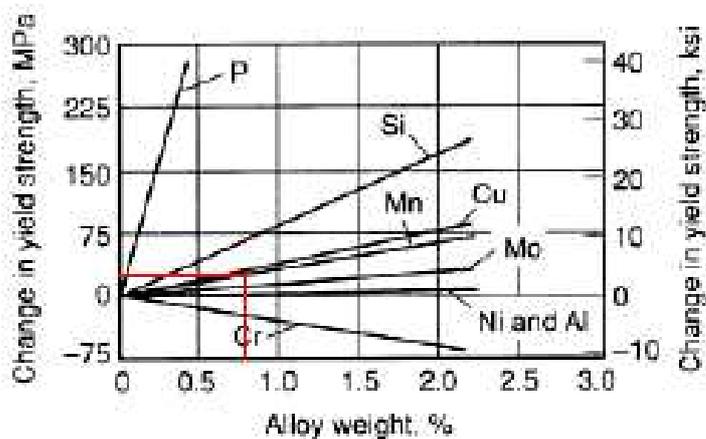


Figura 7.30 Representación gráfica del cambio del Re en base al porcentaje en peso de los elementos de aleación placa de unión central

Fuente: ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys volume 1. 9 ed. Estados Unidos. 2004

ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL B

Tabla 7.30 Media y desviación estándar de los resultados obtenidos por un ensayo de dureza de la placa de unión central

Media (\bar{x})	78,1
Desviación estándar (σ)	0,3

Fuente: Propia

Tabla 7.31 Comparación del Rm de un ensayo de tracción con el obtenido en tablas de dureza de la placa de unión central

Rockwell B	Rmt₁	HRB	Rmt₂	Rmp	Error₁	Error₂
	MPa		MPa	Mpa	%	%
78,1	477,0	144,3	498,2	494,6	3,7	0,7

Fuente: Propia

- La media aritmética de los datos obtenidos en laboratorio es de 78,1 RB.
- La resistencia a la tracción para este valor es de 477 MPa el cual nos da un error porcentual del 3,7% comparando con el valor obtenido por un ensayo de tracción.
- La resistencia última a la tracción a partir del resultado de dureza Brinell es de 144,3 MPa dando como error porcentual del 0,7% con el obtenido en laboratorio cumpliendo de esta manera la relación existente entre dureza Brinell y resistencia ultima a la tracción.

Al final de este documento se presentará un resumen de los resultados obtenidos de cada uno de los elementos estructurales del panel de los respectivos ensayos realizados en laboratorio indicados en el anexo A.

7.7. GALVANIZADO

El procedimiento que se utilizó fue el mismo que la norma INEN 2483: 2009 indica para determinar el espesor del recubrimiento por el método de medición

magnética. La norma hace referencia a un mínimo de 5 mediciones que se debe realizar para cada pieza que tenga un área superficial menor a $0,1\text{m}^2$ y para un valor mayor al indicado, la pieza debe ser dividida en segmentos iguales en las que cada una de ellas se toma el mismo número de mediciones, y el promedio del promedio de las mediciones anteriores, será el espesor promedio del recubrimiento para ese elemento.

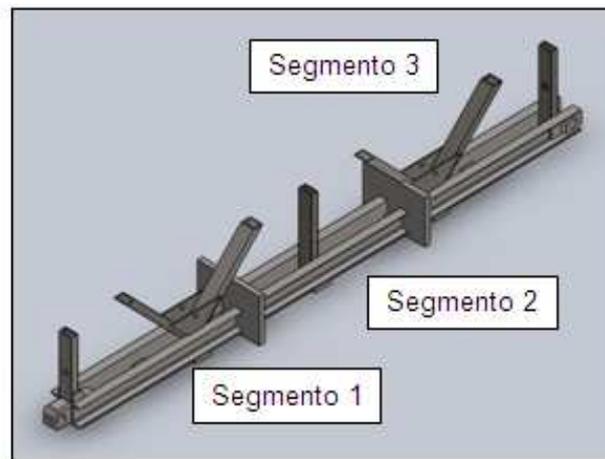


Figura 7.31 Perfil estructural varias secciones

Fuente: Propia

Con lo expresado anteriormente, para cada elemento estructural seleccionado se calculará el promedio de las mediciones y serán comparadas con los requerimientos mínimos que pide la norma INEN 2483:2009 utilizando la siguiente nomenclatura; M = muñón, TR = perfil de arriostramiento, PUC = placa de unión central, PE = perfil estructural

Tabla 7.32 Espesor del recubrimiento

	M	TR	PUC	PE
Media (\bar{x}) μm	166,9	236,9	80,1	229,7
Desviación estándar (σ)	3,3	2,2	3,2	5,1

Fuente: Propia

Calculado el promedio de las mediciones de cada material y comparados con los requerimientos que indica la norma para perfiles y placas estructurales para un espesor comprendido entre $\geq 3,2 < 4,8\text{mm}$, el perfil de arriostramiento

cumple con el requerimiento mínimo de 75 μm de espesor al presentar un espesor de 237 μm .

Categoría del material	Todas las muestras controladas				
	Margen de espesor del acero (mm)				
	< 1,6	$\geq 1,6 < 3,2$	$\geq 3,2 < 4,8$	$\geq 4,8 < 6,4$	$\geq 6,4$
Perfiles y placas estructurales	45	65	75	85	100
Flejes (tiras) y barras	45	65	75	85	100
Cañería y tubería	45	45	75	75	75
Alambre	35	50	60	65	80

Figura 7.32 Espesor promedio mínimo de recubrimiento para TR

Fuente: INEN 2483:2009

Para espesores mayores o iguales a 6,4 mm, la norma establece un espesor mínimo de recubrimiento de 100 μm . Elementos estructurales como el perfil estructural en C y muñón de panel cumplen con los requerimientos establecidos por la norma al presentar un espesor de 230 μm y 166 μm respectivamente mas no de la placa de unión central que tiene un espesor de 80 μm .

Categoría del material	Todas las muestras controladas				
	Margen de espesor del acero (mm)				
	< 1,6	$\geq 1,6 < 3,2$	$\geq 3,2 < 4,8$	$\geq 4,8 < 6,4$	$\geq 6,4$
Perfiles y placas estructurales	45	65	75	85	100
Flejes (tiras) y barras	45	65	75	85	100
Cañería y tubería	45	45	75	75	75
Alambre	35	50	60	65	80

Figura 7.33 Espesor promedio mínimo de recubrimiento para PE, M, PUC

Fuente: INEN 2483:2009

7.8. SOLDADURA

7.8.1. PROCESO

El proceso soldadura utilizado en el panel fue posible analizarlo al existir la presencia de un pedazo de electrodo justo en el cordón que une el perfil de arriostamiento con el perfil estructural tal y como se indica en la figura 7.34 señalado con una circunferencia de color rojo para distinguirlo de mejor manera, siguiendo el mismo procedimiento para preparar la muestra en resina

fenólica y luego someterlo a un proceso de desbaste y pulido para determinar si el alambre es tipo tubular o sólido.



Figura 7.34 Pedazo de un electrodo de alambre

Fuente: Propia

El resultado obtenido se muestra en la figura 7.35 en el cual se puede observar claramente una estructura sólida recubierta de zinc (galvanizado) que se la puede diferenciar por el cambio de tono de la superficie pulida del electrodo.



Figura 7.35 Superficie pulida del electrodo sólido de alambre

Fuente: Propia

De esta manera se puede concluir que el proceso utilizado para unir diferentes elementos estructurales del panel fue un proceso de soldadura por alambre continuo y protección gaseosa GMAW cuyo cordón de soldadura tiene discontinuidades características como porosidad y LOF/LOP¹.

¹ LOF y LOP son abreviaturas que se utilizan para simplificar condiciones de falta de fusión y penetración respectivamente del cordón de soldadura con el metal base.

7.8.2. ANÁLISIS

La sección transversal mostrada en la figura 7.36, muestra claramente los defectos que tienen las cuatro juntas soldadas que se manifiestan en forma de grietas y porosidades sin antes haber realizado un proceso de pulido y ataque químico. Para una mejor comprensión, la sección transversal estará dividida en cuatro cuadrantes utilizando la nomenclatura C1, C2, C3, C4 para referirse a una junta soldada en particular tal y como se muestra en la figura 7.37.

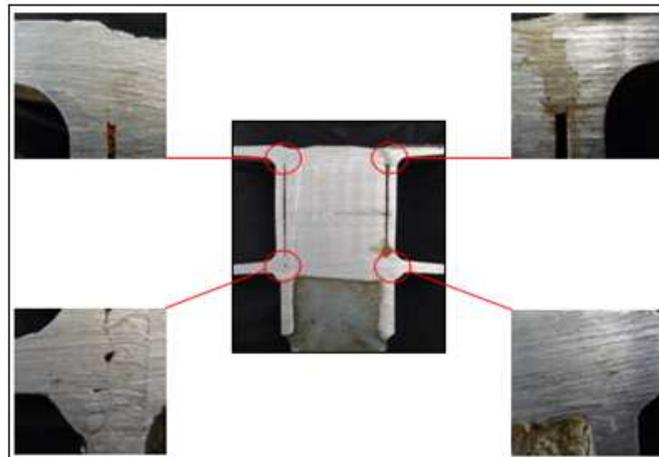


Figura 7.36 Sección transversal del muñón de panel

Fuente: Propia

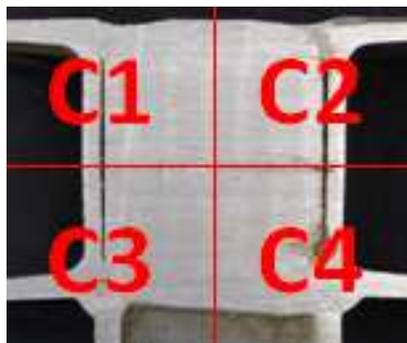


Figura 7.37 Nomenclatura sección transversal del muñón

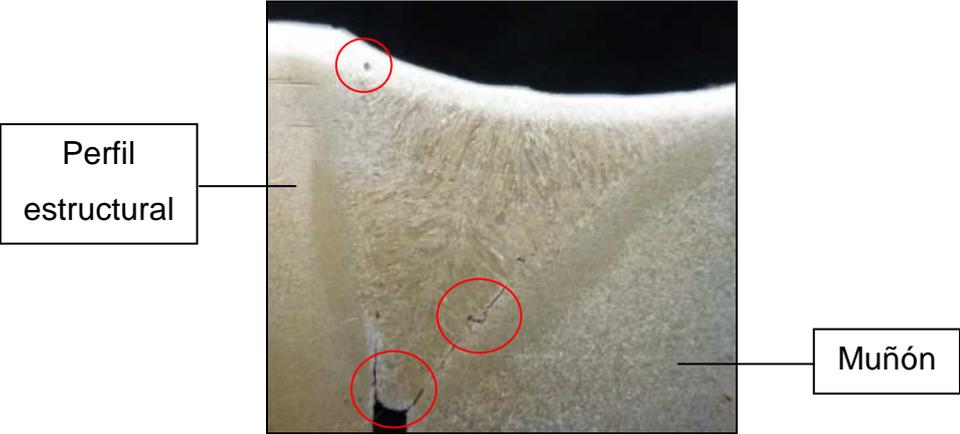
Fuente: Propia

En el cuadrante C1 existe la presencia de grietas justamente cuando empieza a realizarse el cordón de soldadura para unir el muñón con el perfil estructural. A diferencia del cuadrante anterior, el cuadrante C2 no existen grietas en ese sector del cordón pero si la presencia de pequeñas porosidades entre el cordón

y el metal base que en este caso viene a ser el del muñón. La junta soldada observada en el cuadrante C3, existe la presencia de porosidades y grietas de gran importancia que serán analizados con detenimiento cuando se realice el respectivo proceso de pulido y ataque químico y por último, el cuadrante C4 presenta un relleno continuo de la soldadura aunque existe la presencia de pequeñas porosidades.

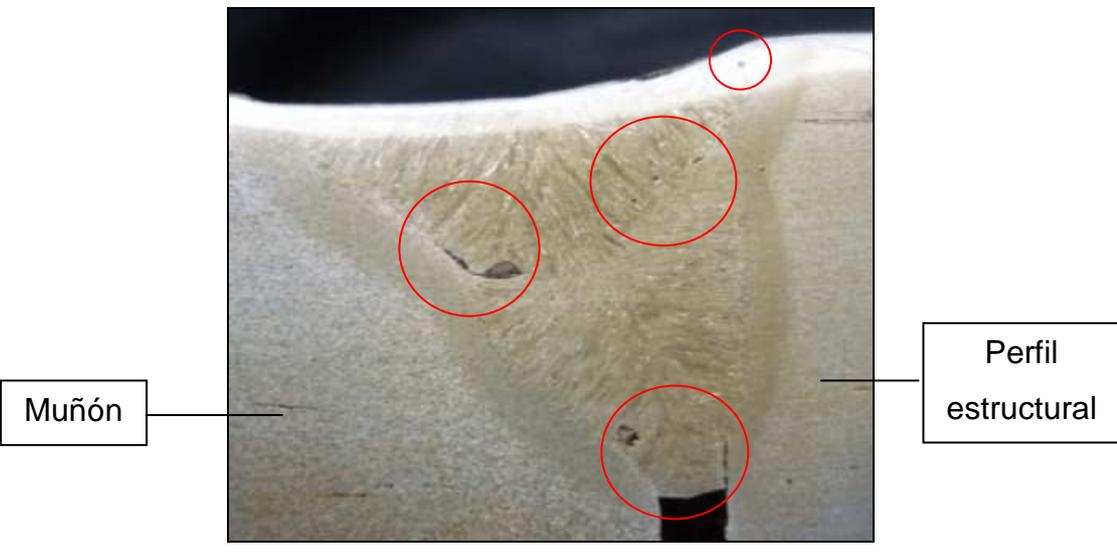
Las tablas a continuación se realiza un análisis más detallado de cada una de las juntas soldadas luego de haber realizado un proceso de pulido y ataque químico a esa sección del muñón revelando lo siguiente:

Tabla 7.33 Defectos en la soldadura

Soldadura cuadrante C1	
	
Defectos	Causas
Fusión Incompleta en la primera pasada del cordón de soldadura manifestándose como grietas entre la soldadura con el material base	<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo defectuoso • Corriente y arco defectuoso • Electrodo inadecuado • Preparación defectuosa
Presencia de porosidades cerca de la superficie del cordón	<ul style="list-style-type: none"> • Charco insuficiente • Corriente muy baja
Penetración incompleta del cordón en el material base	<ul style="list-style-type: none"> • Mucha velocidad • Corriente muy baja • Preparación inadecuada

Fuente: propia

Tabla 7.33 Defectos en la soldadura (continuación)

Soldadura cuadrante C2	
	
Defectos	Causas
Fusión Incompleta en la primera pasada del cordón de soldadura manifestándose como grietas entre la soldadura con el material base.	<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo defectuoso • Corriente y arco defectuoso • Electrodo inadecuado • Preparación defectuosa
Soldadura agrietada manifestándose claramente la diferencia de ambos cordones de soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación no adecuada • Cordones defectuosos • Unión rígida • Tamaño de la soldadura en desbalance con las piezas soldadas
Presencia de porosidades en la raíz del cordón en la primera pasada y entre ambos cordones	<ul style="list-style-type: none"> • Charco insuficiente • Corriente muy baja
Penetración incompleta del cordón en el material base	<ul style="list-style-type: none"> • Mucha velocidad • Corriente muy baja • Preparación inadecuada

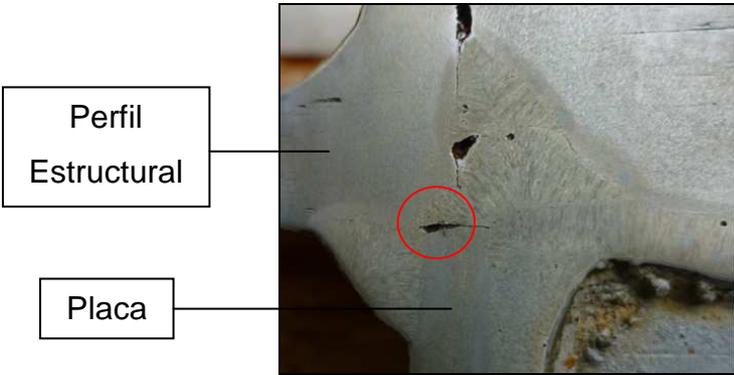
Fuente: Propia

Tabla 7.33 Defectos de la soldadura (continuación)

Soldadura cuadrante C3	
	
Muñón – Perfil estructural C	
Defectos	Causas
Fusión incompleta de la primera pasada del cordón con el metal base	<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo defectuoso • Corriente y arco defectuoso • Electrodo inadecuado • Preparación defectuosa
Soldadura agrietada manifestándose claramente la diferencia de ambos cordones	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación no adecuada • Cordones defectuosos • Unión rígida • Tamaño de la soldadura en desbalance con las piezas soldadas
Penetración incompleta del cordón en el material base	<ul style="list-style-type: none"> • Mucha velocidad • Corriente muy baja • Preparación inadecuada
Presencia de porosidades en la soldadura y entre el metal base	<ul style="list-style-type: none"> • Charco insuficiente • Corriente muy baja • Electrodo inadecuado

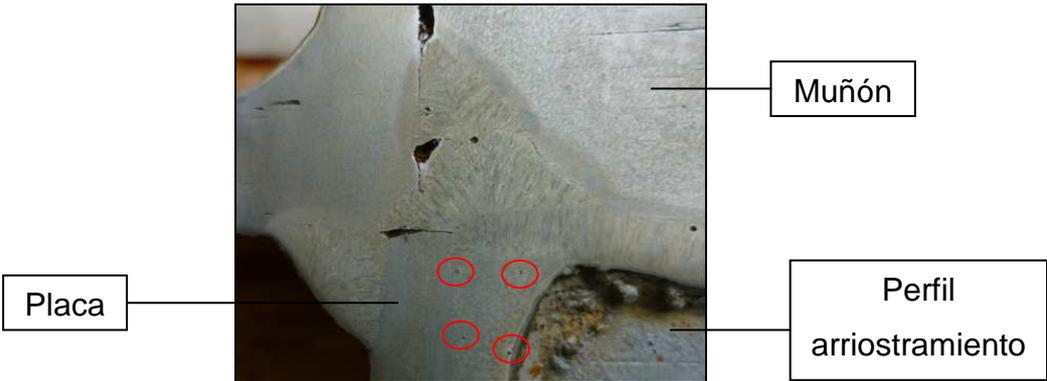
Fuente: Propia

Tabla 7.33 Defectos de la soldadura (continuación)

Soldadura cuadrante C3	
	
Perfil estructural – Placa	
Defectos	Causas
Ninguna	Ninguna
<p>Nota: El espaciamiento entre la placa y el perfil estructural como se indica en la figura se debe a la preparación inadecuada de las superficies que puede afectar adversamente la resistencia del cordón.</p>	

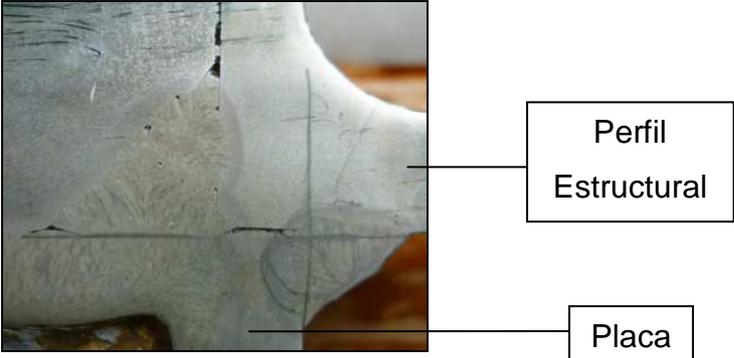
Fuente: Propia

Tabla 7.33 Defectos de la soldadura (continuación)

Soldadura cuadrante C3	
	
Placa – Muñón – Perfil de arriostramiento	
Defectos	Causas
Porosidades en la soldadura	<ul style="list-style-type: none"> • Corriente muy baja • Charco insuficiente

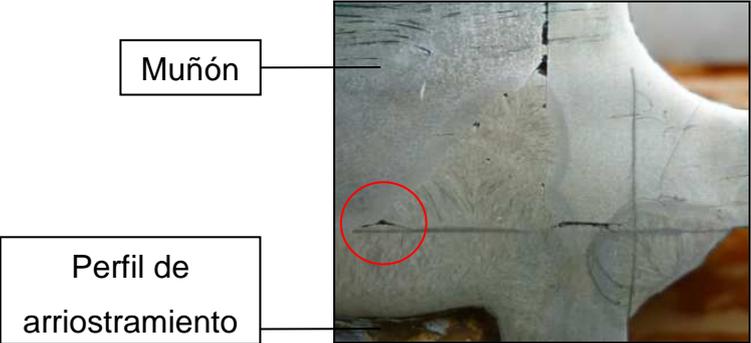
Fuente: Propia

Tabla 7.33 Defectos de la soldadura (continuación)

Soldadura cuadrante C4	
	
Perfil estructural – Placa	
Defectos	Causas
Ninguna	Ninguna
<p>Nota: El espaciamiento entre la placa y el perfil estructural como se indica en la figura se debe a la mala preparación de las superficies que puede afectar adversamente la resistencia del cordón.</p>	

Fuente: Propia

Tabla 7.33 Defectos de la soldadura (continuación)

Soldadura cuadrante C4	
	
Placa – Muñón – Perfil de arriostramiento	
Defectos	Causas
Presencia de grieta entre el muñón y perfil de arriostramiento	<ul style="list-style-type: none"> • Charco insuficiente • Corriente muy baja • Electrodo inadecuado

Fuente: Propia

Tabla 7.33 Defectos de la soldadura (continuación)

Soldadura cuadrante C4	
	
Muñón – Perfil estructural C	
Defectos	Causas
Fusión incompleta de la primera pasada del cordón con el metal base	<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo defectuoso • Corriente y arco defectuoso • Electrodo inadecuado • Preparación defectuosa
Penetración incompleta del cordón en el material base	<ul style="list-style-type: none"> • Mucha velocidad • Corriente muy baja • Preparación inadecuada
Presencia de porosidades en la soldadura y entre el metal base	<ul style="list-style-type: none"> • Charco insuficiente • Corriente muy baja • Electrodo inadecuado

Fuente: Propia

Para emitir un criterio sobre las juntas soldadas, en la tabla 6.1 de la sección 6 de la norma AWS D1.1 para una inspección visual deja muy en claro que cualquier grieta presente en la junta soldada será inaceptable sin tomar en cuenta localización ni tamaño. También hace énfasis sobre la fusión que debe existir entre el cordón de soldadura con el metal base, manifiesta que deberá

existir fusión completa entre las capas adyacentes del metal base y entre el metal de la soldadura con el metal base.

Dicho esto y tomando en cuenta las observaciones realizadas con detenimiento, se pone en manifiesto la inaceptabilidad de los cordones de soldadura en los cuadrantes señalados en esa sección del muñón del panel sin tomar en cuenta la penetración del cordón de soldadura con el metal base y el tamaño de las porosidades presentes especialmente en el cuadrante C3 donde existe la presencia de una porosidad con un diámetro de 2.1 mm a partir del cual aparece una grieta convirtiéndose en un punto de inicio de falla.

7.9. EQUIVALENCIA DEL ACERO DEL PANEL MABEY COMPACTO 100 CON LAS EXISTENTES EN EL PAÍS

Empresas de nuestro país especializadas en el diseño y construcción de puentes estructurales como Sedemi, Santa Bárbara o empresas como Kubiec – Conduit, IPAC que ofrecen una amplia gama de productos de acero y demás servicios especialmente al sector metalmecánico, todos sus materiales de construcción se encuentran bajo normas internacionales en su gran mayoría por la ASTM que certifican la calidad de sus productos de acero ofreciendo soluciones eficaces en la ejecución de proyectos de infraestructura vial.

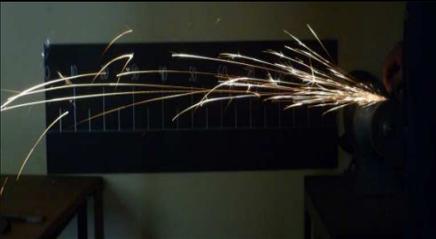
La norma ASTM A 6/A 6M – 04a establece los requerimientos y especificaciones generales o a menos que se especifique lo contrario de barras, placas, perfiles estructurales de materiales de acero al carbón, acero de alta resistencia y baja aleación, aceros normalizados de alta resistencia y baja aleación o aceros al carbono templados y revenidos.

Por otro lado la norma ASTM A29 /A 29M – 04 establece los requerimientos o a menos que se especifique lo contrario de barras de acero al carbono sean laminados en caliente o laminados en frío y aleaciones de acero laminados en caliente o laminados en frío para diferentes propósitos.

En la industria nacional utilizan generalmente materiales como la ASTM A36, ASTM A588, ASTM A572, ASTM A1011, ASTM A709 y de otros aceros estructurales como el ASTM A242 y ASTM A529 designados por la norma RTE INEN 037: 2009 para la construcción de puentes estructurales, los mismos que serán analizados para cada elemento estructural del panel y determinar que acero es su equivalente para la elaboración de los mismos.

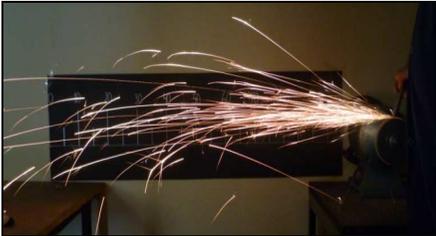
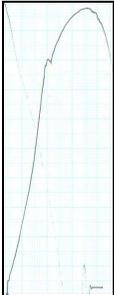
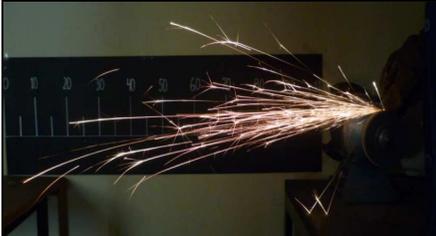
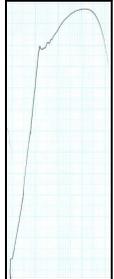
A continuación se presentará una tabla que resume todos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados tanto en los laboratorios de Metalurgia y Mecánica de Materiales para obtener una información total de los elementos estructurales antes de una selección adecuada de los mismos.

Tabla 7.34 Resumen de resultados

CARACTERÍSTICAS ELEMENTOS ESTRUCTURALES PANEL BAILEY									
Elemento estructural	Composición química		Re	Rm	A	Dureza	G	Chispa de característica	Curva Carga - Dsplz. cabezal
	%C	% aleantes	MPa	MPa	%	HRB	-		
Muñón de panel	0,239	0,242 Si 1,214 Mn 0,234 Cu <0,005 P <0,125 S	458,7	577,7	20,4	84,4	3,5		
Bulón de panel	0,211	0,164 Si 0,487 Mn <0,005 P <0,125 S	482,6	556,1	20,1	86,7	4		

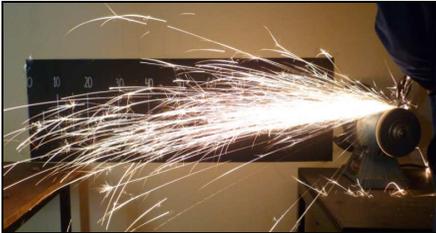
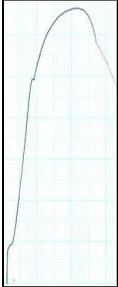
Fuente: Propia

Tabla 7.34 Resumen de resultados (continuación)

CARACTERÍSTICAS ELEMENTOS ESTRUCTURALES PANEL BAILEY									
Elemento estructural	Composición química		Re	Rm	A	Dureza	G	Chispa de característica	Curva Carga – Dsplz. cabezal
	%C	% aleantes	MPa	MPa	%	HRB	-	-	-
Perfil estructural	0,134	0,284 Si 1,241 Mn 0,125 V <0,005 P <0,125 S	502,4	633,3	20,9	93,4	5		
Perfil de arriostramiento	0,209	0,172 Si 1,278 Mn 0,072 V <0,005 P <0,125 S	532,7	635,9	21,9	87,6	7		

Fuente: Propia

Tabla 7.34 Resumen de resultados (continuación)

CARACTERÍSTICAS ELEMENTOS ESTRUCTURALES PANEL BAILEY									
Elemento estructural	Composición química		Re	Rm	A	Dureza	G	Chispa de característica	Curva Carga - Dsplz. cabezal
	%C	% aleantes	MPa	MPa	%	HRB	-		
Placa de unión central	0,204	0,793 Mn <0,005 P <0,125 S	354,7	494,6	26,4	78,1	6		

Fuente: Propia

MUÑÓN DE PANEL

Tabla 7.35 Equivalencia del acero del muñón

Resultado de ensayos		ASTM A36	ASTM A572 G 65
Composición Química	%C= 0,239	% C máx. = 0,28	%C máx. = 0,23
	%Si= 0,242	% Si máx. = 0,40	%Si máx. = 0,40
	%Mn= 1,214	% Mn = 0,60 – 0,90	%Mn máx. = 1,65
	% Cr = 0,071	-	-
	% Ni = 0,158	-	-
	%P = <0,005	% P máx. = 0,04	%P máx. = 0,04
	%S = <0,150	% S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05
	% Cu = 0,234	% Cu min. = 0,20	-
	% Al = 0,015	-	-
	% Mo = 0,059	-	-
	% Ti = <0,001	-	-
%V = <0,005	-	%V = 0,01 – 0,15	
Propiedades mecánicas	Re= 458,7 MPa	Re min. = 250 MPa	Re min. = 450 MPa
	Rm= 577,7 MPa	Rm = 400 – 550 MPa	Rm min. = 550 MPa
	%A(50 mm)= 20,4	%A(50mm)min.= 23	%A (50 mm) min. = 17

Fuente: Propia

Tabla 7.36 Resistencia a la corrosión del muñón

Acero en estudio	ASTM A 36	ASTM A572 G65	ASTM A 588 G B
% Cu = 0,234	% Cu mín. = 0,20	-	% Cu = 0,20 – 0,40
% Ni = 0,158	-	-	%Ni máx. = 0,50
% Si = 0,242	% Si máx. = 0,40	% Si máx. = 0,40	% Si = 0,15 – 0,50
% Cr = 0,071	-	-	% Cr = 0,40 – 0,70

Fuente: Propia

BULÓN DE PANEL

Tabla 7.37 Equivalencia del acero bulón de panel

Resultado de ensayos	AISI 1020	ASTM A529 G 55	
Composición Química	%C= 0,211	% C = 0,18 – 0,23	% C máx. = 0,27
	%Si= 0,164	-	% Si máx. = 0,40
	%Mn= 0,487	% Mn = 0,30 – 0,60	% Mn máx. = 1,35
	% Cr = 0,019	-	-
	% Ni = 0,005	-	-
	%P = <0,005	% P máx. = 0,04	% P máx. = 0,04
	%S = <0,150	% S máx. = 0,05	% S máx. = 0,05
	% Cu = 0,021	-	% Cu min. = 0,20
	% Al = <0,005	-	-
	% Mo = <0,010	-	-
	% Ti = <0,001	-	-
%V = <0,005	-	-	
Propiedades mecánicas	Re= 482,6 MPa	Re = 370 MPa	Re = 380 MPa
	Rm= 556,1 MPa	Rm = 440 MPa	Rm = 485 MPa
	%A(50 mm)= 20,1	%A(50mm) min. = 15	%A(50mm) min. = 20

Fuente: Propia

Tabla 7.38 Resistencia a la corrosión bulón de panel

Acero en estudio	AISI 1020	ASTM A529 G55
% Cu = 0,021	-	% Cu mín. = 0,20
% Ni = 0,005	-	-
% Si = 0,164	-	% Si máx. = 0,40
% Cr = 0,019	-	-

Fuente: Propia

PERFIL ESTRUCTURAL

Tabla 7.39 Equivalencia del acero perfil estructural C

Resultado de ensayos		ASTM A36	ASTM A572 G 65	ASTM A588 G B
Composición Química	%C= 0,134	%C máx. = 0,26	%C máx. = 0,23	%C máx. = 0,20
	%Si= 0,284	%Si máx. = 0,40	%Si máx. = 0,40	%Si = 0,15 – 0,50
	%Mn= 1,241	-	%Mn máx. = 1,65	%Mn = 0,75 – 1,35
	% Cr = 0,024	-	-	% Cr = 0,40 – 0,70
	% Ni = 0,019	-	-	% Ni máx. = 0,50
	%P = <0,005	%P máx. = 0,04	%P máx. = 0,04	%P máx. = 0,04
	%S = <0,150	%S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05
	% Cu = 0,033	% Cu min. = 0,20	-	% Cu = 0,20 – 0,40
	% Al = 0,020	-	-	-
	% Mo = <0,010	-	-	-
	% Ti = <0,001	-	-	-
%V = 0,125	-	%V = 0,01 – 0,15	%V = 0,01 – 0,10	
Propiedades mecánicas	Re= 502,4 MPa	Re min. = 250 MPa	Re min. = 450 MPa	Re min. = 345 MPa
	Rm= 633,3 MPa	Rm = 400 - 550 MPa	Rm min. = 550 MPa	Rm min. = 485 MPa
	%A (50 mm)= 20,9	%A (50 mm) min. = 21	%A (50 mm) min. = 17	%A (50 mm) min. = 21

Fuente: Propia

Tabla 7.40 Resistencia a la corrosión perfil estructural C

Acero en estudio	ASTM A 36	ASTM A572 G65	ASTM A588 G B
% Cu = 0,033	% Cu mín. = 0,20	-	% Cu = 0,20 – 0,40
% Ni = 0,019	-	-	% Ni máx. = 0, 50
% Si = 0,284	% Si máx. = 0,40	% Si máx. = 0,40	% Si = 0,15 – 0,50
% Cr = 0,024	-	-	% Cr = 0,4 – 0,7

Fuente: Propia

PERFIL DE ARRIOSTRAMIENTO

Tabla 7.41 Equivalencia del acero perfil de arriostramiento

Resultado de ensayos	ASTM A36	ASTM A572 G 65	ASTM A588 G B	ASTM A1011 G70 C1	
Composición Química	%C= 0,209	%C máx. = 0,26	%C máx. = 0,23	%C máx. = 0,20	% C máx. = 0,26
	%Si= 0,172	%Si máx. = 0,40	%Si máx. = 0,40	%Si = 0,15 – 0,50	-
	%Mn= 1,278	-	%Mn máx. = 1,65	%Mn = 0,75 – 1,35	% Mn máx. = 1,65
	% Cr = 0,012	-	-	% Cr = 0,40 – 0,70	% Cr = 0,15 – 0,50
	% Ni = 0,013	-	-	% Ni máx. = 0,50	%Ni = 0,20 – 0,50
	%P = <0,005	%P máx. = 0,04	%P máx. = 0,04	%P máx. = 0,04	% P máx. = 0,04
	%S = <0,150	%S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05	% S máx. = 0,04
	% Cu = 0,033	% Cu min. = 0,20	-	% Cu = 0,20 – 0,40	% Cu = 0,20 – 0,50
	% Al = 0,037	-	-	-	-
	% Mo = <0,010	-	-	-	%Mo = 0,06 – 0,50
	% Ti = <0,001	-	-	-	-
%V = 0,072	-	%V = 0,01 – 0,15	%V = 0,01 – 0,10	% V min. = 0,01	
Propiedades mecánicas	Re= 519,3 MPa	Re min. = 250 MPa	Re min. = 450 MPa	Re min. = 345 MPa	Re min. = 480 MPa
	Rm= 619,8 MPa	Rm = 400 - 550 MPa	Rm min. = 550 MPa	Rm min. = 485 MPa	Rm min. = 585 MPa
	%A (50 mm)=21,9	%A (50 mm)min.=21	%A (50 mm)min.=17	%A (50 mm)min.=21	%A (50 mm)min.=14

Fuente: Propia

Tabla 7.42 Resistencia a la corrosión perfil de arriostramiento

Acero en estudio	ASTM A 36	ASTM A572 G65	ASTM A588 G B	ASTM A1011 G70 C1
% Cu = 0,033	% Cu mín. = 0,20	-	% Cu = 0,20 – 0,40	% Cu = 0,20 – 0,50
% Ni = 0,013	-	-	% Ni máx. = 0, 50	% Ni = 0,20 – 0, 50
% Si = 0,172	% Si máx. = 0,40	% Si máx. = 0,40	% Si = 0,15 – 0,50	-
% Cr = 0,012	-	-	% Cr = 0,4 – 0,7	% Cr = 0,15 – 0,5

Fuente: Propia

PLACA DE UNIÓN CENTRAL

Tabla 7.43 Equivalencia del acero placa unión central

Resultado de ensayos		ASTM A36	ASTM A242	ASTM A572 G 42	ASTM A588 G B
Composición Química	%C= 0,204	%C máx. = 0,26	% C máx. = 0,15	%C máx. = 0,21	%C máx. = 0,20
	%Si= <0,010	%Si máx. = 0,40	-	%Si máx. = 0,40	%Si = 0,15 – 0,50
	%Mn= 0,793	-	% Mn máx. = 1,00	%Mn máx. = 1,35	%Mn = 0,75 – 1,35
	% Cr = 0,015	-	-	-	% Cr = 0,40 – 0,70
	% Ni = 0,011	-	-	-	% Ni máx. = 0,50
	%P = <0,005	%P máx. = 0,04	% P máx. = 0,15	%P máx. = 0,04	%P máx. = 0,04
	%S = <0,150	%S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05	%S máx. = 0,05
	% Cu = 0,009	% Cu min. = 0,20	% Cu min. 0,20	-	% Cu = 0,20 – 0,40
	% Al = 0,046	-	-	-	-
	% Mo = <0,010	-	-	-	-
	% Ti = <0,001	-	-	-	-
%V = <0,005	-	-	-	%V = 0,01 – 0,10	
Propiedades mecánicas	Re= 354,7 MPa	Re min. = 250 MPa	Re min. = 345 MPa	Re min. = 290 MPa	Re min. = 345 MPa
	Rm= 494,6 MPa	Rm = 400 - 550 MPa	Rm min. = 480 MPa	Rm min. = 415 MPa	Rm min. = 485 MPa
	%A (50 mm)= 26,4	%A (50 mm) min.=21	%A (50 mm) min.=21	%A(50 mm) min.=24	%A(50 mm) min.= 21

Fuente: Propia

Tabla 7.44 Resistencia a la corrosión placa unión central

Resistencia a la corrosión Placa de unión central				
Acero en estudio	ASTM A 36	ASTM A242	ASTM A572 G 42	ASTM A588 G B
% Cu = 0,009	% Cu mín. = 0,20	% Cu mín. = 0,20	-	% Cu = 0,20 – 0,40
% Ni = 0,011	-	-	-	% Ni máx. = 0, 50
% Si = <0,010	% Si máx. = 0,40	-	% Si máx. = 0,40	% Si = 0,15 – 0,50
% Cr = 0,015	-	-	-	% Cr = 0,4 – 0,7

Fuente: Propia

MUÑÓN DE PANEL

- La microfotografía de este elemento estructural tiene una apariencia similar al de un acero ASTM A36 para un aumento de 100X.
- Los datos de composición química revelan que los elementos que mayor representatividad son el silicio, manganeso, cobre que pueden ser considerados para seleccionar un acero ASTM A36, mientras que los demás aleantes son considerados como elementos residuales.
- Los resultados por un ensayo de chispa hace que este material sea un acero de bajo contenido de carbono aleado con silicio y manganeso.
- Las inclusiones que se puede observar en el material con de tipo óxido.
- Los datos logrados en un ensayo de tracción hace que este material tenga una gran resistencia a la fluencia cuyos datos no concuerdan con las de un acero ASTM A36, mas bien los datos de resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción y alargamiento porcentual cumplen con las especificaciones de un material de acero ASTM A572 G65.
- En cuanto a la resistencia a la corrosión, elementos de aleación como el cobre, níquel y silicio cumplen con las especificaciones de un material de acero ASTM A588 G B no así el cromo que se presenta en bajas cantidades.

BULÓN DE PANEL

- La fotomicrografía revela que este elemento estructural haya sido tratado térmicamente debido a la disposición que presenta la perlita en la matriz ferrita.
- Los datos de composición química revela que existe la presencia de magnesio y silicio como elementos más relevantes mientras que las demás aleaciones se presentan como elementos residuales por estar en menor cantidad.
- Las imágenes obtenidas por un ensayo por chispa revela que este elemento estructural es un acero de bajo contenido de carbono trabajado en frio.
- Las inclusiones que se puede observar son de tipo óxido.
- Los datos alcanzados por un ensayo de tracción hace que este material tenga alta resistencia a la fluencia característica de un material trabajado en

frío que luego ha sido sometido a un proceso de tratamiento térmico para alivianar las tensiones. Con estas características el acero que más se aproxima es a un AISI 1020 estirado en frío.

PERFIL ESTRUCTURAL C

- La fotomicrografía de este elemento estructural tiene un parecido al de un acero ASTM A 572 G55 para un aumento de 100X.
- Los datos de composición química revelan que este elemento estructural tenga silicio, manganeso con un aporte importante de vanadio convirtiéndolo que un acero microaleado.
- La imagen de un ensayo de chispa revela que el acero es de bajo contenido de carbono trabajado en caliente.
- Las inclusiones presentes en el material son de tipo óxido.
- Los datos alcanzados por un ensayo de tracción hace que tenga una alta resistencia a la fluencia y comparándolo con otro material, el acero que más se aproxima es un ASTM A572 G65.

PERFIL DE ARRIOSTRAMIENTO

- La fotomicrografía revela que este elemento estructural sea un acero de alta resistencia y baja aleación laminado en caliente.
- Los datos de composición química revelan que presenta silicio, manganeso con un contenido de vanadio como elemento de aleación mientras que los demás elementos se presentan como elementos residuales al estar en menor cantidad.
- La imagen por un ensayo de chispa revela que es un acero de bajo contenido de carbono trabajado en caliente.
- Las inclusiones que se observan son de tipo óxido.
- Los resultados alcanzados por un ensayo de tracción revela que es un acero de alta resistencia cuyos datos al ser comparados con otro material revela que puede ser un acero ASTM A572 G65, aunque con mayor resistencia se encuentra también un acero ASTM A 1011 G70 clase 1.

PLACA DE UNIÓN CENTRAL

- La fotomicrografía de este elemento estructural tiene un parecido al de un acero ASTM A572 G65.
- Con los datos de composición química, este material tiene como elemento principal el manganeso mientras que los demás aleaciones se presentan como elementos residuales.
- La imagen obtenida por un ensayo de chispa revela que este acero sea de bajo contenido de carbono aleado con manganeso.
- Las inclusiones que se observan en el material son de tipo óxido
- Los datos alcanzados por un ensayo de tracción revela que este material sea de alta resistencia cuyos datos al ser comparados con otro material puede ser considerado un acero ASTM A572 G42 o un ASTM A588 GB.

7.10. REQUISITOS PARA LA FABRICACIÓN DE PUENTES

El sistema de puentes modulares basados en paneles tipo Bailey se encuentra fuertemente establecido en el mundo actual como un producto capaz de aportar soluciones inmediatas en lugares de difícil acceso destinado a ser utilizado como un puente temporal o permanente.

Los paneles deben ser diseñados de acuerdo a los requerimientos mínimos para un diseño de puentes de carretera según la norma AASHTO con su siglas en inglés “American Association of State Highway and Transportation Officials” bajo un sistema de diseño LRFD el cual permite realizar un análisis de cargas tomando en cuenta factores de carga tales como cargas vivas, cargas muertas, cargas de viento, sismo, que fueron desarrollados a partir de la teoría de confiabilidad en base a un conocimiento estadístico actual de cargas y el comportamiento de las estructuras con el fin de llenar inconsistencias, vacíos y corregir algunos puntos conflictivos para lograr puentes que tengan mayor servicio, mantenimiento más sencillo y niveles de seguridad uniformes.

La primera norma ampliamente reconocida para el diseño y construcción de puentes fue publicada en el año de 1931 en Estados Unidos bajo el nombre de

AASHTO con sus siglas en inglés “American Association of State Highway Officials” que con el pasar del tiempo toma el nombre AASHTO.

En el Ecuador, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) que actualmente llamado Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), ha desarrollado un manual con el nombre de “Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes” (MOP – 001 – F 2002) que pone en manifiesto en la sección 505 la construcción de estructuras de acero en la que detalla que las conexiones para puentes de carretera se conformarán según las normas y especificaciones de la AASHTO vigentes con el fin de estandarizar las prácticas y procedimientos de diseño para todo el país.

Los materiales utilizados para la construcción de puentes estructurales, la norma AASHTO trabaja en conjunto con la norma ASTM con el fin de elaborar requisitos uniformes que mejor satisfagan las necesidades de los diseñadores. Así mismo, la norma AWS en su código AASHTO/AWS D1.5M/D1.5: 2008 Bridge Welding Code en su quinta edición, contiene los requisitos de la soldadura para la construcción de puentes de un material de acero al carbono de baja aleación en las que se detallan diseño de juntas soldadas, ejecución de trabajo, técnicas de soldadura, calificación, inspección y otros.

Esta norma específica para distintos materiales ASTM, los requisitos del metal de relleno para una calificación WPS que deben ser tomados en cuenta según las indicaciones que hace la norma AASHTO. En el capítulo anterior se realizó un análisis sobre el tipo del proceso de soldadura utilizado para este tipo de paneles concluyendo que los cordones de soldadura fueron realizados por un proceso de soldadura tipo GMAW.

La figura 7.20 muestra diferentes procesos de soldadura para materiales ASTM A 709 (M 270 para la AASHTO) con su respectivo electrodo bajo las especificaciones AWS A 5.1/A5.1 M y AWS A 5.5/A5.5 M para un proceso SMAW, AWS A5.17/A5.17 M y AWS A5.23/A5.23 M para un proceso SAW, AWS A 5.20/A5.20 M y AWS A 5.29/A5.29 M para un proceso FCAW y por

último se tienen la AWS A 5.18/A5.18 M y la AWS A 5.28/A5.28 M para un proceso GMAW estableciendo cada una los requerimientos de composición química y valores mínimos de resistencia a la fluencia y resistencia a la tensión de los electrodos para cada procesos de soldadura.

Base Metal	AWS Electrode Specification	Qualification Test Requirement				
		Minimum Yield Strength, MPa [ksi]	Minimum Tensile Strength, MPa [ksi]	Elongation in 50 mm [2 in], %	CVN, J [ft-lb] AASHTO Temperature Zones	
					I and II	III
M270M [M270] (A 709M [A 709]) Gr. 250 [36] (Cont'd)	ELBCTROSLAG—Not Authorized for Tension and Reversal Members:					
	AWS A5.25/A5.25M FES60-XXXX FES62-XXXX FES70-XXXX FES72-XXXX	300 (45)	400 (65)	24 22 22	20 @ -20° C [15 @ 0° F]	As Approved by Engineer
	ELBCTROGAS—Not Authorized for Tension and Reversal Members:					
	AWS A5.26/A5.26M BG60X-X BG62X-X BG70X-X BG72X-X	345 [50]	400 [65]	24 24 22 22	20 @ -20° C [15 @ 0° F]	As Approved by Engineer
M270M [M270] (A 709M [A 709]) Gr. 345 [50] Type 1, 2, or 3, Gr. 345W [50W] Gr. HPS 345W [HPS 50W] 100 mm [4 in] and under	GMAW AWS A5.18/A5.18M ER70S-2, 3, 6, 7 AWS A5.28/A5.28M ER80S-NXX	345 [50]	450 [65]	22	27 @ -20° C [20 @ 0° F]	27 @ -30° C [20 @ -20° F]
	FCAW-S AWS A5.20/A5.20M E7XT-6, 8 AWS A5.29/A5.29M B6XT8-X E7XT4-X E7XT6-X E7XT7-X E7XT8-X B8XT8-X	345 [50]	450 [65]	22	27 @ -20° C [20 @ 0° F]	27 @ -30° C [20 @ -20° F]
	ELBCTROSLAG—Not Authorized for Tension and Reversal Members:					
	AWS A5.25/A5.25M FES70-XXXX FES72-XXXX	345 [50]	450 [65]	22	27 @ -20° C [20 @ 0° F]	As Approved by Engineer
	ELBCTROGAS—Not Authorized for Tension and Reversal Members:					
	AWS A5.26/A5.26M BG70X-X BG72X-X	345 [50]	450 [65]	22	27 @ -20° C [20 @ 0° F]	As Approved by Engineer
M270M [M270] (A 709M [A 709]) Gr. HPS 485W [HPS 70W]	As Approved by Engineer (see Table 4.1)					

Figura 7.38 Requisitos del material de relleno

Fuente: AASHTO/AWS D1.5M/D1.5. Bridge Welding Code. 5ed. USA. 2008

Un ejemplo de aplicación de acuerdo a los materiales seleccionados en el inciso anterior, la sección marcada indica los posibles electrodos que se

pueden utilizar para realizar un cordón de soldadura para un material ASTM A 709 grado 50, es decir, correspondiente a un acero ASTM A 572.

Cabe recalcar que la norma ASTM A 709 cubre las especificaciones de ocho categorías diferentes de materiales de acero al carbón de alta resistencia y baja aleación para perfiles estructurales, placas, barras y aleaciones de aceros templados y revenidos para placas estructurales utilizados para puentes con la siguiente denominación: 36 [250], 50 [345], 50S [345S], 50W [345W], 100 [690], 100 [690W] que representan los materiales tipo A 36/A 36M, A 572/A 572M, A 992/A 992M, A 588/A 588M, A 514/A 514M respectivamente.

Es importante tener en cuenta la capacidad de un metal para ser soldado bajo condiciones de fabricación en un diseño específico y apropiado de una estructura para comportarse satisfactoriamente en servicio. Un metal que se pueda soldar con facilidad quiere decir que tiene una buena soldabilidad claro está que esto depende de factores como composición química, facilidad de tratamiento térmico, dimensiones y forma.

Para aceros de bajo contenido de carbono, la soldabilidad está asociada a la facilidad de templeado que tenga el material y la manera para determinar ese parámetro se llama carbono equivalente que se calcula de la siguiente manera:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Si}{6} \quad 7.3$$

Para aceros de baja aleación, la templeabilidad depende del contenido de carbono y de los materiales de aleación que posee en su composición química cuyo carbono equivalente se calcula como se indica en la siguiente ecuación:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Cr + \%Mn}{9} + \frac{\%Ni}{18} + \frac{\%Mo}{13} \quad 7.4$$

Dependiendo del valor que se obtenga del carbono equivalente, se determina la facilidad de temple del material y en caso de que se requiera una junta soldada de buenas características mecánicas, se toma el siguiente criterio:

- Cuando el carbono equivalente sea menor a 0,4, los cambios metalográficos no son significantes por lo que no se requiere un tratamiento térmico.
- Cuando el carbono equivalente se encuentre en un rango de 0,4 – 0,6, los cambios metalográficos que sufre el material son significativos por lo que se requiere un pre – calentamiento entre 200 – 400 °C
- Por último cuando el carbono equivalente sea mayor a 0,6, se requiere un precalentamiento entre 400 – 600°C y además un post – calentamiento.

El precalentamiento se realiza desde el borde de la junta hasta unos 100 mm a cada lado controlando la temperatura a una distancia alrededor de 35 mm del borde de la junta con el uso de lápices térmicos.

El tratamiento térmico utilizado en caso de que sea necesario a más de procurar propiedades mecánicas adecuadas, ayuda también a producir cambios favorables a la junta soldada disminuyendo el peligro de la formación de grietas, minimizar zonas duras adyacentes a la soldadura, minimizar tensiones de contracción y disminuye distorsiones.

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS ECONÓMICO

8.1. COSTOS

8.1.1. COSTOS DIRECTOS

Tabla 8.1 Costos directos de materiales

MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Valor Total
Acero panel Mabey	u	1	0,00	0,00
Electrodo T60/T80	u	2	6,40	12,80
Boquilla T60 60A	u	2	8,80	17,60
Cable de acero 5/8"	u	2	2,84	62,48
Total materiales				92,88

Fuente: Propia

Tabla 8.2 Costos directos de probetas

PROBETAS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Valor Total
E. Tracción Muñón	u	3	13,44	40,32
E. Tracción perfil arriestra.	u	3	13,44	40,32
E. Tracción perfil estruc.	u	3	13,44	40,32
E. Tracción placa central	u	2	13,44	26,88
E. Tracción bulón de panel	u	3	52,84	158,52
Total probetas				306,36

Fuente: Propia

Tabla 8.3 Costos directos ensayos de laboratorio

ENSAYOS DE LABORATORIO				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unit.	Valor Total
Espectrometría de chispa	u	6	44,80	268,80
Total ensayos				268,80

Fuente: Propia

Tabla 8.4 Total costos directos

COSTOS DIRECTOS	
Descripción	Valor
Materiales	139,46
Probetas	306,36
Ensayos de laboratorio	268,80
Total Costos Directos	668,04

Fuente: Propia

8.1.2. COSTOS INDIRECTOS

Tabla 8.5 Costos indirectos

COSTOS INDIRECTOS	
Útiles de oficina	90
Combustible	60
Transporte traslado panel	30
Normas	40
Suministros varios	60
Total Costos Indirectos	280

Fuente: Propia

8.1.3. COSTO TOTAL

Tabla 8.6 Costos totales

COSTO TOTAL	
Costos Directos	668,04
Costos Indirectos	280
Subtotal	948,04
Imprevistos	47,40
Total	995,44

Fuente: Propia

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

- Mediante un proceso de verificación de la prensa hidráulica se pudo comprobar la capacidad real de la misma debido a que al aplicar la ecuación $P = F/A$ con un área transversal del pistón de $9,621 \text{ plg}^2$, el valor de la fuerza es aproximadamente la mitad respecto a la fuerza obtenida por mínimos cuadrados.
- La rotura en la sección transversal aproximadamente de 45° tanto para las probetas del perfil estructural C, perfil de arriostramiento y bulón de panel hace que estos sean materiales dúctiles, mientras que, elementos estructurales como el muñón y placa de unión central no presentan esta característica ya que su corte es a 0° aparentando ser materiales frágiles pero debido a su alargamiento porcentual del 20,4% y 26,4% respectivamente hace que sean materiales dúctiles.
- Los valores de resistencia última a la tracción y resistencia a la fluencia de todos los materiales estructurales del panel mostrados en tablas anteriores, hacen que estos materiales sean de alta resistencia cumpliendo los mínimos requerimientos de alargamiento porcentual que piden las normas con una probeta de 50 mm entre marcas.
- Las imágenes obtenidas por un ensayo de chispa, elementos del panel como el perfil estructural C y perfil de arriostramiento fueron trabajos en caliente al presentar un color anaranjado característico al final del haz de chispa no así el del muñón y el del bulón de panel que al presentar un color amarillento blanquecino hacen que estos materiales sean aleados con manganeso y silicio al igual que la placa de unión central cuya aleación más representativa es el manganeso.
- Por la longitud del haz de chispa de los elementos estructurales del panel hacen que estos materiales sean aceros de bajo contenido de carbono.

- Los datos de composición química obtenidos por el microscopio electrónico pueden ser confiables al ser comparados con un ensayo por espectrometría por chispa, la diferencia radica en que el primer método lo analiza en un área de $1 \mu\text{m}^2$ mientras que el otro método lo realiza en toda la superficie de una probeta de 400 mm^2 .
- Con los datos obtenidos tanto de composición química como de resistencia del bulón de panel, este material no cumple con las especificaciones que hace referencia el manual del panel Bailey definiendo como límite elástico un valor de $78,5 \text{ kg/mm}^2$ ($769,3 \text{ MPa}$) mientras que por un ensayo de tracción realizado en laboratorio arrojó un resultado de $482,6 \text{ MPa}$.
- Los espesores de galvanizado de los elementos estructurales del panel como el perfil en C, perfil de arriostramiento y muñón al ser de $230 \mu\text{m}$, $237 \mu\text{m}$, $167 \mu\text{m}$ respectivamente cumplen con los espesores mínimos requeridos por las normas INEN 2483 y ASTM A 123 para perfiles y placas estructurales que requieren de un mínimo de $100 \mu\text{m}$ y $75 \mu\text{m}$ para el perfil de arriostramiento mas no de la placa de unión central que presenta un espesor de galvanizado de $80 \mu\text{m}$ para una especificación mínima de $100 \mu\text{m}$.
- El proceso de soldadura utilizado para unir los elementos estructurales del panel fue un proceso con alambre continuo y protección gaseosa (GMAW) luego de haber realizado un estudio macro de un pedazo de electrodo que fue depositado en el perfil de arriostramiento.
- Analizando la soldadura en esa sección del panel se pone en manifiesto la inaceptabilidad de los cordones de soldadura en los cuadrantes señalados según la especificación que hace la norma AWS D1.1 para una inspección visual debido a la presencia de grietas que se logra divisar en cada uno de los mismos.
- El panel puede ser construido en nuestro país con aceros de alta resistencia bajo la designación ASTM puesto que estos materiales existen en nuestro medio a mas de que la norma INEN 037 hace referencia a estos materiales para el diseño y fabricación de estructuras de acero, mas no en su geometría cuyo diseño se encuentra patentado por la empresa del mismo nombre.

9.2. RECOMENDACIONES

- Con respecto a la soldadura, se recomienda tomar en cuenta el valor del carbono equivalente pues esto permite definir si se necesita realizar un precalentamiento o realizar un tratamiento térmico posterior esto con el fin de alivianar tensiones y disminuir el peligro de formación de grietas evitando tener resultados con los obtenidos en un ensayo macrográfico de la sección transversal del muñón.
- Seguir los procedimientos que indica la norma AASHTO/AWS D1.5 para seleccionar correctamente el electrodo puesto que para cada acero, existe un proceso de soldadura específico con su respectivo electrodo para lograr un cordón de soldadura acorde a las propiedades mecánicas requeridas.
- Se debe realizar periódicamente una verificación y calibración de todos los equipos de laboratorio puesto que esto implica obtener resultados confiables y valederos que sirvan para un mejor análisis de los resultados.
- Seguir los procedimientos específicos que indican las normas para los respectivos ensayos mecánicos y metalográficos para no dañar el material y alcanzar resultados confiables.
- Realizar una renovación de los equipos de laboratorio en especial el del laboratorio de Metalurgia con el fin de obtener una información más detallada del material sin tener la necesidad de acudir a otras universidades o empresas.

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys volume 1. 9 ed. USA. 2004
- ASM Handbook. Mechanical Testing and Evaluation volume 8. 9 ed. USA. 2004
- ASM Handbook. Metallography and Microstructures volume 9. 9 ed. USA. 2004
- ASM Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control volume 17. 9 ed. USA. 2004
- Askeland, Donald R; Phulé, Pradeep P. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4 ed. Thomson. México. 2004.
- Avner, Sydney H. Introducción a la Metalurgia Física. 2 ed. McGraw Hill. México. 1988.
- Reed – Hill, Robert E. Physical Metallurgy Principles. 2ed. D. Van Nostrand Company. USA. 1973.
- Smith, William. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. 3 ed. McGraw Hill. España. 1998.
- Shaffer, Saxena; Antolovich, Sanders; Warner. Ciencia y Diseño de Materiales para Ingeniería. Primera ed. McGraw Hill. México. 2000.
- Mangonon, Pat L. Ciencia de Materiales y Diseño. Primera ed. Pearson Education. México. 2001.
- Callister, William. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Ed Reverté. España. 1996
- Groover, Mikell. Fundamentos de Manufactura Moderna. 3ed. McGraw Hill. México. 2007.
- Giménez Ferrer , Carlos; Amigó Borros, Vicente. Tecnología de Materiales. Primera ed. Editorial Alfaomega. México. 2005.
- Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R. Manufactura, ingeniería y tecnología. 5 ed. Pearson Education. México. 2008.
- Shachelford, James F. Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingeniería. 6 ed. Prentice Hall. Madrid. 2005.

- Groover, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas. Primera ed. Prentice Hall Hispanoamericana. México. 1997.
- Cary, Howard B. Manual de Soldadura Moderna tomo 2. 2 ed. Prentice Hall. México. 1992.
- Bailey, Donald C. Manual Bailey y Uniflote. Primera ed. Acrow Press. Inglaterra. 1970.
- Hamrock, Bernard J; Jacobson, Jo; Schmid, Steven R. Elementos de Máquinas. McGraw Hill. México. 2000
- Shigley, Joseph Edward; Mischke, Charles R. Diseño en Ingeniería Mecánica. 5 ed. McGraw Hill. México. 1990
- AWS D1.1/D1.1M. Structural Welding Code Steel. 21 ed. 2008
- AASHTO/AWS D1.5/D1.5M. Bridge Welding Code. 5 ed. 2008.
- ASTM E 3 – 01. Guide for Preparation of Metallographic Specimens. 2001
- ASTM E 8 – 03. Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.2001
- ASTM E 18 – 05. Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials. 2005
- ASTM E 112 – 96R04. Test Methods for Determining Average Grain Size. 2004
- ASTM E 340 – 00R01. Test Method for Macroetching Metals and Alloys. 2001
- ASTM E 407 – 07. Practice for Microetching Metals and Alloys. 2007
- ASTM A 123/123M – 02. Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products. 2002
- ASTM A 370 – 05. Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. 2005
- NTE INEN – ISO 377. Acero y productos de acero – localización y preparación de muestras y probetas para ensayos mecánicos. 2009
- NTE INEN 2483. Recubrimientos de Zinc (Galvanizados por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero. Requisitos. 2009
- INEN 1482. Determinación microscópica de inclusiones. 2001
- RTE INEN 037. Diseño, fabricación y montaje de estructuras de acero. 2009

- www.hightech.net.ve/servicios/1-ensayos-no-destructivos/phased-array, Ensayos no destructivos, español, 2012
- <http://www.soldadosdigital.com/2010/pdf/militaria-panelesbailey.pdf>. El puente de paneles “Bailey” uso clásico entre los puentes de uso militar, español, 2012