



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA

*Trabajo Estructurado de Manera Independiente Previo a la Obtención del
Título de Ingeniero Mecánico*

TEMA:

ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN
AGITACIÓN (FSW) Y SU INCIDENCIA SOBRE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS EN UNIONES DE PERFILES DE
ALUMINIO.

AUTOR: Raúl Wladimir Toapanta Bautista

TUTOR: Ing. Mg. Cesar Arroba

AMBATO - ECUADOR

2015

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del presente Trabajo Estructurado de Manera Independiente previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, bajo el tema **“ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW) Y SU INCIDENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN UNIONES DE PERFILES DE ALUMINIO”**, ejecutado por el señor: Raúl Wladimir Toapanta Bautista, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato, CERTIFICO que el presente trabajo de investigación fue elaborado en su totalidad por el autor y ha sido concluido bajo el plan de tesis aprobado.

Ing. Mg. Cesar Arroba

Tutor

AUTORÍA

El contenido de la presente investigación desarrollada bajo el tema **“ESTUDIO DEL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW) Y SU INCIDENCIA SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN UNIONES DE PERFILES DE ALUMINIO”**, nos corresponde exclusivamente al Egresado Raúl Wladimir Toapanta Bautista y al Ing. Mg. Cesar Arroba Tutor del trabajo de investigación.

Egdo. Raúl Wladimir Toapanta Bautista
Autor

Ing. Mg. Cesar Arroba
Tutor

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación lo dedico con mucho amor:

A mi padre: Raúl Toapanta, por apoyarme en todo momento sea bueno o malo, por el esfuerzo que realizo en su trabajo, para regalarme la oportunidad de estudiar, por su cariño y confianza.

A mi madre: Blanca Bautista, porque siempre me ha apoyado en todos los momentos difíciles de mi vida, por su cariño, preocupación y ánimo.

A mi amor: Jessica Quispe, por enseñarme que en la vida nunca hay que darse por vencido, sin ella no lo hubiera logrado.

AGRADECIMIENTO

Al terminar este trabajo de investigación, quiero agradecer sinceramente su apoyo y ayuda a cuantos lo han hecho posible de una u otra forma.

A mi Dios, por regalarme la oportunidad de vivir momentos buenos y los otros, porque es la fuerza que me impulsa a seguir hacia adelante.

A mis padres por su sacrificio y tiempo en mi formación, porque supieron darme el aliento necesario y los consejos oportunos para que continúe con mis estudios.

Agradezco a mi amor: Jessica por su paciencia, su apoyo y comprensión en todo momento, por compartir momentos alegres y tristes a lado mío.

Al Ing. Mg. Cesar Arroba por su amabilidad, responsabilidad, paciencia y colaboración en la elaboración de este proyecto de investigación.

En fin a todas las personas de buen corazón que me han apoyado y animado durante la realización de este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

Certificación	I
Autoría de la Investigación	II
Dedicatoria	III
Agradecimiento	IV
Índice general de Contenidos	V
Índice de Figuras y Tablas	IX
Resumen Ejecutivo	XVII
Summary	XVIII

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema de Investigación	1
1.2 Planteamiento del Problema	1
1.2.1 Contextualización del Problema	1
1.2.2 Análisis Crítico	2
1.2.3 Prognosis	4
1.2.4 Formulación del Problema	4
1.2.5 Preguntas Directrices	4
1.2.6 Delimitación	5
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos	8
2.2 Fundamentación Filosófica	9
2.3 Fundamentación Legal	9
2.4 Categorías Fundamentales	10
2.4.1 Soldadura Industrial	10
2.4.1.1 Soldabilidad del Aluminio	11
2.4.1.2 Dificultades al soldar Aluminio	11
2.4.2 Procesos de soldadura usados para el Aluminio	12
2.4.2.1 Soldadura TIG	13
2.4.2.2 Soldadura MIG	15
2.4.3 Proceso de soldadura por fricción agitación (FSW)	17
2.4.3.1 Principio de funcionamiento de la soldadura FSW	18
2.4.3.2 Ventajas del proceso de soldadura FSW	20
2.4.3.3 Herramienta de soldadura	21
2.4.3.4 Parámetros del proceso de soldadura FSW	22
2.4.3.5 Geometría de las uniones	23
2.4.3.6 Regiones de la zona de soldadura FSW	23
2.4.3.7 flujo plástico de material en la soldadura FSW	25
2.4.3.8 Aplicaciones del proceso de soldadura FSW	25
2.4.4 Ciencia de los materiales	28
2.4.4.1 El aluminio	28
2.4.4.2 Transformación del aluminio	29
2.4.4.3 Propiedades del aluminio	30
2.4.4.4 El aluminio y sus aleaciones	30
2.4.5 Ensayo de materiales	32
2.4.5.1 Ensayo de Tracción	32
2.4.5.2 Ensayo de doblado de soldadura	37
2.4.5.3 Ensayo de Dureza	41

2.4.6 Propiedades Mecánicas	43
2.5 Hipótesis	46
2.6 Señalamiento de variables de la hipótesis	46
2.6.1 Variable independiente	46
2.6.2 Variable dependiente	46
2.6.3 Término de relación	46

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque	47
3.2 Modalidad básica de la investigación	47
3.2.1 Bibliográfica	47
3.2.2 Experimental	47
3.3 Nivel o tipo de investigación	48
3.3.1 Descriptivo	48
3.3.2 Asociación de Variables	48
3.4.1 Población	48
3.4.2 Muestra	48
3.5 Operacionalización de Variables	49
3.6 Recolección de Información	50
3.7 Procesamiento de la Información	50

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Análisis de Resultados	51
4.1.1 Características de la máquina fresadora	52
4.1.2 Diseño y construcción de la herramienta de soldadura	53
4.1.2.1 Dimensionamiento de la herramienta de soldadura	54

4.1.2.2 Material de la herramienta de soldadura	56
4.1.3 Adquisición de la aleación de aluminio 6061.....	67
4.1.4 Características dimensionales de las placas a soldar	67
4.1.5 Calculo de los parámetros del proceso FSW	68
4.1.5.1 Velocidad de avance (Va)	68
4.1.5.2 Velocidad de rotación (Vr).....	69
4.1.5.3 Índice de velocidad (Iv).....	70
4.1.5.4 Condiciones de contacto	71
4.1.5.5 Generación de calor (Q)	72
4.1.5.6 Temperatura alcanzada en el proceso de soldadura FSW (T)	88
4.1.6 Fijación de las probetas	93
4.1.7 Soldar las probetas	94
4.1.8 Dimensionamiento de las probetas para Ensayos Mecánicos	100
4.1.8.1 Ensayo de Tracción	100
4.1.8.2 Ensayo de Doblado.....	100
4.1.8.3 Ensayo de Dureza	100
4.1.9 Ensayos Mecánicos	101
4.2 Interpretación de los resultados obtenidos	125
4.2.1 Ensayo de Tensión	125
4.2.2 Ensayo de Doblado	126
4.2.3 Ensayo de Dureza	127
4.3 Análisis de los datos obtenidos	128
4.3.1 Análisis del ensayo de Tensión	128
4.3.2 Análisis del ensayo de Doblado	129
4.3.3 Análisis del ensayo de Dureza	130
4.4 Verificación de la Hipótesis	131

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	138
5.2 Recomendaciones	139

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 Datos Informativos	140
6.2 Antecedentes de la Propuesta	141
6.3 Justificación	141
6.4 Objetivos	141
6.4.1 Objetivo General	141
6.4.2 Objetivos Específicos	142
6.5 Análisis de Factibilidad	142
6.5.1 Análisis Económico	142
6.5.2 Análisis Tecnológico	142
6.6 Fundamentación	143
6.6.1 Cargas presentes en la herramienta de soldadura	143
6.6.2 Cargas térmicas presentes en el metal base	143
6.6.3 Análisis estático de la herramienta de soldadura	148
6.6.4 Análisis térmico del metal base	159
6.6.5 Análisis de los datos obtenidos de la herramienta de soldadura	231
6.6.6 Análisis de los datos obtenidos en el metal base	231
6.7 Metodología	232
6.8. Administración	234
6.9 Previsión de la evaluación	235
Bibliografía	236
Anexos	239
Planos	284

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Figura 2.1 Categorías Fundamentales	10
--	----

Figura 2.2 Proceso de soldadura TIG	13
Figura 2.3 Esquema de un soplete para soldadura TIG	14
Figura 2.4 Equipo de soldadura por arco de tungsteno y gas	14
Figura 2.5 Esquema de soldadura por sistema MIG	16
Figura 2.6 Esquema básico de un equipo para soldadura MIG	17
Figura 2.7 Esquema general del proceso FSW	18
Figura 2.8 Rotación de la herramienta no consumible	18
Figura 2.9 La introducción del pin crea calentamiento por fricción	19
Figura 2.10 El contacto del hombro forma una columna controlada de metal deformado plásticamente	19
Figura 2.11 El avance localizado de la herramienta	20
Figura 2.12 Cordón de soldadura mediante el proceso FSW	20
Figura 2.13 Esquema de la herramienta de soldadura	21
Figura 2.14 Herramienta de soldadura: a) Pin cuadrado y b) Pin cónico	22
Figura 2.15 Configuración de juntas para la FSW	23
Figura 2.16 Macrografía típica con el proceso de FSW	24
Figura 2.17 Flujo plástico de material en la soldadura FSW	25
Figura 2.18 Industria Naval y la Marina	26
Figura 2.19 Industria Aeroespacial (panel integral unido por FSW)	26
Figura 2.20 Ejemplos de la soldadura FSW en la industria del automóvil	27
Figura 2.21 Reparaciones de fisuras en estructuras de plataformas	27
Figura 2.22 Proceso de extrusión del Aluminio	29
Figura 2.23 Proceso de laminación en caliente del Aluminio	30
Figura 2.24 Alargamiento de una barra de metal sujeta a una fuerza	34
Figura 2.25 Probeta para prueba de Tensión	35
Figura 2.26 Especímenes de doblado de raíz y de cara	38
Figura 2.27 Doble guiado estándar	39
Figura 2.28 Doble guiado equipado con rodillos	40
Figura 2.29 Doble guiado mediante enrollado	41
Figura 2.30 Tipos de penetradores y los tipos de durezas	43
Figura 2.31 Diagrama típico de esfuerzo-deformación unitaria para aluminio y otros metales que no tienen punto de fluencia	44
Figura 4.1 Diagrama de flujo para la toma de resultados	52

Figura 4.2 Fresadora adaptada al proceso FSW	53
Figura 4.3 Esquema de la herramienta de soldadura con pin cónico	53
Figura 4.4 Dimensiones de la herramienta de soldadura	54
Figura 4.5 Esfuerzos producidos: a) en el pin y b) en el hombro	56
Figura 4.6 Cargas de torsión y de flexión presentes en la herramienta de soldadura	57
Figura 4.7 Cargas de torsión y de flexión presentes en el pin	57
Figura 4.8 Cargas de torsión y de contacto presentes en el hombro	61
Figura 4.9 Representación gráfica de la teoría del esfuerzo normal máximo ..	66
Figura 4.10 Dimensiones de las placas para soldar	68
Figura 4.11 Calor generado en el metal base, debido a la fricción de la herramienta	72
Figura 4.12 Calor generado por geometría del pin y del hombro	72
Figura 4.13 Segmentos infinitesimales $d\theta$, dr , $rd\theta$ en el área circular del pin de radio r_p	73
Figura 4.14 Segmentos infinitesimales $d\theta$, dz , $rd\theta$ en el área cilíndrica del pin de radio r_p	75
Figura 4.15 Segmentos infinitesimales $d\theta$, dr , $rd\theta$ en el área circular del hombro	77
Figura 4.16 Condiciones térmicas del proceso FSW	88
Figura 4.17 Sujeción utilizada para fijar las placas	93
Figura 4.18 Dimensiones de la probeta para el ensayo de Tracción	100
Figura 4.19 Dimensiones de la probeta para el ensayo de Doblado	100
Figura 4.20 Efecto de la velocidad de rotación sobre el calor generado	132
Figura 4.21 Efecto de la velocidad de rotación sobre la temperatura	132
Figura 6.1 Esfuerzo principal máximo en la herramienta de soldadura	231

TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio	31
Tabla 2.2 Grupos de aleaciones de aluminio forjado	32
Tabla 3.1 Variable Independiente	49
Tabla 3.2 Variable Dependiente	50

Tabla 4.1	Características de la máquina fresadora	52
Tabla 4.2	Dimensiones recomendadas por Rajiv S. Mishra para el diámetro del pin	55
Tabla 4.3	Características de la herramienta de soldadura	67
Tabla 4.4	Propiedades de la aleación de aluminio 6061.....	67
Tabla 4.5	Factor de material θ_{SALM} para diversos materiales	69
Tabla 4.6	Velocidades de rotación que se utilizara para la soldadura FSW	70
Tabla 4.7	Índice de velocidades del proceso FSW	70
Tabla 4.8	Coefficientes de fricción.....	71
Tabla 4.9	Calor y temperatura generado en el cordón de soldadura	93
Tabla 4.10	Soldadura de la probeta A	94
Tabla 4.11	Soldadura de la probeta B	95
Tabla 4.12	Soldadura de la probeta C	96
Tabla 4.13	Soldadura de la probeta D	97
Tabla 4.14	Soldadura de la probeta E	98
Tabla 4.15	Soldadura de la probeta F	99
Tabla 4.16	Ensayo de tracción de la probeta A	101
Tabla 4.17	Análisis del ensayo de tracción de la probeta A	102
Tabla 4.18	Ensayo de tracción de la probeta B	103
Tabla 4.19	Análisis del ensayo de tracción de la probeta B	104
Tabla 4.20	Ensayo de tracción de la probeta C	105
Tabla 4.21	Análisis del ensayo de tracción de la probeta C	106
Tabla 4.22	Ensayo de tracción de la probeta D	107
Tabla 4.23	Análisis del ensayo de tracción de la probeta D	108
Tabla 4.24	Ensayo de tracción de la probeta E	109
Tabla 4.25	Análisis del ensayo de tracción de la probeta E	110
Tabla 4.26	Ensayo de tracción de la probeta F	111
Tabla 4.27	Análisis del ensayo de tracción de la probeta F	112
Tabla 4.28	Ensayo de doblado de la probeta A	113
Tabla 4.29	Ensayo de doblado de la probeta B	114
Tabla 4.30	Ensayo de doblado de la probeta C	115
Tabla 4.31	Ensayo de doblado de la probeta D	116

Tabla 4.32 Ensayo de doblado de la probeta E	117
Tabla 4.33 Ensayo de doblado de la probeta F	118
Tabla 4.34 Ensayo de dureza de la probeta A	119
Tabla 4.35 Ensayo de dureza de la probeta B	120
Tabla 4.36 Ensayo de dureza de la probeta C	121
Tabla 4.37 Ensayo de dureza de la probeta D	122
Tabla 4.38 Ensayo de dureza de la probeta E	123
Tabla 4.39 Ensayo de dureza de la probeta F	124
Tabla 4.40 Interpretación de los resultados del ensayo de tracción	125
Tabla 4.41 Interpretación de los resultados del ensayo de doblado	126
Tabla 4.42 Interpretación de los resultados del ensayo de dureza.....	127
Tabla 4.43 Análisis de los resultados del ensayo de tracción	128
Tabla 4.44 Análisis de los resultados del ensayo de doblado	129
Tabla 4.45 Análisis de los resultados del ensayo de dureza	130
Tabla 4.46 Resumen de la resistencia obtenida en las diferentes probetas	131
Tabla 4.47 Comparación entre los valores de la resistencia y la dureza del cordón de soldadura y el metal base	133
Tabla 4.48 Calculo de la varianza para la resistencia.....	135
Tabla 4.49 Calculo de la varianza para la dureza	135
Tabla 4.50 Distribución Chi-Cuadrado	136
Tabla 6.1 Cargas estáticas presentes en la herramienta de soldadura	143
Tabla 6.2 Velocidades de rotación y flujos de calor	143
Tabla 6.3 Propiedades del aire a la presión de 1 atm	145
Tabla 6.4 Valores de la velocidad uniforme del fluido al aproximarse al pin	146
Tabla 6.5 Valores del número de Reynolds para el pin	146
Tabla 6.6 Valores del número de Nusselt para el pin	147
Tabla 6.7 Valores del coeficiente de transferencia de calor del pin	147
Tabla 6.8 Datos para el análisis de la herramienta con el AISI 8620	148
Tabla 6.9 Esfuerzo principal máximo de la herramienta con el AISI 8620 ...	149
Tabla 6.10 Desplazamientos de la herramienta con el AISI 8620	150
Tabla 6.11 Factor de seguridad de la herramienta con el AISI 8620	151
Tabla 6.12 Datos para el análisis de la herramienta con el AISI 4340	152

Tabla 6.13	Esfuerzo principal máximo de la herramienta con el AISI 4340	.153
Tabla 6.14	Desplazamientos de la herramienta con el AISI 4340	.....154
Tabla 6.15	Factor de seguridad estático de la herramienta con el AISI 4340	155
Tabla 6.16	Factor de seguridad a fatiga de la herramienta con el AISI 4340	156
Tabla 6.17	Análisis térmico de la herramienta con el AISI 4340 (modelo A, B y C)	.....157
Tabla 6.18	Análisis térmico de la herramienta con el AISI 4340 (modelo D, E y F)	.....158
Tabla 6.19	Datos para el análisis térmico del modelo A	.....159
Tabla 6.20	Resultados del análisis térmico del modelo A (10s, 50s y 90s)	...160
Tabla 6.21	Resultados del análisis térmico del modelo A (130s, 170s y 210s)	.....161
Tabla 6.22	Resultados del análisis térmico del modelo A (250s y 290s)	.....162
Tabla 6.23	Temperatura respecto al tiempo del modelo A (10s y 50s)	.....163
Tabla 6.24	Temperatura respecto al tiempo del modelo A (90s y 130s)	.....164
Tabla 6.25	Temperatura respecto al tiempo del modelo A (170s y 210s)	.....165
Tabla 6.26	Temperatura respecto al tiempo del modelo A (250s y 290s)	.....166
Tabla 6.27	Temperatura respecto la longitud del modelo A (10s y 50s)	.....167
Tabla 6.28	Temperatura respecto la longitud del modelo A (90s y 130s)	.....168
Tabla 6.29	Temperatura respecto la longitud del modelo A (170s y 210s)	....169
Tabla 6.30	Temperatura respecto la longitud del modelo A (250s y 290s)	....170
Tabla 6.31	Datos para el análisis térmico del modelo B	.....171
Tabla 6.32	Resultados del análisis térmico del modelo B (10s, 50s y 90s)	....172
Tabla 6.33	Resultados del análisis térmico del modelo B (130s, 170s y 210s)	.....173
Tabla 6.34	Resultados del análisis térmico del modelo B (250s y 290s)	.....174
Tabla 6.35	Temperatura respecto al tiempo del modelo B (10s y 50s)	.....175
Tabla 6.36	Temperatura respecto al tiempo del modelo B (90s y 130s)	.....176
Tabla 6.37	Temperatura respecto al tiempo del modelo B (170s y 210s)	.....177
Tabla 6.38	Temperatura respecto al tiempo del modelo B (250s y 290s)	.....178
Tabla 6.39	Temperatura respecto la longitud del modelo B (10s y 50s)	.....179
Tabla 6.40	Temperatura respecto la longitud del modelo B (90s y 130s)	.....180
Tabla 6.41	Temperatura respecto la longitud del modelo B (170s y 210s)	....181

Tabla 6.42	Temperatura respecto la longitud del modelo B (250s y 290s)	182
Tabla 6.43	Datos para el análisis térmico del modelo C	183
Tabla 6.44	Resultados del análisis térmico del modelo C (10s, 50s y 90s)	184
Tabla 6.45	Resultados del análisis térmico del modelo C (130s, 170s y 210s)	185
Tabla 6.46	Resultados del análisis térmico del modelo C (250s y 290s)	186
Tabla 6.47	Temperatura respecto al tiempo del modelo C (10s y 50s)	187
Tabla 6.48	Temperatura respecto al tiempo del modelo C (90s y 130s)	188
Tabla 6.49	Temperatura respecto al tiempo del modelo C (170s y 210s)	189
Tabla 6.50	Temperatura respecto al tiempo del modelo C (250s y 290s)	190
Tabla 6.51	Temperatura respecto la longitud del modelo C (10s y 50s)	191
Tabla 6.52	Temperatura respecto la longitud del modelo C (90s y 130s)	192
Tabla 6.53	Temperatura respecto la longitud del modelo C (170s y 210s)	193
Tabla 6.54	Temperatura respecto la longitud del modelo C (250s y 290s)	194
Tabla 6.55	Datos para el análisis térmico del modelo D	195
Tabla 6.56	Resultados del análisis térmico del modelo D (10s, 50s y 90s) ...	196
Tabla 6.57	Resultados del análisis térmico del modelo D (130s, 170s y 210s)	197
Tabla 6.58	Resultados del análisis térmico del modelo D (250s y 290s)	198
Tabla 6.59	Temperatura respecto al tiempo del modelo D (10s y 50s)	199
Tabla 6.60	Temperatura respecto al tiempo del modelo D (90s y 130s)	200
Tabla 6.61	Temperatura respecto al tiempo del modelo D (170s y 210s)	201
Tabla 6.62	Temperatura respecto al tiempo del modelo D (250s y 290s)	202
Tabla 6.63	Temperatura respecto la longitud del modelo D (10s y 50s)	203
Tabla 6.64	Temperatura respecto la longitud del modelo D (90s y 130s)	204
Tabla 6.65	Temperatura respecto la longitud del modelo D (170s y 210s)	205
Tabla 6.66	Temperatura respecto la longitud del modelo D (250s y 290s)	206
Tabla 6.67	Datos para el análisis térmico del modelo E	207
Tabla 6.68	Resultados del análisis térmico del modelo E (10s, 50s y 90s)	208
Tabla 6.69	Resultados del análisis térmico del modelo E (130s, 170s y 210s)	209
Tabla 6.70	Resultados del análisis térmico del modelo E (250s y 290s)	210
Tabla 6.71	Temperatura respecto al tiempo del modelo E (10s y 50s)	211

Tabla 6.72	Temperatura respecto al tiempo del modelo E (90s y 130s)	212
Tabla 6.73	Temperatura respecto al tiempo del modelo E (170s y 210s)	213
Tabla 6.74	Temperatura respecto al tiempo del modelo E (250s y 290s)	214
Tabla 6.75	Temperatura respecto la longitud del modelo E (10s y 50s)	215
Tabla 6.76	Temperatura respecto la longitud del modelo E (90s y 130s)	216
Tabla 6.77	Temperatura respecto la longitud del modelo E (170s y 210s)	217
Tabla 6.78	Temperatura respecto la longitud del modelo E (250s y 290s)	218
Tabla 6.79	Datos para el análisis térmico del modelo F	219
Tabla 6.80	Resultados del análisis térmico del modelo F (10s, 50s y 90s)	220
Tabla 6.81	Resultados del análisis térmico del modelo F (130s, 170s y 210s)	221
Tabla 6.82	Resultados del análisis térmico del modelo F (250s y 290s)	222
Tabla 6.83	Temperatura respecto al tiempo del modelo F (10s y 50s)	223
Tabla 6.84	Temperatura respecto al tiempo del modelo F (90s y 130s)	224
Tabla 6.85	Temperatura respecto al tiempo del modelo F (170s y 210s)	225
Tabla 6.86	Temperatura respecto al tiempo del modelo F (250s y 290s)	226
Tabla 6.87	Temperatura respecto la longitud del modelo F (10s y 50s)	227
Tabla 6.88	Temperatura respecto la longitud del modelo F (90s y 130s)	228
Tabla 6.89	Temperatura respecto la longitud del modelo F (170s y 210s)	229
Tabla 6.90	Temperatura respecto la longitud del modelo F (250s y 290s)	230
Tabla 6.91	Análisis de la temperatura alcanzada en el metal base	231
Tabla 6.92	Procedimiento para el análisis de la herramienta	232
Tabla 6.93	Procedimiento para el análisis del metal base	233
Tabla 6.94	Costos de investigación	234

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

Autor: Egdo. Raúl Wladimir Toapanta Bautista

Tutor: Ing. Mg. Cesar Arroba

RESUMEN EJECUTIVO

El proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), es un método de unión en estado sólido (los elementos a juntar no alcanzan la temperatura de fusión) y sin aporte de material. Sus principales ventajas son: no se requiere habilidad para soldar, no se necesita material de aporte ni gas de protección, no produce humos, radiación o salpicaduras, ausencia de defectos de solidificación (porosidades y fisuración) lo que permite mejorar las propiedades mecánicas. El principio de funcionamiento consiste: colocación de las placas a tope, sujeción de las placas para evitar posibles desplazamientos, rotación y posicionamiento de la herramienta sobre la línea de unión, introducción lentamente sobre el metal base (la fricción entre las dos partes genera calor, lo que permite el ablandamiento del metal base), avance de la herramienta sobre la línea de soldadura (el metal base es agitado o mezclado) y retracción de la herramienta. Los parámetros de soldadura que se utilizó son: la geometría de la herramienta, y las velocidades de rotación y avance de la herramienta. Para poder efectuar el presente trabajo de investigación se adaptó a una máquina fresadora, por la razón que esta máquina cumple con los requisitos de operación. El objetivo principal fue estudiar las propiedades mecánicas resultantes del cordón de soldadura, por tal razón se efectuó los siguientes ensayos mecánicos: el ensayo de tracción para determinar la resistencia de la junta, el ensayo de doblado para verificar la ductilidad del cordón de soldadura y el ensayo de dureza.

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO

THE ENGINEER FACULTY OF CIVIL AND MECHANICAL

Author: Egdo. Raúl Wladimir Toapanta Bautista

Tutor: Ing. Mg. Cesar Arroba

ABSTRACT

The process of friction stir welding (FSW) is a method of solid state joining (the elements are not enough to raise the melting temperature) and without filler material. Its main advantages are: no soldering skill required, no filler or gas protection is needed, does not produce smoke, radiation or splashing, no solidification defects (porosity and cracking) thereby improving the mechanical properties. The working principle is: placing butt plates, clamping plates to avoid displacement, rotation and positioning of the tool on the connecting line, introduction slowly on the base metal (the friction between the two parts creates heat, allowing softening of the base metal), tool feed on the welding line (the base metal is agitated or mixed) and retraction of the tool. Welding parameters are used: the geometry of the tool, and the rotational speeds and tool feed. In order to perform this research was adapted to a milling machine, for the reason that this machine meets the operating requirements. The main objective was to study the resulting mechanical properties of the weld, for that reason the following mechanical tests were performed: the tensile test to determine the strength of the joint, the bend test to verify the ductility of the weld and hardness test.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Tema de Investigación

Estudio del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) y su incidencia sobre las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio.

1.2 Planteamiento del Problema

1.2.1 Contextualización

A nivel mundial la soldadura industrial se utiliza para la fabricación de estructuras metálicas en ingeniería, para realizar juntas de perfiles de aluminio se ha limitado, debido a que las propiedades mecánicas del cordón de soldadura tiene una gran reducción en comparación con el del metal base, porque durante la soldadura debido al aporte de calor localizado se generan gradientes térmicos que dan origen a un campo de tensiones residuales, las cuales podrán alcanzar valores cercanos al límite de fluencia del material a temperatura ambiente. Las tensiones residuales se definen como campos de tensiones que se encuentra en ausencia de cargas externas. Es decir, aquellas que no son requeridas por una estructura para mantener su equilibrio con el medio. Las mismas pueden ser una parte importante de las tensiones totales actuantes en un componente en servicio y presentan una importante influencia sobre la vida a la fatiga, fractura frágil como así también sobre la corrosión bajo tensiones (Melendo, 2010, p.1).

Varias aleaciones de aluminio se consideraban como no soldables, por esta razón los países de Inglaterra, Estados Unidos, Brasil, Argentina y Colombia han optado por utilizar el proceso de soldadura por fricción agitación o FSW (Friction Stir

Welding), que fue inventado por el Instituto Inglés de Soldadura (The Welding Institute) de Inglaterra en 1991 (Santiago & Lombera, 2007, p.1). Es un nuevo método de soldadura que se realiza en estado sólido y sin material de aporte ni gases de protección, demostrando tener un gran potencial para la realización de uniones de aleaciones de aluminio (Zapata, 2013, p.21).

En el Ecuador no se han realizado investigaciones acerca del proceso de soldadura por fricción agitación FSW, por lo que es de fundamental importancia realizar un estudio, para verificar si es posible mejorar las propiedades mecánicas resultantes del cordón de soldadura del aluminio.

1.2.2 Análisis Crítico

Se analizó que existe el problema para realizar la soldadura de perfiles extruidos de aluminio, por las siguientes razones:

El contacto del aluminio con el oxígeno del aire genera rápidamente, una capa de oxidación denominada alúmina. Esta capa de óxido influye directamente en el proceso de soldadura, ya que su punto de fusión es tres veces más alto que el del propio aluminio, por lo que es necesario eliminarla con un cepillo de acero inoxidable antes de comenzar la soldadura. La capa de óxido posee dos propiedades que afectan el resultado de la soldadura: un alto punto de fusión, lo que significa que el óxido no se funde durante la soldadura y además el calor aplicado combinado con el oxígeno acelera la formación de óxido.

El aluminio posee una conductividad térmica unas cuatro veces superior a la del acero. Esta característica hace que el aluminio sea muy sensible a las fluctuaciones de calor en los procesos de soldadura, de forma que hay que emplear mayor tensión y, en muchos casos será necesario atemperar la pieza.

El aluminio al calentarse, se dilata el doble que el acero, produciéndose deformaciones de la pieza a medida que soldamos la unión. Para evitar la separación de la junta será necesario dar un punteado previo.

Los procesos de soldadura por fusión se caracterizan por generar esfuerzos residuales en la junta con magnitudes cercanas al límite elástico del material, esto se debe a diferencias considerables en las velocidades de calentamiento y enfriamiento de las regiones cercanas a la unión. Los esfuerzos residuales son entre otros, uno de los parámetros que más influye en el comportamiento mecánico de los cordones de soldadura.

Los procesos de soldadura de materiales metálicos involucran la aplicación de calor localizado y cambios de temperatura en la zona de la unión. Estos cambios de temperatura generan expansión o contracción en la junta y sus alrededores; siendo estos fenómenos los encargados de restringir las deformaciones ocasionadas por el cambio de volumen, generando esfuerzos a compresión o a tracción según la distancia a la fuente de calor de la región analizada.

Al soldar por fusión en una atmósfera protegida (TIG o MIG) el arco voltaico rompe la capa de óxido al tiempo que el gas protege la masa fundida contra el oxígeno del aire e impide la formación de más óxido, pero al desarrollar la unión de juntas de aluminio implica una desventaja: el costo del gas protector para evitar la formación de escoria en la parte soldada y también se necesita una varilla de aluminio como aporte de material. También se produce defectos asociados a la solidificación (porosidad y susceptibilidad a la fisuración en caliente) que se produce en los procesos por fusión, por la razón de que se debe tener la habilidad manual del obrero para soldar.

El riesgo de la generación de poros en la soldadura, proviene del hidrógeno que se disuelve en la fundición. Si la cantidad de hidrógeno disuelta es demasiado grande, el exceso se separa como gas durante el enfriamiento y crea poros en la junta. El hidrógeno puede ser absorbido por elementos como la humedad y las impurezas en el metal base o el metal de aporte, así como por la llama de gas o el arco voltaico.

Los aditivos de aleación también afectan la tendencia del metal fundido a absorber hidrógeno. La formación de grietas está asociada con la resistencia y elasticidad del material así como las tensiones que surgen debido al calentamiento durante la

soldadura. Las propiedades mecánicas, por ejemplo: la resistencia se reducen a temperaturas cercanas al rango de fusión. El riesgo de formación de grietas es alto si se impide la deformación mediante la fuerte fijación de las piezas. Las grietas de soldadura pueden aparecer en la junta de la soldadura o bien en la superficie de separación entre la unión de la soldadura y el mismo material. Un tiempo prolongado de enfriamiento aumenta el riesgo de formación de grietas, mientras que la soldadura rápida parece tener el efecto contrario.

1.2.3 Prognosis

La dificultad para realizar la unión de perfiles de aluminio, con procesos de soldadura convencionales, no permite aprovechar al máximo las características de las aleaciones de aluminio, por ejemplo: alta resistencia a la corrosión. Al no realizar la investigación acerca del nuevo proceso de soldadura FSW, entonces se limitara el uso del aluminio para la fabricación de estructuras metálicas.

1.2.4 Formulación del Problema

¿El proceso de soldadura por fricción agitación permitirá obtener un mejor comportamiento mecánico de las soldaduras en perfiles de aluminio?

1.2.5 Preguntas Directrices

1. ¿Cuál es el principio de funcionamiento del proceso de soldadura por fricción agitación, que se aplica para realizar la soldadura de juntas de aluminio?
2. ¿Cuáles son las variables fundamentales del proceso de soldadura FSW, que se deben controlar para la formación del cordón de soldadura?
3. ¿Qué tipos de juntas se puede unir mediante el proceso de soldadura por fricción agitación, en perfiles extruidos de aluminio?
4. ¿Qué propiedades mecánicas se analizarán en el cordón de soldadura de aleaciones de aluminio, realizadas mediante el proceso de soldadura FSW?

1.2.6 Delimitación

1.2.6.1 Delimitación Temporal

El presente trabajo investigativo se realizará en los meses de Marzo del 2014 a Diciembre del 2014.

1.2.6.2 Delimitación Espacial

La investigación se realizará en la Provincia de Tungurahua, ciudad de Ambato, en la Universidad Técnica de Ambato, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica en el laboratorio de Materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

1.2.6.3 Delimitación de Contenido

Campo: Ingeniería Mecánica.

Área: Materiales.

Aspecto: Soldadura Industrial.

1.3 Justificación

El aluminio extruido es ampliamente utilizado, debido a su alta resistencia a la corrosión y a su baja densidad, tiene una gran aplicación en la industria de la construcción, por ejemplo: en puentes, torres, castilletes, pilares, columnas, armazones para techumbre, techados, puertas, ventanas y sus marcos, contramarcos y umbrales, barandillas, prefabricados, chapas decorativas y antideslizantes para pisos, chapas para recubrimientos en fachadas, barras, perfiles, tubos, en formas de "T", ángulos, vigas y canales.

La soldabilidad es uno de los principales problemas de las aleaciones de aluminio, por lo cual no es muy utilizada, y por eso es de vital importancia el estudio del proceso de soldadura por fricción agitación FSW, por la razón de que este método

se realiza en estado sólido en comparación con los métodos de soldadura por fusión, estos últimos pueden llegar a ser costosos, perjudiciales para la salud y el medio ambiente, además pueden generar un gran número de defectos en el cordón de soldadura del material, si no se aplica correctamente.

El proceso de soldadura por fricción agitación, está enfocado especialmente para unir el aluminio y sus aleaciones, es una técnica que emplea medios mecánicos para la unión (se utiliza una herramienta giratoria no consumible), la cual se caracteriza por realizar en estado sólido (los materiales en cuestión no alcanzan la temperatura de fusión) y sin aporte de material.

Con el proceso de soldadura por fricción agitación, se obtiene excelentes propiedades mecánicas, por dos razones: se obtiene en el cordón de soldadura un menor nivel de tensiones residuales y la ausencia de defectos de solidificación (porosidades y fisuración), porque los elementos a unir no se funden.

También el proceso FSW, permite obtener una reducción del costo de soldadura, porque no es necesario gas inerte de protección en comparación con los proceso de soldadura por fusión, y además posee bajos requerimientos de preparación de la junta, no se requiere de mecanizado después de la soldadura.

El proceso de soldadura por fricción agitación también se justifica: por ser más seguro, no se requiere una especial habilidad del operario de soldadura, más limpio (no produce escoria) y no presenta problemas medio ambientales en comparación con los proceso de soldadura por fusión (MIG o TIG), debido a que no genera humos, no emite radiación (infrarrojos y ultravioletas) no produce gases nocivos, y no produce salpicaduras.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Estudiar el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) y su incidencia sobre las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre el proceso de soldadura por fricción agitación FSW, para realizar la soldadura de juntas de aluminio.
- Establecer las variables fundamentales del proceso de soldadura FSW, para controlar la formación del cordón de soldadura.
- Estudiar los tipos de juntas que se puede unir mediante el proceso de soldadura FSW, para la fabricación de estructuras metálicas de aluminio.
- Analizar las propiedades mecánicas del cordón de soldadura obtenido mediante el proceso de soldadura FSW, para evaluar el comportamiento de la junta de aluminio.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Investigativos

Para el presente estudio se ha tomado como referencia las siguientes investigaciones sobre el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW):

Universidad Tecnológica de Pereira, tema: COMPARACIÓN DE LA JUNTA EN ESTADO SÓLIDO MEDIANTE FSW Y ARCO ELÉCTRICO EN ALEACIÓN AZ31, conclusión: Se debe hacer una evaluación cuidadosa de las variables del proceso de soldadura FSW para lograr primero una unión soldada sin defectos y después la mejor combinación de propiedades mecánicas en función del servicio.

Departamento de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia, tema: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE UNIONES SOLDADAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 5052 H38, conclusión: Las soldaduras por fricción agitación de la aleación de aluminio 5052 H38 hechas con 1800 rpm presentaron un aumento de la eficiencia mecánica con el aumento de la velocidad de soldadura; caso contrario para las muestras soldadas a 900 rpm.

Escuela de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia, tema: EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE LAS JUNTAS SOLDADAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6261 T5 POR EL PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN, conclusión: La velocidad de rotación, la velocidad de avance de la herramienta y la geometría del pin juegan un papel importante en la resistencia mecánica de la junta, se encontró una mayor resistencia a la tensión cuando se utilizó el pin cilíndrico roscado.

Comisión Nacional de Energía Atómica, tema: SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW) DE AA 6061 T6, conclusión: La herramienta es la variable fundamental del proceso, dentro del rango de velocidad estudiado un mismo diseño permite obtener soldaduras sanas. La velocidad de avance influye sobre la tensión de rotura y dureza de la junta, el aumento de velocidad va acompañado de un aumento de resistencia sin cambio apreciable en la ductilidad.

2.2 Fundamentación Filosófica

La presente investigación sobre el proceso de soldadura por fricción agitación implica al aspecto neopositivista, debido a las siguientes razones:

La finalidad de la investigación es realizar un estudio sobre la soldadura por fricción agitación (FSW), que permitirá posteriormente controlar los aspectos más importantes del proceso, para realizar la unión de aleaciones de aluminio sin defectos, con la finalidad de obtener excelentes propiedades mecánicas.

La visión que se tiene de la realidad es la dificultad que se presenta al soldar perfiles de aleaciones de aluminio, esto se debe a que no se cuenta con un sistema eficiente para la unión, existen procesos como la TIG y la MIG pero requieren de un operador calificado para realizar la unión.

La metodología estará enfocada en la utilización del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), porque se obtienen excelentes características del cordón de soldadura generado y por esto excelentes propiedades mecánicas resultantes.

2.3 Fundamentación Legal

Para realizar la soldadura de las probetas, y el ensayo de tensión se utilizó la norma AWS D17.3, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Hardware.

Para el ensayo de doblado la norma API 1104 y la norma ASTM E-10 para el ensayo de dureza.

2.4 Categorías Fundamentales

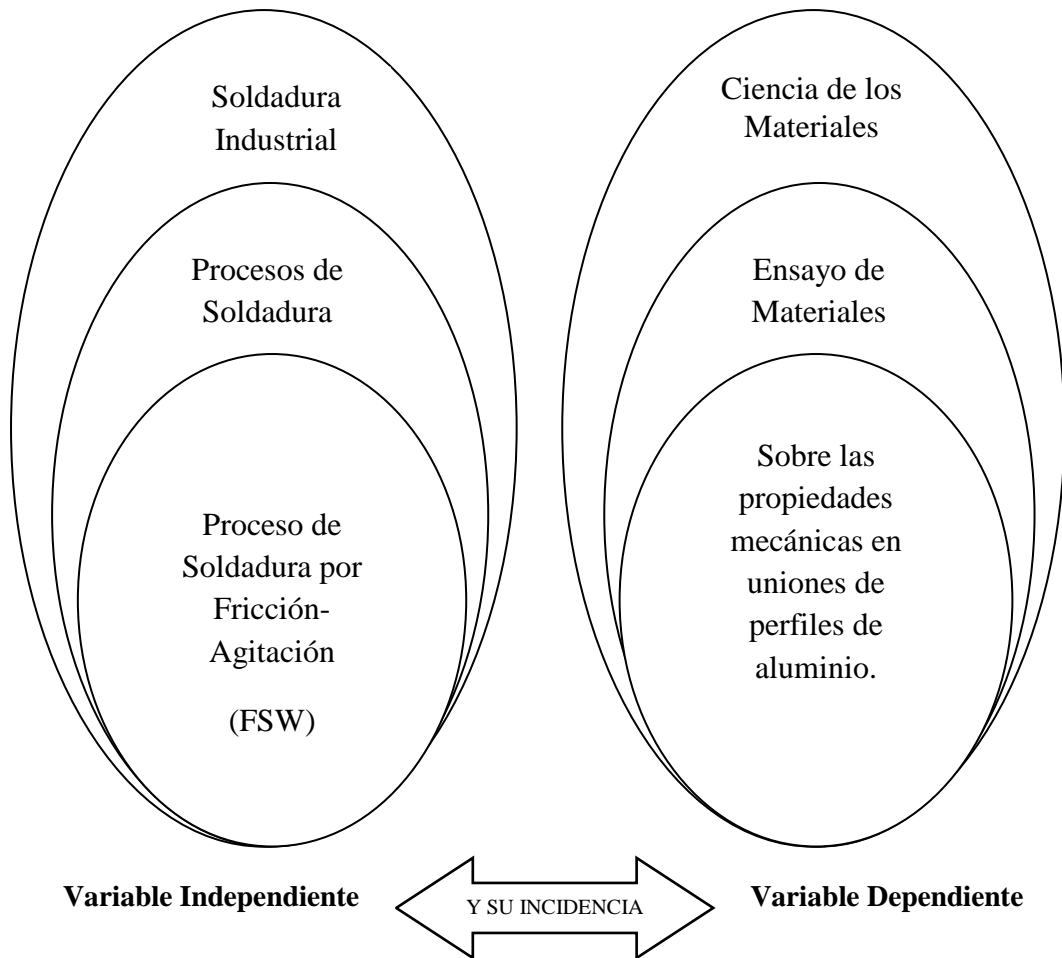


Figura 2.1 Categorías fundamentales
(Fuente: El autor)

DESARROLLO DE LA RED DE CATEGORÍAS DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE

2.4.1 Soldadura Industrial

La soldadura se ha constituido en uno de los procesos de fabricación más utilizados para la unión de elementos. Gracias al desarrollo de nuevas técnicas, la soldadura sustituyó al atornillado y al remachado en la construcción de muchas estructuras, como puentes, edificios y autos. Es una técnica fundamental en las industrias: automotriz, aeroespacial, en la fabricación de maquinaria y en la de

cualquier producto hecho con metal; sin embargo, la aplicación de soldadura produce transformaciones estructurales importantes en el metal debido a cambios en la composición y transformaciones de fase durante la solidificación y enfriamiento, las mismas que deben ser bien entendidas para estar en posibilidad de diseñar y producir soldaduras confiables (Rodríguez, 2001, p.5).

2.4.1.1 Soldabilidad del aluminio

La soldabilidad de las aleaciones de aluminio varía significativamente dependiendo de la composición química de la aleación usada. Las aleaciones de aluminio son susceptibles al agrietamiento caliente, y para combatir el problema los soldadores aumentan la velocidad de la soldadura para reducir el aporte de calor. El precalentamiento reduce el gradiente de temperatura a través de la zona de soldadura y por lo tanto ayuda a reducir el agrietamiento caliente, pero puede reducir las características mecánicas del material base y no debe ser usado cuando el material base está restringido (Cárdenas, 2007, p.27).

2.4.1.2 Dificultades al soldar aluminio

a) Formación de óxido

Una de las desventajas de la soldadura es la tendencia del aluminio a formar óxido. Esto significa que no es posible fundir directamente dos componentes de aluminio. La capa de óxido posee dos propiedades que afectan el resultado de la soldadura: un alto punto de fusión (2060°C), lo que significa que el óxido no se funde durante la soldadura y además el calor aplicado combinado con el oxígeno acelera la formación de óxido.

Eliminar la capa de óxido durante la soldadura puede lograrse de diversas maneras durante el proceso de soldadura, utilizando un fundente que disuelva y elimine el óxido, o antes de la soldadura, mediante un cepillo de acero. Al soldar en una atmósfera protegida (TIG o MIG) el arco voltaico rompe la capa de óxido al tiempo que el gas protege la masa fundida contra el oxígeno del aire e impide la

formación de más óxido. La conductividad térmica del aluminio es cuatro veces mayor que la del acero. Esto significaría que se necesita cuatro veces más calor para calentar el aluminio en contraposición al acero, para lograr la misma temperatura local. Sin embargo, esto no es necesariamente así ya que entran en juego otras propiedades mecánicas del metal (Hydro, 2014, p.43).

b) Creación de poros

El riesgo de la generación de poros en la soldadura, proviene del hidrógeno que se disuelve en la fundición. Si la cantidad de hidrógeno disuelta es demasiado grande, el exceso se separa como gas durante el enfriamiento y crea poros en la junta. El hidrógeno puede ser absorbido por elementos como la humedad y las impurezas en el metal o el metal de aporte, así como por la llama de gas o el arco voltaico. Los aditivos de aleación también afectan la tendencia del metal fundido a absorber hidrógeno (Hydro, 2014, p.43).

c) Formación de grietas

La formación de grietas está asociada con la resistencia y elasticidad del material así como con las tensiones que surgen debido al calentamiento dispar durante la soldadura. Las propiedades de resistencia se reducen a temperaturas cercanas al rango de fusión. El riesgo de formación de grietas es alto si se impide la deformación mediante la fuerte fijación de las piezas. Las grietas de soldadura pueden aparecer en la junta de la soldadura o bien en la superficie de separación entre la unión de la soldadura y el mismo material. Un tiempo prolongado de enfriamiento aumenta el riesgo de formación de grietas mientras que la soldadura rápida parece tener el efecto contrario (Hydro, 2014, p.43).

2.4.2 Procesos de soldadura usados para el Aluminio

Para realizar la soldadura de aluminio, se aplica dos procesos de soldadura convencionales por fusión:

2.4.2.1 Soldadura TIG

En la figura 2.2 se presenta un esquema de la soldadura TIG. El calor necesario para soldar, se produce mediante un arco eléctrico manteniendo entre el electrodo no consumible y la pieza por soldar. El electrodo usado para llevar la corriente es una varilla de tungsteno. El metal fundido y el electrodo están protegidos contra el efecto pernicioso del oxígeno y nitrógeno por una atmósfera de gas inerte alimentado a través de la porta electrodo. La soldadura se practica aplicando el calor del arco hasta que los bordes de las juntas por soldar estén fundidos. Este proceso puede ser aplicado en forma manual o automática, usando o no metal de aporte (Oxgasa, 2010, p.43).

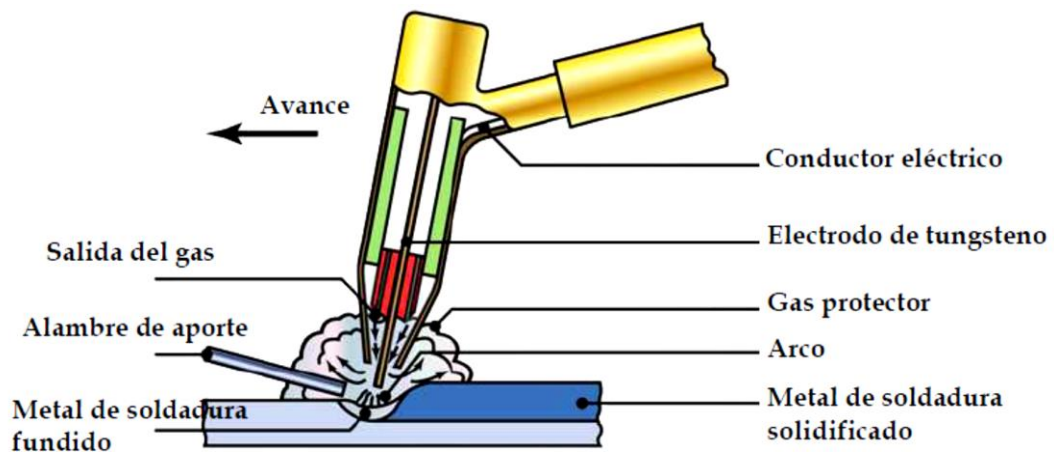


Figura 2.2 Proceso de soldadura TIG
(Fuente: López, 2013, p.185)

a) Características del sistema TIG

Como el proceso de GTAW o TIG es por arco eléctrico, los primeros sopletes que se utilizaron resultaban de una adaptación de las pinzas porta-electrodo de la soldadura de arco convencional (SMAW) con un electrodo de tungsteno y un tubo de cobre suministrando el gas inerte sobre la zona de soldadura. El soplete actual consta de un mango, un sistema de collar para la sujeción del electrodo de tungsteno y un sistema de tobera a través del cual se eyecta el gas inerte, figura 2.3. Pueden poseer sistema de enfriamiento por aire o por agua. Cuando se

utilizan corrientes por debajo de 150 A, se emplea la refrigeración por aire. En cambio, cuando se utilizan corrientes superiores a 150 A, se emplea refrigeración por agua. El agua puede ser recirculada mediante un sistema cerrado con un tanque de reserva, una bomba y un enfriador (Rodríguez, 2001, p.43, 44).

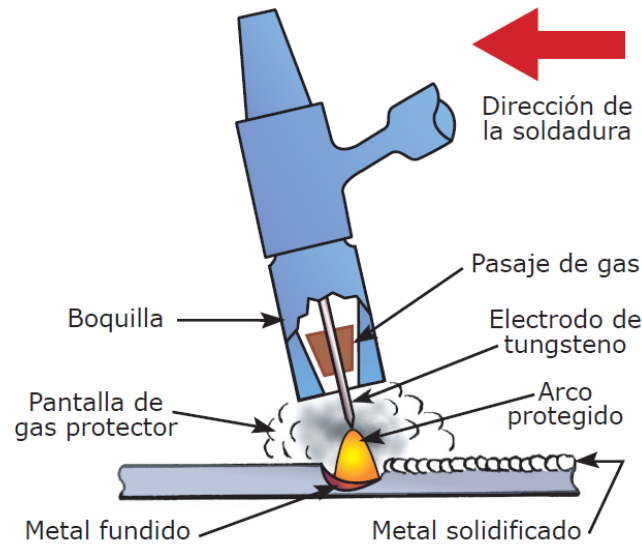


Figura 2.3 Esquema de un soplete para soldadura TIG
(Fuente: Rodríguez, 2001, p.44)

b) Equipo básico para la TIG

En la figura 2.4 se presenta el equipo para sistema TIG o Soldadura por arco y electrodo no consumible.

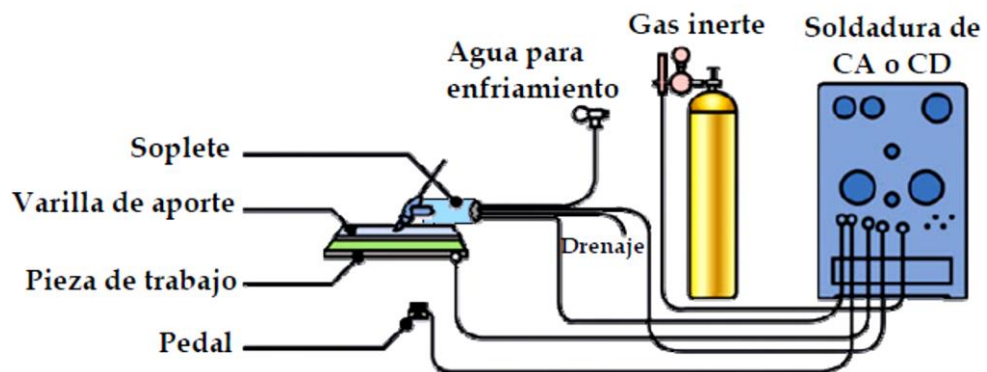


Figura 2.4 Equipo de soldadura por arco de tungsteno y gas
(Fuente: López, 2013, p.185)

En este caso el calor requerido para la soldadura se obtiene de la energía eléctrica. Se produce un arco entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo, siendo necesaria una fuente de alimentación. Se alcanzan temperaturas de unos 3000°C. Como electrodo no consumible se suele utilizar el tungsteno. Dadas las altas temperaturas se debe proteger la zona de la soldadura con algún gas inerte que evite la oxidación de la pieza de trabajo (López, 2013, p.185).

c) Aplicaciones del sistema TIG

1. Este sistema puede ser aplicado casi a cualquier tipo de metal, como: aluminio, acero inoxidable, acero al carbono, hierro fundido, cobre, níquel, magnesio, etc.
2. Es especialmente apto para unión de metales de espesores delgados, desde 0,5 mm, debido al control preciso del calor del arco y la facilidad de aplicación con o sin metal de aporte. Ejemplos: tuberías, estanques, etc.
3. Se utiliza también en unión de espesores mayores, cuando se requiere calidad y buena terminación de la soldadura (Indura, 2007, p.123).

2.4.2.2 Sistema MIG sólido

La soldadura G.M.A.W - MIG/MAG, es el proceso más popular y difundido en la industria, puede utilizarse con todos los metales comerciales importantes, como los aceros al carbono y de aleación, inoxidables, aluminio, magnesio, cobre, hierro, titanio y zirconio.

Casi todos los tipos de hierro y acero pueden unirse con MIG/MAG, incluso el hierro libre de carbono y los aceros al bajo carbono y baja aleación, los aceros de alta resistencia enfriados por inmersión y templados, los hierros y aceros cromados o niquelados, y algunos de los aceros llamados de súper aleación. Esta técnica tiene enormes ventajas, ya que es de fácil aplicación, no salpica en exceso

y produce soldaduras de calidad, además los consumibles se pueden encontrar en casi todas las ferreterías o distribuidores especializados.

Sin embargo, a pesar de ser un excelente método aplicado mundialmente, parte del sector desconoce todas sus características y propiedades, de hecho algunos soldadores cometen errores de fácil corrección, e incluso hay una confusión generalizada respecto al nombre; falsamente la industria conoce esta soldadura como MIG, pero la verdad, este sistema sólo es una de las dos formas de aplicar el proceso (Molina, 2008, p.1).

El sistema MIG fue introducido a fines del año 1940. En la figura 2.5 se muestra el proceso de soldadura al arco, donde la fusión se produce por calentamiento con un arco entre un electrodo de metal de aporte continuo y la pieza, donde la protección del arco se obtiene de un gas suministrado en forma externa, el cual protege el metal líquido de la contaminación atmosférica y ayuda a estabilizar el arco (Indura, 2007, p.82).

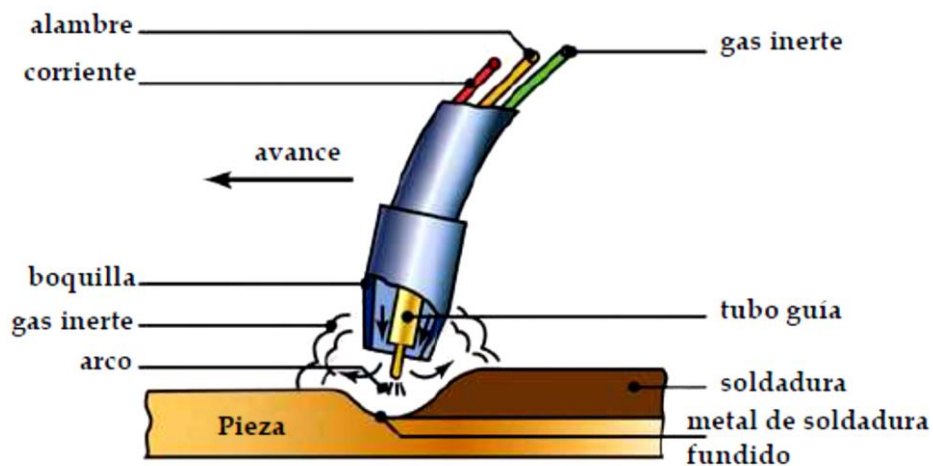


Figura 2.5 Esquema de soldadura por sistema MIG
(Fuente: López, 2013, p.188)

a) Equipo básico de la soldadura MIG

En la figura 2.6 se ilustra un esquema básico de un equipo para soldadura MIG. El equipo básico se compone de una pistola, una unidad de alimentación de hilo (alambre), un suministrador de hilo, una fuente de alimentación, un suministrador

de gas de protección con regulador/medidor de caudal, un circuito de control y las mangueras, forros interiores y cables asociados (Rowe & Jeffus, 2008, p.3).

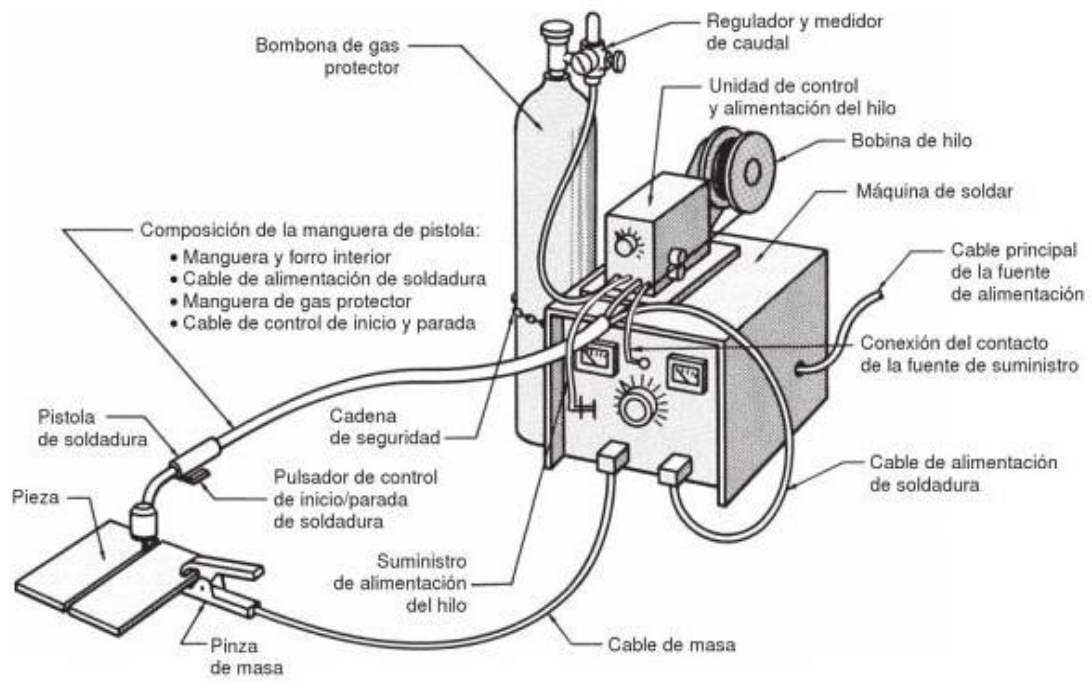


Figura 2.6 Esquema básico de un equipo para soldadura MIG

(Fuente: Rowe & Jeffus, 2008, p.3)

b) Funcionamiento en la zona del arco

El sistema MIG es un proceso de soldadura por arco eléctrico, en el cual un alambre es automática y continuamente alimentado hacia la zona de soldadura a una velocidad constante y controlada. El área de soldadura y arco están debidamente protegidas por una atmósfera gaseosa suministrada externamente, que evita la contaminación. El voltaje, amperaje y tipo de gas de protección, determinan la manera en la cual se transfiere el metal desde el alambre-electrodo al baño de soldadura (Indura, 2007, p.83).

2.4.3 Proceso de soldadura por fricción agitación (FSW)

El proceso de soldadura por fricción agitación o “Friction Stir Welding” (FSW) es un método de soldadura desarrollado por el (TWI) “The Welding Institute” de Inglaterra en 1991, figura 2.7. Es un nuevo concepto en soldadura en fase sólida

por fricción especialmente apto para la soldadura del aluminio y sus aleaciones y ofrece aspectos interesantes pudiendo en muchos casos reemplazar a los procesos usuales por arco eléctrico (Santiago & Lombera, 2007, p.1).

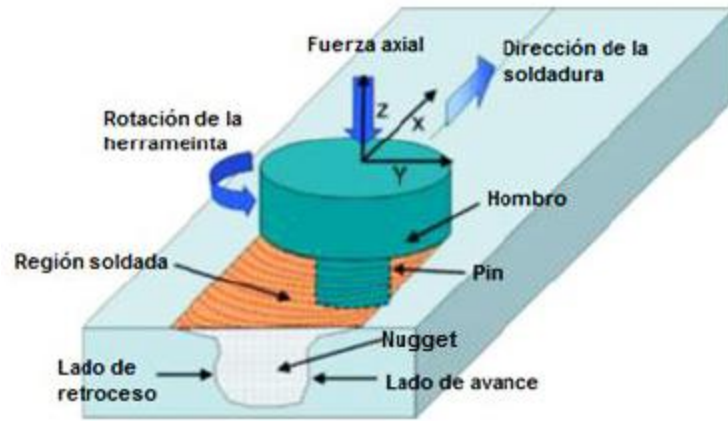


Figura 2.7 Esquema general del proceso de Soldadura por Fricción Agitación

(Fuente: Zapata, 2013, p.27)

2.4.3.1 Principio de funcionamiento de la soldadura FSW

Las placas se colocan a tope en un eje común, posteriormente sigue la rotación de la herramienta no consumible, antes de hacer contacto con las placas a soldar. A continuación se posiciona sobre la línea de unión, figura 2.8.

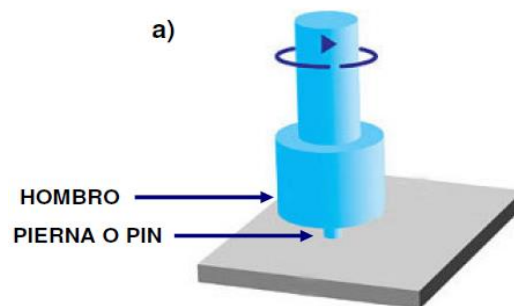


Figura 2.8 Rotación de la herramienta no consumible

(Fuente: García, 2009, p.19)

La herramienta no consumible en rotación, se inserta sobre la zona de unión, el pin hace contacto con las placas a soldar, generando calor por rozamiento, la

herramienta rota mientras se aplica una fuerza axial y penetra gradualmente hasta que el hombro toca la superficie de los componentes a soldar, figura 2.9.

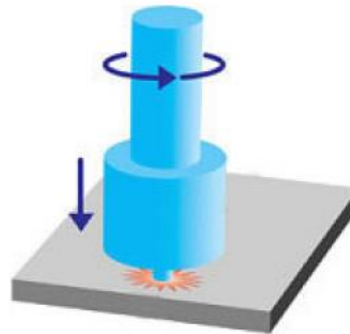


Figura 2.9 La introducción del pin crea calentamiento por fricción
(Fuente: García, 2009, p.19)

Debido a la fricción entre la herramienta no consumible y las placas a soldar, empezará a subir la temperatura de esa zona y el material empezará a ablandarse, adquiriendo un estado plástico, figura 2.10.

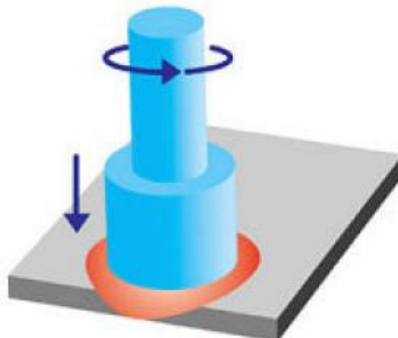


Figura 2.10 El contacto del hombro forma una columna controlada de metal deformado plásticamente
(Fuente: García, 2009, p.19)

A continuación se le impone una velocidad de avance a la herramienta en dirección a la línea de soldadura. La intensa fricción entre la herramienta y el material de las piezas, y la gran deformación plástica del material alrededor de la herramienta contribuyen a producir un aumento de la temperatura en una zona cercana a la herramienta. El ablandamiento del material alrededor del pin, debido a las altas temperaturas, y la acción combinada de la rotación y la traslación de la herramienta, conducen al material del frente del pin hacia atrás del mismo, generando la unión de las piezas, figura 2.11 (García, 2009, p.19).

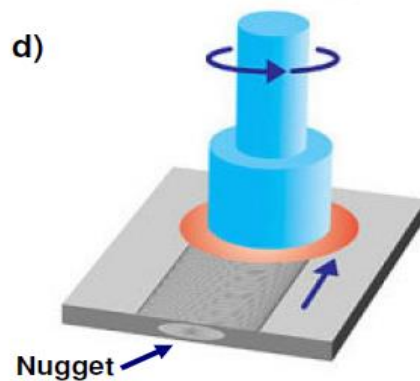


Figura 2.11 El avance localizado de la herramienta
(Fuente: García, 2009, p.19)

2.4.3.2 Ventajas del proceso de soldadura FSW

- a) Con el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) permite en la unión un menor nivel de tensiones residuales y la ausencia de defectos de solidificación (porosidades y fisuración) lo que permite obtener excelentes propiedades mecánicas en el cordón de soldadura, figura 2.12.

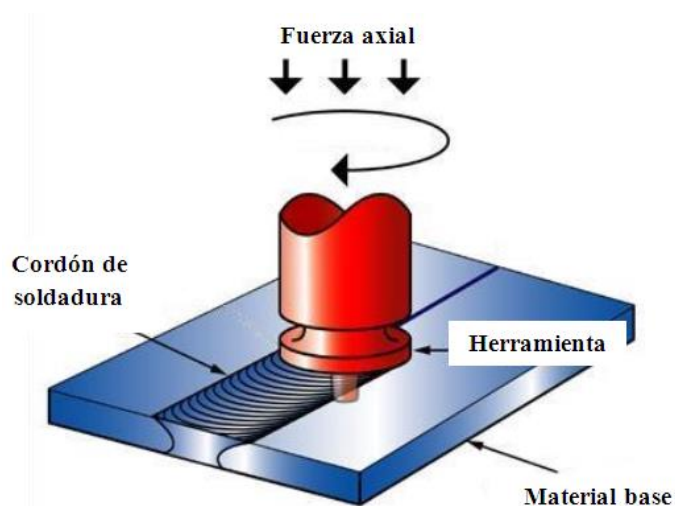


Figura 2.12 Cordón de soldadura mediante el proceso FSW
(Fuente: Meilinger, 2013, p.2)

- b) No presenta problemas medio ambientales durante la soldadura de metales, por las siguientes razones: no hay humos, no emite radiación, no se producen salpicaduras (chispas) ni gases nocivos.

- c) Reducción del costo de soldadura por las siguientes razones: baja cantidad de energía empleada, no es necesario gas inerte de protección, no se requiere una especial habilidad del operario de soldadura, bajos requerimientos de preparación de la junta y no se requiere de mecanizado después de la soldadura (Carabalí, 2006, p.64).

2.4.3.3 Herramienta de soldadura

En la figura 2.13 se muestra el esquema de la herramienta de soldadura. La cual consta básicamente de dos partes: el pin y el hombro. El pin, que penetra completamente en el material a unir y discurre a lo largo de la línea de unión, puede tener diversas formas, facilitando así el transporte del material a su alrededor, y contribuyendo a una mejor calidad de la soldadura. El pin está contenido en el hombro, cuyas tres funciones básicas son: asegurar una perfecta colocación de la herramienta, proporcionar calor fraccional a través de su rotación y la presión que ejerce contra la superficie, y evitar que el material plastificado salga a la superficie durante el proceso de soldadura (Mishra, 2014, p.14).

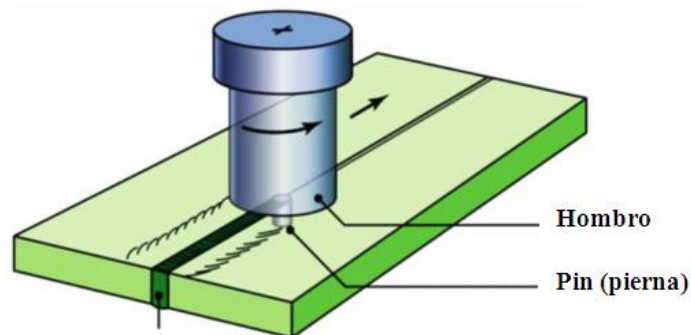


Figura 2.13 Esquema de la herramienta de soldadura

(Fuente: Kalpakjian, 2008, p.24)

El diseño de la herramienta es de fundamental importancia en lo referente a la calidad de la unión y la productividad del proceso. En este sentido existen diversos diseños de herramientas para FSW. Aspectos como el diámetro del hombro, el diámetro del pin, la geometría del pin y la longitud del pin, son algunos de los más significativos entre las características de dichas herramientas.

En la figura 2.14 se presenta dos geometrías de herramienta de soldadura: pin cónico y pin cuadrado.

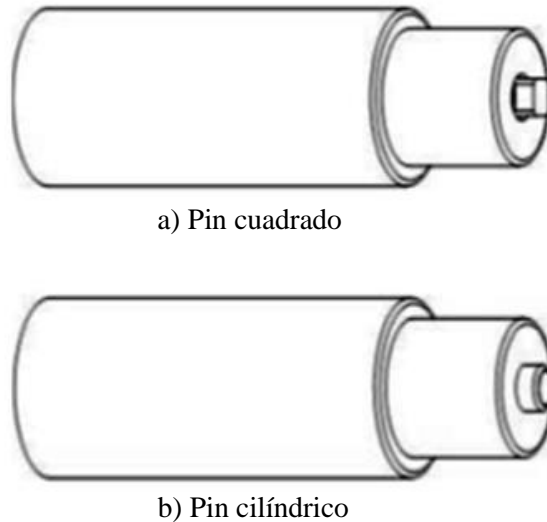


Figura 2.14 Herramienta de soldadura: a) Pin cuadrado y b) Pin cilíndrico
(Fuente: Burgos, 2010, p.3)

2.4.3.4 Parámetros del proceso de soldadura FSW

a) La velocidad de avance y rotación de la herramienta de soldadura

El efecto de la velocidad de soldadura sobre la resistencia mecánica de las juntas, se debe principalmente a la cantidad de calor generado por unidad de longitud, dado que cuanto mayor sea la velocidad de soldadura menor será la cantidad de calor que se genere en los alrededores de la herramienta. Incrementando la velocidad de rotación o disminuyendo la velocidad de avance resultará en una soldadura con más entrada de calor (García, 2009, p.21).

b) La profundidad de entrada e inclinación de la herramienta

Hundiendo el hombro por debajo de la superficie de la placa aumenta la presión por debajo de la herramienta y ayuda a garantizar la forja adecuada del material en la parte trasera de la herramienta. De tal manera que la parte trasera de la

herramienta es más baja que la parte delantera. La inclinación de la herramienta es de 2-4 grados, para ayudar a este proceso de forja (García, 2009, p.22).

2.4.3.5 Geometría de las uniones

La soldadura por FSW se puede usar para realizar juntas lineales, tanto por una como por las dos caras de las piezas a unir, uniones de piezas superpuestas, en forma de T y soldaduras de esquina, figura 2.15 (Hilgert, 2013, p.25).

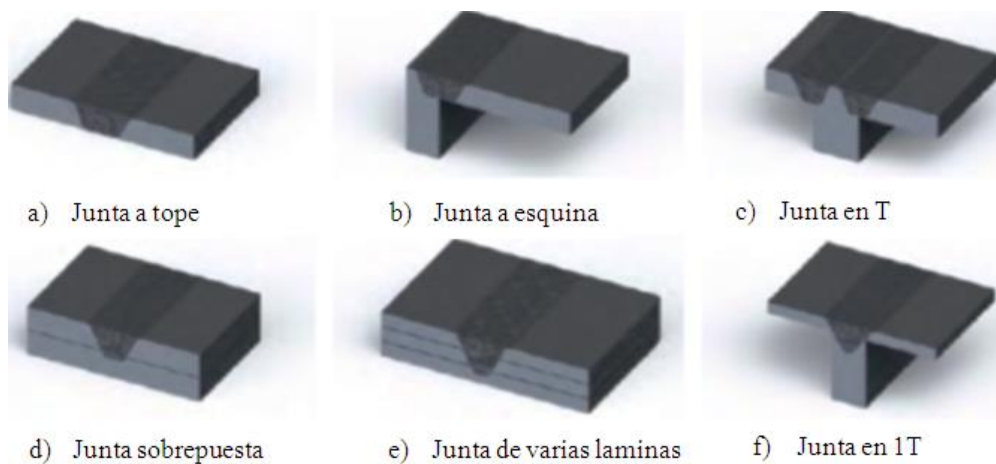


Figura 2.15 Configuración de juntas para la FSW

(Fuente: Hilgert, 2012, p.25)

2.4.3.6 Regiones de la zona de soldadura FSW

En la figura 2.16 se presenta la microestructura de la soldadura por fricción agitación, es similar a la que se obtiene con procesos de soldadura por fusión.

a) **Zona mezclada (ZM):** También es llamada NUGGET o zona recristalizada dinámicamente. Es la región de la soldadura que se forma debido al calor producto de la fricción entre la herramienta y las placas, y a la intensa deformación plástica del material producto de la acción de agitación. La forma y tamaño de esta zona depende de factores como los parámetros del proceso,

la geometría de la herramienta, la temperatura de la pieza durante la soldadura y la conductividad térmica del material a soldar (Zapata, 2013, p.31).

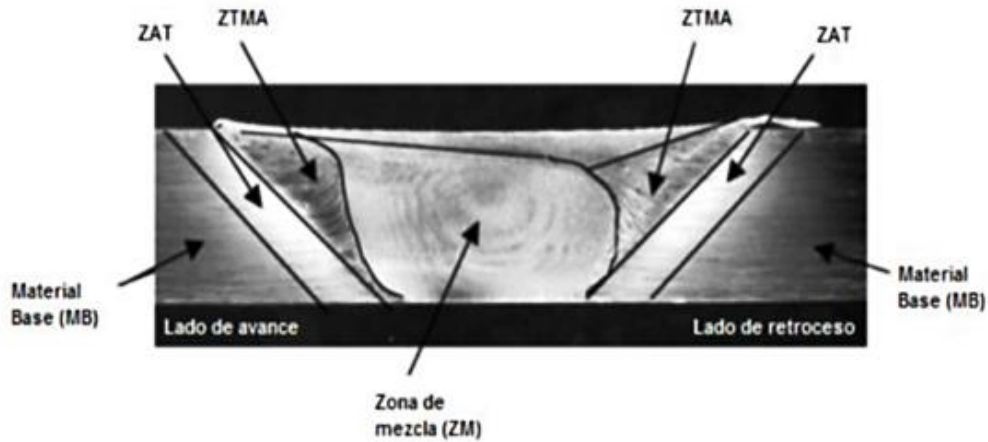


Figura 2.16 Macrografía típica con el proceso de FSW

(Fuente: Zapata, 2013, p.30)

- b) **Zona termo mecánicamente afectada (ZTMA):** Esta región es particular y única para el proceso de FSW; en ella se evidencia el efecto de la deformación plástica y el calentamiento del material en las propiedades mecánicas y en la microestructura; aunque es posible que la deformación plástica no sea suficiente para que ocurra recristalización dinámica de la microestructura, adicionalmente, en esta región puede presentarse crecimiento o disolución de precipitados (Zapata, 2013, p.32).
- c) **Zona afectada térmicamente (ZAT):** Hace referencia al material que no sufre ninguna deformación plástica, pero que debido al calor generado durante el proceso, puede sufrir cambios micro-estructurales y/o en sus propiedades mecánicas (Zapata, 2013, p.32).
- d) **Material Base (MB):** Se refiere al material lo suficientemente alejado de la junta para no verse afectado por la deformación plástica o el ciclo térmico, en términos de sus propiedades mecánicas o microestructura (Zapata, 2013, p.33).

2.4.3.7 Flujo plástico de material en la soldadura FSW

En la figura 2.17 se identifican tres flujos que producen la unión en la soldadura por fricción agitación FSW: El primero tiene lugar cerca de la herramienta y está asociado al material plastificado que rota alrededor de la misma. Está controlado por la rotación de la herramienta y la fricción herramienta-material. El segundo, el movimiento del pin produce un flujo de material hacia abajo en la adyacencia del pin, el cual induce un flujo de material ascendente equivalente algo más alejado del pin. Finalmente hay un movimiento relativo entre la herramienta y el material. El flujo total de material plastificado y la formación de la junta resulta de la interacción de estos tres flujos (Svoboda, 2009, p.13).

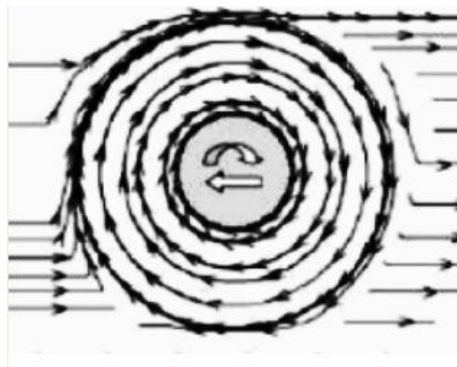


Figura 2.17 Flujo plástico de material en la soldadura FSW

(Fuente: Svoboda, 2009, p.13)

2.4.3.8 Aplicaciones del proceso de soldadura FSW

El proceso de soldadura por fricción agitación FSW, se utiliza en diferentes sectores industriales como los que se mostrarán a continuación:

- a) **Industria Naval y Marina:** Estas dos industrias fueron las primeras que adoptaron este proceso de soldadura para sus aplicaciones comerciales (paneles para cubiertas, tabiques, suelos, cascos y superestructuras, etc.). Gracias a la baja deformación y a los buenos acabados se logró reducir los

costes, minimizando el post-proceso de soldadura de los componentes fabricados, figura 2.18 (Regina, 2013, p.13).



Figura 2.18 Industria naval y la marina (paneles para cubiertas, tabiques, cascos)

(Fuente: Bolaños, 2013, p.13)

b) Industria Aeroespacial: La soldadura por fricción agitación ha sustituido al remachado en la mayoría de las estructuras importantes de los aviones, como en alas, fuselajes y colas de aviones además de tanques de combustible, ya que es aproximadamente 10 veces más rápido que el remachado manual y da lugar a una unión continua que mejora la rigidez estructural. En lo referente a la industria espacial se utiliza en vehículos lanzadera y también en los tanques de combustible. La compañía Boeing construye cohetes espaciales Delta, algunos de los cuales contienen tanques de combustibles cilíndricos de aluminio, constituidos de paneles curvos, figura 2.19 (Suárez, 2008, p.7).

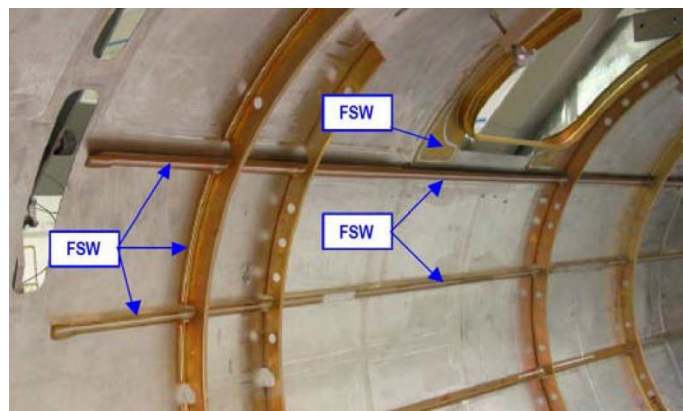


Figura 2.19 Industria aeroespacial (panel integral unido por FSW)

(Fuente: Suárez, 2008, p.7)

c) **Industria del Automóvil:** La soldadura por fricción agitación se está utilizando en la actualidad en la industria del automóvil. Se están desarrollando, por parte de varias compañías, diferentes aplicaciones comerciales como carrocerías, motores y chasis, cuerpos de camiones, grúas móviles o caravanas, figura 2.20 (Mishra, 2014, p.11).

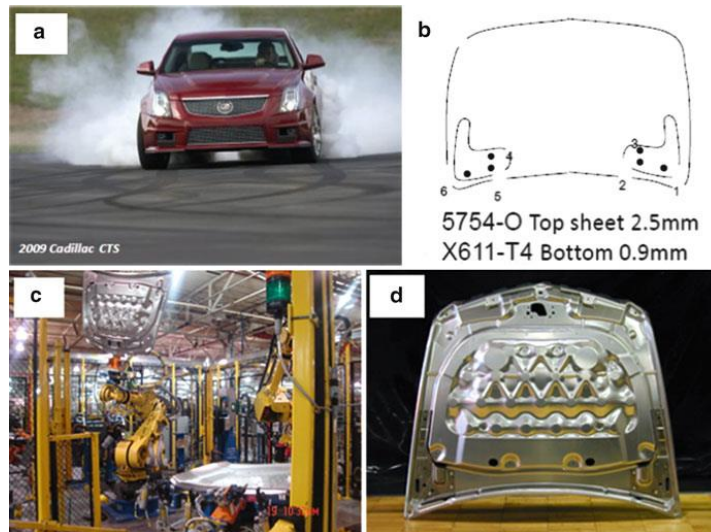


Figura 2.20 Ejemplos de la soldadura FSW en la industria del automóvil

(Fuente: Mishra, 2014, p.11)

d) **Otros sectores industriales:** La soldadura FSW también se utiliza en la producción de estructuras, cubiertas, en equipos de cocina, tanques de gas, intercambiadores de calor en la industria química y silos o almacenes en la industria agrícola, figura 2.21 (Bolaños, 2013, p.15).



Figura 2.21 Reparaciones de fisuras en estructuras de plataformas

(Fuente: Bolaños, 2013, p.15)

DESARROLLO DE LA RED DE CATEGORÍAS DE LA VARIABLE DEPENDIENTE

2.4.4 Ciencia de los Materiales

La Ciencia de los Materiales, es el estudio de la composición y propiedades de los diversos materiales, usados en Ingeniería a través de su análisis a escala atómica y molecular. La Ciencia de los Materiales se considera la introducción a la Ingeniería de Materiales, que es la que analiza y determina alternativas de aplicación en sus diversos campos, así como los métodos de fabricación de los productos. También es un campo de la Ciencia de Materiales, las diversas formas de cómo puede deteriorarse y degradarse un material. La ciencia de los materiales es el estudio de los requerimientos, propiedades y evaluaciones de los diversos materiales utilizados por la Ingeniería, por esto se hace necesario conocer de ellos su micro y macro estructura (Giménez, 2010, p.4).

2.4.4.1 El Aluminio

El aluminio es el metal no ferroso más abundante de la corteza terrestre, siendo el segundo elemento en cantidad después de la sílice (silicatos de aluminio). Es extraído principalmente de la bauxita. No se encuentra en estado libre, sino formando compuesto con el oxígeno. El aluminio es un metal blanco plateado con gran cantidad de usos, debido principalmente a sus propiedades naturales de ligereza, resistencia, plasticidad y versatilidad. En la actualidad se ha convertido en un material con innumerables aplicaciones en todos los ámbitos de producción y consumo de la sociedad actual: transporte, construcción, decoración, señalización, embalaje o incluso moda, ofreciendo las mejores opciones en funcionalidad y estética (European Aluminium Association, 2010, p.2).

Como propiedades físicas y químicas que hacen a este metal óptimo para construcción, automoción e industria aeroespacial, se pueden destacar, además de su resistencia y plasticidad, su baja densidad, su ductilidad y maleabilidad y su gran conductividad. A temperaturas cercanas a su punto de fusión se vuelve

quebradizo. Al combinarse con otros metales, las nuevas aleaciones son duras y livianas. Resiste el ataque de la mayoría de los ácidos orgánicos y a la corrosión (más que el hierro). El aire húmedo lo empaña ligeramente y lo cubre de una delgada y compacta capa de óxido que le aísla e impide que siga reaccionando. Esta oxidación puede producirse de manera controlada por medio de un proceso denominado anodización. Es además un material no tóxico, lo que permite su utilización en la fabricación de utensilios de cocina, papel de aluminio, envases que contengan líquidos alimenticios como cerveza, refrescos, etc. (European Aluminium Association, 2010, p.2).

2.4.4.2 Transformación del aluminio

Los perfiles de aluminio se obtienen a través del proceso de extrusión que consiste en pulsar un tocho cilíndrico caliente de aluminio a través de una forma dada. La facilidad con que las aleaciones de aluminio pueden ser extruidas en formas complejas permite que el diseñador realice con el metal exactamente lo que necesita, y también que introduzca características multifuncionales. Los productos extrusionados de aluminio se utilizan en edificios comerciales y domésticos para ventanas, puertas, muros, cortinas, estructuras de casas prefabricadas, y en muchas otras aplicaciones, figura 2.22 (Rivero, 2003, p.6).

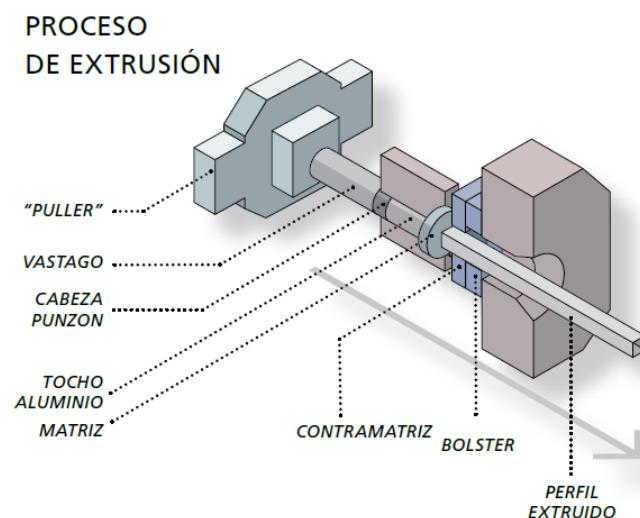


Figura 2.22 Proceso de extrusión del Aluminio
(Fuente: European Aluminium Association, 2013, p.3)

Los productos planos de aluminio se obtienen a través del proceso de laminación, mediante el cual grandes planchas de aluminio se introducen en los laminadores y se convierten en láminas de diferentes espesores. El proceso suele comenzar con un método de laminación en caliente, sosteniendo el bloque de un lado a otro a través de un rodillo, figura 2.23 (Rivero, 2003, p.6).

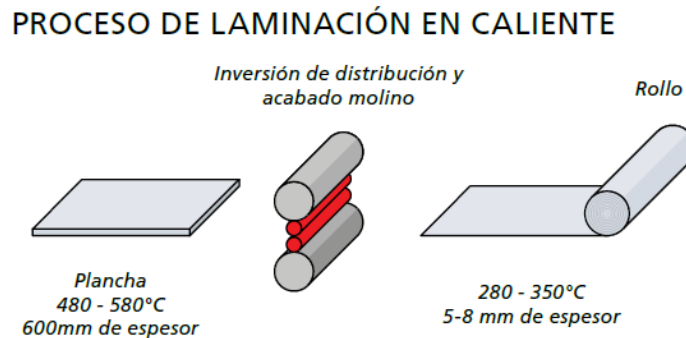


Figura 2.23 Proceso de laminación en caliente del Aluminio
(Fuente: European Aluminium Association, 2013, p.3)

2.4.4.3 Propiedades del aluminio

El aluminio tiene una combinación de propiedades que lo hacen sumamente útil como material de ingeniería. El aluminio tiene una densidad baja (2.70 g/cm^3), que lo hace particularmente útil para productos manufacturados para el transporte. El aluminio tiene también buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes naturales, debido a la película de óxido tenaz que se forma en su superficie. Aunque el aluminio puro tiene baja resistencia, mediante sus aleaciones puede adquirir una resistencia aproximada de 100 kpsi. El aluminio no es tóxico y se usa ampliamente en recipientes y envases para alimentos. Las buenas propiedades eléctricas del aluminio lo hacen adecuado para muchas aplicaciones en la industria eléctrica (Smith, 2006, p.410).

2.4.4.4 El aluminio y sus aleaciones

Algunas de las aleaciones de aluminio, las más complejas, pueden alcanzar características mecánicas muy parecidas al de algunos aceros. La adición de

elementos de aleación, la deformación en frío y el tratamiento térmico hacen que su baja resistencia mecánica mejore significativamente; sin embargo, si una aleación de aluminio va a ser sometida a un proceso de soldadura por fusión sus propiedades mecánicas y microestructurales se verán modificadas en la zona afectada por el calor. Los elementos aleantes, generalmente en bajo porcentaje, mejoran las propiedades mecánicas del aluminio puro. Las aleaciones de aluminio se encuentran clasificadas en series; según el contenido del elemento aleante principal o elementos principales; del mismo modo, estas series se agrupan si sus elementos aleantes permiten ser o no tratadas térmicamente, en la tabla 2.1 se presenta las propiedades mecánicas y aplicaciones de algunas aleaciones comerciales de aluminio (Smith, 2006, p.411).

Tabla 2.1 **Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio**

Tabla 9.8 Propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de las aleaciones de aluminio

Número de aleación*	Composición química (% en peso)†	Estado‡	Resistencia a la tensión		Límite elástico	
			ksi	MPa	ksi	MPa
Aleaciones forjadas						
1100	99.0 mín Al, 0.12 Cu	Recocido (-O)	13	89 (prom)	3.5	24 (prom)
		Semirrígido (-H14)	18	124 (prom)	14	97 (prom)
3003	1.2 Mn	Recocido (-O)	17	117 (prom)	5	34 (prom)
		Semirrígido (-H14)	23	159 (prom)	23	159 (prom)
5052	2.5 Mg, 0.25 Cr	Recocido (-O)	28	193 (prom)	9.5	65 (prom)
		Semirrígido (-H34)	38	262 (prom)	26	179 (prom)
2024	4.4 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn	Recocido (-O)	32	220 (máx)	14	97 (máx)
6061	1.0 Mg, 0.6 Si, 0.27 Cu, 0.2 Cr	Tratado térmicamente (-T6)	64	442 (mín)	50	345 (mín)
		Recocido (-O)	22	152 (máx)	12	82 (máx)
		Tratado térmicamente (-T6)	42	290 (mín)	35	241 (mín)
7075	5.6 Zn, 2.5 Mg, 1.6 Cu, 0.23 Cr	Recocido (-O)	40	276 (máx)	21	145 (máx)
		Tratado térmicamente (-T6)	73	504 (mín)	62	428 (mín)

(Fuente: Smith, 2006, p.414)

Las aleaciones de aluminio pueden subdividirse en dos grandes grupos, para forja y aleaciones para fundición, de acuerdo con el proceso de fabricación. Las aleaciones para forja, es decir chapas, láminas, extrusión, varillas y alambres, se clasifican de acuerdo con los elementos que contengan en aleación. Para identificar las aleaciones de aluminio se utiliza una designación numérica de

cuatro dígitos, el primero de los cuales indica el grupo de aleación e indicando el segundo los límites de impurezas. Los dos últimos identifican la aleación o indican la pureza del metal. En la tabla 2.2 se recogen los diferentes grupos de aleaciones de aluminio indicándose los principales elementos de aleación de cada uno de ellos (Smith, 2006, p.412).

Tabla 2.2 Grupos de aleaciones de aluminio forjado

Aluminio, 99.00% como mínimo o más	1xxx
Aleaciones de aluminio agrupadas según los principales elementos en una aleación:	
Cobre	2xxx
Manganeso	3xxx
Silicio	4xxx
Magnesio	5xxx
Magnesio y silicio	6xxx
Zinc	7xxx
Otros elementos	8xxx
Series no utilizadas	9xxx

(Fuente: Smith, 2006, p.412)

2.4.5 Ensayo de Materiales

Los ensayos tienen como objetivo determinar las propiedades de los materiales.

Una clasificación se produce al dividir a los ensayos en destructivos y no destructivos. En los ensayos destructivos, el material se destruye durante el ensayo y, por lo tanto, no puede ser usado posteriormente. En los ensayos no destructivos, el material no se destruye durante el ensayo y, entonces, puede ser utilizado posteriormente. Todos estos ensayos están normalizados. Las normas son de vital importancia para realizarlos ensayos, ya que establecen los procedimientos para su realización (Ruiz, 2006, p.30, 31).

2.4.5.1 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción es el más utilizado de todos los ensayos mecánicos; consiste en aplicar a una pieza de eje recto, en forma lentamente creciente, dos fuerzas en la dirección del eje que tienden a producir el alargamiento de la pieza. El ensayo

de tracción se realiza en las denominadas máquinas “universales”, que permiten efectuar varios tipos de ensayos (compresión, flexión, etc.) (Ruiz, 2006, p.32).

a) Esfuerzos y Deformaciones

Los cuerpos bajo la acción de una carga producen esfuerzos y deformaciones. El esfuerzo es la intensidad de las fuerzas internas que actúan sobre un plano dado y es la respuesta que ofrece el material a las cargas aplicadas y la deformación es todo cambio en sus dimensiones que sufre un cuerpo bajo efectos externos (Díaz, 2008, p.15).

b) Deformación elástica y plástica

Cuando se somete una pieza de metal a una fuerza de tracción uniaxial se produce la deformación del metal. Si el metal recupera sus dimensiones originales cuando se elimina la fuerza, se considera que el metal ha sufrido una deformación elástica. La cantidad de deformación elástica que puede soportar un metal es pequeña pues durante la deformación elástica, los átomos del metal se desplazan de sus posiciones originales, pero sin llegar a alcanzar nuevas posiciones. De este modo, cuando la fuerza sobre el metal deformado elásticamente se elimina, los átomos del metal vuelven a sus posiciones iniciales y el metal recupera su forma inicial. Si el metal se deforma tanto que no puede recuperar completamente sus dimensiones originales, se considera que ha sufrido una deformación plástica. (Smith, 2006, p.213).

c) Tensión de ingeniería y deformación convencional

En la figura 2.24 se presenta el alargamiento de una barra cilíndrica sujeta a una fuerza de tracción uniaxial. Considérese una barra cilíndrica de longitud l_0 y área de la sección transversal A_0 sujeta a una fuerza de tracción uniaxial F .

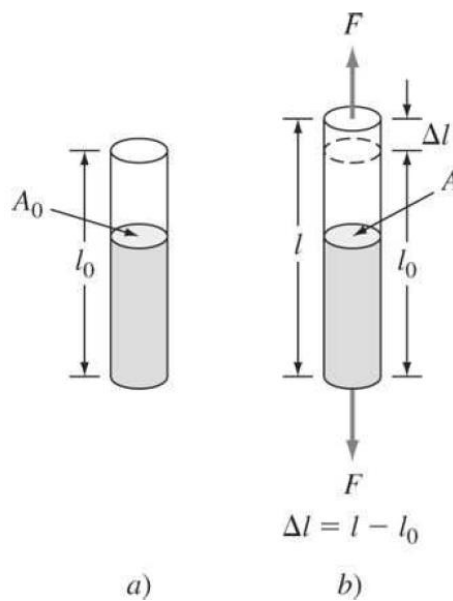


Figura 2.24 Alargamiento de una barra cilíndrica de metal sujeta a una fuerza de tracción uniaxial F . a) La barra sin ninguna fuerza y b) la barra sujeta a la fuerza de tracción uniaxial F , que alarga la barra desde una longitud l_0 hasta l .

(Fuente: Smith, 2006, p.256)

Por definición, la tensión de ingeniería σ sobre la barra es igual a la fuerza media de fracción F sobre la barra dividida por el área de su sección transversal A_0 . La deformación convencional es cuando una fuerza de tracción uniaxial se aplica a una barra, se produce un alargamiento de la barra en la dirección de la fuerza. Dicho desplazamiento se conoce como deformación. Por definición, deformación convencional es la relación entre el cambio en la longitud de una muestra en la dirección en que se aplica la fuerza y la longitud original de la muestra considerada (Smith, 2006, p.213).

d) Aplicación de la prueba de tensión

Para poder analizar dicho comportamiento y al mismo tiempo obtener las principales propiedades mecánicas de un material se aplica la prueba de tensión, la cual consiste en aplicar a una probeta de sección uniforme, figura 2.25, una carga de tensión que se va incrementando gradualmente hasta que ocurre la falla (Díaz, 2008, p.20).

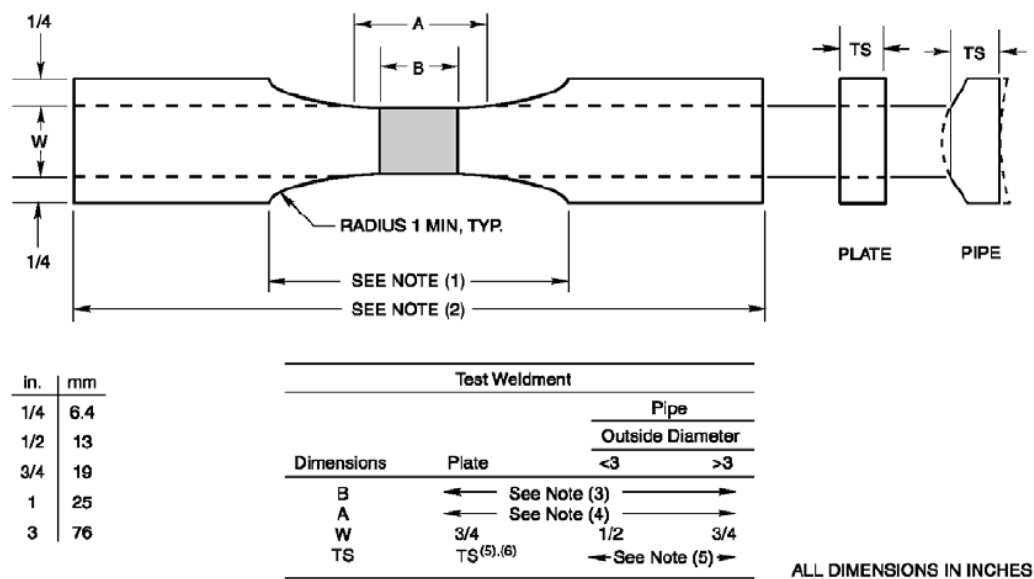


Figura 2.25 Probeta para prueba de Tensión
(Fuente: AWS D17.3, 2010, p.46)

e) Valores de propiedades mecánicas obtenidos del ensayo de tracción

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones que tienen interés para el diseño estructural en ingeniería, y que pueden obtenerse a partir del ensayo de tracción técnico, son: Módulo de elasticidad, límite elástico convencional de 0.2 por ciento, resistencia a la tracción, porcentaje de alargamiento a fractura y porcentaje de estricción a fractura (Smith & Hashemi, 2006, p.221).

1) Módulo de elasticidad: En la primera parte del ensayo de tracción, el metal se deforma elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la muestra desaparece, la probeta volverá a su longitud inicial. Para metales, la máxima deformación elástica suele ser inferior a 0.5 por ciento. En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la ley de Hooke, ecuación 2.1 (Smith & Hashemi, 2006, p.221).

$$E = \frac{\sigma(\text{Tensión})}{\varepsilon(\text{Deformación})} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Dónde:

E : Módulo de elasticidad [kg/mm²]

σ : La resistencia a la tracción [kg/mm²]

ε : Porcentaje de alargamiento [%]

2) La resistencia a la tracción: Es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión-deformación. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal, la tensión convencional decrecerá con el incremento de la deformación hasta producirse la fractura. Cuanto más dúctil es el metal, mayor es la estricción antes de la fractura y más descendente la tensión alejándose del valor de resistencia a la tracción. En aleaciones de aluminio de alta resistencia, sólo hay un pequeño descenso de la tensión convencional desde el valor resistencia a la tracción porque este tipo de material tiene una ductilidad relativamente baja. El cálculo de la resistencia última a la tracción está dado por la ecuación 2.2 (Smith & Hashemi, 2006, p.222, 223).

$$S_{ut} = \frac{P_{max}}{A_o} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Dónde:

S_{ut} : Resistencia última a la Tracción [kg/mm²]

P_{max} : La carga máxima aplicada [kg]

A_o : Área inicial de la sección transversal de la probeta [mm²]

3) Porcentaje de alargamiento: El porcentaje de alargamiento que una probeta a tracción soporta durante el ensayo proporciona un valor de la ductilidad del metal. La ductilidad de metales suele expresarse como porcentaje de alargamiento. En general, a mayor ductilidad del metal (a mayor capacidad de deformación), mayor porcentaje de deformación. El cálculo del porcentaje de alargamiento (%) está dada por la ecuación 2.3 (Smith & Hashemi, 2006, p.223).

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Dónde:

ε : Porcentaje de alargamiento [%]

l_o : Longitud inicial de la probeta [mm]

l_f : Longitud de la probeta deformada elásticamente [mm]

4) Porcentaje de estricción: La ductilidad de un metal también se puede expresar en términos de porcentaje de reducción de área o estricción. Después del ensayo, se determina el área de la sección transversal de la zona de fractura. Utilizando las medidas del área inicial y del área final, el porcentaje de estricción se determina con la ecuación 2.4 (Smith & Hashemi, 2006, p.224).

$$\%reducción = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100 \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Dónde:

$\%reducción$: Porcentaje de alargamiento [%]

A_o : Área inicial de la sección transversal de la probeta [mm²]

A_f : Área final de la sección transversal de la probeta [mm²]

2.4.5.2 Ensayo de doblado de soldadura

Las pruebas de doblado se emplean para evaluar la ductilidad y sanidad (ausencia de defectos) de las juntas soldadas, y la ductilidad por lo general se juzga verificando si el espécimen se fracturo o no bajo las condiciones especificadas de prueba. Estas pruebas consisten en doblar o plegar un espécimen bajo cargas aplicadas gradual y uniformemente, aunque a veces también se aplican mediante impactos. El objetivo de este ensayo mecánico es medir la ductilidad de la unión

soldada a través de la observación visual al final de la prueba y también como una medida de la seguridad de la unión soldadura (Aguirre, 2008, p.53).

a) Especímenes de doblado de raíz y de cara

En la figura 2.26, se presenta un esquema de las dimensiones de la probeta para el ensayo de doblado de soldadura.

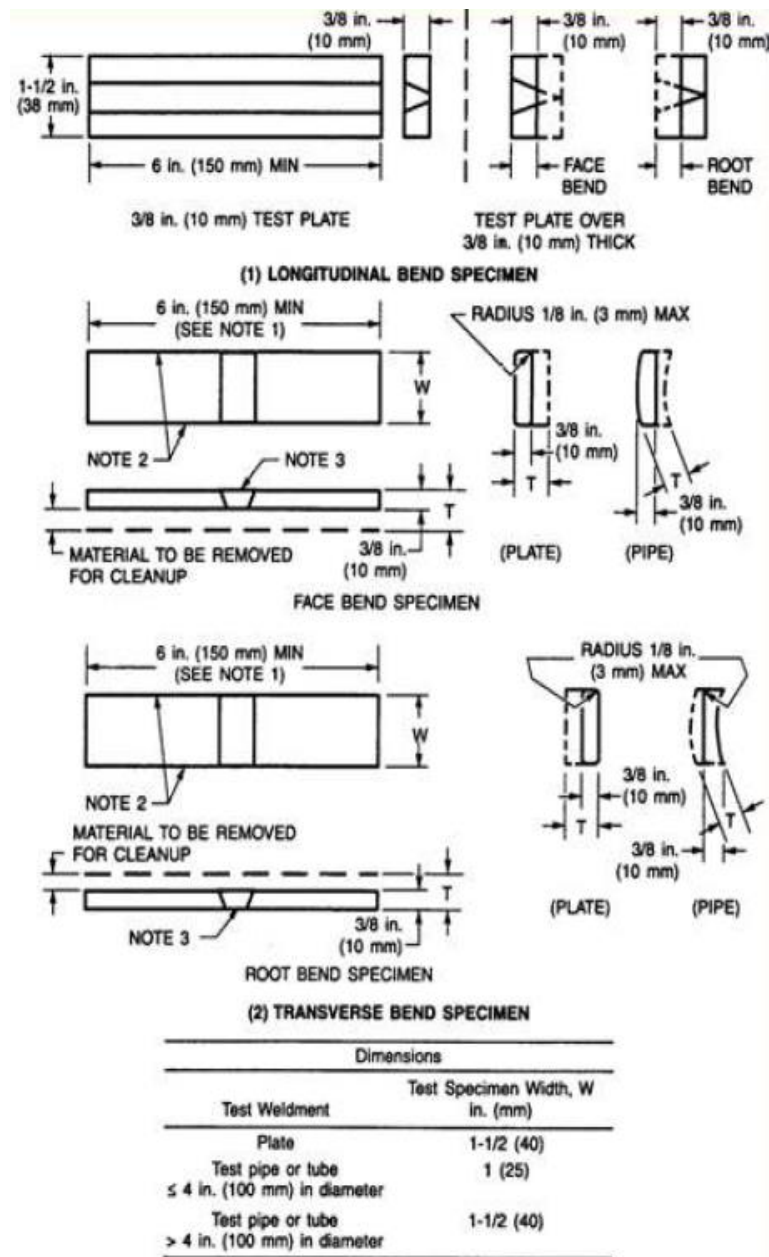


Figura 2.26 Especímenes de doblado de raíz y de cara (Fuente: API 1104, 2002, p.157)

b) Dispositivos utilizados para el ensayo de doblado de soldadura

Existen tres tipos de dispositivos básicos, para realizar el ensayo de doblado de soldadura: Doblez guiado estándar, doblez guiado equipado con rodillos y doblez guiado mediante enrollado (María, 2010, p.115).

1) Doblez guiado estándar

Consiste de un punzón y un dado en forma de “U” para realizar el ensayo de doblez. El espécimen se coloca sobre los hombros del dado con el lado que va a ponerse en tensión hacia la parte interior del dado. El punzón se coloca sobre el área de interés y se aplica la fuerza para doblar el espécimen hasta 180° y que tiene la forma de “U”. Posteriormente el espécimen es removido y evaluado. En la figura 2.27 se presenta un esquema del doblez guiado estándar (María, 2010, p. 115).

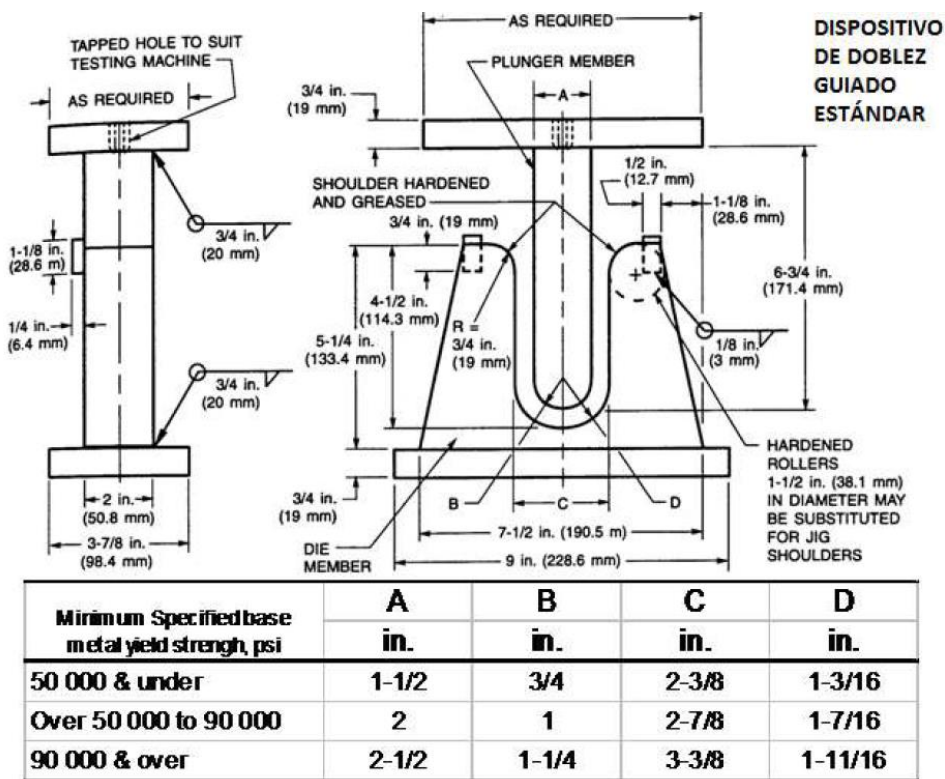


Figura 2.27 Doblez guiado estándar
(Fuente: API 1104, 2002, p.160)

2) Doblez guiado equipado con rodillos

El dispositivo de doblez guiado equipado con rodillos es muy similar al dispositivo de doblez guiado estándar, excepto que este se encuentra equipado con rodillos en lugar de un dado. Esto permite disminuir la fricción durante los dobles del espécimen reduciendo la carga aplicada. En la figura 2.28 se presenta un esquema del doblez guiado equipado con rodillos (Fernández, 2010, p.116).

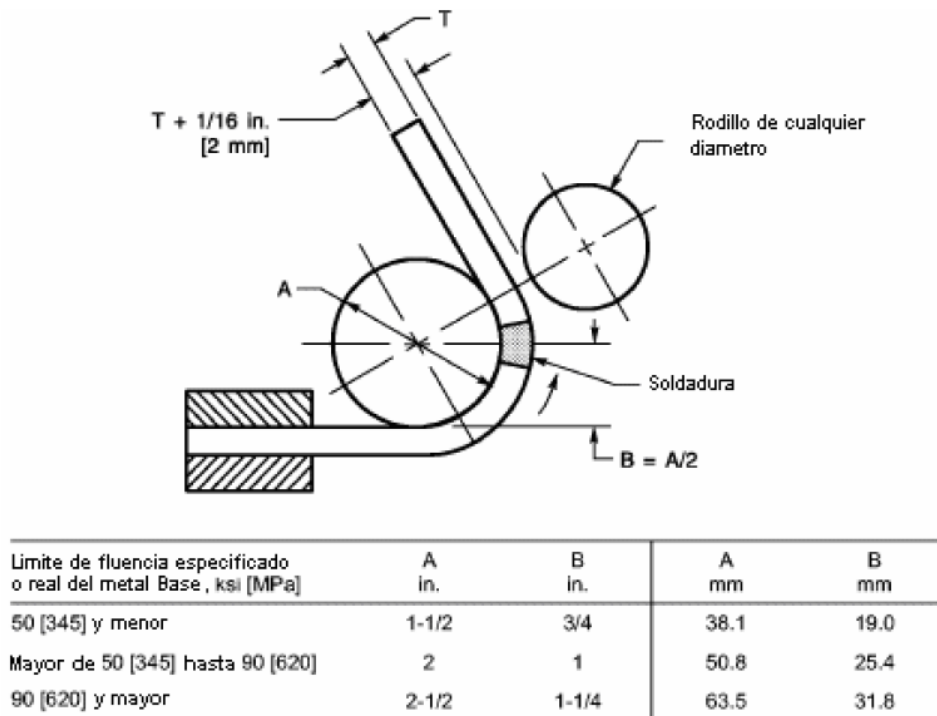


Figura 2.28 Doblez guiado equipado con rodillos
(Fuente: API 1104, 2002, p.161)

3) Doblez guiado mediante enrollado

Este toma su nombre debido a que el espécimen es doblado por un rodillo alrededor de otro fijo. Este tipo de dispositivos es muy útil para doblar especímenes que tengan diferente resistencia en metal base y en la soldadura. En la figura 2.29 se muestra un esquema del doblez guiado mediante enrollado (Fernández, 2010, p.117).

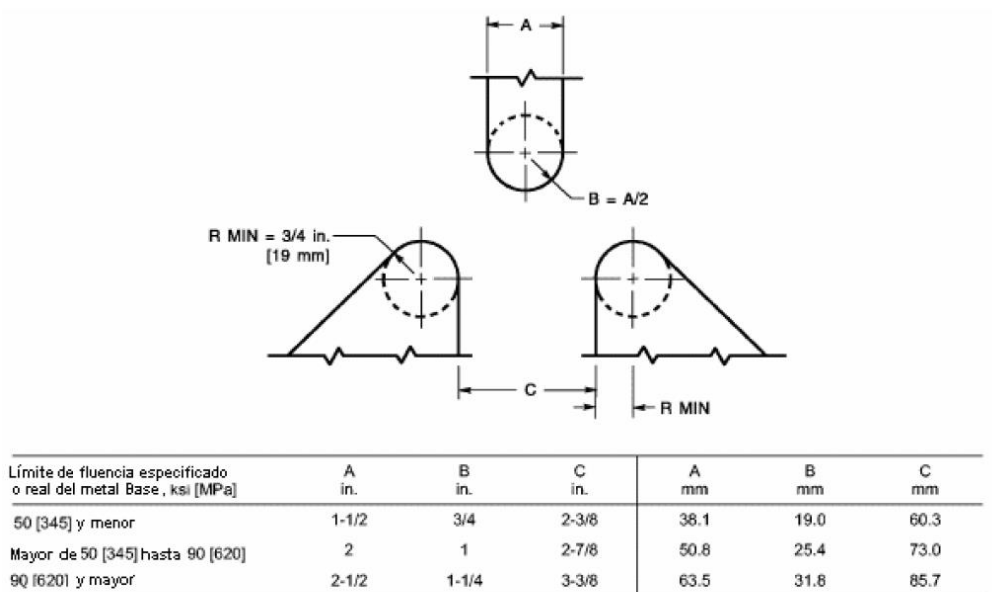


Figura 2.29 Doblez guiado mediante enrollado
(Fuente: API 1104, 2002, p.161)

En cualquiera de los ensayos de doblez los especímenes deben prepararse con cuidado para evitar impresiones. Cualquier marca o ralladura sobre la superficie a tensionar, puede ser concentrador de esfuerzos que podría ocasionar que el espécimen ensayado falle. El criterio de aceptación del ensayo de dobles, se basa en el tamaño y número de defectos que aparecen sobre la superficie expuesta a tensión (Fernández, 2010, p.118).

2.4.5.3 Ensayo de Dureza

Dureza es la habilidad que presenta los metales para resistir a ser penetrados. Consecuentemente el ensayo de dureza se realiza utilizando un tipo de penetrador el cual es forzado a penetrar la superficie del objeto a ensayar. Dependiendo del tipo de ensayo de dureza utilizado, se puede medir, ya sea el diámetro o profundidad de la indentación realizada (Fernández, 2010, p.14).

Desde el punto de vista físico se define la dureza como la resistencia que oponen los cuerpos a ser rayados o penetrados por otros con los que se compara. La Ciencia de los Materiales restringe algo más el concepto para definirlo como la

resistencia, que opone un cuerpo a la penetración de otro cuerpo más duro. Bajo esta definición la cuantificación de la dureza se realiza en base a la medición de los parámetros de una huella, de tal modo que dureza y dimensión de huella, estarán correlacionados inversamente. (Giménez, 2010, p.50).

a) Características del ensayo de dureza

La dureza de un metal se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador, que normalmente es una bola, pirámide o cono, está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar. Por ejemplo, el material empleado en estos penetradores suele ser acero templado, carburo de tungsteno o diamante. En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados se aplica lentamente una carga conocida, que presiona el penetrador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a ésta. Después de producir la indentación, se retira el penetrador. Se calcula o se lee en un dial un número empírico de dureza basado en el área del corte transversal de la huella producida o en su profundidad (Smith & Hashemi, 2006, p.227).

b) Tipos de ensayos de dureza

Los ensayos de dureza más comunes son: Ensayos Brinell: En el ensayo de dureza Brinell el penetrador es una bola de acero extraduro, que se apoya sobre la probeta a estudiar; ejerciendo sobre la misma una fuerza durante un tiempo dado, aparece una huella sobre el metal el cual determina la dureza del material. Ensayo Vickers: El ensayo de dureza Vickers es, como el ensayo Brinell, un ensayo cuyo objetivo es la determinación de la superficie lateral, de la huella. El penetrador es una pirámide de diamante de base cuadrada, cuyo ángulo en el vértice es de 136° . Dureza Rockwell: En los ensayos de dureza Rockwell, las unidades de dureza se establecen por la medida de la profundidad de la huella. En la Figura 2.31 se muestra un diagrama de los tipos de dureza (Giménez, 2010, p.50).

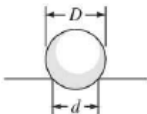

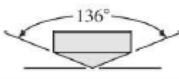
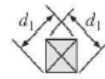
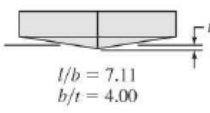
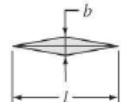
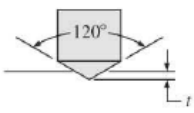

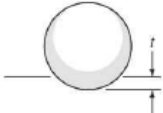

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza	
		Vista lateral	Vista en planta			
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$	
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$	
Rockwell						
A } C } D }	Cono de diamante			60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$	100-500f
B } F } G }	Esfera de acero de $\frac{1}{16}$ pulgadas			100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$	
E	Esfera de acero de $\frac{1}{8}$ pulgadas			100 kg	$R_E =$	130-500f

Figura 2.30 Tipos de penetradores y los tipos de huellas producidas asociados a cuatro ensayos de dureza comunes: Brinell, Vickers, Knoop y Rockwell.

(Fuente: Smith, 2006, p.229)

2.4.6 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas son aquellas que indican cómo se espera que el material se comporte cuando está sujeto a varias cargas o combinación de cargas. Dichas propiedades mecánicas son determinadas por pruebas estandarizadas. El conocimiento de estas propiedades permite al diseñador determinar el tamaño, la forma y método para la fabricación elementos de una máquina. Por lo regular, las propiedades de resistencia, elasticidad y ductilidad de los metales, plásticos y otros materiales se suelen determinar con una prueba de tensión, en donde una muestra del material, casi siempre con la forma de una barra redonda o plana, se sujeta entre mordazas y se tensa lentamente, hasta que se rompe por la tensión. Durante la prueba, se monitorea y registra la magnitud de la fuerza ejercida sobre la barra y el cambio correspondiente de longitud (deformación). Como el esfuerzo

en la barra es igual a la fuerza aplicada dividida entre el área, ese esfuerzo es proporcional a la fuerza aplicada, figura 2.32 (Mott, 2006, p.32).

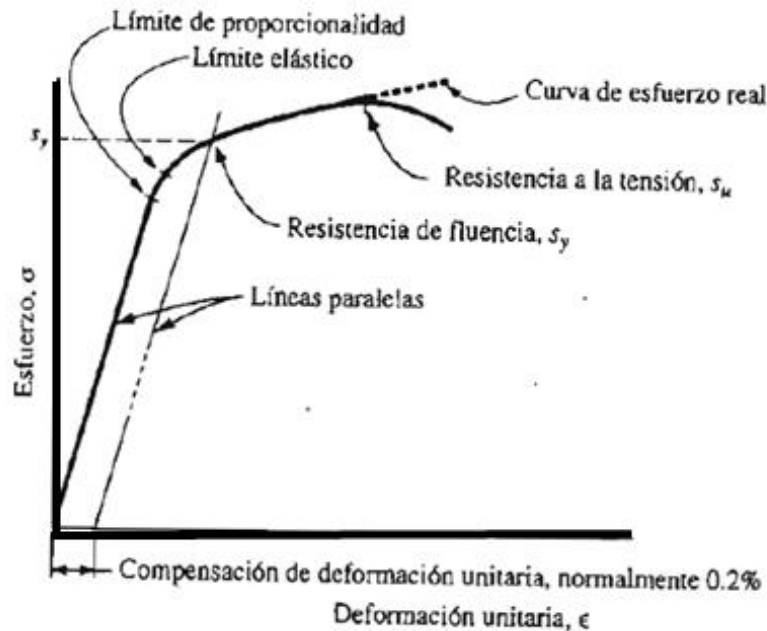


Figura 2.31 Diagrama típico de esfuerzo-deformación unitaria para aluminio y otros metales que no tienen punto de fluencia.

(Fuente: Mott, 2006, p.33)

a) Resistencia a la tensión (S_u)

Se considera que el punto máximo de la curva esfuerzo-deformación unitaria es la resistencia última a la tensión (S_u), a veces se le llama resistencia última o simplemente resistencia a la tensión. En ese punto de la prueba se mide el máximo esfuerzo aparente en una barra de prueba de material. El esfuerzo aparente se calcula al dividir la carga entre el área de la sección transversal original de la barra de prueba. Después de que se alcanza el máximo de la curva hay un decremento notable del diámetro de la barra, cual recibe el nombre de formación de cuello. Así la carga actúa sobre un área menor, y el esfuerzo real continúa aumentando hasta la ruptura. Es muy difícil seguir la reducción en el diámetro durante el proceso de formación de cuello, por lo que se acostumbra usar el punto máximo de la curva como resistencia a la tensión (Mott, 2006, p.33).

b) Resistencia de fluencia (S_y)

La parte del diagrama esfuerzo-deformación unitaria donde hay un gran incremento de la deformación con poco o ningún aumento del esfuerzo se llama resistencia de fluencia o resistencia de cedencia (S_y). Esta propiedad indica que, en realidad, el material ha cedido o se ha alargado en gran medida y en forma plástica y permanente. Si el punto de fluencia es muy notable, en la figura anterior muestra la forma del diagrama esfuerzo-deformación, típica de un metal no ferroso, como el aluminio. Observe que no hay un punto de fluencia marcado, pero el material ha cedido, en realidad, en o cerca del valor del esfuerzo indicado como S_y . Ese punto se determina por el método de compensación, donde se traza una recta paralela a la porción rectilínea de la curva, y es compensada hacia la derecha en una cantidad establecida, que en el caso normal es 0.20% de deformación unitaria (0.002). La intersección de esta línea y la curva de esfuerzo deformación definen la resistencia del material a la fluencia (Mott, 2006, p.34).

c) Límite de proporcionalidad

El punto de la curva de esfuerzo-deformación donde se desvía de una línea recta se llama límite de proporcionalidad. Esto es, por debajo de este valor de esfuerzo, u otros mayores, el esfuerzo ya no es proporcional a la deformación unitaria. Por abajo del límite de proporcionalidad, se aplica la ley de Hooke: el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria. En el diseño mecánico, es poco común usar los materiales arriba del límite de proporcionalidad (Mott, 2006, p.34).

d) Límite elástico

En algún punto, llamado límite elástico, el material tiene cierta cantidad de deformación plástica, por lo que no regresa a su forma original después de liberar la carga. Por debajo de este nivel, el material se comporta en forma totalmente elástica. El límite de proporcionalidad y el límite elástico están bastante cerca de

la resistencia de fluencia. Como son difíciles de determinar, rara vez se les cita (Robert, 2006, p.34).

2.5 Hipótesis

Mediante la variación de la velocidad de rotación de la herramienta del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) permitirá mejorar las propiedades mecánicas en uniones de placas de aluminio.

2.6 Señalamiento de variables de la hipótesis

2.6.1 Variable Independiente

La variación de la velocidad de rotación de la herramienta del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW)

2.6.2 Variable Dependiente

Mejorar las propiedades mecánicas en uniones de placas de aluminio.

2.6.3 Término de relación

Permitirá

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Enfoque

Esta investigación se enfocó en información de tipo cualitativo, con el propósito de conocer cuáles son las características principales que tiene el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), sus principales ventajas en comparación con los procesos convencionales de soldadura, que parámetros del proceso de soldadura se deben controlar, que tipo de juntas se puede unir.

La investigación se realizó, mediante la búsqueda de documentos relacionados con el proceso de soldadura por fricción agitación FSW para aluminio, como por ejemplo: libros, tesis, revistas, catálogos, manuales.

3.2 Modalidad básica de la investigación

3.2.1 Bibliográfica

Se utilizó esta modalidad para la recolección de información del proceso de soldadura por fricción agitación FSW para uniones de perfiles de aluminio.

3.2.2 Experimental

Se utilizó esta modalidad con la finalidad de analizar las propiedades mecánicas del cordón de soldadura obtenido mediante el proceso de soldadura por fricción agitación FSW, en aleaciones de aluminio.

3.3 Nivel o tipo de investigación

3.3.1 Descriptivo

Se utilizó este tipo de investigación, porque se basara en características cuantitativas y cualitativas del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), teniendo presente el principio de funcionamiento mediante la ayuda externa de estudios previos, que permita controlar los parámetros que son indispensables, como por ejemplo: la velocidad de rotación, velocidad de avance, el tipo de perfil de la herramienta no consumible, que tipos de juntas se puede soldar, para obtener un cordón de soldadura de calidad.

3.3.2 Asociación de variables

Este tipo de investigación se utilizó, para verificar si el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), es aplicable para generar soldaduras de alta calidad con solo la utilización de medios mecánicos para la unión de perfiles de aluminio y su influencia sobre las propiedades mecánicas del cordón de soldadura obtenidas, si son o no satisfactorias.

3.4 Población y Muestra

3.4.1 Población

La población es la totalidad de aleaciones de aluminio disponibles en nuestro país, las cuales son: la aleación 6063, 6061 y 6005.

3.4.2 Muestra

En este caso es un muestreo no probabilístico y por tal razón se seleccionó una muestra intencional de la aleación 6061, porque tiene una gran aplicación en la industria de la construcción: en puentes, torres, castilletes, pilares, columnas,

armazones para techumbre, techados, puertas, ventanas y sus marcos, contramarcos y umbrales, barandillas, chapas decorativas y antideslizantes para pisos, chapas para recubrimientos en fachadas, barras, perfiles, tubos, en formas de “T”, ángulos, vigas, canales y “Z” preparados para la construcción.

3.5 Operacionalización de variables

Variable Independiente: El proceso de soldadura por fricción agitación (FSW)

Tabla 3.1 **Variable Independiente**

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas instrumentos
Es un nuevo concepto en soldadura en fase sólida por fricción especialmente apto para la soldadura del aluminio y sus aleaciones y ofrece aspectos interesantes pudiendo en muchos casos reemplazar a los procesos usuales por fusión, la calidad de la soldadura depende del control que se tenga de los parámetros del proceso.	Soldadura del aluminio y sus aleaciones	¿Qué tipo de aleación de aluminio se utilizara?	-Aleación 6061	Indirecta: Bibliográfica
		¿Qué tipo de espesor se utilizara para la unión?	-3mm	Indirecta: Bibliográfica
		¿Qué tipo de juntas se puede soldar con el proceso FSW?	-A tope	Indirecta: Bibliográfica
		¿Cuáles son los límites máximos y mínimos de velocidad de rotación de la herramienta?	-500 rpm -3500 rpm	Indirecta: Bibliográfica
	Parámetros del proceso.	¿Cuáles son los límites máximos y mínimos de velocidad de avance de la herramienta?	-40 mm/min -180 mm/min	Indirecta: Bibliográfica

(Fuente: El autor)

Variable Dependiente: Mejorar las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio.

Tabla 3.2 **Variable Dependiente**

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas instrumentos
Las propiedades mecánicas de perfiles de aluminio tienen interés para el diseño estructural en ingeniería porque de ello depende el grado de seguridad de la estructura, y que pueden obtenerse a partir del ensayo del material	Propiedades mecánicas	¿Qué propiedades mecánicas se analizara en el cordón de soldadura?	-Ductilidad -Dureza -Resistencia	Observación de campo.
	Ensayo del material	¿Qué ensayos se utilizara para verificar las propiedades mecánicas?	-Ensayo de doblado. -Ensayo de dureza. -Ensayo de tracción.	Observación de campo.

(Fuente: El autor)

3.6 Recolección de información

La recolección de información acerca del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), se realizará en catálogos, normas, estudios anteriores referentes a las características cualitativas y cuantitativas, para obtener los fundamentos generales, que permitan el correcto desarrollo de la unión de perfiles de aluminio.

3.7 Procesamiento y Análisis

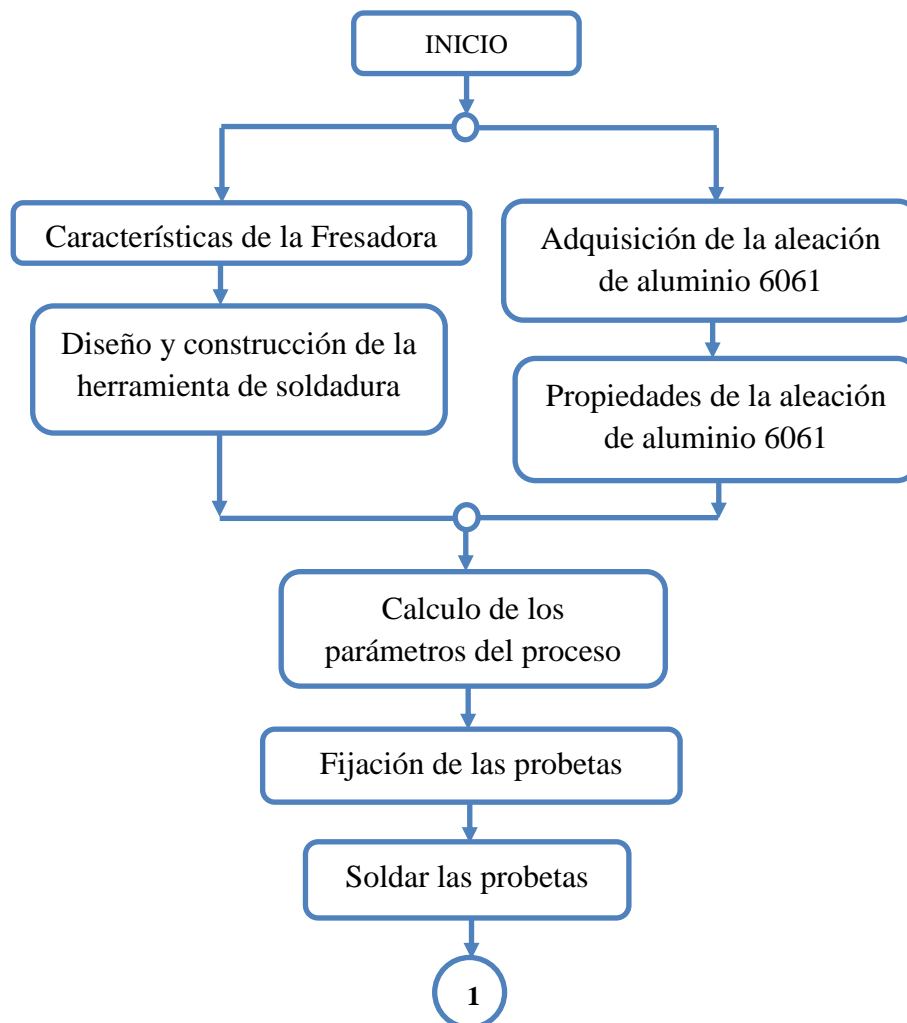
- Revisión de la información bibliográfica recogida.
- Análisis e interpretación de resultados.
- Comprobación de la hipótesis.
- Establecer conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de Resultados

Para realizar la Soldadura por Fricción Agitación (FSW), se empleó una máquina fresadora convencional adaptada al proceso, para lo cual se desarrolló el siguiente diagrama de flujo para la toma de resultados, figura 4.1.



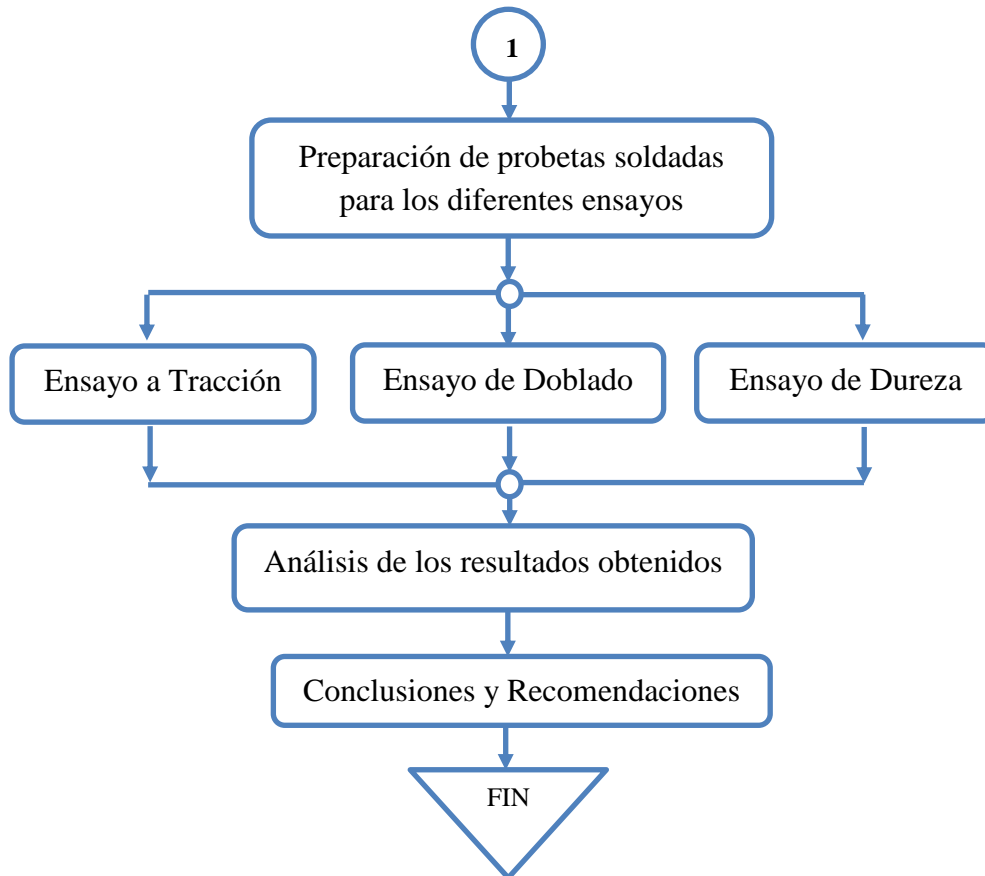


Figura 4.1 Diagrama de flujo para la toma de resultados
(Fuente: El autor)

4.1.1 Características de la máquina fresadora

En la figura 4.2 se muestra la máquina fresadora, que se utilizó para efectuar la unión de las probetas de aleación de aluminio 6061, mediante el proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW). Las características de la fresadora son: la velocidad de rotación del usillo, la velocidad de avance de la mesa y la potencia, en la tabla 4.1 se presenta esta información.

Tabla 4.1 Características de la máquina fresadora

Características	Información
Velocidad de rotación del usillo (rpm):	31,5 a 1600
Velocidad de avance (mm/min):	40 a 200
Potencia del motor (Hp):	10

(Fuente: El autor)



Figura 4.2 Fresadora adaptada al proceso FSW

(Fuente: El autor)

4.1.2 Diseño y construcción de la herramienta de soldadura

La herramienta es la parte principal del proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW), es el componente que genera el cordón de soldadura. En la figura 4.3 se muestra el esquema de la herramienta, las partes en que se divide son: el pin que se introduce en la intersección de las placas a soldar con una velocidad de rotación, lo que produce la fricción por contacto entre elementos, el hombro contribuye en la generación de calor y ejerce una presión sobre las placas, para prevenir que el material mezclado salga expulsado y la sujeción.

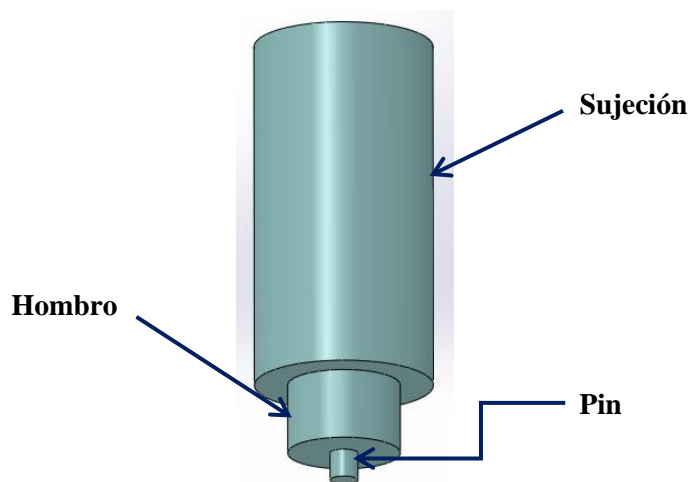


Figura 4.3 Esquema de la herramienta de soldadura con pin cilíndrico

(Fuente: El autor)

4.1.2.1 Dimensionamiento de la herramienta de soldadura

En la figura 4.4 se esquematiza las características dimensionales más importantes de la herramienta de soldadura con pin cónico.

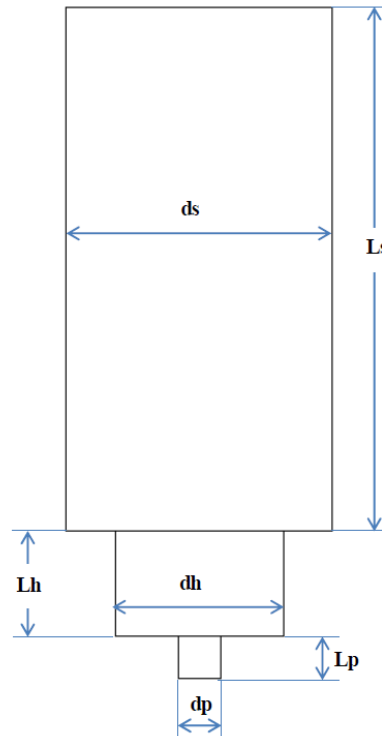


Figura 4.4 Dimensiones de la herramienta de soldadura (d_p y L_p diámetro y longitud del pin, d_h y L_h diámetro y longitud del hombro, d_s y L_s diámetro y longitud de la sujeción)

(Fuente: El autor)

a) Diámetro del hombro (d_h):

Para determinar el diámetro del hombro se utilizó la ecuación 4.1, propuesta por Dubourg, L., Dacheux, P., 2006. Design and Properties of FSW Tools: A Literature Review. 6th International Symposium on Friction Stir Welding, 1-16.

$$d_h = 2.26e + 6.99 \quad \text{Ecuación (4.1)}$$

Dónde:

d_h : Diámetro del hombro [mm]

e : Espesor de las placas a soldar [mm]

Reemplazando en la ecuación 4.1, para un espesor de las placas de 3mm:

$$d_h = (2.26)(3mm) + 6.99 = 13mm$$

b) Diámetro del pin (d_p):

Para calcular el diámetro del pin se utilizó la tabla 4.2 presentada por Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, 2007. Friction Stir Welding and Processing: Tool Materials and Designs, 25.

Tabla 4.2 Dimensiones recomendadas por Rajiv S. Mishra para el diámetro del pin

Summary of friction stirring tool dimensions for a given workpiece material

Shoulder diameter		Cylindrical pin diameter		Shoulder-to-pin ratio	Workpiece material and thickness, mm
mm	in.	mm	in.		
13	0.5	5	0.2	2.6:1	6061-T6 Al, 3 mm
20–30	0.8–1.2	8–12	0.3–0.5	2.5:1, 1.6:1	7050, 2195, 5083, 2024, 7075 Al, 6.35 mm
23	0.9	8.2	0.32	2.8:1	2024-T351 Al, 6.4 mm
20,16	0.8, 0.6	6	0.24	3.3:1, 2.7:1	5083 and 6061 Al, 5.5 mm
12	0.5	4	0.16	3:1	1050 Al and oxygen-free copper, 1.8 mm
25.4	1.0	7.87	0.31	3.22:1	7075-T7351 Al, 9.53 mm
23	0.9	8.4	0.33	2.7:1	2524-T351 Al, 6.4 mm
20	0.79	4	0.16	5:1	6064 Al to carbon steel, 4.5 mm
23	0.9	8.2	0.32	2.8:1	2024-T351, 7 mm
10	0.4	3.8	0.15	2.6:1	2095 Al, 1.63 mm
25	1.0	9	0.35	2.8:1	5251 Al, 5 mm

(Fuente: Mishra, 2014, p.25)

El diámetro del pin recomendado para un diámetro del hombro de 13mm, el aluminio 6061 y para un espesor de 3mm es de: $d_p = 5mm$

c) Longitud del pin (L_p):

Para la longitud del pin no se encontró ninguna referencia, pero se tomó la limitante del espesor de las placas a soldar, es decir la longitud del pin no debe ser mayor al del espesor para no traspasar el metal base, además no debe ser menor al del espesor porque produciría defectos de soldadura., entonces: $L_p = 3mm$

4.1.2.2 Material de la herramienta de soldadura

Para la selección del material de la herramienta de soldadura, se analizó los esfuerzos presentes en el pin y en el hombro, figura 4.5. Propuesto por Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, 2014. Friction Stir Welding and Processing, 54, 55.

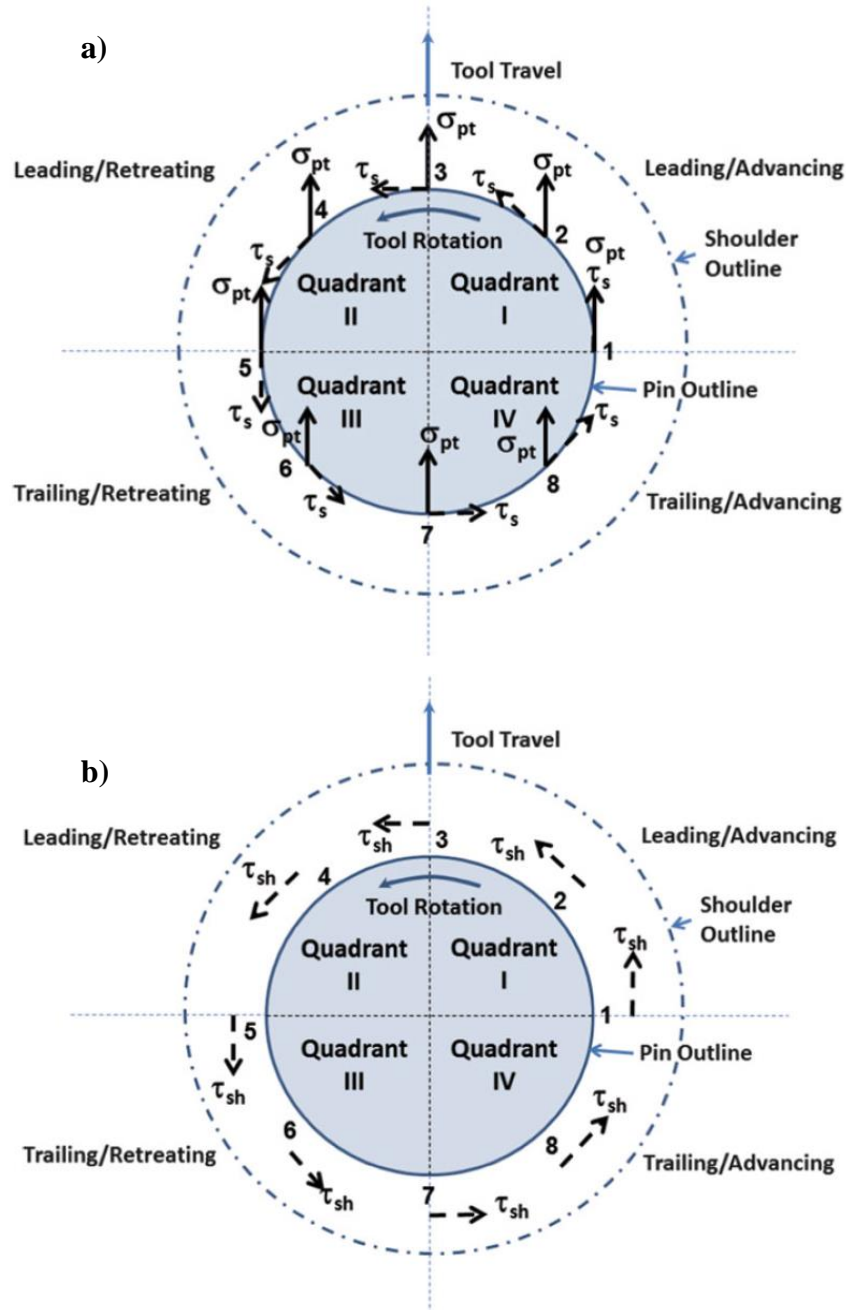


Figura 4.5 Esfuerzos producidos: a) en el pin y b) en el hombro

(Fuente: Mishra, 2014, p.54, 55)

En la figura 4.6, se esquematiza las cargas de torsión y de flexión presentes en el pin y en el hombro, cuando este se encuentra en rotación y traslación dentro de las placas de aluminio.

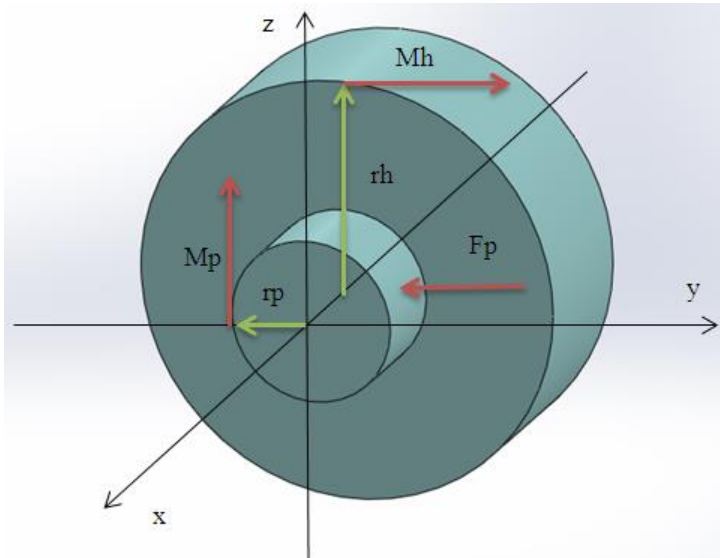


Figura 4.6 Cargas de torsión y de flexión presentes en la herramienta de soldadura
(Fuente: El autor)

En la figura 4.7 se muestra las cargas de torsión y flexión presentes en el pin, que originan el esfuerzo a torsión y el esfuerzo a la flexión.

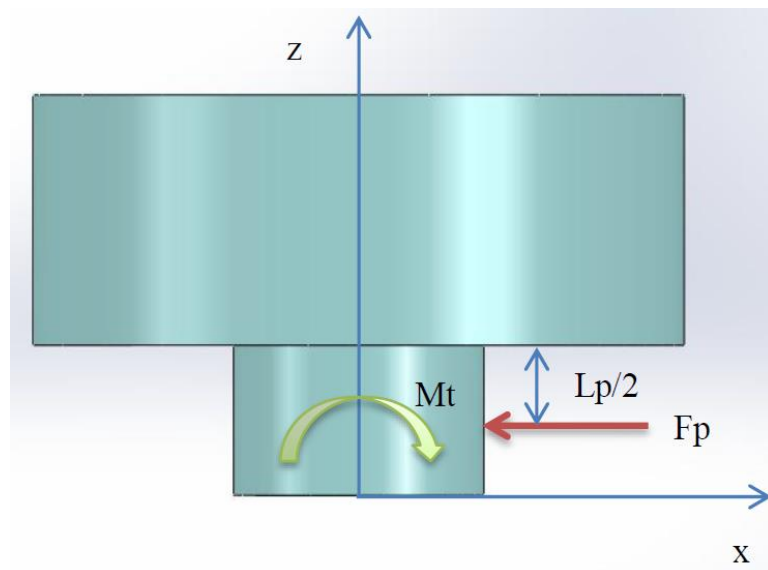


Figura 4.7 Cargas de torsión y de flexión presentes en el pin
(Fuente: El autor)

El esfuerzo por flexión en el pin (σ_x)

El esfuerzo por flexión en el pin, se determina con la ecuación 4.2 propuesta por Holowenco y Laughlin, Serie Shcaum, Diseño de Máquinas, transmisión de potencia mediante ejes, p.113

$$\sigma_x = \frac{32M_p}{\pi d_p^3} \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

Dónde:

σ_x : Esfuerzo por flexión en el pin [N/m^2]

M_p : Momento torsionante en el pin [N^*m]

d_p : Diámetro del pin [m]

El momento torsionante en el pin, se calcula con la ecuación 4.3 (Mott, 2005, p.40).

$$M_p = F_{pr} \left(\frac{L_p}{2} \right) \quad \text{Ecuación (4.3)}$$

Dónde:

M_p : Momento torsionante en el pin [N^*m]

F_{pr} : Fuerza de oposición por fricción, por parte del material a soldar [N]

L_p : Longitud del pin [m]

La fuerza de oposición por fricción, se calcula con la ecuación 4.4 (Serway & Jewett, 2008, p.120).

$$F_{pr} = \mu * F_p \quad \text{Ecuación (4.4)}$$

Dónde:

F_{pr} : Fuerza de oposición por fricción, por parte del material a soldar [N]

F_p : Fuerza aplicada al pin [N]

μ : Coeficiente de fricción [adimensional]

La fuerza de oposición se determina con la ecuación 4.5.

$$F_p = (A_p)(Sut_{Al}) \quad \text{Ecuación (4.5)}$$

Dónde:

F_p : Fuerza de oposición por parte del material a soldar [N]

A_p : Área afectada por el avance de la herramienta [m²]

Sut_{Al} : Resistencia última del aluminio 6061 [N/m²]

El área afectada por pin se determinó con la ecuación 4.6 (Lammlein, 2010, p.9)

$$A_p = (d_p)(e) \quad \text{Ecuación (4.6)}$$

Dónde:

A_p : Área afectada por el avance de la herramienta [m²]

d_p : Diámetro del pin [m]

e : Espesor de las placas a soldar [m]

Ingresando con los valores de espesor de placas de 3mm y el diámetro del pin de 5mm en la ecuación 4.6, se tiene:

$$A_p = (5mm)(3mm) = 15mm^2 = 1.5 * 10^{-5}m^2$$

Reemplazando en la ecuación 4.5, para valores de resistencia última o a tracción del aluminio 6061 de 310.34MPa y una área afectada de $1.5 * 10^{-5} m^2$, la fuerza de oposición por parte del material a soldar es de:

$$F_p = (1.5 * 10^{-5}m^2) \left(310.34 * 10^6 \frac{N}{m^2} \right) = 4655.1N$$

Reemplazando el valor del coeficiente de fricción de 0.47 para el contacto entre el aluminio-acero, tabla 4.8, en la ecuación 4.4, para determinar la fuerza de oposición por fricción, por parte del material a soldar.

$$F_{pr} = \mu * F_p = 0.47 * 4655.1N = 2187.8N$$

Reemplazando en la ecuación 4.3, para una longitud del pin de 3mm:

$$M_p = 2187.8N \left(\frac{3 * 10^{-3}m}{2} \right) = 3.28N * m$$

Reemplazando en la ecuación 4.2, se tiene el valor del esfuerzo de flexión.

$$\sigma_x = \frac{32(3.28N * m)}{\pi(5 * 10^{-3})^3m^3}$$

$$\sigma_x = 267.28MPa$$

El esfuerzo por torsión en el pin (τ_p)

El esfuerzo por torsión en el pin, se determina con la ecuación 4.7 propuesta por Holowenco y Laughlin, Serie Shcaum, Diseño de Máquinas, transmisión de potencia mediante ejes, p.113

$$\tau_p = \frac{16 Mt}{\pi d_p^3} \quad \text{Ecuación (4.7)}$$

Dónde:

τ_p : Esfuerzo por torsión en el pin [N/m²]

Mt : Momento torsionante [N*m]

d_p : Diámetro del pin [m]

El momento torsionante en el pin, se calcula con la ecuación 4.8 (Robert, 2005, p.40).

$$Mt = F_{pr} * r_p \quad \text{Ecuación (4.8)}$$

Dónde:

Mt : Momento torsionante [N*m]

F_{pr} : Fuerza de torsión en el pin [N]

r_p : Radio del pin [m]

La fuerza aplicada en el pin, se calcula con la ecuación 4.9. (Serway & Jewett, 2008, p.120).

$$F_{pr} = \mu * F_p \quad \text{Ecuación (4.9)}$$

Dónde:

F_{pr} : Fuerza de torsión en el pin [N]

F_p : Fuerza aplicada al pin [N]

μ : Coeficiente de fricción [adimensional]

Reemplazando en la ecuación 4.9 para un valor de coeficiente de fricción de 0.47 para el contacto entre aluminio y acero, tabla 4.8.

$$F_{pr} = 0.47 * 4350N = 2044.5N$$

Reemplazando en la ecuación 4.8, para el momento por torsión en el pin.

$$Mt = 2044.5N * 2.5 * 10^{-3}m = 5.11N * m$$

Reemplazando en la ecuación 4.7, para el esfuerzo por torsión en el pin.

$$\tau_p = \frac{(16)(5.11N * m)}{(\pi)(5 * 10^{-3})^3m^3} = 208.2MPa$$

En la figura 4.8, se presenta un esquema de la carga de torsión presente en el hombro de la herramienta de soldadura.

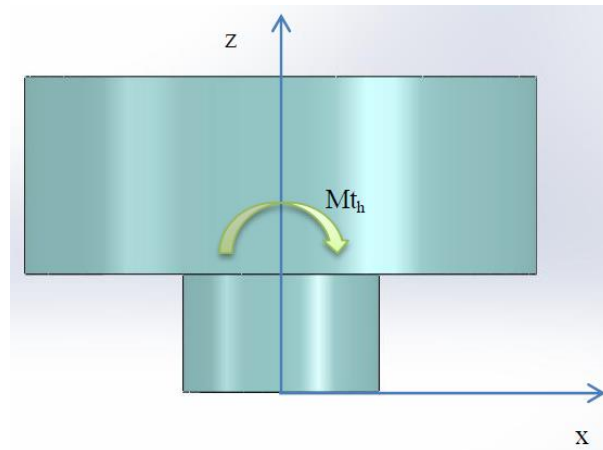


Figura 4.8 Carga de torsión presente en el hombro

(Fuente: El autor)

El esfuerzo por torsión en el hombro (τ_h)

El esfuerzo por torsión en el hombro, se determina con la ecuación 4.10 propuesta por Holowenco y Laughlin, Serie Shcaum, Diseño de Máquinas, transmisión de potencia mediante ejes, p.113

$$\tau_h = \frac{16 Mt_h}{\pi d_h^3} \quad \text{Ecuación (4.10)}$$

Dónde:

τ_h : Esfuerzo por torsión en el hombro [N/m²]

Mt_h : Momento torsionante en el hombro [N*m]

d_h : Diámetro del hombro [m]

El momento torsionante en el hombro, se calcula con la ecuación 4.11 (Robert, 2005, p.40).

$$Mt_h = F_{hr} * r_h \quad \text{Ecuación (4.11)}$$

Dónde:

Mt_h : Momento torsionante en el hombro [N*m]

F_{hr} : Fuerza de torsión en el hombro [N]

r_h : Radio del hombro [m]

La fuerza de torsión en el hombro, se calcula con la ecuación 4.12. (Serway & Jewett, 2008, p.120).

$$F_{hr} = \mu * F_h \quad \text{Ecuación (4.12)}$$

Dónde:

F_{hr} : Fuerza de torsión en el pin [N]

F_h : Fuerza aplicada al hombro [N]

μ : Coeficiente de fricción [adimensional]

La fuerza aplicada al hombro, se determina con la ecuación 4.13.

$$F_h = (A_h)(Sut_{Al}) \quad \text{Ecuación (4.13)}$$

Dónde:

F_h : Fuerza de oposición por parte del material a soldar [N]

A_h : Área afectada por el avance de la herramienta [m²]

Sut_{Al} : Resistencia última del aluminio 6061 [N/m²]

El área afectada por hombro, se determinó con la ecuación 4.14 (Lammlein, 2010, p.14)

$$A_h = (d_h - d_p)(z) \quad \text{Ecuación (4.14)}$$

Dónde:

A_h : Área afectada por el avance de la herramienta [m²]

d_h : Diámetro del hombro [m]

d_p : Diámetro del pin [m]

z : Profundidad que se introduce el hombro sobre las placas [m]

Reemplazando en la ecuación 4.14, para calcular el área afectada por el hombro.

$$A_h = (13 * 10^{-3}m - 5 * 10^{-3}m)(0.2 * 10^{-3}m) = 1.6 * 10^{-6}m^2$$

Reemplazando en la ecuación 4.13, para calcular la fuerza aplicada al hombro.

$$F_h = (1.6 * 10^{-6} m^2) \left(290 * 10^6 \frac{N}{m^2} \right) = 464 N$$

Reemplazando en la ecuación 4.12, para calcular la fuerza de torsión.

$$F_{hr} = 0.47 * 464 N = 218.08 N$$

Reemplazando en la ecuación 4.11, para calcular momento torsionante.

$$M t_h = 218.08 N * 6.5 * 10^{-3} m = 1.42 N * m$$

Reemplazando en la ecuación 4.10, para calcular el esfuerzo por torsión.

$$\tau_h = \frac{16 * 1.42 N * m}{\pi (6.5 * 10^{-3} m)^3} = 3.29 MPa$$

Esfuerzo total cortante en la herramienta (τ)

Con la ecuación 4.15 se determino el esfuerzo total cortante en la herramienta.

$$\tau = \tau_h + \tau_p \quad \text{Ecuación (4.15)}$$

Reemplazando en la ecuación 4.15, para calcular el esfuerzo total cortante.

$$\tau = 3.29 MPa + 208.2 MPa = 211.49 MPa$$

Teoría del esfuerzo normal Máximo.

Para verificar que el material seleccionado no falle se baso en la Teoría del esfuerzo normal Máximo. Esta teoría establece lo siguiente: la falla de un elemento sometido a un estado multiaxial de esfuerzos se producirá cuando

cualquiera de los esfuerzos principales alcance a superar la resistencia máxima del material, por lo tanto, un elemento será seguro siempre y cuando se cumplan las condiciones siguientes, ecuación 4.16 (Rodríguez, 2008, p.144).

$$|\sigma_1| \leq \frac{\sigma_{max}}{F.S.} \text{ y } |\sigma_2| \leq \frac{\sigma_{max}}{F.S.} \quad \text{Ecuación (4.16)}$$

Dónde:

σ_1 : Esfuerzo principal máximo [MPa]

σ_2 : Esfuerzo principal mínimo [MPa]

σ_{max} : esfuerzo maximo del material de la herramienta [MPa]

$F.S.$: Factor de seguridad ($F.S. > 1$)

Con la ecuación 4.17 se determina el esfuerzo principal máximo (Rodríguez, 2008, p.51).

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad \text{Ecuación (4.17)}$$

Con la ecuación 4.18 se determina el esfuerzo principal mínimo.

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad \text{Ecuación (4.18)}$$

Reemplazando en la ecuación 4.17 y la ecuación 4.18 para los siguientes esfuerzos: $\sigma_y = 0$, $\sigma_x = 267.28MPa$ y $\tau = 211.49MPa$

$$\sigma_1 = \frac{267.28 + 0}{2} + \sqrt{\left(\frac{267.28 + 0}{2}\right)^2 + 211.49^2} = 383.82MPa$$

$$\sigma_2 = \frac{267.28 + 0}{2} - \sqrt{\left(\frac{267.28 + 0}{2}\right)^2 + 211.49^2} = -116.54MPa$$

Comparando la condición que presenta la ecuación 4.16 para el acero de maquinaria para cementación 7210 o el AISI 3115/8620, que tiene una resistencia a la tracción de 530 MPa y un factor de seguridad de 1.2.

$$|383.82MPa| \leq \frac{530MPa}{1.2} \text{ y } |-116.54MPa| \leq \frac{530MPa}{1.2}$$

$$|383.82MPa| \leq 441.67MPa \text{ y } |-116.54MPa| \leq 441.67MPa \therefore \text{ si cumple}$$

En la figura 4.9, se puede apreciar que si se gráfica un punto cuyas coordenadas sean σ_1 y σ_2 y está dentro del cuadrado el elemento será seguro, por el contrario si esta fuera, el elemento será inseguro, esto es, que podría darse la falla. En este caso el acero 7210 si soportara con seguridad las cargas aplicadas (Rodríguez, 2008, p.145).

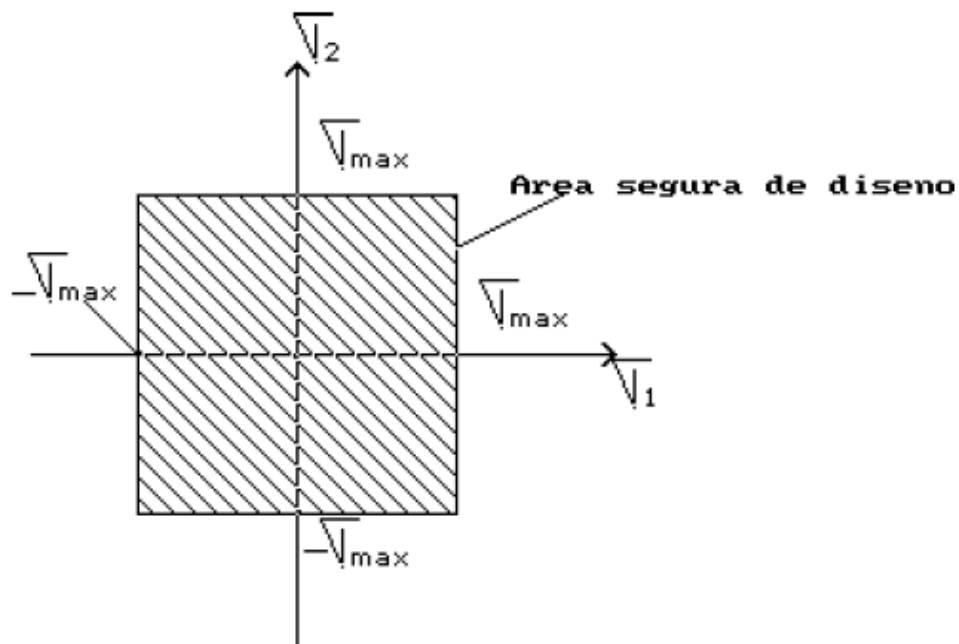


Figura 4.9 Representación gráfica de la teoría del esfuerzo normal máximo

(Fuente: Rodríguez, 2011, p.36)

En la tabla 4.3 se presenta un resumen de las dimensiones y el material de la herramienta de soldadura.

Tabla 4.3 Características de la herramienta de soldadura

Resumen	
Dimensiones	Información
Diámetro del hombro (dh):	13mm
Diámetro del pin (dp):	5mm
Diámetro de la sujeción (ds):	25.4mm
Longitud del pin (Lp):	3mm
Longitud del hombro (lh):	10mm
Material de la herramienta:	AISI 3115/8620

(Fuente: El autor)

4.1.3 Adquisición de la aleación de aluminio 6061

Las placas para el ensayo de soldadura, se cortaron de una plancha de la aleación de aluminio 6061. Las principales propiedades que hacen del aluminio sea un material valioso son su ligereza (en torno a un tercio del peso del cobre y el acero), resistencia a la corrosión, es excelente para la construcción. En la tabla 4.4 se presenta las propiedades físicas y mecánicas.

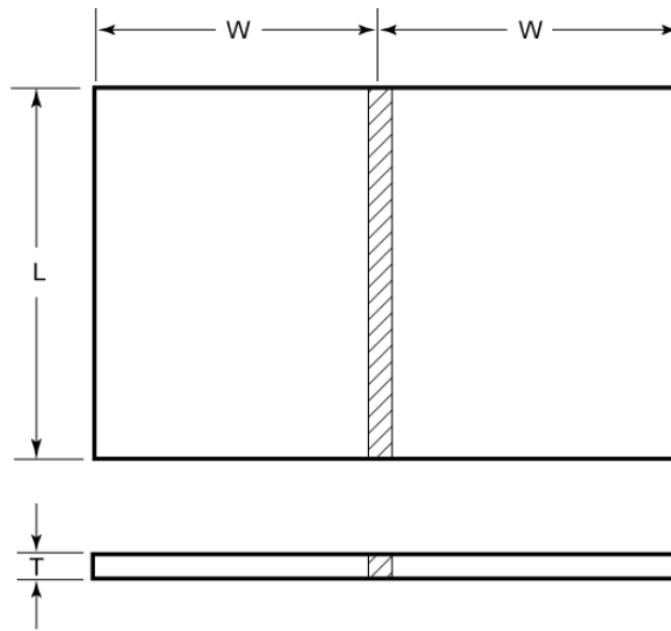
Tabla 4.4 Propiedades de la aleación de aluminio 6061

Propiedades Físicas	Datos	Propiedades Mecánicas	Datos
Densidad :	2710 Kg/m ³	Dureza:	65HB
Temperatura de fusión:	933K	Resistencia a Tensión:	310MPa
Calor específico:	896J/Kg K	Limite elástico:	275MPa
Conductividad térmica:	166.9W/m K		

(Fuente: El autor)

4.1.4 Características dimensionales de las placas a soldar

Las dimensiones para las placas fueron tomadas de la norma AWS D17.3, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum, figura 4.10.



Base Metal Thickness	Minimum Dimension in [mm]	
T	W	L
All	4 [102]	12 [305]

Figura 4.10 Dimensiones de las placas para soldar
(Fuente: AWS D17.3, 2010, p.39)

4.1.5 Cálculo de los parámetros del proceso FSW

4.1.5.1 Velocidad de avance (V_a)

La velocidad de avance también se conoce como velocidad de soldadura, y se calcula con la ecuación 4.19 (Alves, 2009, p.41).

$$V_a = \theta_{SALM} * \psi_{SALM} * e^{-1} \quad \text{Ecuación (4.19)}$$

Dónde:

V_a : Velocidad de avance o de soldadura [mm/min]

ψ_{SALM} : Factor de la herramienta de soldadura [0.1 a 0.4]

e : Espesor del material a soldar [mm]

θ_{SALM} : Es el factor del material.

Los valores tipos del factor de material, se exponen en la tabla 4.5 para diversos materiales utilizados en la soldadura FSW (Alves, 2009, p.41).

Tabla 4.5 Factor de material θ_{SALM} para diversos materiales

Material	θ_{SALM} (mm/min)
Chumbo	3700
Al 6xxx	1200
Al 5xxx	700
Al 7xxx	600
Al 8xxx	600
Al 2xxx	600
Magnésio	400
Cobre	300
Titânio	100

(Fuente: Alves, 2009, p.41)

Reemplazando en la ecuación 4.19, para un espesor de 3mm, factor de herramienta de 0.15 y el factor de material de 1200 para la serie de aluminio 6.

$$V_a = 1200 * 0.15 * 3^{-1} = 54mm/min$$

4.1.5.2 Velocidad de rotación (V_r)

Para la velocidad de rotación, no se encontró alguna referencia, por esta razón se variara de la siguiente forma, para poder analizar el efecto que tiene sobre las propiedades mecánicas del material soldado. En la tabla 4.6 se presenta estas velocidades de rotación.

Tabla 4.6 Velocidades de rotación que se utilizara para la soldadura FSW

Probetas	Velocidad de rotación de la Fresadora
A	500rpm
B	680rpm
C	800rpm
D	1000rpm
E	1250rpm
F	1600rpm

(Fuente: El autor)

4.1.5.3 Índice de velocidad (I_v)

Con la ecuación 4.20, propuesta por Ariel B., se determina el índice de velocidad que es definido como el cociente entre la velocidad de rotación y la velocidad de avance de la herramienta de soldadura, en la tabla 4.7 se presenta el I_v .

$$I_v = \frac{V_r}{V_a} \quad \text{Ecuación (4.20)}$$

Dónde:

I_v : Índice de velocidad [rev/mm]

V_r : Velocidad de rotación [rpm]

V_a : Velocidad de avance [mm/min]

Tabla 4.7 Índices de velocidades del proceso FSW

Probetas	Velocidad de rotación (V_r)	Velocidad de avance (V_a)	Índice de velocidad (I_v)
A	500rpm	54mm/min	9.26 rev/mm
B	680rpm	54mm/min	12.59 rev/mm
C	800rpm	54mm/min	14.82 rev/mm
D	1000rpm	54mm/min	18.52 rev/mm
E	1250rpm	54mm/min	23.15 rev/mm
F	1600rpm	54mm/min	29.63 rev/mm

(Fuente: El autor)

4.1.5.4 Condiciones de contacto

En el proceso de Soldadura por Fricción Agitación, las condiciones de contacto entre la herramienta de soldadura y el metal base, están representadas por la ley de Coulomb, ecuación 4.21, la cual describe la fuerza cortante entre la superficie de contacto de la herramienta y la superficie de la placa (Mishra, 2014, p.18).

$$\tau_{fricción} = \mu * P \quad \text{Ecuación (4.21)}$$

Dónde:

$\tau_{fricción}$: Tensión cortante por contacto [N/m^2]

μ : El coeficiente de fricción entre el aluminio-acero

P : Presión de contacto [N/m^2]

Cuando la herramienta de soldadura (acero) está en funcionamiento, hace contacto con las partes a soldar (aluminio 6061), se genera el coeficiente de fricción cinético entre superficies. En la tabla 4.8 se presenta los coeficientes de fricción estático y cinético, para diferentes materiales en contacto.

Tabla 4.8 Coeficientes de fricción

Coeficientes de fricción		
	μ_s	μ_k
Hule sobre concreto	1.0	0.8
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Vidrio sobre vidrio	0.94	0.4
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Madera sobre madera	0.25–0.5	0.2
Madera encerada sobre nieve húmeda	0.14	0.1
Madera encerada sobre nieve seca	—	0.04
Metal sobre metal (lubricado)	0.15	0.06
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Hielo sobre hielo	0.1	0.03
Articulación sinovial en humanos	0.01	0.003

Nota: Todos los valores son aproximados. En algunos casos el coeficiente de fricción puede superar 1.0.

(Fuente: Serway & Jewett, 2008, p.121)

4.1.5.5 Generación de calor (Q)

La generación de calor depende de la configuración geométrica del pin y el hombro de la herramienta de soldadura, porque son las partes que se encuentra en contacto con las placas a soldar. En la figura 4.11 se analiza el efecto que tiene la geometría del pin y del hombro sobre el calor por fricción (Mishra, 2014, p.21).

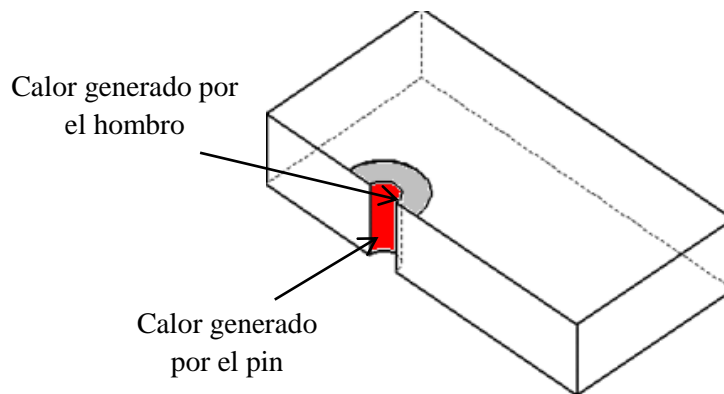


Figura 4.11 Calor generado en el metal base, debido a la fricción de la herramienta
(Fuente: El autor)

Para calcular la generación de calor del pin y del hombro de la herramienta de soldadura, en la figura 4.12 se ilustra la geometría del pin y del hombro, dividida en tres superficies: circular del pin, superficie cilíndrica del pin y la superficie del hombro. Todas ellas obedecen a una ley de fricción modificada de Coulomb.

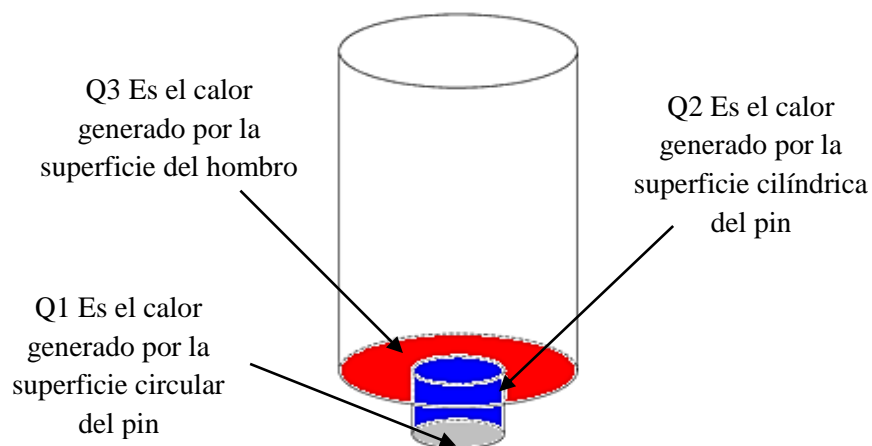


Figura 4.12 Calor generado por la geometría del pin y del hombro
(Fuente: El autor)

a) **Calor generado por la superficie circular del pin:** Para calcular la generación de calor de la superficie circular del pin, la cual rota respecto al centro axial de la herramienta, se toma de ella un pequeño segmento infinitesimal, figura 4.13 (Mishra, 2014, p.22).

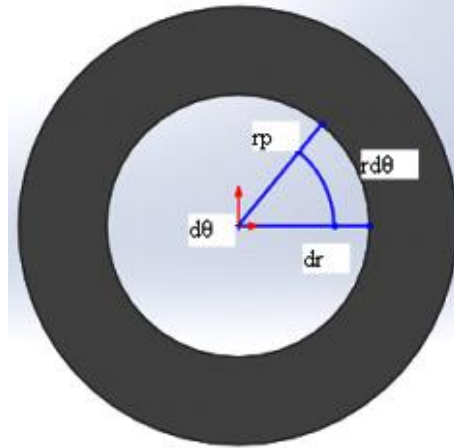


Figura 4.13 Segmentos infinitesimales $d\theta$, dr , $r d\theta$ en el área circular del pin de radio r_p

(Fuente: El autor)

Este segmento infinitesimal posee la siguiente formulación:

$$dA = r_p * d\theta * dr \quad \text{Ecuación (4.22)}$$

En donde el segmento infinitesimal contribuye con una fuerza y un torque:

$$\frac{dF}{dA} = \tau_{\text{contacto}} \text{ Entonces } dF = \tau_{\text{contacto}} * dA \quad \text{Ecuación (4.23)}$$

$$dM = r_p * dF \quad \text{Ecuación (4.24)}$$

La generación de calor de este segmento está dada por:

$$dQ_1 = w * r_p * dF \quad \text{Ecuación (4.25)}$$

Remplazando dF y dA , se obtiene:

$$dQ_1 = w * r_p * \tau_{contacto} * dA$$

$$dQ_1 = w * r_p * \tau_{contacto} * r_p * d\theta * dr$$

$$dQ_1 = w * r_p^2 * \tau_{contacto} * d\theta * dr \quad \text{Ecuación (4.26)}$$

Dónde:

r : Es el radio del área circular del pin

w : Es la velocidad angular

$r * d\theta * dr$: son segmentos infinitesimales en el área circular del pin.

Para encontrar la generación de calor sobre la superficie circular del pin se integra la ecuación 4.26.

$$\int dQ_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_p} w * r_p^2 * \tau_{contacto} * dr * d\theta$$

$$Q_1 = \int_0^{2\pi} \frac{w * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3} d\theta$$

$$Q_1 = \frac{2\pi * w * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3} \quad \text{Ecuación (4.27)}$$

Dónde:

Q_1 : Calor generado por la superficie circular del pin [W]

w : Velocidad de rotación [rd/s]

r_p : Radio del pin [m]

$\tau_{contacto}$: Tensión cortante [N/m²]

b) Calor generado por la superficie cilíndrica del pin: Para calcular la generación de calor de la superficie cilíndrica del pin, la cual rota respecto al centro axial de la herramienta, se toma de ella un pequeño segmento infinitesimal, figura 4.14 (Mishra, 2014, p.23).

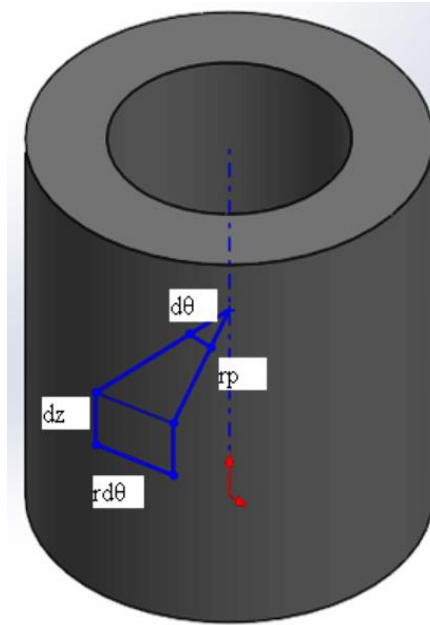


Figura 4.14 Segmentos infinitesimales $d\theta$, dz , $rd\theta$ en el área cilíndrica del pin de radio r_p
(Fuente: El autor)

Este segmento infinitesimal posee la siguiente formulación:

$$dA = r_p * d\theta * dz \quad \text{Ecuación (4.28)}$$

Que contribuye con una fuerza de:

$$dF = \tau_{contacto} dA \quad \text{Ecuación (4.29)}$$

La generación de calor de este segmento está dada por la siguiente ecuación:

$$dQ_2 = w * r_p * dF \quad \text{Ecuación (4.30)}$$

Remplazando dF y dA , se obtiene:

$$dQ_2 = w * r_p * \tau_{contacto} * dA$$

$$dQ_2 = w * r_p * \tau_{contacto} * r_p * d\theta * dz$$

$$dQ_2 = w * r_p^2 * \tau_{contacto} * d\theta * dz \quad \text{Ecuación (4.31)}$$

Dónde:

r : Es el radio del área circular del pin

w : Es la velocidad angular

$r * d\theta * dr$: son segmentos infinitesimales en el área circular del pin.

Para encontrar la generación de calor sobre la superficie cilíndrica del pin se integra la ecuación 4.31.

$$\int dQ_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_p} w * r_p^2 * \tau_{contacto} * dz * d\theta$$

$$Q_2 = \int_0^{2\pi} w * r_p^2 * \tau_{contacto} * H_p * d\theta$$

$$Q_2 = 2\pi * w * r_p^2 * \tau_{contacto} * H_p \quad \text{Ecuación (4.32)}$$

Dónde:

Q_2 : Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

w : Velocidad de rotación [rd/s]

r_p : Radio del pin [m]

$\tau_{contacto}$: Tensión cortante [N/m²]

H_p : Altura o longitud del pin [m]

c) Calor generado por la superficie circular del hombro:

Para calcular la generación de calor de la superficie circular del hombro, la cual rota respecto al centro axial de la herramienta, se toma de ella un pequeño segmento infinitesimal, figura 4.15 (Mishra, 2014, p.23).

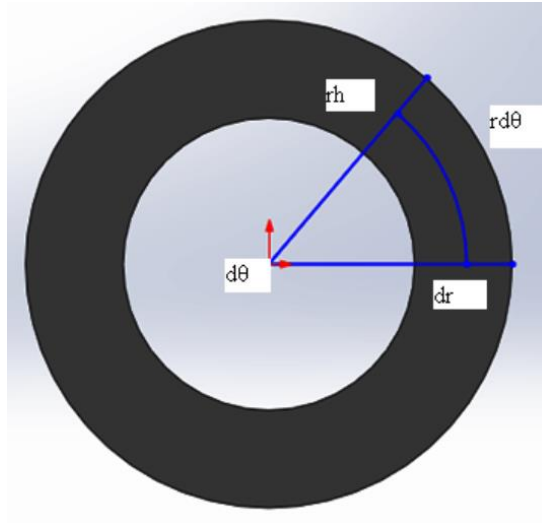


Figura 4.15 Segmentos infinitesimales $d\theta$, dr , $rd\theta$ en el área circular del hombro
(Fuente: El autor)

Este segmento infinitesimal posee la siguiente formulación:

$$dA = r_h * d\theta * dr \quad \text{Ecuación (4.33)}$$

En donde el segmento infinitesimal contribuye con una fuerza y un torque:

$$dF = \tau_{contacto} * dA \quad \text{Ecuación (4.34)}$$

$$dM = r_h * dF \quad \text{Ecuación (4.35)}$$

La generación de calor de este segmento está dada por:

$$dQ_3 = w * r_h * dF \quad \text{Ecuación (4.36)}$$

Remplazando dF y dA , se obtiene:

$$dQ_3 = w * r_h * \tau_{contacto} * dA, dQ_3$$

$$dQ_3 = w * r_h * \tau_{contacto} * r_h * d\theta * dr$$

$$dQ_3 = w * r_h^2 * \tau_{contacto} * d\theta * dr \quad \text{Ecuación (4.37)}$$

Dónde:

r : Es el radio del área circular del pin

w : Es la velocidad angular

$r * d\theta * dr$: son segmentos infinitesimales en el área circular del pin.

Para encontrar la generación de calor sobre la superficie circular del hombro se integra la ecuación 4.37.

$$\int dQ_3 = \int_0^{2\pi} \int_{r_p}^{r_h} w * r^2 * \tau_{contacto} * dr * d\theta$$

$$Q_3 = \int_0^{2\pi} \frac{w * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3} d\theta$$

$$Q_3 = \frac{2\pi * w * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3} \quad \text{Ecuación (4.38)}$$

Dónde:

Q_3 : Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

w : Velocidad de rotación [rd/s]

$\tau_{contacto}$: Tensión cortante [N/m²]

r_h : Radio del hombro [m]

r_p : Radio del pin [m]

d) Calor total generado (Q_{total})

Para encontrar el flujo de calor total, sobre la línea de soldadura, se suman: el calor generado por la superficie circular y la superficie cilíndrica del pin, y el calor generado por la superficie circular del hombro, ecuación 4.39.

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \text{Ecuación (4.39)}$$

Dónde:

Q_{total} : Flujo de calor total en la línea de soldadura [W]

Q_1 : Calor generado por la superficie circular del pin [W]

Q_2 : Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

Q_3 : Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

La presión de contacto se determinó con la ecuación 4.40.

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación (4.40)}$$

Dónde:

P : Presión de contacto [N/m^2]

F : Fuerza aplicada [N], 0.6KN, valor propuesto por: Dr. Ing. Hernán. G. Svoboda

A : Área de contacto [m^2]

El área se determinó con la ecuación 4.41:

$$A = \pi * (r_h^2 - r_p^2) \quad \text{Ecuación (4.41)}$$

Dónde:

A : Área de contacto [m^2]

r_h : Es el radio del hombro [m]

r_p : Radio del pin [m]

Reemplazando en la ecuación 4.41, para el radio del hombro de 6.5mm y el radio del pin de 2.5mm.

$$A = \pi * [(6.5 * 10^{-3}m)^2 - (2.5 * 10^{-3}m)^2] = 1.13 * 10^{-4}m^2$$

Reemplazando en la ecuación 4.40, para el valor del área de $1.13 * 10^{-4}m^2$.

$$P = \frac{600N}{1.13 * 10^{-4}m^2} = 5.30Mpa$$

Reemplazando en la ecuación 4.21, para el valor del coeficiente de fricción (μ) para el aluminio-acero es de: 0.47, tabla 4.9.

$$\tau_{contacto} = 0.47 * 5.30Mpa$$

$$\tau_{contacto} = 2.49Mpa$$

Determinación del calor en las diferentes probetas

Probeta A: Para una velocidad de rotación de 500 rpm

$$w_A = \frac{500rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * \frac{1min}{60s} = \frac{52.36rad}{s}$$

Q_1 : Calor generado por la superficie circular del pin [W]

$$Q_1 = \frac{2\pi * w_A * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3}$$

$$Q_1 = \frac{2\pi * \frac{52.36rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^3 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{3}$$

$$Q_1 = 4.27W$$

Q_2 : Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

$$Q_2 = 2\pi * w_A * r_p^2 * \tau_{contacto} * Hp$$

$$Q_2 = 2\pi * \frac{52.36rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^2 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} * 3 * 10^{-3}m$$

$$Q_2 = 15.38W$$

Q_3 : Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

$$Q_3 = \frac{2\pi * W_A * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3}$$

$$Q_3 = \frac{2\pi * \frac{52.36rad}{s} * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} ((6.5 * 10^{-3}m)^3 - (2.5 * 10^{-3}m)^3)}{3}$$

$$Q_3 = 70.82W$$

Q_{totalA} : Flujo de calor total en la línea de soldadura [W]

$$Q_{totalA} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{totalA} = 4.27W + 15.38W + 70.82W$$

$$Q_{totalA} = 90.47W$$

Probeta B: Para una velocidad de rotación de 680 rpm

$$W_B = \frac{680rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * \frac{1min}{60s} = \frac{71.21rad}{s}$$

Q_1 : Calor generado por la superficie circular del pin [W]

$$Q_1 = \frac{2\pi * W_B * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3}$$

$$Q_1 = \frac{2\pi * \frac{71.21rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^3 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{3}$$

$$Q_1 = 5.81W$$

Q_2 : Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

$$Q_2 = 2\pi * w_B * r_p^2 * \tau_{contacto} * Hp$$

$$Q_2 = 2\pi * \frac{71.21rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^2 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} * 3 * 10^{-3}m$$

$$Q_2 = 20.92W$$

Q_3 : Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

$$Q_3 = \frac{2\pi * w_B * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3}$$

$$Q_3 = \frac{2\pi * \frac{71.21rad}{s} * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} ((6.5 * 10^{-3}m)^3 - (2.5 * 10^{-3}m)^3)}{3}$$

$$Q_3 = 96.31W$$

Q_{totalB} : Flujo de calor total en la línea de soldadura [W]

$$Q_{totalB} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{totalB} = 5.81W + 20.92W + 96.31W$$

$$Q_{totalB} = 123.04W$$

Probeta C: Para una velocidad de rotación de 800 rpm

$$w_C = \frac{800rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * \frac{1min}{60s} = \frac{83.78rad}{s}$$

Q_1 : Calor generado por la superficie circular del pin [W]

$$Q_1 = \frac{2\pi * w_C * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3}$$

$$Q_1 = \frac{2\pi * \frac{83.78rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^3 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{3}$$

$$Q_1 = 6.84W$$

Q_2 : Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

$$Q_2 = 2\pi * w_C * r_p^2 * \tau_{contacto} * Hp$$

$$Q_2 = 2\pi * \frac{83.78rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^2 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} * 3 * 10^{-3}m$$

$$Q_2 = 24.61W$$

Q_3 : Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

$$Q_3 = \frac{2\pi * w_C * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3}$$

$$Q_3 = \frac{2\pi * \frac{83.78rad}{s} * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} ((6.5 * 10^{-3}m)^3 - (2.5 * 10^{-3}m)^3)}{3}$$

$$Q_3 = 113.31W$$

Q_{totalC} : Flujo de calor total en la línea de soldadura [W]

$$Q_{totalC} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{totalC} = 6.84W + 24.61W + 113.31W$$

$$Q_{totalC} = 144.76W$$

Probeta D: Para una velocidad de rotación de 1000 rpm

$$w_D = \frac{1000rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * \frac{1min}{60s} = \frac{104.72rad}{s}$$

Q₁: Calor generado por la superficie circular del pin [W]

$$Q_1 = \frac{2\pi * w_D * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3}$$

$$Q_1 = \frac{2\pi * \frac{104.72rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^3 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{3}$$

$$Q_1 = 8.54W$$

Q₂: Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

$$Q_2 = 2\pi * w_D * r_p^2 * \tau_{contacto} * H_p$$

$$Q_2 = 2\pi * \frac{104.72rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^2 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} * 3 * 10^{-3}m$$

$$Q_2 = 30.76W$$

Q₃: Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

$$Q_3 = \frac{2\pi * w_D * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3}$$

$$Q_3 = \frac{2\pi * \frac{104.72rad}{s} * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} ((6.5 * 10^{-3}m)^3 - (2.5 * 10^{-3}m)^3)}{3}$$

$$Q_3 = 141.64W$$

Q_{totalD} : Flujo de calor total en la línea de soldadura [W]

$$Q_{totalD} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{totalD} = 8.54W + 30.76W + 141.64W$$

$$Q_{totalD} = 180.95W$$

Probeta E: Para una velocidad de rotación de 1250 rpm

$$w_E = \frac{1250rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * \frac{1min}{60s} = \frac{130.89rad}{s}$$

Q_1 : Calor generado por la superficie circular del pin [W]

$$Q_1 = \frac{2\pi * w_E * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3}$$

$$Q_1 = \frac{2\pi * \frac{130.89rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^3 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{3}$$

$$Q_1 = 10.68W$$

Q_2 : Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

$$Q_2 = 2\pi * w_E * r_p^2 * \tau_{contacto} * Hp$$

$$Q_2 = 2\pi * \frac{130.89rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^2 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} * 3 * 10^{-3}m$$

$$Q_2 = 38.45W$$

Q₃: Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

$$Q_3 = \frac{2\pi * w_E * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3}$$

$$Q_3 = \frac{2\pi * \frac{130.89rad}{s} * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} ((6.5 * 10^{-3}m)^3 - (2.5 * 10^{-3}m)^3)}{3}$$

$$Q_3 = 177.05W$$

Q_{totalE}: Flujo de calor total en la línea de soldadura [W]

$$Q_{totalE} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{totalE} = 10.68W + 38.45W + 177.05W$$

$$Q_{totalE} = 226.18W$$

Probeta F: Para una velocidad de rotación de 1600 rpm

$$w_F = \frac{1600rev}{min} * \frac{2\pi rad}{1rev} * \frac{1min}{60s} = \frac{167.55rad}{s}$$

Q₁: Calor generado por la superficie circular del pin [W]

$$Q_1 = \frac{2\pi * w_F * r_p^3 * \tau_{contacto}}{3}$$

$$Q_1 = \frac{2\pi * \frac{167.55rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^3 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2}}{3}$$

$$Q_1 = 13.67W$$

Q₂: Calor generado por la superficie cilíndrica del pin [W]

$$Q_2 = 2\pi * w_F * r_p^2 * \tau_{contacto} * Hp$$

$$Q_2 = 2\pi * \frac{167.55rad}{s} * (2.5 * 10^{-3}m)^2 * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} * 3 * 10^{-3}m$$

$$Q_2 = 49.22W$$

Q₃: Calor generado por la superficie circular del hombro [W]

$$Q_3 = \frac{2\pi * w_F * \tau_{contacto} (r_h^3 - r_p^3)}{3}$$

$$Q_3 = \frac{2\pi * \frac{167.55rad}{s} * 2.49 * 10^6 \frac{N}{m^2} ((6.5 * 10^{-3}m)^3 - (2.5 * 10^{-3}m)^3)}{3}$$

$$Q_3 = 226.62W$$

Q_{totalF}: Flujo de calor total en la línea de soldadura [W]

$$Q_{totalF} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{totalF} = 13.67W + 49.22W + 226.62W$$

$$Q_{totalF} = 289.51W$$

4.1.5.6 Temperatura alcanzada en el proceso de soldadura FSW (T)

La transferencia de calor a través de un material fijo está vinculada a la distribución de temperatura dentro del cuerpo. La misma caracteriza el estado térmico de un cuerpo y determina su grado de calentamiento, figura 4.16.

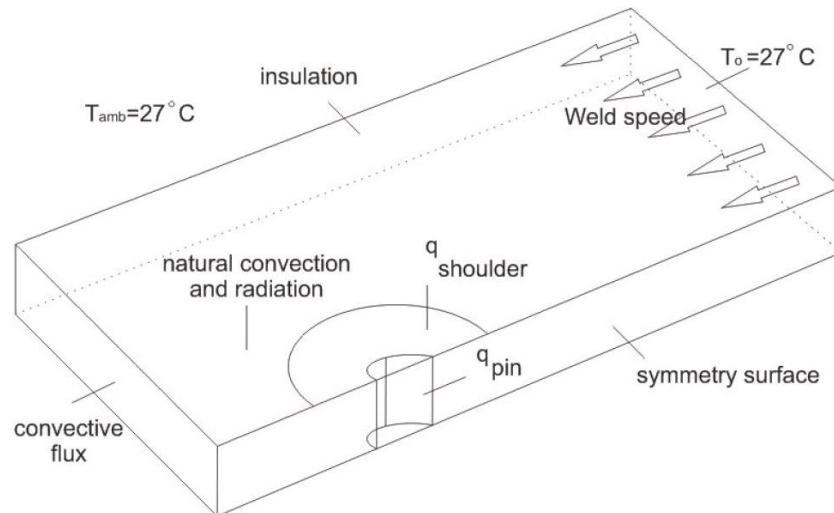


Figura 4.16 Condiciones térmicas del proceso FSW

(Fuente: Mohamadreza, 2013, p.32)

La temperatura se calculó con la ecuación 4.42 (Yilbas & Sahin, 2014, p.7).

$$T = T_0 + \frac{Q}{4\pi K t} * K_0 * K_1 \quad \text{Ecuación (4.42)}$$

Dónde:

T : Temperatura máxima alcanzada por el proceso de soldadura FSW [K]

T_0 : Temperatura inicial del metal base [K]

Q : Calor generado por el contacto entre la herramienta y el metal base [W]

K : Conductividad térmica [W/m K]

t : Espesor de las placas a soldar [m]

K_0 : Se determina con la ecuación 4.43.

$$K_0 = \exp(-\lambda V_a \xi) \quad \text{Ecuación (4.43)}$$

Dónde:

V_a : Velocidad de avance o de soldadura [m/s]

ξ : Longitud de soldadura [m]

λ : Se determina con la ecuación 4.44.

$$\lambda = \frac{cp}{2K} \quad \text{Ecuación (4.44)}$$

Dónde:

cp : Es el calor específico del aluminio [J/KgK]

K : Es la conductividad térmica del aluminio [W/mK]

K_1 : Se determina con la ecuación 4.45.

$$K_1 = \frac{\exp(-\lambda V_a R)}{R} \quad \text{Ecuación (4.45)}$$

Dónde:

V_a : Velocidad de avance o de soldadura [m/s]

λ : Se determina con la ecuación 4.44.

R : Se determina con la ecuación 4.46.

$$R = \sqrt{\xi^2 + y^2 + z^2} \quad \text{Ecuación (4.46)}$$

La temperatura inicial del metal base, se tomó de 22 grados centígrados, se transforma a grados kelvin con la ecuación 4.47.

$$T_K = T_C + 273.15 \quad \text{Ecuación (4.47)}$$

Dónde:

T_K : Temperatura en grados kelvin [K]

T_C : Temperatura en grados centígrados [C]

Reemplazando en la ecuación 4.45.

$$T_K = 22 + 273.15 = 295.15K$$

Reemplazando en la ecuación 4.44, para los siguientes valores: calor específico de 896J/KgK y conductividad térmica de 166.9W/mK.

$$\lambda = \frac{896 \frac{J}{kgK}}{2 * 166.9 \frac{W}{mK}} = 2.684$$

Reemplazando en la ecuación 4.43, para los siguientes valores: velocidad de avance de 0.001m/s y una longitud de soldadura de 0.3m.

$$K_0 = \exp(-2.684 * 0.001 * 0.3) = 0.99$$

Reemplazando en la ecuación 4.44, para los valores de longitud de soldadura de 0.3m, ancho de las placas 0.1m y una profundidad de 0.003m.

$$R = \sqrt{0.3m^2 + 0.1m^2 + 0.003m^2}$$

$$R = 0.316m$$

Reemplazando en la ecuación 4.45, para los siguientes valores: velocidad de avance de 0.001m/s y R igual a 0.316m.

$$K_1 = \frac{\exp(-2.684 * 0.001 * 0.316)}{0.316}$$

$$K_1 = 3.162$$

Determinación de la temperatura obtenida en cada probeta

Probeta A: Para un calor total de: $Q_{totalA} = 90.47W$

$$T_A = T_0 + \frac{Q_A}{4\pi Kt} * K_0 * K_1$$

$$T_A = 295.15K + \frac{90.47W}{4\pi(166.9 \frac{W}{mK})(0.003m)} * 0.99 * 3.162$$

$$T_A = 345.54K$$

Probeta B: Para un calor total de: $Q_{totalB} = 123.04W$

$$T_B = T_0 + \frac{Q_B}{4\pi Kt} * K_0 * K_1$$

$$T_B = 295.15K + \frac{123.04W}{4\pi(166.9 \frac{W}{mK})(0.003m)} * 0.99 * 3.162$$

$$T_B = 361.88K$$

Probeta C: Para un calor total de: $Q_{totalC} = 144.76W$

$$T_C = T_0 + \frac{Q_C}{4\pi Kt} * K_0 * K_1$$

$$T_C = 295.15K + \frac{144.76W}{4\pi(166.9 \frac{W}{mK})(0.003m)} * 0.99 * 3.162$$

$$T_C = 372.78K$$

Probeta D: Para un calor total de: $Q_{totalD} = 180.95W$

$$T_D = T_0 + \frac{Q_D}{4\pi Kt} * K_0 * K_1$$

$$T_D = 295.15K + \frac{180.95W}{4\pi(166.9 \frac{W}{mK})(0.003m)} * 0.99 * 3.162$$

$$T_D = 390.94K$$

Probeta E: Para un calor total de: $Q_{totalE} = 226.18W$

$$T_E = T_0 + \frac{Q_E}{4\pi Kt} * K_0 * K_1$$

$$T_E = 295.15K + \frac{226.18W}{4\pi(166.9 \frac{W}{mK})(0.003m)} * 0.99 * 3.162$$

$$T_E = 413.63K$$

Probeta F: Para un calor total de: $Q_{totalF} = 289.51W$

$$T_F = T_0 + \frac{Q_F}{4\pi Kt} * K_0 * K_1$$

$$T_F = 295.15K + \frac{289.51W}{4\pi(166.9 \frac{W}{mK})(0.003m)} * 0.99 * 3.162$$

$$T_F = 445.41K$$

En la tabla 4.9, se presenta un resumen de los valores del calor y la temperatura alcanzada con el proceso FSW y la verificación de que no exceda la temperatura de fusión del aluminio ($T_{fusión}: 660C = 933.15K$).

Tabla 4.9 Calor y temperatura generado en el cordón de soldadura

Probeta	Velocidad de rotación (V_r)	Calor total (Q_{total})	Temperatura del proceso (T)	$T < T_{fusión}$
A	500rpm	90.47W	345.54K	<u>Si cumple</u>
B	680rpm	123.04W	361.88K	<u>Si cumple</u>
C	800rpm	144.76W	372.78K	<u>Si cumple</u>
D	1000rpm	180.95W	390.94K	<u>Si cumple</u>
E	1250rpm	226.18W	413.63K	<u>Si cumple</u>
F	1600rpm	289.51W	445.41K	<u>Si cumple</u>

(Fuente: El autor)

4.1.6 Fijación de las probetas

Para efectuar la unión, con el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) se debe sujetar las probetas mediante un dispositivo de sujeción, figura 4.17, con la finalidad de evitar los desplazamientos longitudinal y transversal de las mismas, al instante de realizar la introducción y avance de la herramienta no consumible sobre la línea de soldadura.

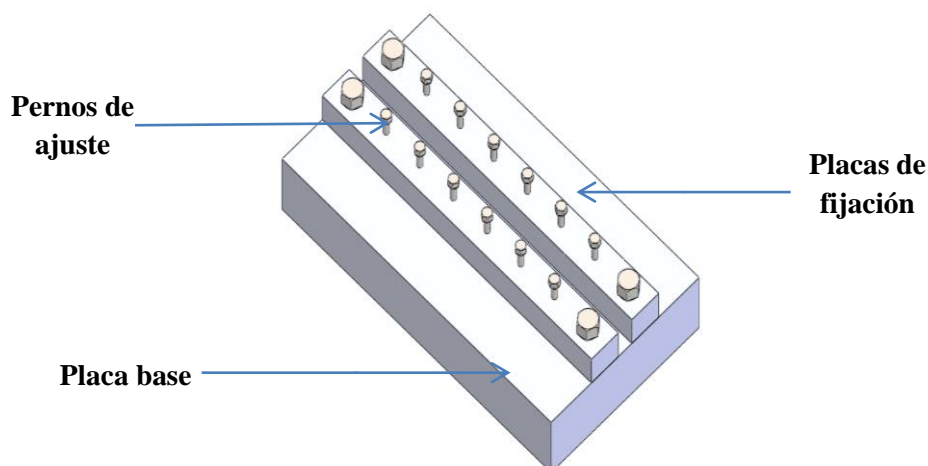


Figura 4.17 Sujeción utilizada para fijar las placas

(Fuente: El autor)


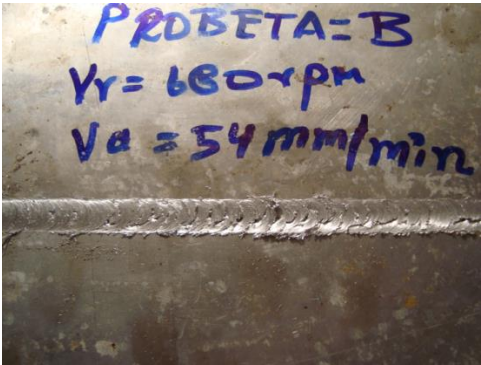
4.1.7 Soldar las probetas

Tabla 4.10 Soldadura de la probeta A

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
SOLDADURA DE LAS PLACAS					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°01					
Probeta:	A	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:			27°C	Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Talleres Industriales			Fecha de ejecución:	26/09/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3		
Instrumento:			Máquina Fresadora		
Método:			Soldadura por Fricción Agitación (FSW)		
ESPECIFICACIONES DE LA FRESADORA					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			31,5 a 1600		
Velocidad de avance (mm/min):			40 a 2000		
Potencia del motor (Hp):			10		
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL A UNIR					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		100*300*3mm
PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA FSW					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			500rpm		
Velocidad de avance (mm/min):			54mm/min		
RESULTADOS DE LA SOLDADURA FSW					
IMÁGENES					
SOLDADURA DE LAS PROBETAS 					

(Fuente: El autor)

Tabla 4.11 Soldadura de la probeta B

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
SOLDADURA DE LAS PLACAS					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°02					
Probeta:	B	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Talleres Industriales			Fecha de ejecución:	26/09/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3		
Instrumento:			Máquina Fresadora		
Método:			Soldadura por Fricción Agitación (FSW)		
ESPECIFICACIONES DE LA FRESADORA					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			31,5 a 1600		
Velocidad de avance (mm/min):			40 a 2000		
Potencia del motor (Hp):			10		
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL A UNIR					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		100*300*3mm
PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA FSW					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			680rpm		
Velocidad de avance (mm/min):			54mm/min		
RESULTADOS DE LA SOLDADURA FSW					
IMÁGENES					
SOLDADURA DE LAS PROBETAS 					



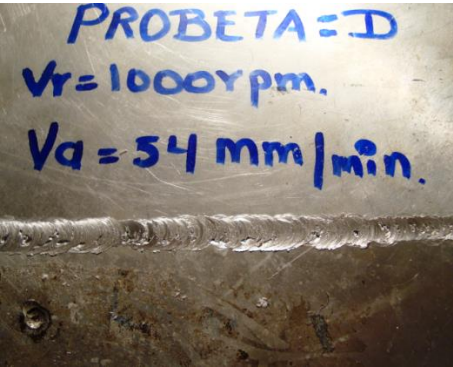
(Fuente: El autor)

Tabla 4.12 Soldadura de la probeta C

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
SOLDADURA DE LAS PLACAS					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°03					
Probeta:	C	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Talleres Industriales			Fecha de ejecución:	26/09/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3		
Instrumento:			Máquina Fresadora		
Método:			Soldadura por Fricción Agitación (FSW)		
ESPECIFICACIONES DE LA FRESADORA					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			31,5 a 1600		
Velocidad de avance (mm/min):			40 a 2000		
Potencia del motor (Hp):			10		
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL A UNIR					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		100*300*3mm
PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA FSW					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			800rpm		
Velocidad de avance (mm/min):			54mm/min		
RESULTADOS DE LA SOLDADURA FSW					
IMÁGENES					
SOLDADURA DE LAS PROBETAS					
					

(Fuente: El autor)

Tabla 4.13 Soldadura de la probeta D

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
SOLDADURA DE LAS PLACAS					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°04					
Probeta:	D	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Talleres Industriales			Fecha de ejecución:	26/09/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3		
Instrumento:			Máquina Fresadora		
Método:			Soldadura por Fricción Agitación (FSW)		
ESPECIFICACIONES DE LA FRESADORA					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			31,5 a 1600		
Velocidad de avance (mm/min):			40 a 2000		
Potencia del motor (Hp):			10		
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL A UNIR					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		100*300*3mm
PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA FSW					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			1000rpm		
Velocidad de avance (mm/min):			54mm/min		
RESULTADOS DE LA SOLDADURA FSW					
IMÁGENES					
SOLDADURA DE LAS PROBETAS					
					

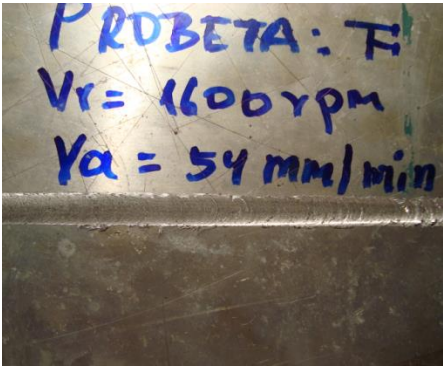
(Fuente: El autor)

Tabla 4.14 Soldadura de la probeta E

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
SOLDADURA DE LAS PLACAS						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
SOLDADURA: N°05						
Probeta:	E	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Temperatura ambiente del lugar:			27°C	Flujo de aire del medio:	Estático	
Lugar de realización:	Talleres Industriales			Fecha de ejecución:	26/09/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Fresadora			
Método:			Soldadura por Fricción Agitación (FSW)			
ESPECIFICACIONES DE LA FRESADORA						
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			31,5 a 1600			
Velocidad de avance (mm/min):			40 a 2000			
Potencia del motor (Hp):			10			
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL A UNIR						
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK	
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB	
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²	
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		100*300*3mm	
PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA FSW						
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			1250rpm			
Velocidad de avance (mm/min):			54mm/min			
RESULTADOS DE LA SOLDADURA FSW						
IMÁGENES						
SOLDADURA DE LAS PROBETAS						
						

(Fuente: El autor)

Tabla 4.15 Soldadura de la probeta F

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
SOLDADURA DE LAS PLACAS					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°06					
Probeta:	F	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:			27°C	Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Talleres Industriales			Fecha de ejecución:	26/09/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3		
Instrumento:			Máquina Fresadora		
Método:			Soldadura por Fricción Agitación (FSW)		
ESPECIFICACIONES DE LA FRESADORA					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			31,5 a 1600		
Velocidad de avance (mm/min):			40 a 2000		
Potencia del motor (Hp):			10		
ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL A UNIR					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		100*300*3mm
PARÁMETROS DEL PROCESO DE SOLDADURA FSW					
Velocidad de rotación del usillo (rpm):			1600rpm		
Velocidad de avance (mm/min):			54mm/min		
RESULTADOS DE LA SOLDADURA FSW					
IMÁGENES					
SOLDADURA DE LAS PROBETAS					
					

(Fuente: El autor)

4.1.8 Dimensiones de las probetas para Ensayos Mecánicos

4.1.8.1 Ensayo de Tracción

En la figura 4.15, se muestra las dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción, las cuales están basadas bajo la norma AWS D17.3.

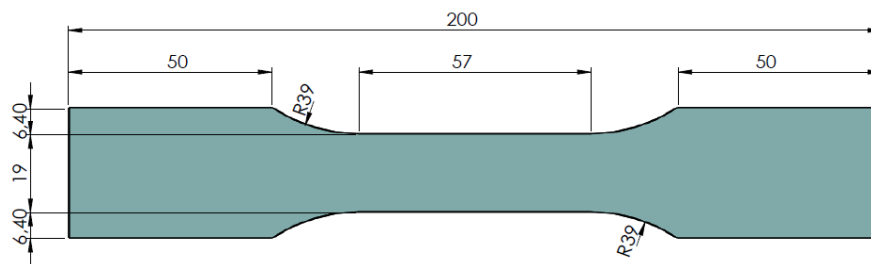


Figura 4.18 Dimensiones de la probeta para el ensayo de Tracción

(Fuente: El autor)

4.1.8.2 Ensayo de Doblado

En la figura 4.16, se muestra las dimensiones de la probeta para el ensayo de doblado, las cuales están basadas bajo la norma API 1104.

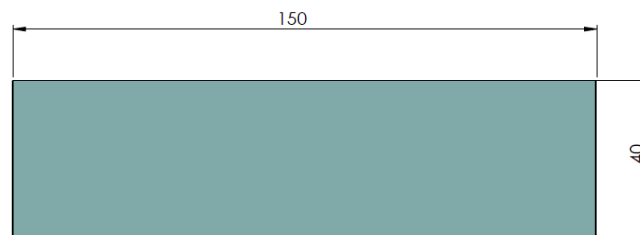


Figura 4.19 Dimensiones de la probeta para el ensayo de Doblado



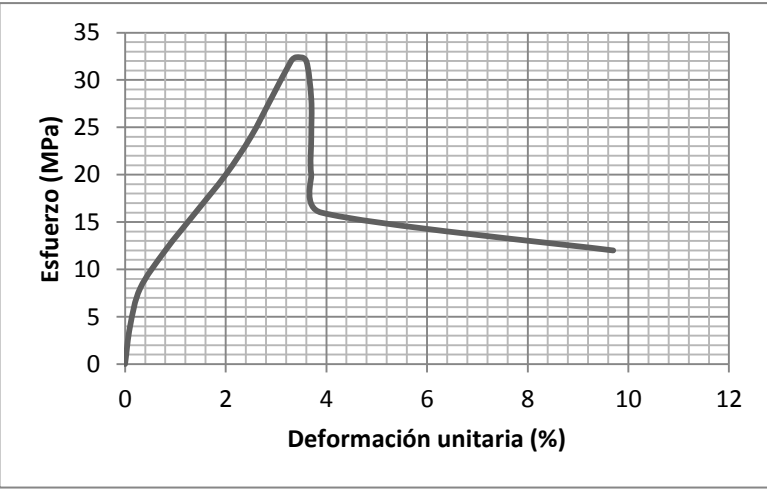

(Fuente: El autor)

4.1.8.2 Ensayo de Dureza

Para determinar la dureza en Brinell del cordón de soldadura, se aplicó la norma ASTM E-10, las dimensiones para la probeta de dureza fueron las mismas de la probeta de doblado, con la excepción de que estas fueron más pulidas.



4.1.9 Ensayos Mecánicos

Tabla 4.16 Ensayo de tracción de la probeta A

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	A	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Resistencia (MPa):	32.4		Carga de Ruptura (N):	1271		
IMÁGENES						
GRÁFICO ESFUERZO vs PORCENTAJE DE ALARGAMIENTO					PROBETA ENSAYADA	
						
Observaciones:						
<p>Del diagrama esfuerzo-deformación, la resistencia a la tracción es de 32.4MPa. El módulo de elasticidad es de 98.18MPa y el coeficiente de Poisson es de 0.33, el valor de la resistencia de fluencia se determina por el método de compensación, donde se traza una recta paralela a la porción rectilínea de la curva, y es compensada hacia la derecha en una cantidad establecida, que en el caso normal es 0.20% de deformación unitaria (0.002). La intersección de esta línea y la curva de esfuerzo deformación definen la resistencia del material para este caso: 8MPa.</p>						



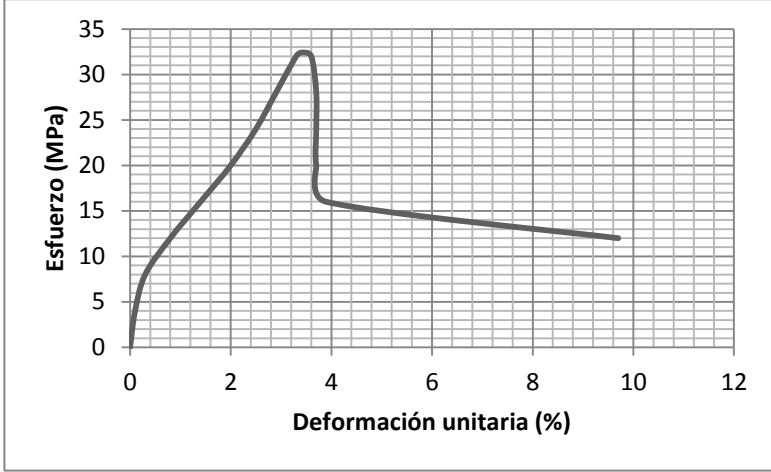

(Fuente: El autor)

Tabla 4.17 Análisis del ensayo de tracción de la probeta A

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	A	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Área (mm²):	40.1		Carga de Ruptura (N):	1271		
Deformación unitaria (%):			3.3			
CÁLCULOS						
Resistencia a la tensión:						
$S_{ut} = \frac{P_{max}}{A_o} = \frac{1271N}{40.1mm^2} = 32.4MPa$						
Deformación unitaria:						
$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 = 3.3 \%$						
Módulo de elasticidad o módulo de Young:						
$E = \frac{S_{ut}}{\varepsilon} = \frac{32.4MPa}{0.033} = 98.18MPa$						
Coeficiente de Poisson:						
$\varepsilon_x = \frac{dx}{lx} = \frac{0.3}{2} = 0.15$						
$\varepsilon_y = -\frac{dy}{ly} = -\frac{0.1}{2} = -0.05$						
$\mu = \left| -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| -\frac{0.05}{0.15} \right| = 0.33$						



(Fuente: El autor)

Tabla 4.18 Ensayo de tracción de la probeta B

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°02						
Probeta:	B	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Resistencia (MPa):	26.1		Carga de Ruptura (N):	1024		
IMÁGENES						
GRÁFICO ESFUERZO vs DEFORMACIÓN UNITARIA					PROBETA ENSAYADA	
						
Observaciones:						
Del diagrama esfuerzo-deformación unitaria para la aleación de aluminio 6061, la resistencia a la tensión es de 26.1MPa, el módulo de elasticidad o módulo de Young es de 40.15MPa y el coeficiente de Poisson es de 0.33, del diagrama se observa que no hay un punto de fluencia marcado, el valor de la resistencia de fluencia se determina por el método de compensación, donde se traza una recta paralela a la porción rectilínea de la curva, y es compensada hacia la derecha en una cantidad establecida, que en el caso normal es 0.20% de deformación unitaria (0.002). La intersección de esta línea y la curva de esfuerzo deformación definen la resistencia del material para este caso: 7MPa.						



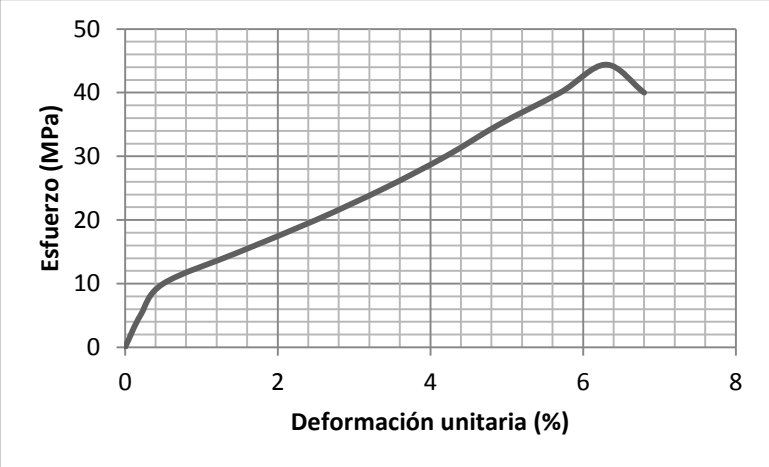

(Fuente: El autor)

Tabla 4.19 Análisis del ensayo de tracción de la probeta B

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	B	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Área (mm²):	26.1		Carga de Ruptura (N):	1024		
Deformación unitaria (%):			6.5			
CÁLCULOS						
Resistencia a la tensión:						
$S_{ut} = \frac{P_{max}}{A_o} = \frac{1024N}{40.1mm^2} = 26.1MPa$						
Deformación unitaria:						
$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 = 6.5 \%$						
Módulo de elasticidad o módulo de Young:						
$E = \frac{S_{ut}}{\varepsilon} = \frac{26.1MPa}{0.065} = 40.15MPa$						
Coeficiente de Poisson:						
$\varepsilon_x = \frac{dx}{lx} = \frac{0.3}{2} = 0.15$						
$\varepsilon_y = -\frac{dy}{ly} = -\frac{0.1}{2} = -0.05$						
$\mu = \left| -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| -\frac{0.05}{0.15} \right| = 0.33$						



(Fuente: El autor)

Tabla 4.20 Ensayo de tracción de la probeta C

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°03						
Probeta:	C	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Resistencia (MPa):	44.4		Carga de Ruptura (N):	1707		
IMÁGENES						
GRÁFICO ESFUERZO vs DEFORMACIÓN UNITARIA					PROBETA ENSAYADA	
						
Observaciones:						
Del diagrama esfuerzo-deformación unitaria para la aleación de aluminio 6061, la resistencia a la tensión es de 44.4MPa, el módulo de elasticidad o módulo de Young es de 70.48MPa y el coeficiente de Poisson es de 0.33, del diagrama se observa que no hay un punto de fluencia marcado, el valor de la resistencia de fluencia se determina por el método de compensación, donde se traza una recta paralela a la porción rectilínea de la curva, y es compensada hacia la derecha en una cantidad establecida, que en el caso normal es 0.20% de deformación unitaria (0.002). La intersección de esta línea y la curva de esfuerzo deformación definen la resistencia del material para este caso: 9MPa.						



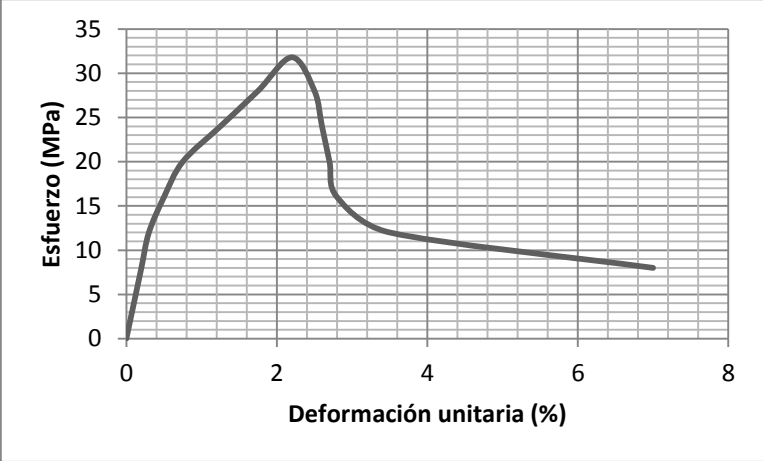

(Fuente: El autor)

Tabla 4.21 Análisis del ensayo de tracción de la probeta C

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	C	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Área (mm²):	40.1		Carga de Ruptura (N):	1707		
Deformación unitaria (%):			6.3			
CÁLCULOS						
Resistencia a la tensión:						
$S_{ut} = \frac{P_{max}}{A_o} = \frac{1707N}{40.1mm^2} = 44.4MPa$						
Deformación unitaria:						
$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 = 6.3 \%$						
Módulo de elasticidad o módulo de Young:						
$E = \frac{S_{ut}}{\varepsilon} = \frac{44.4MPa}{0.063} = 70.48MPa$						
Coeficiente de Poisson:						
$\varepsilon_x = \frac{dx}{lx} = \frac{0.3}{2} = 0.15$						
$\varepsilon_y = -\frac{dy}{ly} = -\frac{0.1}{2} = -0.05$						
$\mu = \left| -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| -\frac{0.05}{0.15} \right| = 0.33$						



(Fuente: El autor)

Tabla 4.22 Ensayo de tracción de la probeta D

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°04						
Probeta:	D	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Resistencia (MPa):	31.8		Carga de Ruptura (N):	1244		
IMÁGENES						
GRÁFICO ESFUERZO vs DEFORMACIÓN UNITARIA					PROBETA ENSAYADA	
						
Observaciones:						
Del diagrama esfuerzo-deformación unitaria para la aleación de aluminio 6061, la resistencia a la tensión es de 31.8MPa, el módulo de elasticidad o módulo de Young es de 144.55MPa y el coeficiente de Poisson es de 0.33, del diagrama se observa que no hay un punto de fluencia marcado, el valor de la resistencia de fluencia se determina por el método de compensación, donde se traza una recta paralela a la porción rectilínea de la curva, y es compensada hacia la derecha en una cantidad establecida, que en el caso normal es 0.20% de deformación unitaria (0.002). La intersección de esta línea y la curva de esfuerzo deformación definen la resistencia del material para este caso: 13MPa.						



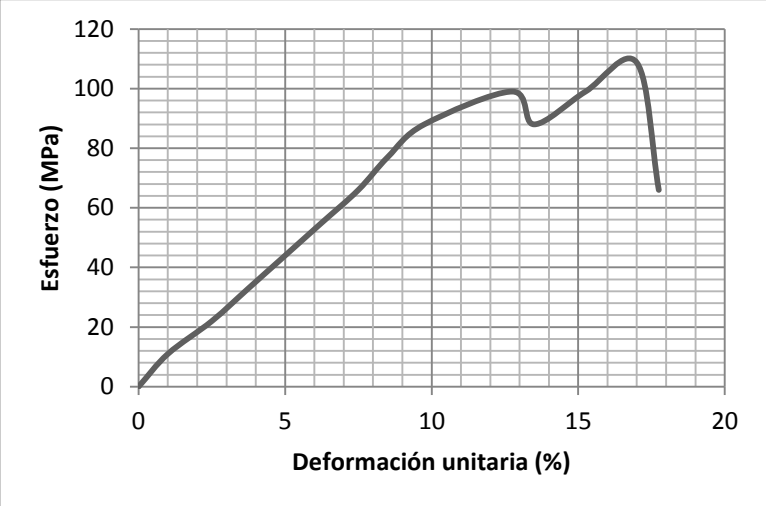

(Fuente: El autor)

Tabla 4.23 Análisis del ensayo de tracción de la probeta D

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	D	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Área (mm²):	40.1		Carga de Ruptura (N):	1244		
Deformación unitaria (%):			2.2			
CÁLCULOS						
Resistencia a la tensión:						
$S_{ut} = \frac{P_{max}}{A_o} = \frac{1244N}{40.1mm^2} = 31.8MPa$						
Deformación unitaria:						
$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 = 2.2 \%$						
Módulo de elasticidad o módulo de Young:						
$E = \frac{S_{ut}}{\varepsilon} = \frac{31.8MPa}{0.22} = 144.55MPa$						
Coeficiente de Poisson:						
$\varepsilon_x = \frac{dx}{lx} = \frac{0.3}{2} = 0.15$						
$\varepsilon_y = -\frac{dy}{ly} = -\frac{0.1}{2} = -0.05$						
$\mu = \left| -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| -\frac{0.05}{0.15} \right| = 0.33$						



(Fuente: El autor)

Tabla 4.24 Ensayo de tracción de la probeta E

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°05						
Probeta:	E	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Resistencia (MPa):	108.7		Carga de Ruptura (N):	4320		
IMÁGENES						
GRÁFICO ESFUERZO vs DEFORMACIÓN UNITARIA					PROBETA ENSAYADA	
						
Observaciones:						
Del diagrama esfuerzo-deformación unitaria para la aleación de aluminio 6061, la resistencia a la tensión es de 108.7MPa, el módulo de elasticidad o módulo de Young es de 639.41MPa y el coeficiente de Poisson es de 0.33, del diagrama se observa que no hay un punto de fluencia marcado, el valor de la resistencia de fluencia se determina por el método de compensación, donde se traza una recta paralela a la porción rectilínea de la curva, y es compensada hacia la derecha en una cantidad establecida, que en el caso normal es 0.20% de deformación unitaria (0.002). La intersección de esta línea y la curva de esfuerzo deformación definen la resistencia del material para este caso: 82MPa.						

(Fuente: El autor)

Tabla 4.25 Análisis del ensayo de tracción de la probeta E

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	E	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Área (mm²):	40.1		Carga de Ruptura (N):	4320		
Deformación unitaria (%):			17			
CÁLCULOS						
Resistencia a la tensión:						
$S_{ut} = \frac{P_{max}}{A_o} = \frac{4320N}{40.1mm^2} = 108.7MPa$						
Deformación unitaria:						
$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 = 17 \%$						
Módulo de elasticidad o módulo de Young:						
$E = \frac{S_{ut}}{\varepsilon} = \frac{108.7MPa}{0.17} = 639.41MPa$						
Coeficiente de Poisson:						
$\varepsilon_x = \frac{dx}{lx} = \frac{0.3}{2} = 0.15$						
$\varepsilon_y = -\frac{dy}{ly} = -\frac{0.1}{2} = -0.05$						
$\mu = \left| -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| -\frac{0.05}{0.15} \right| = 0.33$						



(Fuente: El autor)

Tabla 4.26 Ensayo de tracción de la probeta F

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°06						
Probeta:	F	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Resistencia (MPa):	97.2		Carga de Ruptura (N):	3900		
IMÁGENES						
GRÁFICO ESFUERZO vs DEFORMACIÓN UNITARIA					PROBETA ENSAYADA	
						
Observaciones:						
Del diagrama esfuerzo-deformación unitaria para la aleación de aluminio 6061, la resistencia a la tensión es de 97.2MPa, el módulo de elasticidad o módulo de Young es de 413.62MPa y el coeficiente de Poisson es de 0.33, del diagrama se observa que no hay un punto de fluencia marcado, el valor de la resistencia de fluencia se determina por el método de compensación, donde se traza una recta paralela a la porción rectilínea de la curva, y es compensada hacia la derecha en una cantidad establecida, que en el caso normal es 0.20% de deformación unitaria (0.002). La intersección de esta línea y la curva de esfuerzo deformación definen la resistencia del material para este caso: 8MPa.						

(Fuente: El autor)

Tabla 4.27 Análisis del ensayo de tracción de la probeta E

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	F	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:			AWS D17.3			
Instrumento:			Máquina Universal de Ensayos			
Método:			Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Área (mm²):	40.1		Carga de Ruptura (N):	3900		
Deformación unitaria (%):			23.5			
CÁLCULOS						
Resistencia a la tensión:						
$S_{ut} = \frac{P_{max}}{A_o} = \frac{3900N}{40.1mm^2} = 97.2MPa$						
Deformación unitaria:						
$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100 = 23.5 \%$						
Módulo de elasticidad o módulo de Young:						
$E = \frac{S_{ut}}{\varepsilon} = \frac{97.2MPa}{0.235} = 413.62MPa$						
Coeficiente de Poisson:						
$\varepsilon_x = \frac{dx}{lx} = \frac{0.3}{2} = 0.15$						
$\varepsilon_y = -\frac{dy}{ly} = -\frac{0.1}{2} = -0.05$						
$\mu = \left| -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| = \left| -\frac{0.05}{0.15} \right| = 0.33$						

(Fuente: El autor)

Tabla 4.28 Ensayo de doblado de la probeta A

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE DOBLADO					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°01					
Probeta:	A	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	07/11/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			API 1104		
Instrumento:			Máquina Universal		
Método:			Doblado de soldadura		
ESPECIFICACIONES DE LA PROBETA					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		80*200*3mm
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO					
Carga máxima:			2kg		
Porcentaje de deformación plástica:			3.3%		
IMÁGENES					
PROBETA DOBLADA					
					
Observaciones:					
Se verifico con el ensayo de doblado, que la probeta A tiene una pobre ductilidad, por las siguientes razones: el cordón de soldadura poseía defectos (falta de penetración, raíz de la soldadura con porosidades, soldadura no homogénea), por la razón que el aporte de calor es muy poco, debido a la baja velocidad de rotación de la herramienta.					

(Fuente: El autor)

Tabla 4.29 Ensayo de doblado de la probeta B




		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE DOBLADO					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°02					
Probeta:	B	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	07/11/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			API 1104		
Instrumento:			Máquina Universal		
Método:			Doblado de soldadura		
ESPECIFICACIONES DE LA PROBETA					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		80*200*3mm
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO					
Carga máxima:			6kg		
Porcentaje de deformación plástica:			6.5%		
IMÁGENES					
PROBETA DOBLADA					
					
Observaciones:					
La probeta B la ductilidad se mejora, porque se reduce los defectos en el cordón de soldadura (falta de penetración, raíz de la soldadura con porosidades, soldadura no homogénea), al aumentar la velocidad de rotación de la herramienta de soldadura, generando una mayor fricción entre elementos, y por ello el aumento del calor.					
(Fuente: El autor)					

Tabla 4.30 Ensayo de doblado de la probeta C

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE DOBLADO					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°03					
Probeta:	C	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	07/11/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			API 1104		
Instrumento:			Máquina Universal		
Método:			Doblado de soldadura		
ESPECIFICACIONES DE LA PROBETA					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		80*200*3mm
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO					
Carga máxima:			9kg		
Porcentaje de deformación plástica:			6.3%		
IMÁGENES					
PROBETA DOBLADA					
					
Observaciones:					
El cordón de soldadura de la probeta C, tiene un aumento de ductilidad en comparación con la probeta B, porque la velocidad de rotación de la herramienta de soldadura permite en la junta, un flujo de calor mayor por esta razón se reduce los defectos de soldadura (falta de penetración, raíz de la soldadura con porosidades, soldadura no homogénea).					

(Fuente: El autor)

Tabla 4.31 Ensayo de doblado de la probeta D

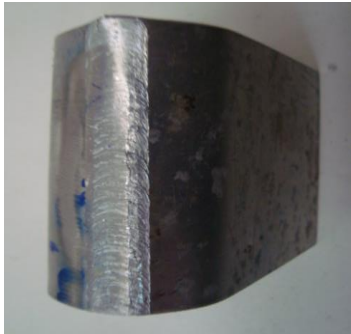
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE DOBLADO					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°04					
Probeta:	D	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	07/11/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			API 1104		
Instrumento:			Máquina Universal		
Método:			Doblado de soldadura		
ESPECIFICACIONES DE LA PROBETA					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		80*200*3mm
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO					
Carga máxima:			8kg		
Porcentaje de deformación plástica:			2.2%		
IMÁGENES					
PROBETA DOBLADA					
					
Observaciones:					
Se verifico con el ensayo de doblado, que la probeta D tiene una reducción de la ductilidad, comparando con la probeta C, por las siguientes razones: el cordón de soldadura poseía defectos (falta de penetración y raíz de la soldadura con porosidades), por la razón que la presión de soldadura no fue la correcta.					

(Fuente: El autor)

Tabla 4.32 Ensayo de doblado de la probeta E




		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE DOBLADO					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°05					
Probeta:	E	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	07/11/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			API 1104		
Instrumento:			Máquina Universal		
Método:			Doblado de soldadura		
ESPECIFICACIONES DE LA PROBETA					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		80*200*3mm
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO					
Carga máxima:			20kg		
Porcentaje de deformación plástica:			17%		
IMÁGENES					
PROBETA DOBLADA					
					
Observaciones:					
El cordón de soldadura de la probeta E, tiene una excelente ductilidad porque la velocidad de rotación de la herramienta de soldadura genera en la junta la fricción necesaria para tener el flujo de calor adecuado para la unión de las placas, por esta razón se genera menos defectos de soldadura lo que permite el aumento de la ductilidad.					
(Fuente: El autor)					

Tabla 4.33 Ensayo de doblado de la probeta F

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ENSAYO DE DOBLADO					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
SOLDADURA: N°06					
Probeta:	F	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Temperatura ambiente del lugar:		27°C		Flujo de aire del medio:	Estático
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	07/11/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO					
Realizado bajo la norma:			API 1104		
Instrumento:			Máquina Universal		
Método:			Doblado de soldadura		
ESPECIFICACIONES DE LA PROBETA					
Densidad (ρ):		2710 Kg/m ³	Calor específico:		896J/KgK
Temperatura de fusión:		933K	Dureza:		65HB
Conductividad térmica (K)		230W/mK	Resistencia a tensión:		24 Kg/mm ²
Geometría:		Rectangular	Dimensiones:		80*200*3mm
RESULTADOS DEL ENSAYO DE DOBLADO					
Carga máxima:			50kg		
Porcentaje de deformación plástica:			23.5%		
IMÁGENES					
PROBETA DOBLADA					
					
Observaciones:					
El cordón de soldadura de la probeta F, tiene una excelente ductilidad porque el aporte de calor permite la mezcla de las partes, esto se debe a una alta velocidad de rotación de la herramienta.					




(Fuente: El autor)

Tabla 4.34 Ensayo de dureza de la probeta A

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE DUREZA						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°01						
Probeta:	A	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	21/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10		
Instrumento:				Durómetro		
Método:				Dureza Brinell		
Tipo de penetrador				Penetrador de bola (Ø =2.5mm)		
Carga aplicada				1839N (187.46Kg)		
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Huellas	Diámetro de la huella	Promedio del diámetro de la huella		Dureza de cada huella	Dureza de la probeta	
1	1.785mm	1.77mm		64.99HB	66.01 HB	
	1.755mm					
2	1.72mm	1.7475mm		67.03HB		
	1.775mm					
IMÁGENES						
CALCULO DE LA DUREZA				PROBETA ENSAYADA		
$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ $HB1 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.77^2})}$ $HB1 = 64.99$ $HB2 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.7475^2})}$ $HB2 = 67.03$						
Observaciones:						
La dureza de la probeta A es de 66.01HB, comparando con la dureza del metal base de 65HB, se verifica que a baja velocidad de rotación de la herramienta, no permite el cambio de la dureza en el cordón de soldadura.						




(Fuente: El autor)

Tabla 4.35 Ensayo de dureza de la probeta B

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE DUREZA						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°02						
Probeta:	B	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	21/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10		
Instrumento:				Durómetro		
Método:				Dureza Brinell		
Tipo de penetrador				Penetrador de bola (Ø =2.5mm)		
Carga aplicada				1839N (187.46Kg)		
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Huellas	Diámetro de la huella	Promedio del diámetro de la huella		Dureza de cada huella	Dureza de la probeta	
1	1.79mm	1.795mm		62.82HB	62.29 HB	
	1.8mm					
2	1.805mm	1.8075mm		61.76HB		
	1.81mm					
IMÁGENES						
CALCULO DE LA DUREZA				PROBETA ENSAYADA		
$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$						
$HB1 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.795^2})}$						
$HB1 = 62.82$						
$HB2 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.8075^2})}$						
$HB2 = 61.76$						
Observaciones:						
La dureza de la probeta B es de 62.29 HB, comparando con la dureza del metal base de 65HB, se concluye que con el aumento de la velocidad de rotación se afecta la dureza del cordón de soldadura por el aumento del calor.						




(Fuente: El autor)

Tabla 4.36 Ensayo de dureza de la probeta C

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE DUREZA						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°03						
Probeta:	C	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	21/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10		
Instrumento:				Durómetro		
Método:				Dureza Brinell		
Tipo de penetrador				Penetrador de bola (Ø =2.5mm)		
Carga aplicada				1839N (187.46Kg)		
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Huellas	Diámetro de la huella	Promedio del diámetro de la huella		Dureza de cada huella	Dureza de la probeta	
1	1.75mm	1.85mm		58.32HB	61.44 HB	
	1.95mm					
2	1.745mm	1.775mm		64.55HB		
	1.805mm					
IMÁGENES						
CALCULO DE LA DUREZA				PROBETA ENSAYADA		
$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$						
$HB1 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.85^2})}$						
$HB1 = 58.32$						
$HB2 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.775^2})}$						
$HB2 = 64.55$						
Observaciones:						
La dureza de la probeta C es de 61.44 HB, comparando con la dureza del metal base de 65HB, se verifica que se reduce la dureza del cordón de soldadura porque la velocidad de rotación de la herramienta de soldadura, genera más entrada de calor en la junta.						




(Fuente: El autor)

Tabla 4.37 Ensayo de dureza de la probeta D

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE DUREZA						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°04						
Probeta:	D	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	21/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10		
Instrumento:				Durómetro		
Método:				Dureza Brinell		
Tipo de penetrador				Penetrador de bola (Ø =2.5mm)		
Carga aplicada				1839N (187.46Kg)		
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Huellas	Diámetro de la huella	Promedio del diámetro de la huella		Dureza de cada huella	Dureza de la probeta	
1	1.83mm	1.875mm		56.40HB	58.77 HB	
	1.92mm					
2	1.835mm	1.815mm		61.14HB		
	1.795mm					
IMÁGENES						
CALCULO DE LA DUREZA				PROBETA ENSAYADA		
$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ $HB1 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.875^2})}$ $HB1 = 56.40$ $HB2 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.815^2})}$ $HB2 = 61.14$						
Observaciones:						
La dureza de la probeta D es de 58.77 HB, comparando con la dureza del metal base de 65HB, se concluye que con el aumento de la velocidad de rotación se afecta la dureza del cordón de soldadura por el aumento del calor.						



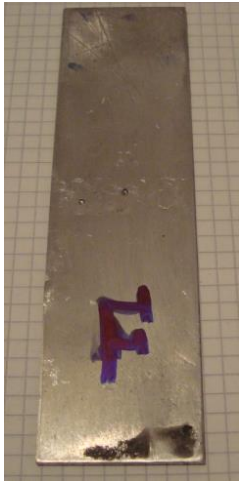
(Fuente: El autor)

Tabla 4.38 Ensayo de dureza de la probeta E

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE DUREZA						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°05						
Probeta:	E	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	21/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10		
Instrumento:				Durómetro		
Método:				Dureza Brinell		
Tipo de penetrador				Penetrador de bola (Ø =2.5mm)		
Carga aplicada				1839N (187.46Kg)		
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Huellas	Diámetro de la huella	Promedio del diámetro de la huella		Dureza de cada huella	Dureza de la probeta	
1	1.81mm	1.8275mm		60.12HB	60.63 HB	
	1.845mm					
2	1.81mm	1.815mm		61.14HB		
	1.82mm					
IMÁGENES						
CALCULO DE LA DUREZA				PROBETA ENSAYADA		
$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ $HB1 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.8275^2})}$ $HB1 = 60.12$ $HB2 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.815^2})}$ $HB2 = 61.14$						
Observaciones:						
La dureza de la probeta E es de 60.63 HB, comparando con la dureza del metal base de 65HB, se concluye que con el aumento de la velocidad de rotación se afecta la dureza del cordón de soldadura por el aumento del calor.						

(Fuente: El autor)

Tabla 4.39 Ensayo de dureza de la probeta F



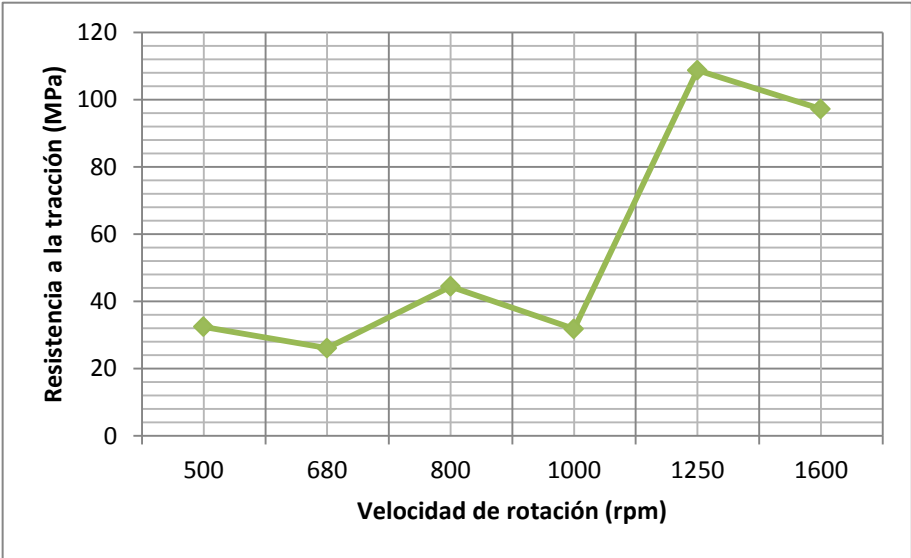
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ENSAYO DE DUREZA						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
ENSAYO: N°06						
Probeta:	F	Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de materiales ESPOCH			Fecha de ejecución:	21/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10		
Instrumento:				Durómetro		
Método:				Dureza Brinell		
Tipo de penetrador				Penetrador de bola (Ø =2.5mm)		
Carga aplicada				1839N (187.46Kg)		
RESULTADOS DE LA PRUEBA						
Huellas	Diámetro de la huella	Promedio del diámetro de la huella		Dureza de cada huella	Dureza de la probeta	
1	1.875mm	1.9mm		54.54HB	55.47 HB	
	1.925mm					
2	1.855mm	1.875mm		56.40HB		
	1.895mm					
IMÁGENES						
CALCULO DE LA DUREZA				PROBETA ENSAYADA		
$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$						
$HB1 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.9^2})}$						
$HB1 = 54.54$						
$HB2 = \frac{2 * 187.46}{\pi 2.5(2.5 - \sqrt{2.5^2 - 1.875^2})}$						
$HB2 = 56.40$						
Observaciones:						
La dureza de la probeta F es de 55.47 HB, comparando con la dureza del metal base de 65HB, se concluye que con el aumento de la velocidad de rotación se afecta la dureza del cordón de soldadura por el aumento del calor.						

(Fuente: El autor)

4.2. Interpretación de los resultados obtenidos

4.2.1. Ensayo de Tensión





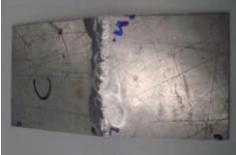

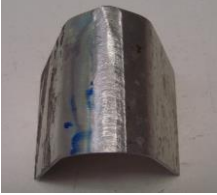
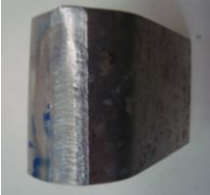
Tabla 4.40 Interpretación de los resultados del ensayo de tracción

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN							
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS							
Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba			Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta		
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014		
PARÁMETROS DEL ENSAYO							
Realizado bajo la norma:				AWS D17.3			
Instrumento:				Máquina Universal de Ensayos			
Método:				Deformación Controlada			
RESULTADOS DE LA PRUEBA							
Probetas:	A	B	C	D	E	F	
Sut (MPa)	32.4	26.1	44.4	31.8	108.7	97.2	
EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN CON RESPECTO A LA RESISTENCIA							
							
Observaciones:							
<p>Se obtuvo una mayor resistencia del cordón de soldadura, para altas velocidades de rotación de la herramienta de soldadura, porque se produce mayor flujo de calor, lo que facilita el mezclado de las partes.</p>							

(Fuente: El autor)

4.2.2. Ensayo de Doblado



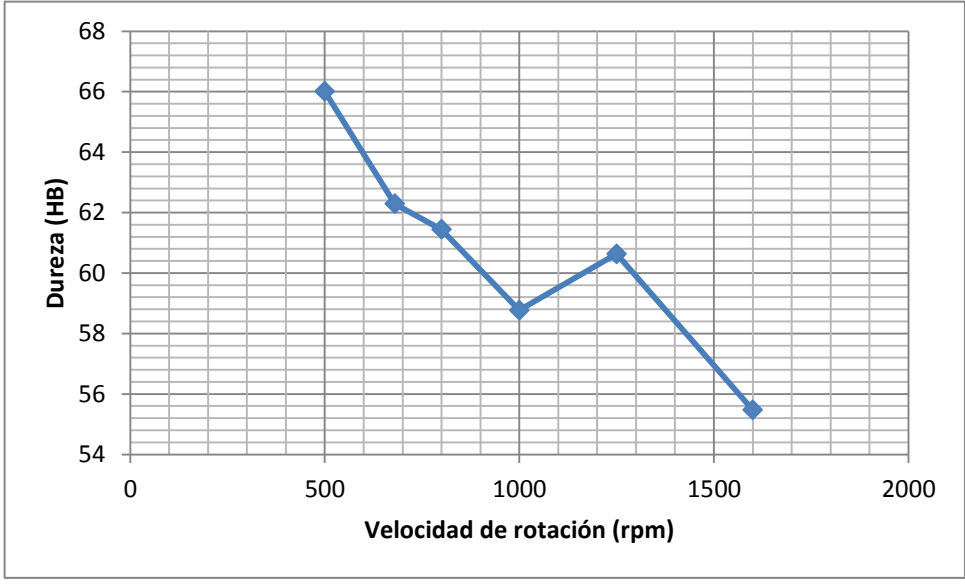
Tabla 4.41 Interpretación de los resultados del ensayo de doblado

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DOBLADO			
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS			
Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba	Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales ESPOCH	Fecha de ejecución:	07/11/2014
PARÁMETROS DEL ENSAYO			
Realizado bajo la norma:		API 1104	
Instrumento:		Máquina Universal	
Método:		Doblado de soldadura	
RESULTADOS DE LA PRUEBA			
Probeta: A		Probeta: B	
Doblado de soldadura		Doblado de soldadura	
			
Porcentaje de deformación plástica: 3.3%		Porcentaje de deformación plástica: 6.5%	
Probeta: C		Probeta: D	
Doblado de soldadura		Doblado de soldadura	
			
Porcentaje de deformación plástica: 6.3%		Porcentaje de deformación plástica: 2.2%	
Probeta: E		Probeta: F	
Doblado de soldadura		Doblado de soldadura	
			
Porcentaje de deformación plástica: 17%		Porcentaje de deformación plástica: 23.5%	
Observaciones:			
<p>Se obtuvo una mayor ductilidad del cordón de soldadura en la probeta F, porque tiene un porcentaje de deformación plástica de 23.5% mayor a las demás probetas, debido al incremento de la velocidad de rotación de la herramienta de soldadura, generando un mayor flujo de calor, lo que permite que los componentes se junte con mayor facilidad.</p>			

(Fuente: El autor)

4.2.3. Ensayo de Dureza

Tabla 4.42 Interpretación de los resultados del ensayo de dureza

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DUREZA							
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS							
Autorizado por:		Ing. Mg. Cesar Arroba		Realizado por:		Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:		Laboratorio de materiales ESPOCH		Fecha de ejecución:		21/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO							
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10			
Instrumento:				Durómetro			
Método:				Dureza Brinell			
RESULTADOS DE LA PRUEBA							
Probetas:		A	B	C	D	E	F
HB		66.01	62.29	61.44	58.77	60.63	55.47
EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN vs LA DUREZA							
							
Observaciones:							
Con el diagrama dureza vs velocidad de rotación se concluye que la dureza del cordón de soldadura, se reduce a medida que se aumenta la velocidad de rotación de la herramienta, porque el material se vuelve más dúctil.							
(Fuente: El autor)							

4.3. Análisis de los resultados obtenidos

4.3.1. Análisis del ensayo de Tensión


Tabla 4.43 Análisis de los resultados del ensayo de tracción

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba			Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				AWS D17.3		
Instrumento:				Máquina Universal de Ensayos		
Método:				Deformación Controlada		
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS						
Parámetros de soldadura					Cordón de soldadura	Metal base
N°	Velocidad de rotación	Velocidad de avance	Calor	Temperatura	Resistencia última a la tracción	Resistencia última a la tracción
A	500rpm	54mm/min	90.47W	345.54K	32.4 MPa	310 MPa
B	680rpm	54mm/min	123.04W	361.88K	26.1 MPa	310 MPa
C	800rpm	54mm/min	144.76W	372.78K	44.4 MPa	310 MPa
D	1000rpm	54mm/min	180.95W	390.94K	31.8 MPa	310 MPa
E	1250rpm	54mm/min	226.18W	413.63K	108.7 MPa	310 MPa
F	1600rpm	54mm/min	289.51W	445.41K	97.2 MPa	310 MPa
Conclusión:						
<p>Para analizar la resistencia del cordón de soldadura, obtenido mediante el proceso de soldadura por fricción agitación, se comparo con la resistencia del metal base (aleación de aluminio 6061), con lo cual se concluye que la resistencia del cordón de soldadura de las probetas A, B, C y D son muy pobres, por las siguientes razones: para las velocidades de rotación de la herramienta de 500rpm, 680rpm, 800rpm y 1000rpm, no permite generar el calor necesario para facilitar la unión de las partes y permite a que se produzcan defectos de soldadura (porosidad). Se encontró una mejora en la resistencia (108.7 MPa y 97.2MPa) del cordón de soldadura para las probetas E y F, porque la unión se realizo a mayores velocidades de rotación, con lo cual se aumenta el calor que se produce por fricción entre la herramienta y los elementos a juntar.</p>						

(Fuente: El autor)

4.3.2. Análisis del ensayo de Doblado



Tabla 4.44 Análisis de los resultados del ensayo de doblado

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DOBLADO						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba			Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				API 1104		
Instrumento:				Máquina Universal		
Método:				Doblado de soldadura		
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS						
Parámetros de soldadura					Cordón de soldadura	
N°	Velocidad de rotación	Velocidad de avance	Calor	Temperatura	Porcentaje de deformación plástica	
A	500rpm	54mm/min	90.47W	345.54K	3.3%	
B	680rpm	54mm/min	123.04W	361.88K	6.5%	
C	800rpm	54mm/min	144.76W	372.78K	6.3%	
D	1000rpm	54mm/min	180.95W	390.94K	2.2%	
E	1250rpm	54mm/min	226.18W	413.63K	17%	
F	1600rpm	54mm/min	289.51W	445.41K	23.5%	
Conclusión:						
<p>Para analizar la ductilidad del cordón de soldadura, obtenido mediante el proceso de soldadura por fricción agitación, se basó en el porcentaje de deformación plástica, con lo cual se concluye que la ductilidad del cordón de soldadura de las probetas A, B, C y D son muy pobres, por las siguientes razones: para las velocidades de rotación de la herramienta de 500rpm, 680rpm, 800rpm y 1000rpm, no permite generar el calor necesario para facilitar la unión de las partes y permite a que se produzcan defectos de soldadura (porosidad). Se encontró una mejora en la ductilidad del cordón de soldadura para las probetas E y F, porque se obtuvo un mayor porcentaje de deformación plástica (17% y 23.5%), debido a que la unión se realizó a mayores velocidades de rotación, con lo cual se aumenta el calor que se produce por fricción entre la herramienta y los elementos a juntar.</p>						

(Fuente: El autor)

4.3.3. Análisis del ensayo de Dureza

Tabla 4.45 Análisis de los resultados del ensayo de dureza

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
ANÁLISIS DEL ENSAYO DE DUREZA						
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS						
Autorizado por:	Ing. Mg. Cesar Arroba			Realizado por:	Egdo. Wladimir Toapanta	
Lugar de realización:	Laboratorio de Materiales Escuela Politécnica Nacional			Fecha de ejecución:	14/11/2014	
PARÁMETROS DEL ENSAYO						
Realizado bajo la norma:				ASTM E-10		
Instrumento:				Durómetro		
Método:				Dureza Brinell		
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS						
Parámetros de soldadura					Cordón de soldadura	Metal base
N°	Velocidad de rotación	Velocidad de avance	Calor	Temperatura	Dureza Brinell	Dureza Brinell
A	500rpm	54mm/min	90.47W	345.54K	66.01 HB	65 HB
B	680rpm	54mm/min	123.04W	361.88K	62.29 HB	65 HB
C	800rpm	54mm/min	144.76W	372.78K	61.44 HB	65 HB
D	1000rpm	54mm/min	180.95W	390.94K	58.77 HB	65 HB
E	1250rpm	54mm/min	226.18W	413.63K	60.63 HB	65 HB
F	1600rpm	54mm/min	289.51W	445.41K	55.47 HB	65 HB
Conclusión:						
Para analizar la dureza del cordón de soldadura, obtenido mediante el proceso de soldadura por fricción agitación, se comparo con la dureza del metal base (aleación de aluminio 6061), con lo cual se concluye que la dureza del cordón de soldadura de la probeta A no se afecta (66.01 HB), porque la velocidad de rotación de la herramienta es muy baja y no permite que se cree en la junta una temperatura (345.54K) lo suficientemente alta, para crear cambios en la dureza, al incrementar la velocidad de rotación de la herramienta (680 rpm y 800 rpm) en un intervalo pequeño, se puede apreciar cambios en la dureza del cordón de soldadura en las probetas B y C (62.29 HB y 61.44 HB), para velocidades de rotación de la herramienta (1000 rpm, 1250 rpm y 1600rpm) mayores a las anteriores, da lugar a que la dureza se reduzca mas, porque la unión se realizo a mayores flujos de calor y por ende a una mayor temperatura.						

(Fuente: El autor)

4.4. Verificación de la Hipótesis

Hipótesis: Mediante la variación de la velocidad de rotación de la herramienta del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) permitirá mejorar las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio.

Para verificar la hipótesis, se desarrolló la soldadura de las placas de aluminio, variando la velocidad de rotación de la herramienta, para posteriormente realizar los ensayos de tracción, de doblado y de dureza. En la tabla 4.10 se presenta un resumen de la resistencia y la dureza obtenida en las diferentes probetas.

Tabla 4.46 **Resumen de la resistencia obtenida en las diferentes probetas**

Probetas:	Velocidad de avance (Va)	Velocidad de rotación (Vr)	Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza (HB)
A	54mm/min	500rpm	32.4	66.01
B	54mm/min	680rpm	26.1	62.29
C	54mm/min	800rpm	44.4	61.44
D	54mm/min	1000rpm	31.8	58.77
E	54mm/min	1250rpm	108.7	60.63
F	54mm/min	1600rpm	97.2	55.47

(Fuente: El autor)

Los resultados del ensayo de tracción y doblado de soldadura en las diferentes probetas, demuestran que la resistencia y la ductilidad del cordón de soldadura se mejoran al incrementar la velocidad de rotación de la herramienta de soldadura, porque se genera una mayor fricción entre la herramienta y las placas, y por esta razón un mayor flujo de calor, lo que permite un mejor mezclado. Pero en el ensayo de dureza, la velocidad de rotación de la herramienta de soldadura afecta la dureza del cordón de soldadura, porque la unión se transforma más dúctil.

Para verificar el efecto que tiene la velocidad de rotación de la herramienta, sobre las propiedades mecánicas, se determinó la entrada de calor y la temperatura alcanzada en el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW). En las figuras

4.18 y 4.19 se muestran los datos teóricos calculados, sobre el calor generado y la temperatura máxima alcanzada en el proceso de soldadura FSW.

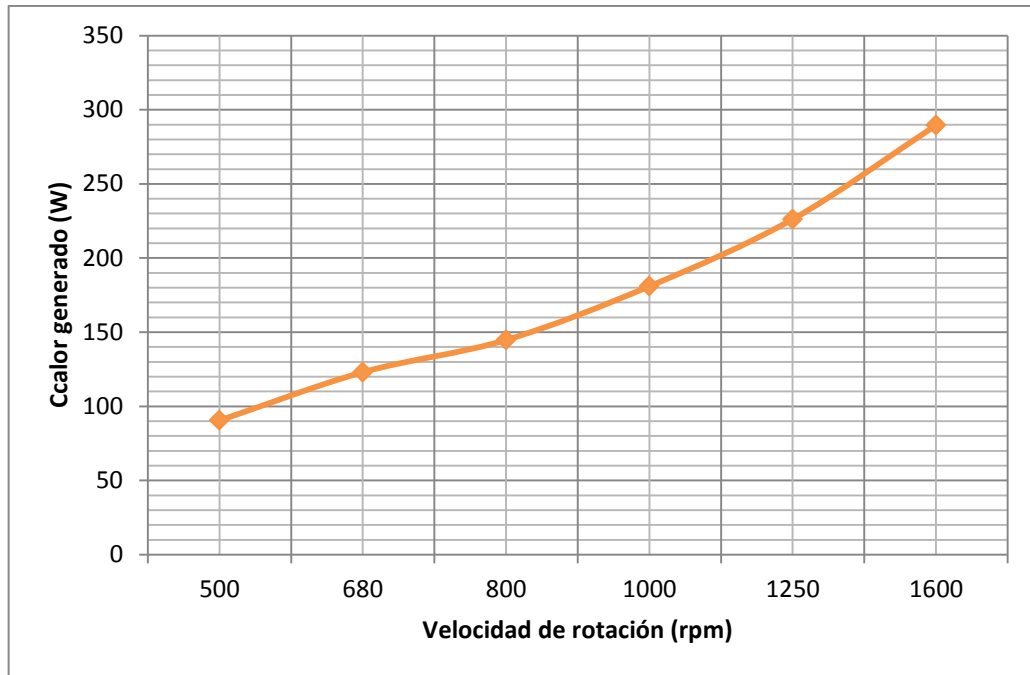


Figura 4.20 Efecto de la velocidad de rotación sobre el calor generado

(Fuente: El autor)

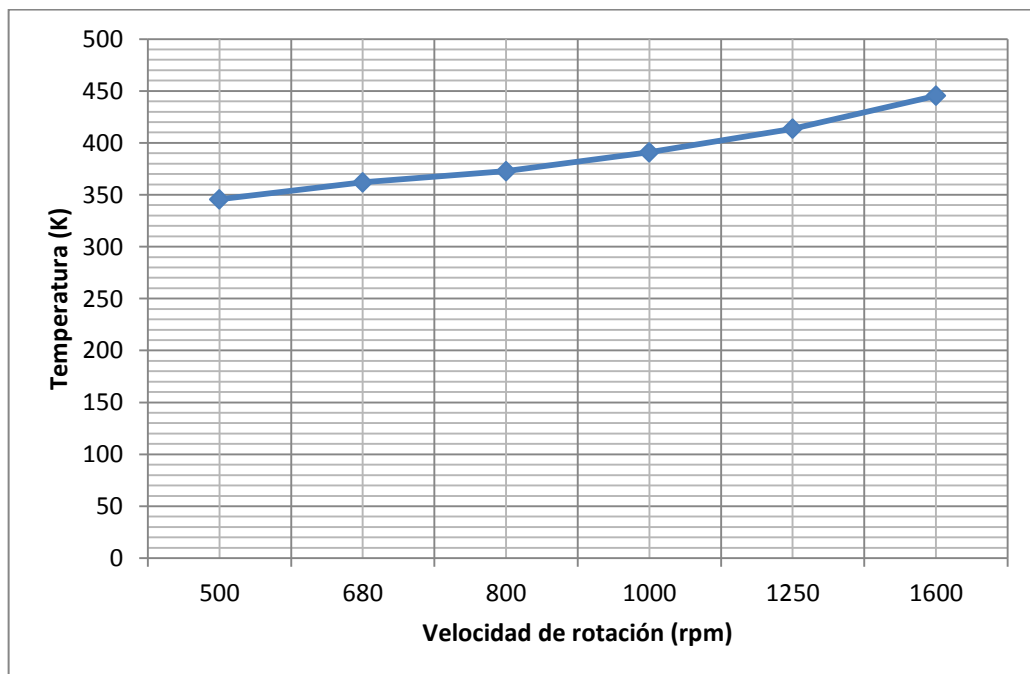


Figura 4.21 Efecto de la velocidad de rotación sobre la temperatura

(Fuente: El autor)

En la tabla 4.47, se hace una comparación entre los valores de la resistencia y la dureza del cordón de soldadura y el metal base.

Tabla 4.47 Comparación entre los valores de la resistencia y la dureza del cordón de soldadura y el metal base.

PROPIEDADES MECÁNICAS				
Cordón de Soldadura			Material Base	
Probetas:	Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza (HB)	Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza (HB)
A	32.4	66.01	310	65
B	26.1	62.29	310	65
C	44.4	61.44	310	65
D	31.8	58.77	310	65
E	108.7	60.63	310	65
F	97.2	55.47	310	65

(Fuente: El autor)

Con la tabla 4.47 se verifica la hipótesis que mediante la variación de la velocidad de rotación de la herramienta del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), permite mejorar la resistencia y ductilidad del cordón de soldadura pero no la dureza.

➤ Demostración de la hipótesis estadísticamente

La distribución Chi-Cuadrado es la razón que existe entre la varianza de la muestra multiplicada por los grados de libertad y la varianza de la población, ecuación 4.48 (Anderson, 2004, p. 28).

$$x^2 = \frac{s^2(gl)}{\sigma^2} \quad \text{Ecuación (4.48)}$$

Dónde:

x^2 : La distribución Chi-Cuadrado

s^2 : La varianza de la muestra

gl : Grados de libertad

σ : La varianza de la población

El termino grados de libertad se refiere al número de observaciones independientes para una fuente de variación menos el número de parámetros independientes estimado al calcular la variación (Anderson, 2004, p. 29).

A continuación se determina la media aritmética, utilizando la ecuación 4.49

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{Ecuación (4.49)}$$

Dónde:

\bar{X} : La media aritmética

n : Tamaño de la muestra

Determinación de la media aritmética para la resistencia a la tracción:

$$\bar{X} = \frac{32.4 + 26.1 + 44.4 + 31.8 + 108.7 + 97.2}{6}$$

$$\bar{X} = 56.76 \text{ MPa}$$

Determinación de la media aritmética para la dureza:

$$\bar{X} = \frac{66.01 + 62.29 + 61.44 + 58.77 + 60.63 + 55.47}{6}$$

$$\bar{X} = 60.77 \text{ HB}$$

Determinación de la varianza, ecuación 4.50 (Anderson, 2004, p. 30).

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad \text{Ecuación (4.50)}$$

Dónde:

s: Varianza maestral

n: Tamaño de la muestra

Tabla 4.48 Cálculo de la varianza para la resistencia

Probetas:	Resistencia	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$	Varianza
1	32.4	-24.36	593.41	$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ $s^2 = \frac{1}{6-1} * 6642.37$
2	26.1	-30.66	940.04	
3	44.4	-12.36	152.77	
4	31.8	-24.96	623.00	
5	108.7	51.94	2697.76	
6	97.2	40.44	1635.39	
Total		0.04	6642.37	$s^2 = 1328.47$

(Fuente: El autor)

Tabla 4.49 Cálculo de la varianza para la dureza

Probetas:	Dureza	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$	Varianza
1	66.01	5.24	27.46	$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ $s^2 = \frac{1}{6-1} * 62.33$
2	62.29	1.52	2.31	
3	61.44	0.67	0.45	
4	58.77	-2	4	
5	60.63	-0.14	0.02	
6	55.47	-5.3	28.09	
Total		-0.01	62.33	$s^2 = 12.466$

(Fuente: El autor)

De la curva de la distribución Chi- Cuadrado, el valor para ambas colas será diferente, así el primer valor que se debe de obtener es el de la calo derecha, el mismo que se obtiene al ubicar en el primera región de la tabla el valor correspondiente al nivel de significancia, que en este caso es de 0.05 y

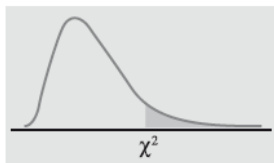
posteriormente se ubica en el lugar de las columnas los correspondientes grados de libertad. Con la tabla 4.47 se determina el valor del Chi-Cuadrado:

$$\chi^2_{0,05,5} = 11.071$$

El valor del Chi-Cuadrado para la cola izquierda se obtiene al calcular el área que se encuentra a la derecha de la cola izquierda entonces: $1-0.05=0.95$

$$\chi^2_{0,95,5} = 1.145$$

Tabla 4.50 **Distribución Chi-Cuadrado**



df\área	0,995	0,99	0,975	0,95	0,9	0,75	0,5	0,25	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005
1	0,000	0,000	0,001	0,004	0,016	0,102	0,455	1,323	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,575	1,386	2,773	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,213	2,366	4,108	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	1,923	3,357	5,385	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	2,675	4,351	6,626	9,236	11,071	12,833	15,086	16,750

(Fuente: M. A. Balmon (2009). Guía práctica de análisis de datos. Pág. 192)

Incorporando estos valores, en la ecuación 4.51, tenemos que el intervalo de 90% de confianza para las 6 probetas soldadas se tendrá:

$$\frac{s^2(n-1)}{X^2\alpha/2} \leq \sigma^2 \leq \frac{s^2(n-1)}{X^21-\alpha/2} \quad \text{Ecuación (4.51)}$$

Reemplazando para los datos de resistencia a la tracción:

$$\frac{1328.47(6-1)}{11.071} \leq \sigma^2 \leq \frac{1328.47(6-1)}{1.145}$$

$$599.97 \leq \sigma^2 \leq 5801.18$$

El valor de la resistencia a la tracción de la aleación de aluminio 6061 es de 310Mpa, este valor no cumple con el intervalo de confianza anterior entonces no cumple la hipótesis.

Reemplazando para los datos de dureza:

$$\frac{12.466(6 - 1)}{11.071} \leq \sigma^2 \leq \frac{12.466(6 - 1)}{1.145}$$

$$5.63 \leq \sigma^2 \leq 54.44$$

El valor de la dureza de la aleación de aluminio 6061 es de 65 HB, este valor no cumple con el intervalo de confianza anterior entonces no cumple la hipótesis.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.3 Conclusiones

- El proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), consta de las siguientes etapas: sujetar las placas de aluminio para evitar desplazamientos, se le impone una cierta velocidad de rotación a la herramienta, posicionamiento de la herramienta sobre la línea de soldadura, introducción lentamente de la herramienta sobre el metal base, calentamiento del área por fricción, se le impone una cierta velocidad de avance a la herramienta, esto permite la agitación o mezclado del material, y retracción de la herramienta. La herramienta de soldadura es el elemento principal del proceso FSW, porque es la parte en rotación y traslación, que produce el calentamiento del material base, y permite la generación del cordón de soldadura.
- Los parámetros del proceso de soldadura FSW que se utilizó, para unir las placas de aluminio 6061 son: la geometría del pin, las velocidades de rotación y avance de la herramienta. Se estudió la velocidad de rotación de la herramienta, porque influye en la generación de calor en la junta y la temperatura alcanzada en el proceso FSW. La velocidad de avance de la herramienta de soldadura, depende de los siguientes aspectos: el espesor de las placas a juntar, el factor de la herramienta (0.1 a 0.4) y el factor del material a unir (para 6061 es 1200). A mayores velocidades de rotación de la herramienta se alcanza mayores flujos de calor y de temperatura, caso contrario a bajas velocidad de rotación de la herramienta se obtiene poco aporte de calor y de temperatura.
- El tipo de junta que se realizó sobre las placas de aluminio 6061 fue a tope, porque permite posteriormente efectuar los ensayos mecánicos.

- Para poder analizar el comportamiento mecánico del cordón de soldadura obtenido, mediante el proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW), en placas de la aleación de aluminio 6061, se realizó los ensayos de tracción, de doblado y de dureza, con estos ensayos mecánicos se concluye que el proceso FSW, permite mejorar la resistencia y la ductilidad pero no la dureza.

3.4 Recomendaciones

- Para realizar la unión de placas de aluminio con el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), se aconseja realizar en una fresadora que tenga velocidades de rotación elevadas (1250rpm en adelante). Las características principales que se debe conocer de la máquina son: velocidad de rotación del usillo (rpm), velocidad de avance (mm/min) y la potencia del motor (Hp).
- La herramienta de soldadura se debe diseñar con un material que tenga alta dureza y resistencia al desgaste superficial, porque es la parte que está en fricción y agitación con las placas a soldar. Las principales dimensiones de la herramienta son: el diámetro y la longitud de la sujeción, el diámetro y la longitud del hombro, diámetro y la longitud del pin.
- Se debe aplicar restricciones de movimiento a las placas a soldar, para ello se puede utilizar algún método de sujeción, este debe cumplir con la función de evitar posibles desplazamientos laterales, longitudinales y transversales, en el momento de la introducción de la herramienta de soldadura y el desplazamiento de la misma, para evitar defectos en el cordón de soldadura.
- Cuando se realice la unión con el proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), tratar de que las placas se encuentre a escuadra y la herramienta se encuentra bien posicionada en el centro de la línea de las placas a soldar.
- Para realizar los ensayos mecánicos, se aconseja utilizar las siguientes normativas: norma AWS D17.3, norma API 1104 y la norma ASTM E-10.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

Determinación de parámetros adecuados para el proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW) mediante el uso de un Software de Elementos Finitos.

6.1 Datos Informativos

Después de realizar el estudio del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), se puede decir que la unión de las partes se efectúa en estado sólido, es decir que los extremos a unir no alcanzan la temperatura de fusión.

Las ventajas que se tiene con el proceso de soldadura FSW son: si se optimiza los parámetros de soldadura, se puede obtener propiedades mecánicas del cordón de soldadura similares a la del metal base, ausencia de defecto de solidificación, porque el material a unir no alcanza la temperatura de fusión y con ello no existe porosidades o fisuración, no hay humos, no emite radiación, no se produce salpicaduras y no produce gases nocivos, lo que permite mejorar la seguridad del trabajador, no se contamina el medio ambiente, y también se tiene reducción en el costo de soldadura por las siguientes razones: no se requiere mecanizado después de la unión, bajos requerimientos de la preparación de la junta, no se requiere una habilidad del operario de soldadura y baja cantidad de energía empleada.

También se verifico que no se aplica gases de protección ni material de aporte, para realizar la unión de las placas de aluminio, para ello se utiliza una pieza mecánica cilíndrica denominada herramienta de soldadura, la cual se divide en tres partes: el pin, el hombro y el sujetador. Las partes de la herramienta de soldadura tienen las siguientes funciones: el pin cónico es el encargado de la generación de calor por fricción y de la agitación o mezclado de las partes a unir,

el hombro ejerce una cierta presión sobre la parte superior de las placas evitando que el material salga expulsado y también contribuye en la generación de calor del proceso FSW y el sujetador permite adaptar a la máquina fresadora.

6.2 Antecedentes de la Propuesta

Actualmente el proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW) no se aplica en nuestro país, por esta razón se carece de información acerca del proceso.

6.3 Justificación

Con el estudio mecánico de la herramienta de soldadura, mediante el uso de un Software de Elementos Finitos, permitirá verificar si el material seleccionado va a trabajar con seguridad, también ayudara a determinar puntos críticos de diseño.

Con el estudio térmico del metal base, mediante el uso de un Software de Elementos Finitos, permitirá verificar que la temperatura alcanzada en la línea de soldadura no sea superior a la temperatura de fusión del aluminio 6061.

Mediante el uso de un Software de Elementos Finitos, permitirá tener soluciones con alto grado de aproximación a las soluciones tanto teóricas como a la realidad. Esto permitirá determinar los parámetros adecuados del proceso de soldadura por Fricción Agitación (FSW).

6.4 Objetivos

6.4.1 Objetivo General

Determinar los parámetros adecuados para el proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW) mediante el uso de un Software de Elementos Finitos.

6.4.2 Objetivos Específicos

- Construir el modelo geométrico y mallado de la herramienta de soldadura en el Software de Elementos Finitos, para la simulación.
- Determinar las condiciones de borde en la herramienta utilizada en el proceso de soldadura FSW, para determinar el factor de seguridad.
- Construir el modelo geométrico y mallado del metal base en el Software de Elementos Finitos, para la simulación.
- Determinar las condiciones de borde del metal base, a diferentes velocidades de rotación de la herramienta, para determinar la temperatura del proceso.
- Analizar los resultados obtenidos del estudio de la herramienta y el estudio del material base, mediante el uso de un Software de Elementos Finitos, para determinar los parámetros adecuados del proceso de Soldadura por Fricción Agitación (FSW).

6.5 Análisis de Factibilidad

Realizar el estudio mecánico de la herramienta de soldadura y el estudio térmico del material base en un Software de Elementos Finitos, si es posible, porque permite tener una gran versatilidad al poder iterar sobre el diseño y optimizar de esa forma el proceso de soldadura FSW.

6.5.1 Análisis Económico

El análisis económico está enfocado en el costo de la utilización del ordenador, para efectuar los estudios en un Software de Elementos Finitos.

6.5.2 Análisis Tecnológico

Utilización del Software de Elementos Finitos.

6.6 Fundamentación

6.6.1 Cargas presentes en la herramienta de soldadura

En el capítulo 4, se determinó las cargas estáticas presentes en la herramienta de soldadura, en la tabla 6.1 se presenta un resumen de estos valores.

Tabla 6.1 Cargas estáticas presentes en la herramienta de soldadura

<u>Cargas en el pin</u>	
Momento torsionante:	5.11 Nm
Fuerza de flexión:	2187.8 N
<u>Carga en el hombro</u>	
Momento torsionante:	1.42 Nm

(Fuente: El autor)

6.6.2 Cargas térmicas presentes en el metal base

Se variara la velocidad de rotación de la herramienta, para explorar el efecto que tiene sobre la temperatura máxima alcanzada en la línea de unión, tabla 6.2

Tabla 6.2 Velocidades de rotación y flujos de calor

Nº	Velocidad de rotación (rpm)	Pin circular Q1 (W)	Pin cilíndrico Q2 (W)	Hombro circular Q3 (W)
A	1000	8,54	30,76	141,64
B	1500	12,82	46,14	212,46
C	2000	17,09	61,52	283,28
D	2500	21,36	76,90	354,10
E	3000	25,63	92,28	424,92
F	3500	29,91	107,66	495,74

(Fuente: El autor)

El coeficiente de transferencia de calor: El coeficiente de transferencia de calor del pin, se determinó con la ecuación 6.1. (Cengel & Ghajar, 2011, p. 435).

$$h = \frac{Nu * k}{D} \quad \text{Ecuación (6.1)}$$

Dónde:

h : Coeficiente de transferencia de calor [W/m²*K]

Nu : Número de Nusselt promedio en lo relativo al flujo cruzado sobre un cilindro

k : Conductividad térmica del aire [W/m*K]

D : Diámetro externo del cilindro [m]

El número de Nusselt promedio en lo relativo al flujo cruzado sobre un cilindro, se utiliza la ecuación 6.2, propuesta por Churchill y Bernstein (Cengel & Ghajar, 2011, p. 434).

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad \text{Ecuación (6.2)}$$

Dónde:

Nu : Número de Nusselt promedio en lo relativo al flujo cruzado sobre un cilindro

Re : El número de Reynolds [adimensional] se determinó con la ecuación 6.3. (Cengel & Ghajar, 2011, p. 435).

Pr : El número de Prandtl [adimensional]

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad \text{Ecuación (6.3)}$$

Dónde:

Re : El número de Reynolds [adimensional]

V : Es la velocidad uniforme del fluido al aproximarse al cilindro [m/s], se determinó con la ecuación 6.4.

D : Diámetro externo del cilindro [m]

ν : La viscosidad cinemática del aire [m²/s]

$$V = \omega * r \quad \text{Ecuación (6.4)}$$

Dónde:

V : Es la velocidad uniforme del fluido al aproximarse al cilindro [m/s]

ω : Velocidad de rotación del cilindro [rad/s]

r : Es el radio del cilindro [m]

El número de Prandtl, se determinó con la ecuación 6.5. (Cengel & Ghajar, 2011, p. 384).

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Ecuación (6.5)}$$

Dónde:

Pr : El número de Prandtl [adimensional]

c_p : Es el calor específico del aire [J/Kg*K]

μ : Es la viscosidad dinámica del aire [Kg/m*s]

k : Conductividad térmica del aire [W/m*K]

Las propiedades del aire a la presión de 1 atm, se presenta en la tabla 6.3.

Tabla 6.3 Propiedades del aire a la presión de 1atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}

(Fuente: Yanus A. Cengel y Afshin J. Ghajar (2011). Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones. Pág. 884)

Reemplazando en la ecuación 6.5, para los valores de la tabla 6.3.

$$Pr = \frac{1007 \frac{J}{Kg \cdot K} * 1.825 * 10^{-5} \frac{Kg}{m \cdot s}}{0.02514 \frac{W}{m \cdot K}} = 0.73$$

Reemplazando en la ecuación 6.4, se determina la velocidad uniforme del fluido al aproximarse al pin, tabla 6.4.

Tabla 6.4 Valores de la velocidad uniforme del fluido al aproximarse al pin

$V = \omega * r$	$\omega(\text{rad/s})$	$rp(\text{m})$	Valor (m/s)
V_A	104.72	0.0025	0,262
V_B	157.08	0.0025	0,393
V_C	209.44	0.0025	0,524
V_D	261.80	0.0025	0,654
V_E	314.15	0.0025	0,785
V_F	366.52	0.0025	0,916

(Fuente: El autor)

Reemplazando en la ecuación 6.3, para las siguientes velocidades de rotación de la herramienta, el diámetro del pin de 0.005m y el valor de la viscosidad cinemática de $1.516 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, se determina el número de Reynolds, tabla 6.5.

Tabla 6.5 Valores del número de Reynolds para el pin

$Re = \frac{V * D}{\nu}$	$V(\text{m/s})$	$D(\text{m})$	$\nu(\text{m}^2/\text{s})$	Valor
Re_A	0,262	0.0025	$1.516 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	86,35
Re_B	0,393	0.0025	$1.516 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	129,52
Re_C	0,524	0.0025	$1.516 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	172,69
Re_D	0,654	0.0025	$1.516 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	215,86
Re_E	0,785	0.0025	$1.516 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	259,04
Re_F	0,916	0.0025	$1.516 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	302,21

(Fuente: El autor)

El número de Reynolds crítico para el flujo que pasa a través de un cilindro circular es alrededor de $Re_{cr} \approx 2 \cdot 10^5$. Es decir, la capa límite se conserva laminar para más o menos $Re \leq 2 \cdot 10^5$ y se vuelve turbulenta para $Re \geq 2 \cdot 10^5$.

Reemplazando en la ecuación 6.2, para los siguientes valores del número de Reynolds y el número de Prandtl de 0.73, se determina el número de Nusselt, tabla 6.6.

Tabla 6.6 Valores del número de Nusselt para el pin

<i>Nu</i>	<i>Re</i>	<i>Pr</i>	Valor
Nu _A	86,35	0.73	4,89
Nu _B	129,52	0.73	5,93
Nu _C	172,69	0.73	6,81
Nu _D	215,86	0.73	7,58
Nu _E	259,04	0.73	8,29
Nu _F	302,21	0.73	8,94

(Fuente: El autor)

Reemplazando en la ecuación 6.1, para los siguientes valores del número de Nusselt, el diámetro del pin de 0.005m y la conductividad térmica de 0.02514W/m*K, se determina los valores del coeficiente de transferencia de calor del pin, tabla 6.7.

Tabla 6.7 Valores del coeficiente de transferencia de calor del pin

$h = \frac{Nu * k}{D}$	<i>Nu</i>	<i>k</i>	<i>D</i>	Valor
h _A	4,89	0.02514W/m*K	0.005m	24,582 W/m ² *K
h _B	5,93	0.02514W/m*K	0.005m	29,809 W/m ² *K
h _C	6,81	0.02514W/m*K	0.005m	34,229 W/m ² *K
h _D	7,58	0.02514W/m*K	0.005m	38,133 W/m ² *K
h _E	8,29	0.02514W/m*K	0.005m	41,672 W/m ² *K
h _F	8,94	0.02514W/m*K	0.005m	44,934 W/m ² *K

(Fuente: El autor)

6.6.3 Análisis estático de la herramienta de soldadura

Tabla 6.8 Datos para el análisis de la herramienta con el AISI 8620

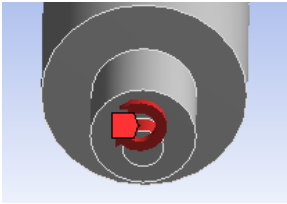
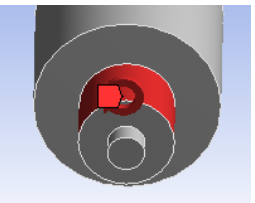
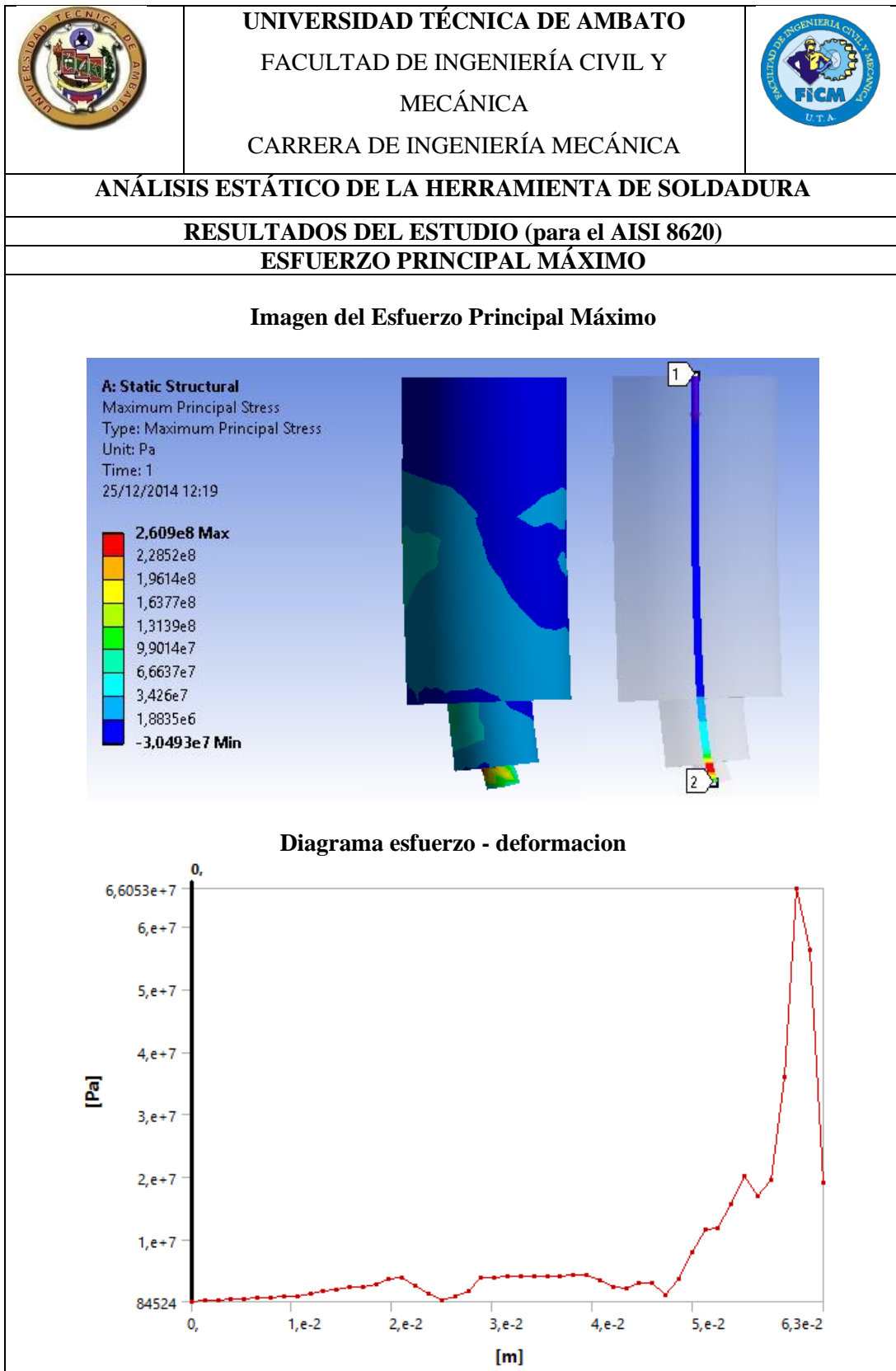
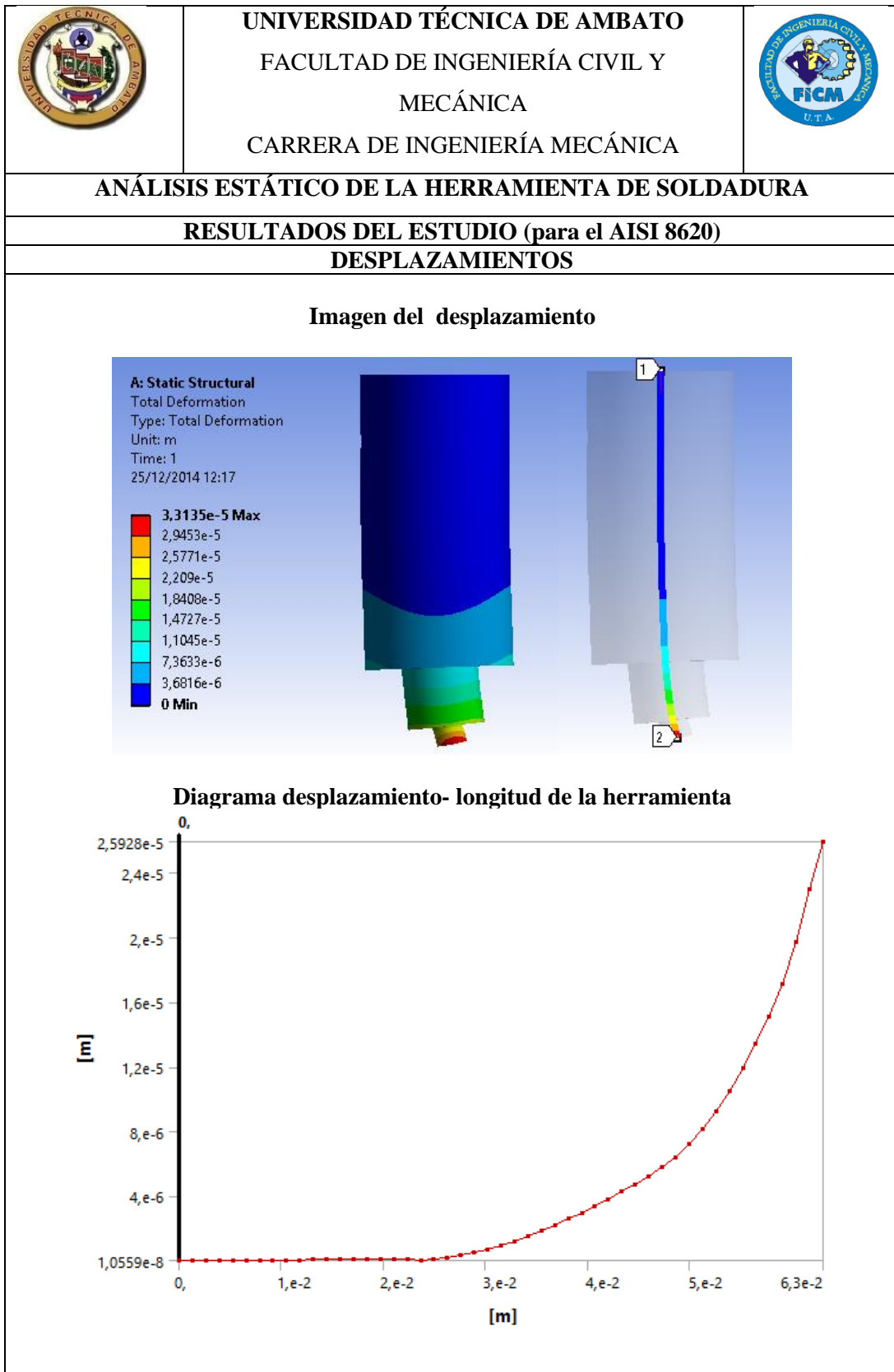
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA			
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS (para el AISI 8620)			
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS			
Masa:	0.214962 kg	Densidad:	7850 kg/m ³
Volumen:	2.73837e-005 m ³	Peso:	2.10663 N
PROPIEDADES DEL MATERIAL			
Límite elástico:	3.85e+008 N/m ²	Densidad:	7850 kg/m ³
Límite de tracción:	5.3e+008 N/m ²	Módulo cortante:	3.189e+008 N/m ²
Módulo elástico:	2.1e+011 N/m ²	Coefficiente de Poisson:	0.27
CARGAS Y SUJECIONES			
Imagen de la sujeción			
 Tipo de sujeción: Cylindrical Support			
Imagen de la torsión sobre el pin		Imagen de la fuerza sobre el pin	
 Valor de la carga de torsión: 5.11 N*m		 Valor de la fuerza: 2187.8 N	
Imagen de la torsión sobre el hombro			
 Valor de la carga de torsión: 1.42 N*m (Fuente: El autor)			

Tabla 6.9 Esfuerzo principal máximo de la herramienta con el AISI 8620





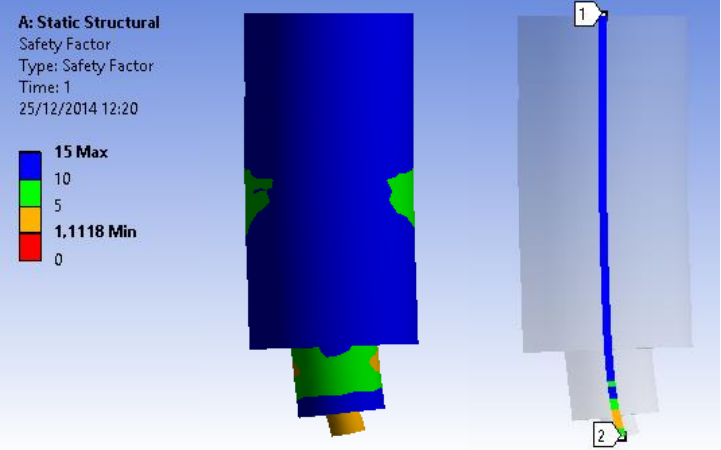
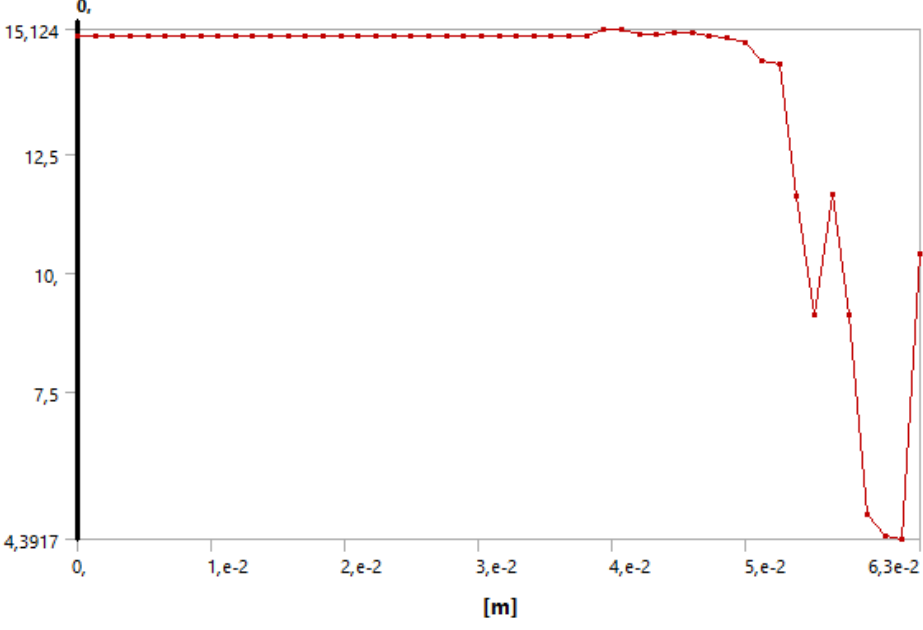
(Fuente: El autor)

Tabla 6.10 Desplazamientos de la herramienta con el AISI 8620





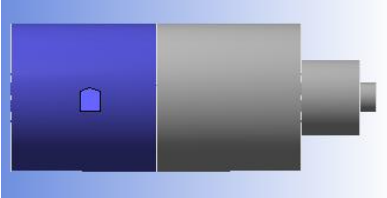
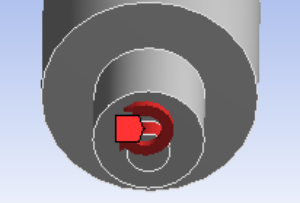
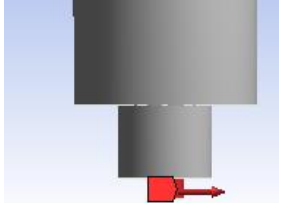
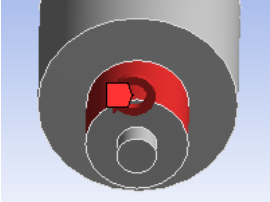
(Fuente: El autor)

Tabla 6.11 Factor de seguridad de la herramienta con el AISI 8620

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA		
RESULTADOS DEL ESTUDIO (para el AISI 8620)		
FACTOR DE SEGURIDAD		
Valor del factor de seguridad mínimo:	1.1118	
<div style="text-align: center;"> <p>Imagen del factor de seguridad</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Diagrama factor de seguridad- longitud</p>  </div>		

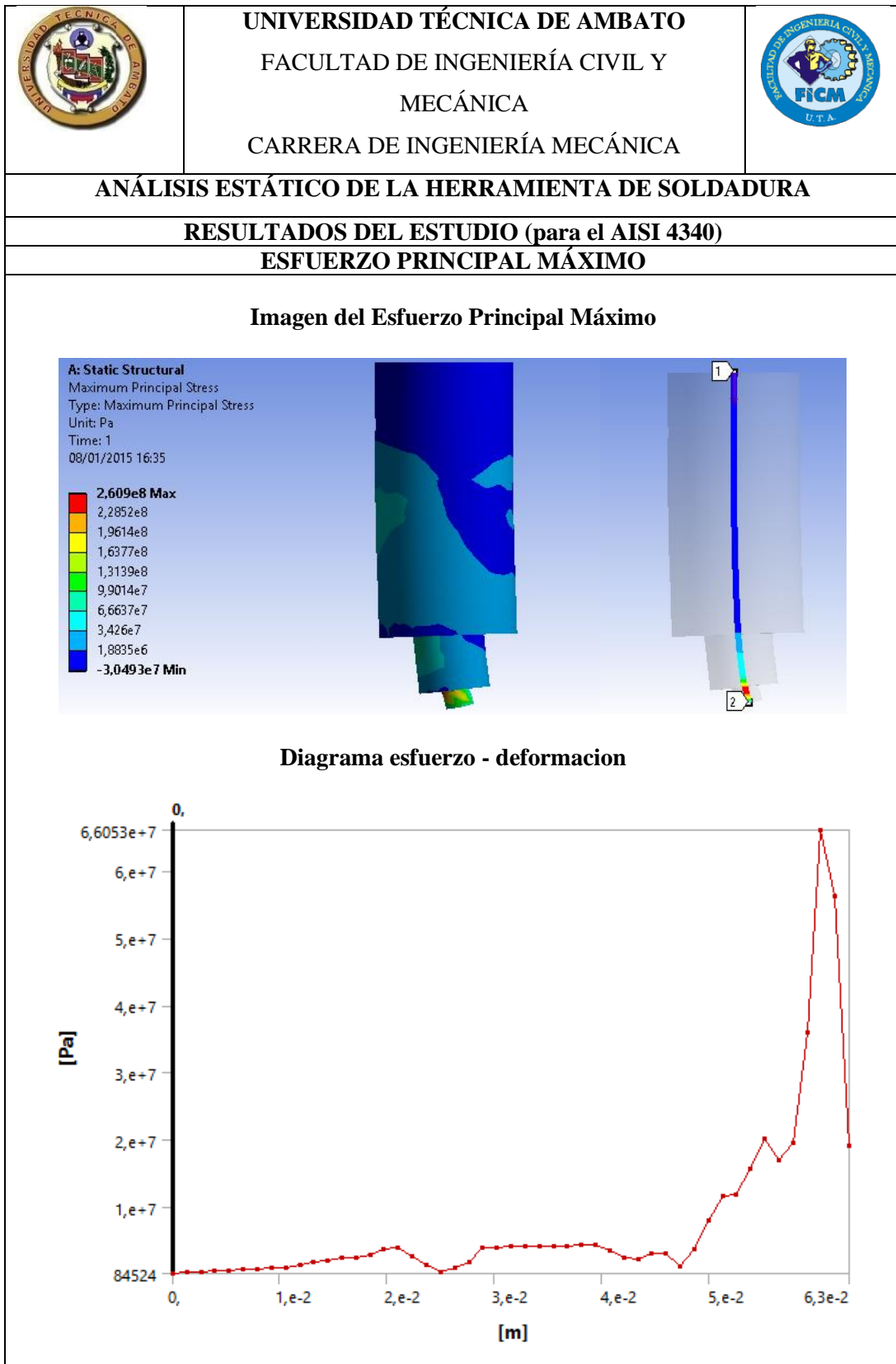
(Fuente: El autor)

Tabla 6.12 Datos para el análisis de la herramienta con el AISI 4340

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
MATERIAL AISI 4340 (temple y revenido a 315C)					
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS					
Masa:		0.214962 kg		Densidad:	
Volumen:		2.73837e-005 m ³		Peso:	
				7850 kg/m ³	
				2.10663 N	
PROPIEDADES DEL MATERIAL					
Límite elástico:		1.59e+009 N/m ²		Densidad:	
Límite de tracción:		1.72e+009 N/m ²		Módulo cortante:	
Módulo elástico:		2.1e+011 N/m ²		Coefficiente de Poisson:	
				0.27	
				7850 kg/m ³	
				3.189e+008 N/m ²	
CARGAS Y SUJECIONES					
Imagen de la sujeción					
					
Tipo de sujeción: Cylindrical Support					
Imagen de la torsión sobre el pin			Imagen de la fuerza sobre el pin		
					
Valor de la carga de torsión: 5.11 N*m			Valor de la fuerza: 2187.8 N		
Imagen de la torsión sobre el hombro					
					
Valor de la carga de torsión: 1.42 N*m					

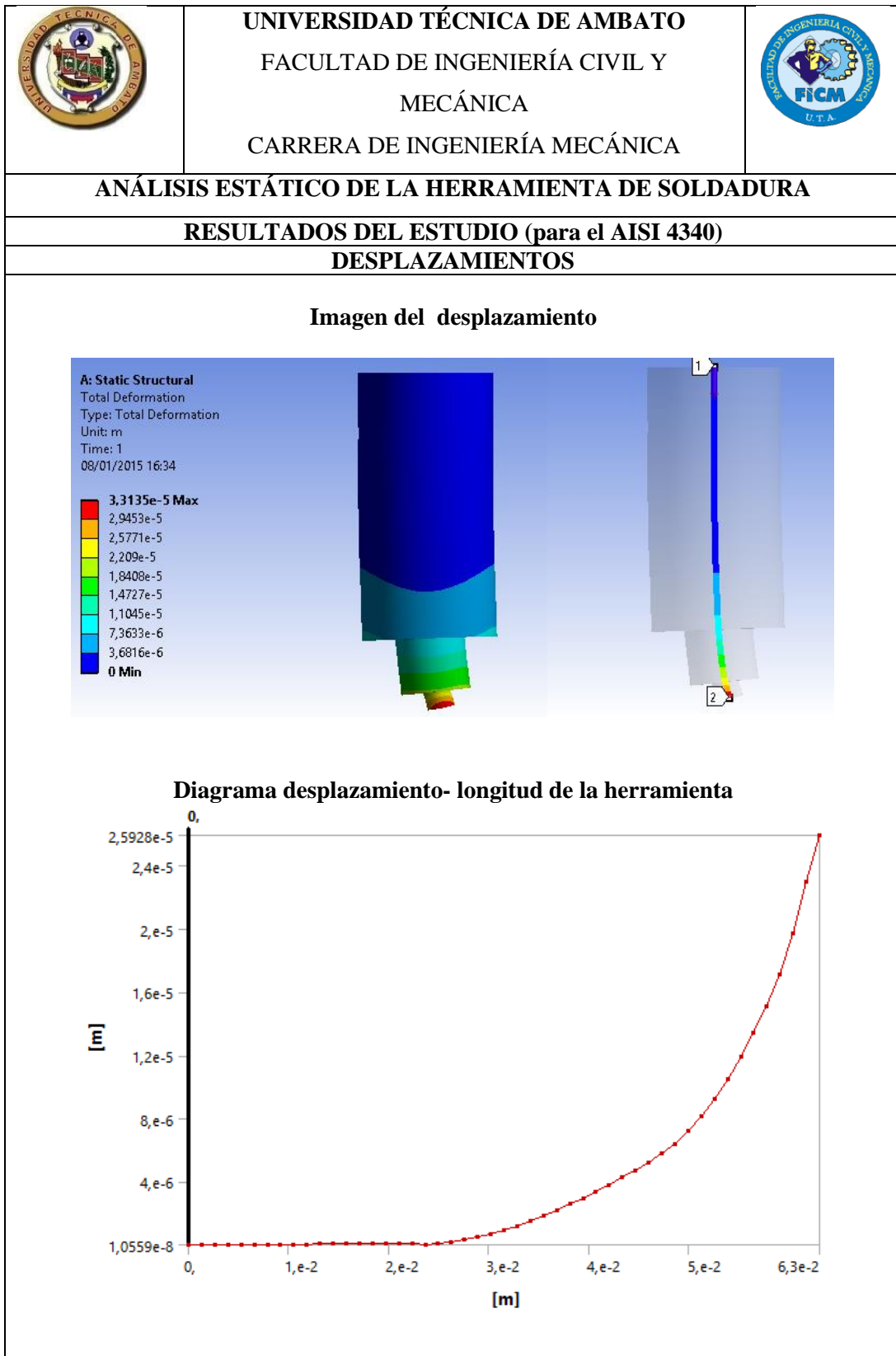
(Fuente: El autor)

Tabla 6.13 Esfuerzo principal máxima de la herramienta con el AISI 4340



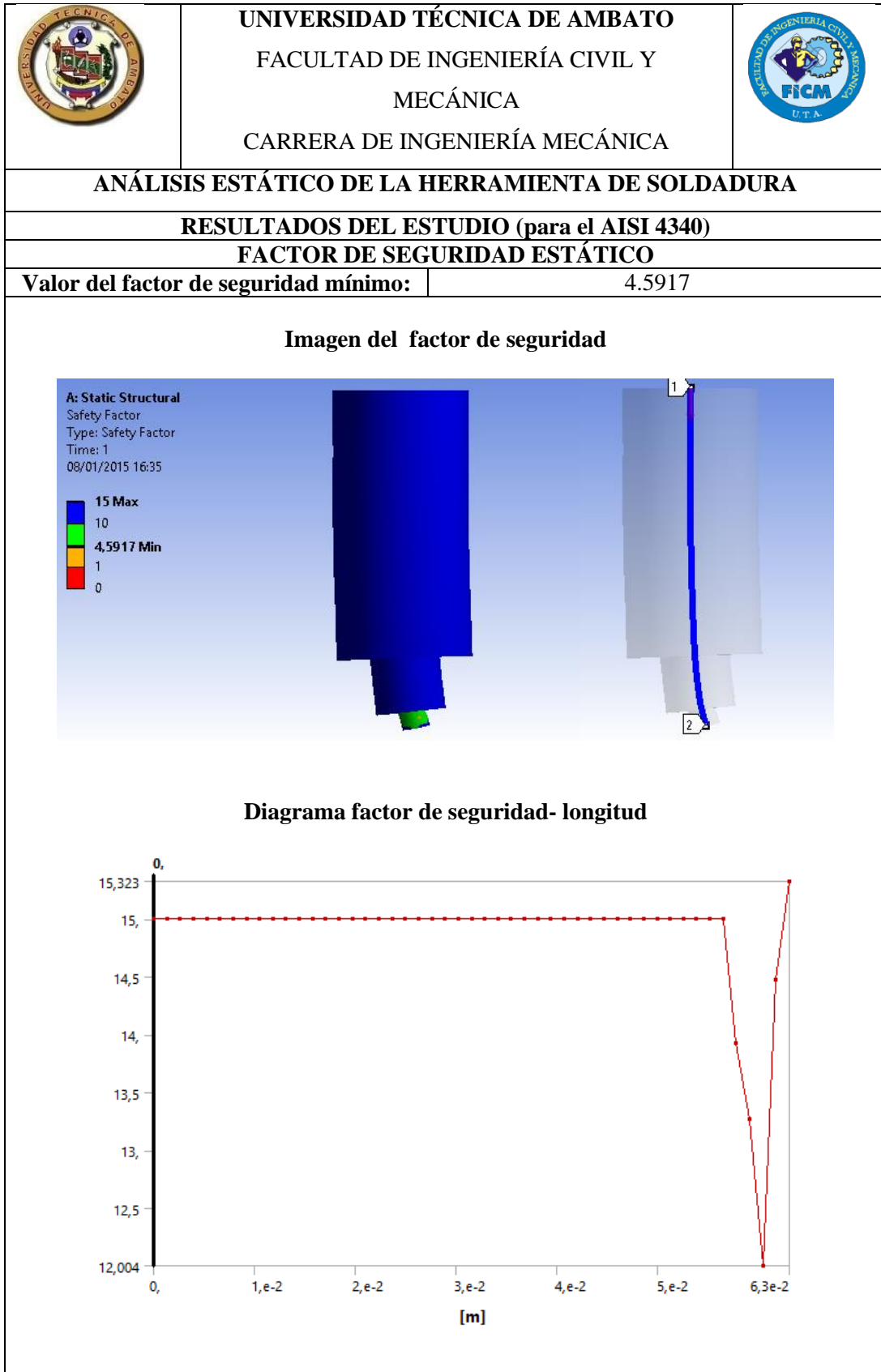
(Fuente: El autor)

Tabla 6.14 Desplazamientos de la herramienta con el AISI 4340





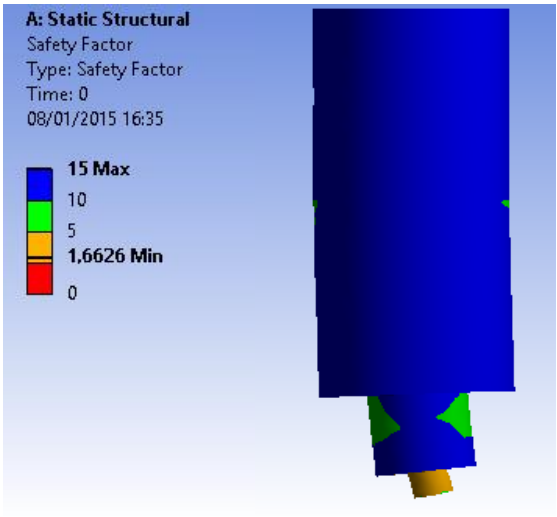
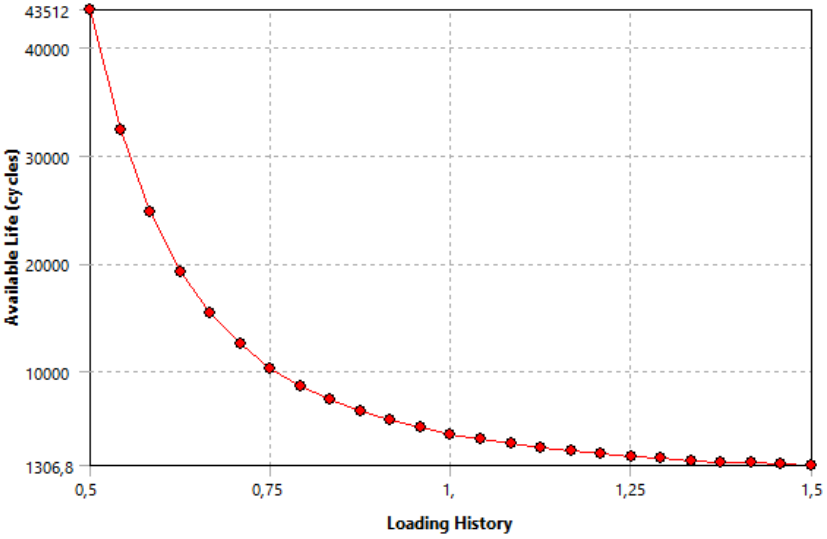
(Fuente: El autor)

Tabla 6.15 Factor de seguridad estático de la herramienta con el AISI 4340





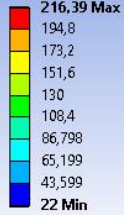

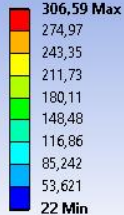

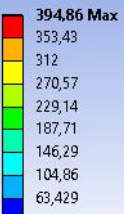

(Fuente: El autor)

Tabla 6.16 Factor de seguridad a fatiga de la herramienta con el AISI 4340

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
ANÁLISIS A FATIGA DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA		
RESULTADOS DEL ESTUDIO (para el AISI 4340)		
FACTOR DE SEGURIDAD A FATIGA		
Valor del factor de seguridad mínimo:	1.6626	
<div style="text-align: center;"> <p>Imagen del factor de seguridad a fatiga</p>  <p>Diagrama Fatigue Sensitivity</p>  </div>		



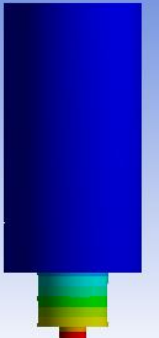


(Fuente: El autor)

Tabla 6.17 Análisis térmico de la herramienta con el AISI 4340 (modelo A, B y C)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DE LA HERRAMIENTA</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>IMÁGENES DEL TIEMPO QUE NECESITA LA HERRAMIENTA PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA MÁXIMA</p>		
<p style="text-align: center;">Imagen para la temperatura de la probeta A (Tiempo: 1.53s)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 1,53 09/01/2015 16:57</p>  </div> <div style="width: 65%;">  </div> </div> <p style="text-align: center;">Imagen para la temperatura de la probeta B (Tiempo: 3.42s)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 3,42 09/01/2015 17:43</p>  </div> <div style="width: 65%;">  </div> </div> <p style="text-align: center;">Imagen para la temperatura de la probeta C (Tiempo: 6.72s)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 6,72 09/01/2015 17:41</p>  </div> <div style="width: 65%;">  </div> </div>		

(Fuente: El autor)



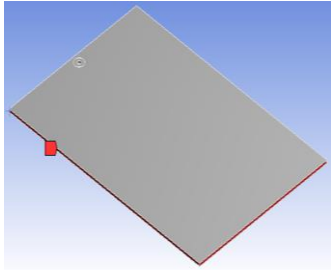
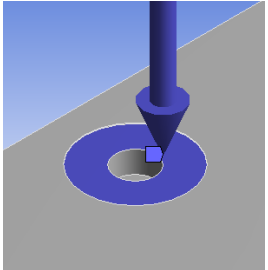
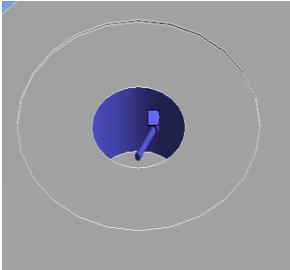
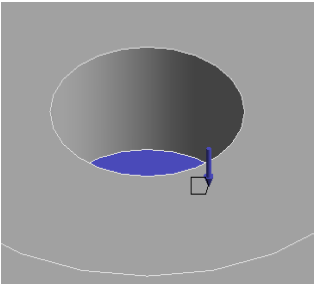
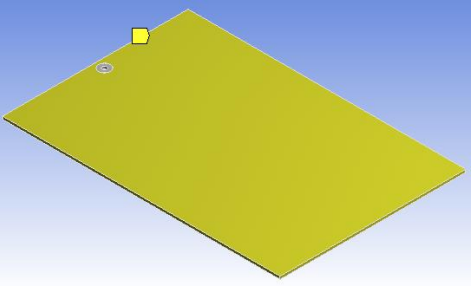
Tabla 6.18 Análisis térmico de la herramienta con el AISI 4340 (modelo D, E y F)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																															
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DE LA HERRAMIENTA</p>																																
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																
<p>IMÁGENES DEL TIEMPO QUE NECESITA LA HERRAMIENTA PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA MÁXIMA</p>																																
<p style="text-align: center;">Imagen para la temperatura de la probeta D (Tiempo: 12.76s)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 12,76 09/01/2015 17:39</p> <table border="1"> <tr><td style="background-color: red;">482,41 Max</td></tr> <tr><td style="background-color: orange;">431,26</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow;">380,1</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen;">328,94</td></tr> <tr><td style="background-color: green;">277,79</td></tr> <tr><td style="background-color: lightblue;">226,63</td></tr> <tr><td style="background-color: cyan;">175,47</td></tr> <tr><td style="background-color: blue;">124,31</td></tr> <tr><td style="background-color: darkblue;">73,157</td></tr> <tr><td style="background-color: black;">22 Min</td></tr> </table> </div> <div style="width: 65%; text-align: center;">  </div> </div> <p style="text-align: center;">Imagen para la temperatura de la probeta E (Tiempo: 25.79s)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 25,79 09/01/2015 17:35</p> <table border="1"> <tr><td style="background-color: red;">570,27 Max</td></tr> <tr><td style="background-color: orange;">509,35</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow;">448,43</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen;">387,51</td></tr> <tr><td style="background-color: green;">326,6</td></tr> <tr><td style="background-color: lightblue;">265,68</td></tr> <tr><td style="background-color: cyan;">204,76</td></tr> <tr><td style="background-color: blue;">143,84</td></tr> <tr><td style="background-color: darkblue;">82,919</td></tr> <tr><td style="background-color: black;">22 Min</td></tr> </table> </div> <div style="width: 65%; text-align: center;">  </div> </div> <p style="text-align: center;">Imagen para la temperatura de la probeta F (Tiempo: 52.4s)</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 52,4 09/01/2015 17:30</p> <table border="1"> <tr><td style="background-color: red;">656,93 Max</td></tr> <tr><td style="background-color: orange;">586,38</td></tr> <tr><td style="background-color: yellow;">515,83</td></tr> <tr><td style="background-color: lightgreen;">445,29</td></tr> <tr><td style="background-color: green;">374,74</td></tr> <tr><td style="background-color: lightblue;">304,19</td></tr> <tr><td style="background-color: cyan;">233,64</td></tr> <tr><td style="background-color: blue;">163,1</td></tr> <tr><td style="background-color: darkblue;">92,548</td></tr> <tr><td style="background-color: black;">22 Min</td></tr> </table> </div> <div style="width: 65%; text-align: center;">  </div> </div>			482,41 Max	431,26	380,1	328,94	277,79	226,63	175,47	124,31	73,157	22 Min	570,27 Max	509,35	448,43	387,51	326,6	265,68	204,76	143,84	82,919	22 Min	656,93 Max	586,38	515,83	445,29	374,74	304,19	233,64	163,1	92,548	22 Min
482,41 Max																																
431,26																																
380,1																																
328,94																																
277,79																																
226,63																																
175,47																																
124,31																																
73,157																																
22 Min																																
570,27 Max																																
509,35																																
448,43																																
387,51																																
326,6																																
265,68																																
204,76																																
143,84																																
82,919																																
22 Min																																
656,93 Max																																
586,38																																
515,83																																
445,29																																
374,74																																
304,19																																
233,64																																
163,1																																
92,548																																
22 Min																																

(Fuente: El autor)



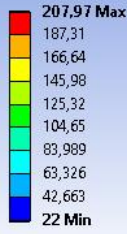
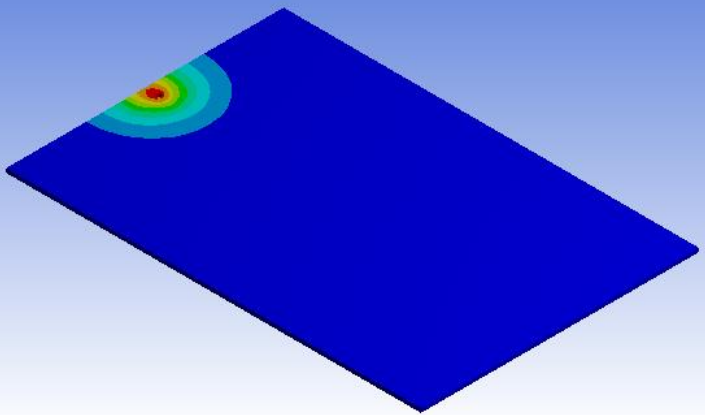
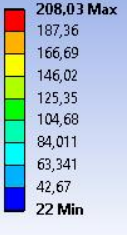
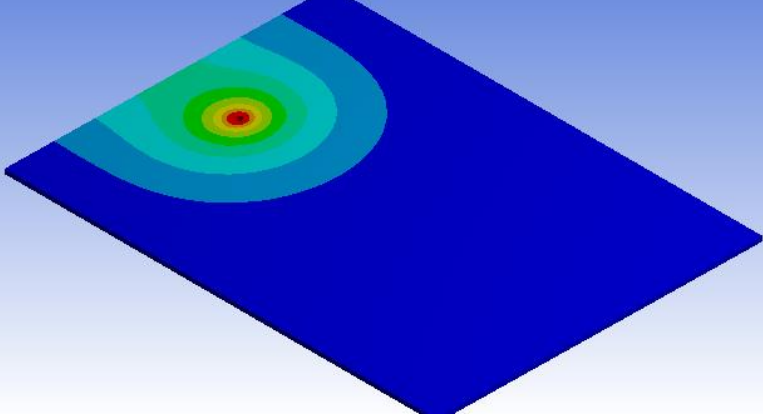
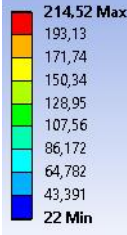
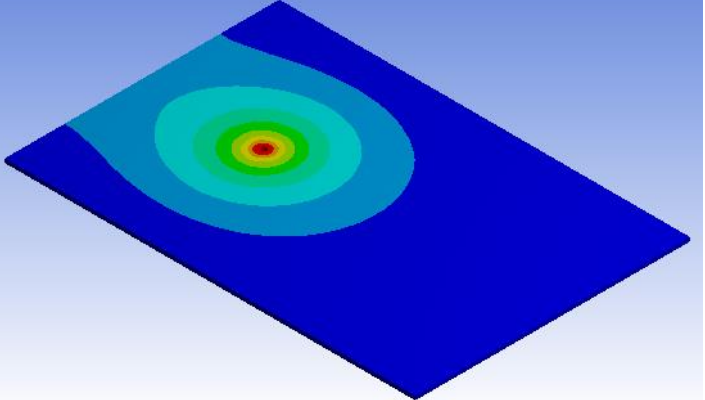
6.6.3 Análisis térmico del metal base

Tabla 6.19 Datos para el análisis térmico del modelo A

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)			
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS			
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS			
Masa:	0.503798 kg	Densidad:	2700 kg/m ³
Volumen:	0.000186592 m ³	Peso:	4.93722 N
PROPIEDADES DEL MATERIAL AI 6061			
Conductividad térmica:		166.9 W/(m.K)	
Calor específico:		896 J/(kg.K)	
Densidad:		2700 kg/m ³	
CARGAS TÉRMICAS			
Imágenes de las condiciones del contorno y cargas térmicas			
			
Valor de la temperatura externa: 22 C	Flujo de calor producido por el hombro: 141.64W	Flujo de calor producido por la superficie cilíndrica del pin: 30.76W	
			
Flujo de calor producido por la superficie circular del pin: 8.54W	Coeficiente de transferencia de calor del pin: 24.582W/m ² *K		




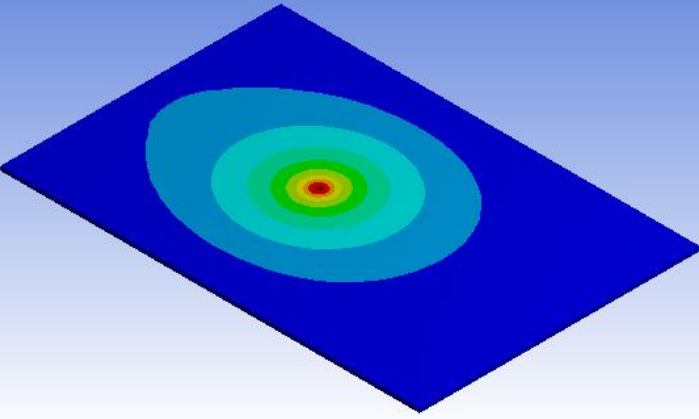
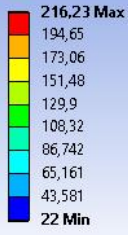
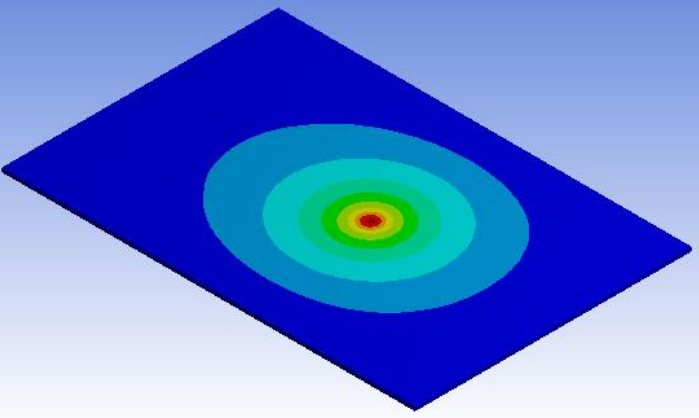
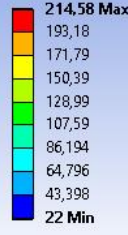
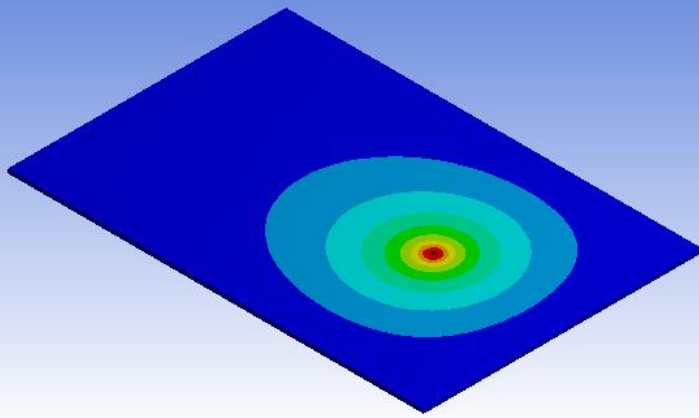
(Fuente: El autor)

Tabla 6.20 Resultados del análisis térmico del modelo A (10s, 50s y 90s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 10 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 10 09/01/2015 14:26</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 50 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 50 09/01/2015 14:44</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 90 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 90 09/01/2015 15:00</p> 		

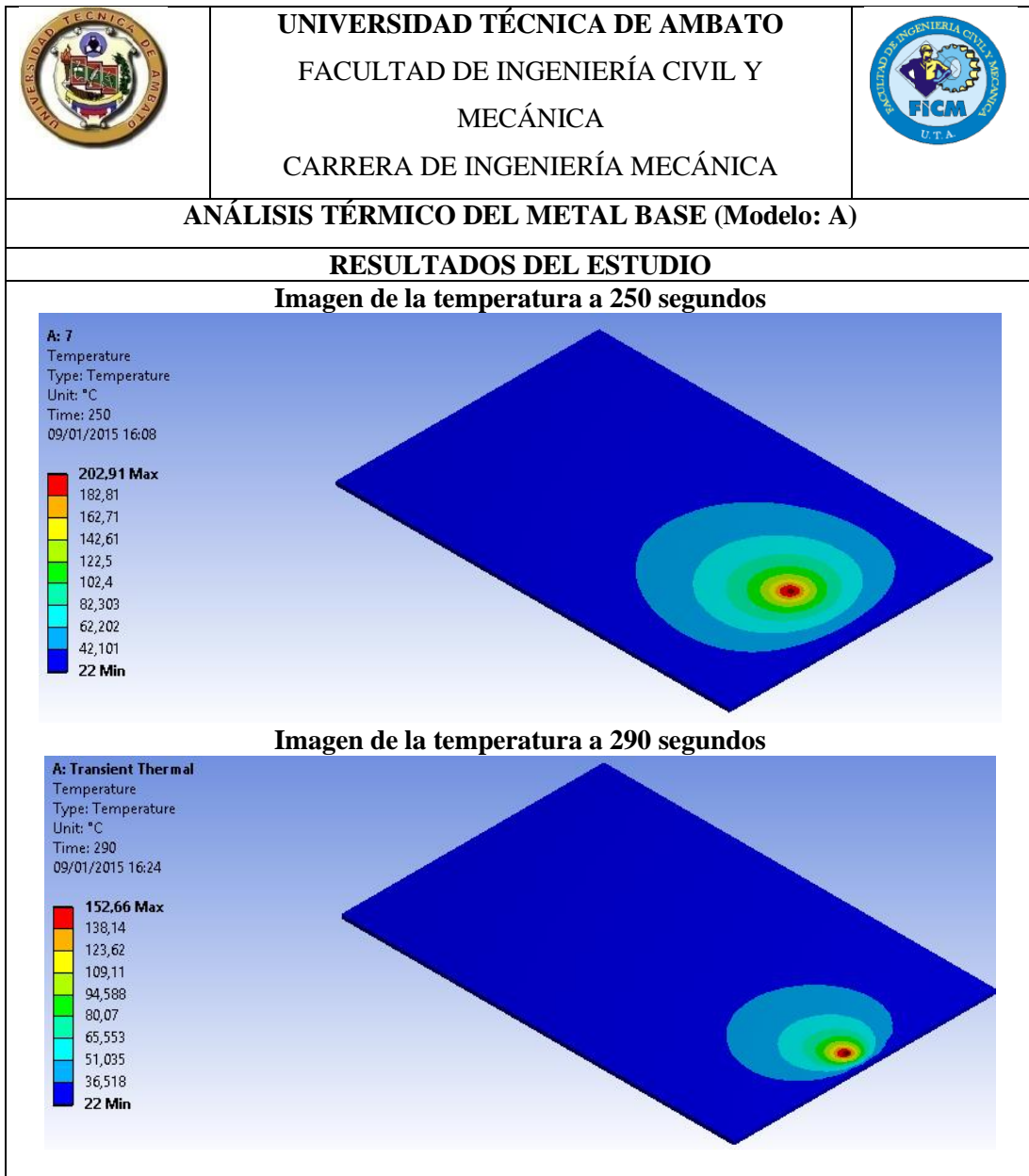
(Fuente: El autor)

Tabla 6.21 Resultados del análisis térmico del modelo A (130s, 170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 130 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 130 09/01/2015 15:19</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 170 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 170 09/01/2015 15:36</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 210 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 210 09/01/2015 15:53</p> 		

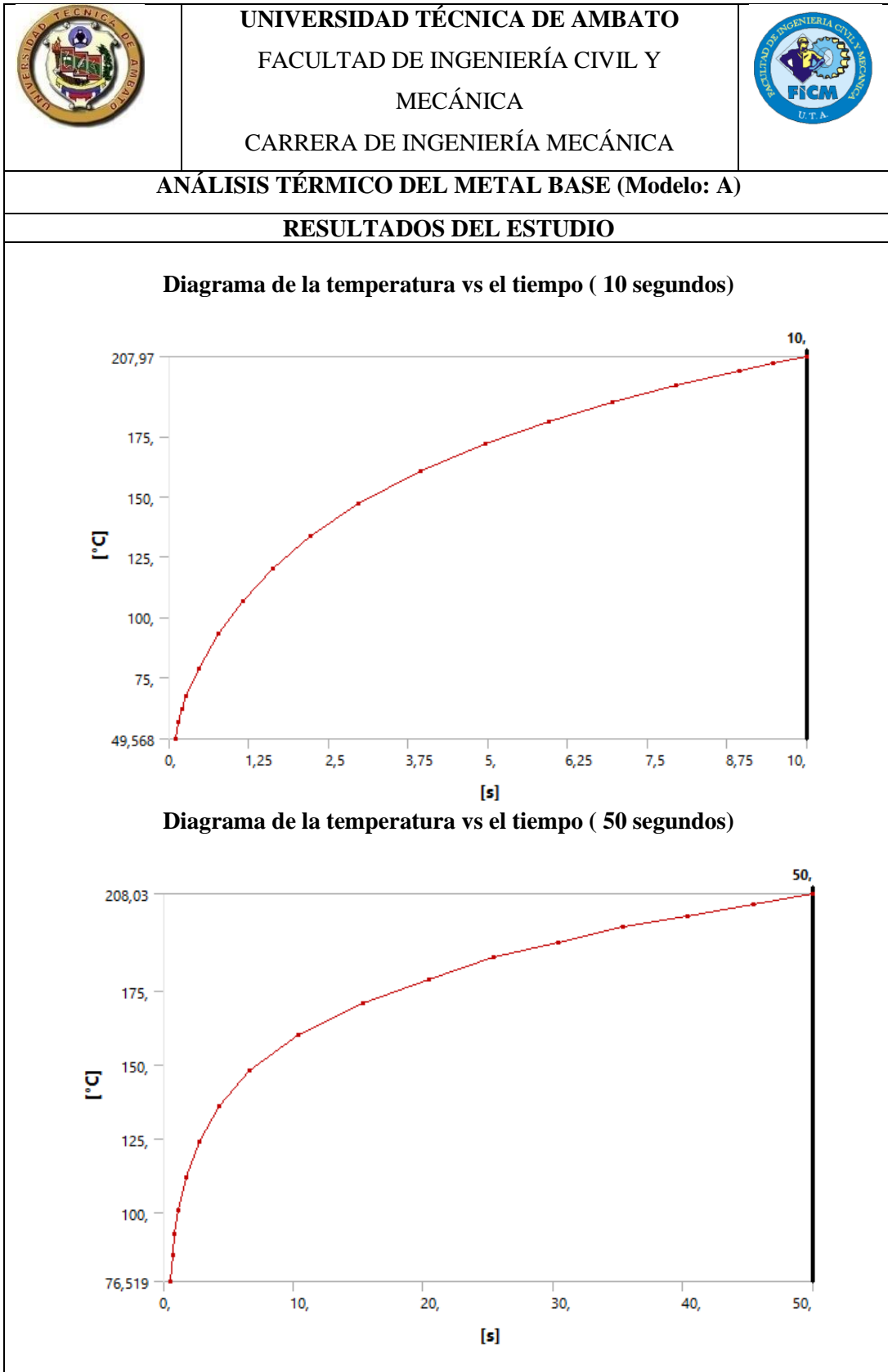
(Fuente: El autor)

Tabla 6.22 Resultados del análisis térmico del modelo A (250s y 290s)



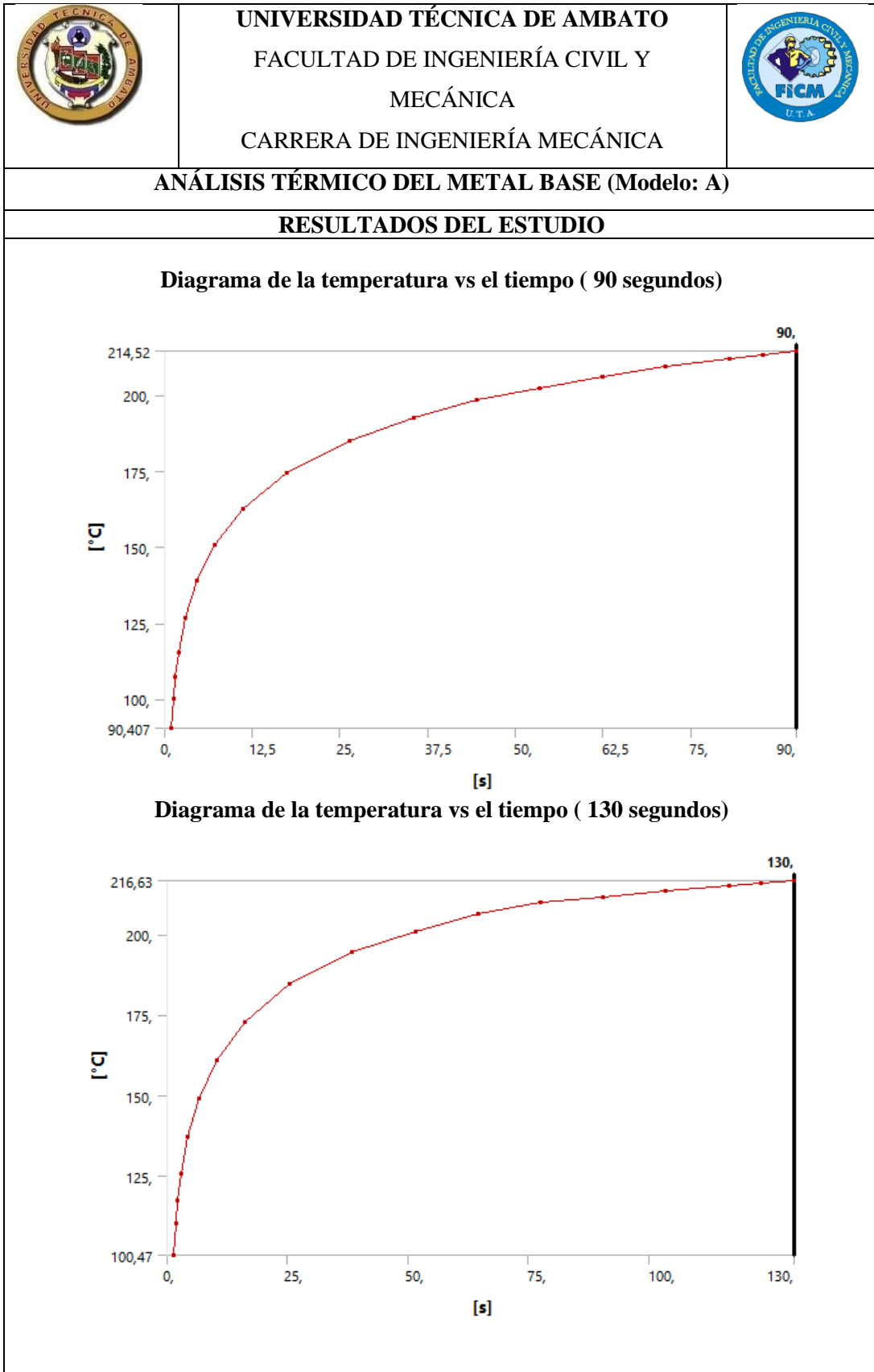
(Fuente: El autor)

Tabla 6.23 Temperatura respecto al tiempo del modelo A (10s y 50s)





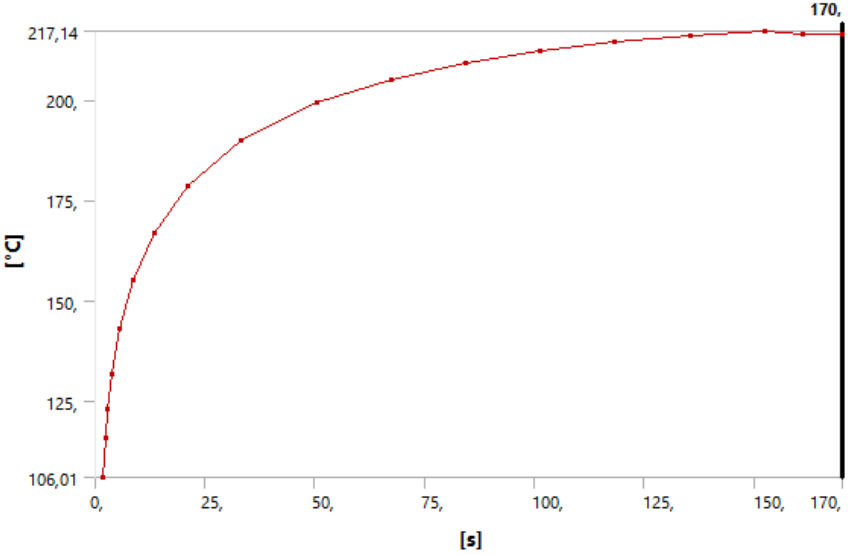
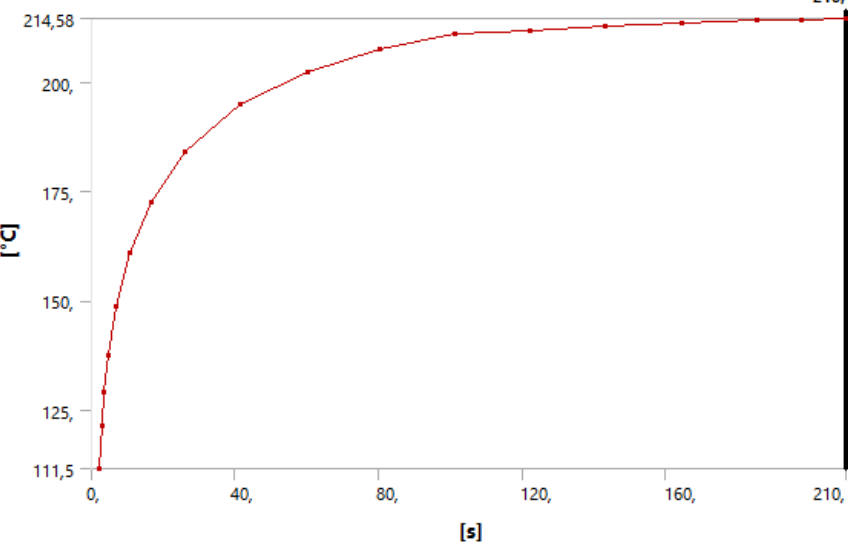
(Fuente: El autor)

Tabla 6.24 Temperatura respecto al tiempo del modelo A (90s y 130s)





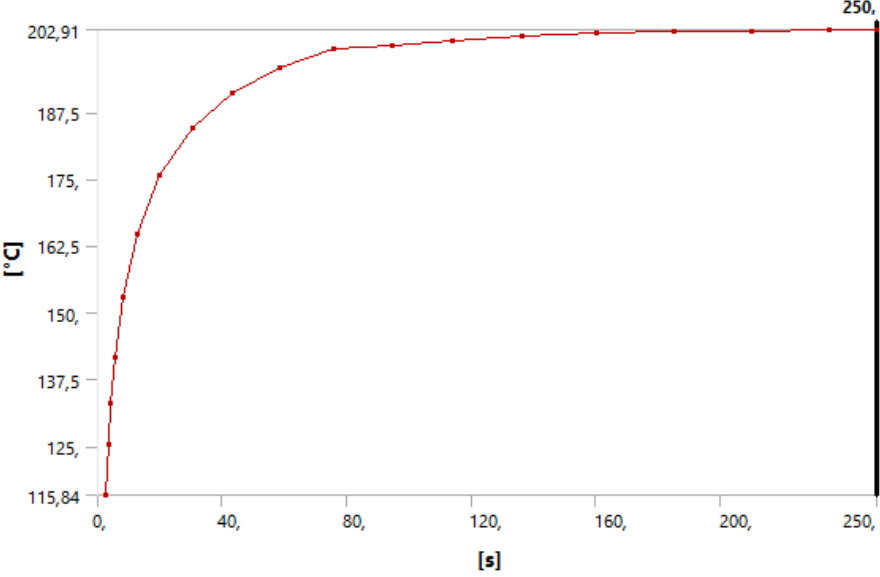
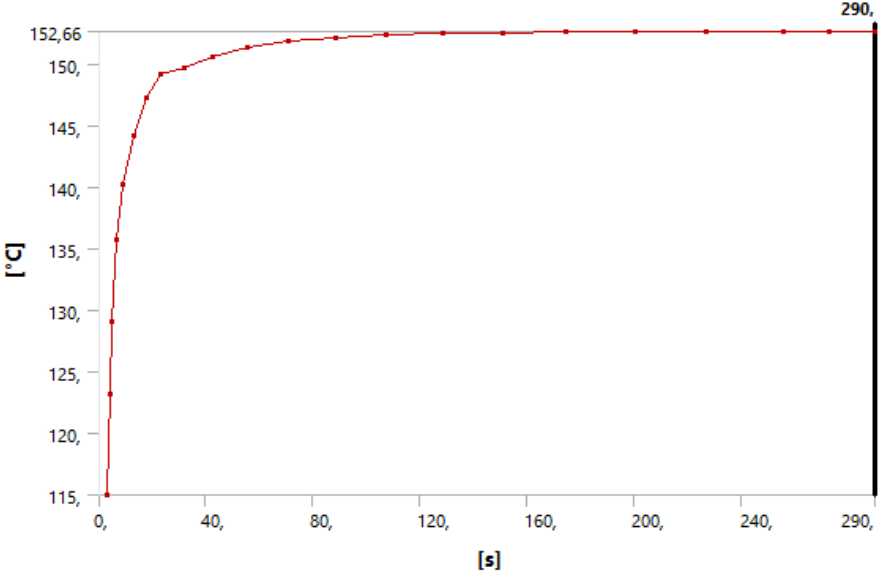
(Fuente: El autor)

Tabla 6.25 Temperatura respecto al tiempo del modelo A (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																																	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>																																																																																																		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																																		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (170 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="411 674 1262 1227"> <caption>Data points for 170s graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>106,01</td></tr> <tr><td>5</td><td>125</td></tr> <tr><td>10</td><td>145</td></tr> <tr><td>15</td><td>165</td></tr> <tr><td>20</td><td>178</td></tr> <tr><td>25</td><td>188</td></tr> <tr><td>30</td><td>195</td></tr> <tr><td>40</td><td>202</td></tr> <tr><td>50</td><td>206</td></tr> <tr><td>60</td><td>209</td></tr> <tr><td>70</td><td>211</td></tr> <tr><td>80</td><td>212</td></tr> <tr><td>90</td><td>213</td></tr> <tr><td>100</td><td>214</td></tr> <tr><td>110</td><td>214,5</td></tr> <tr><td>120</td><td>215</td></tr> <tr><td>130</td><td>215,5</td></tr> <tr><td>140</td><td>216</td></tr> <tr><td>150</td><td>216,5</td></tr> <tr><td>160</td><td>216,8</td></tr> <tr><td>170</td><td>217,14</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (210 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="411 1346 1262 1899"> <caption>Data points for 210s graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>111,5</td></tr> <tr><td>5</td><td>125</td></tr> <tr><td>10</td><td>145</td></tr> <tr><td>15</td><td>165</td></tr> <tr><td>20</td><td>178</td></tr> <tr><td>25</td><td>188</td></tr> <tr><td>30</td><td>195</td></tr> <tr><td>40</td><td>202</td></tr> <tr><td>50</td><td>206</td></tr> <tr><td>60</td><td>209</td></tr> <tr><td>70</td><td>211</td></tr> <tr><td>80</td><td>212</td></tr> <tr><td>90</td><td>213</td></tr> <tr><td>100</td><td>214</td></tr> <tr><td>110</td><td>214,5</td></tr> <tr><td>120</td><td>214,8</td></tr> <tr><td>130</td><td>215</td></tr> <tr><td>140</td><td>215,2</td></tr> <tr><td>150</td><td>215,4</td></tr> <tr><td>160</td><td>215,5</td></tr> <tr><td>170</td><td>215,6</td></tr> <tr><td>180</td><td>215,7</td></tr> <tr><td>190</td><td>215,8</td></tr> <tr><td>200</td><td>215,9</td></tr> <tr><td>210</td><td>214,58</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	106,01	5	125	10	145	15	165	20	178	25	188	30	195	40	202	50	206	60	209	70	211	80	212	90	213	100	214	110	214,5	120	215	130	215,5	140	216	150	216,5	160	216,8	170	217,14	Time [s]	Temperature [°C]	0	111,5	5	125	10	145	15	165	20	178	25	188	30	195	40	202	50	206	60	209	70	211	80	212	90	213	100	214	110	214,5	120	214,8	130	215	140	215,2	150	215,4	160	215,5	170	215,6	180	215,7	190	215,8	200	215,9	210	214,58
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	106,01																																																																																																	
5	125																																																																																																	
10	145																																																																																																	
15	165																																																																																																	
20	178																																																																																																	
25	188																																																																																																	
30	195																																																																																																	
40	202																																																																																																	
50	206																																																																																																	
60	209																																																																																																	
70	211																																																																																																	
80	212																																																																																																	
90	213																																																																																																	
100	214																																																																																																	
110	214,5																																																																																																	
120	215																																																																																																	
130	215,5																																																																																																	
140	216																																																																																																	
150	216,5																																																																																																	
160	216,8																																																																																																	
170	217,14																																																																																																	
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	111,5																																																																																																	
5	125																																																																																																	
10	145																																																																																																	
15	165																																																																																																	
20	178																																																																																																	
25	188																																																																																																	
30	195																																																																																																	
40	202																																																																																																	
50	206																																																																																																	
60	209																																																																																																	
70	211																																																																																																	
80	212																																																																																																	
90	213																																																																																																	
100	214																																																																																																	
110	214,5																																																																																																	
120	214,8																																																																																																	
130	215																																																																																																	
140	215,2																																																																																																	
150	215,4																																																																																																	
160	215,5																																																																																																	
170	215,6																																																																																																	
180	215,7																																																																																																	
190	215,8																																																																																																	
200	215,9																																																																																																	
210	214,58																																																																																																	



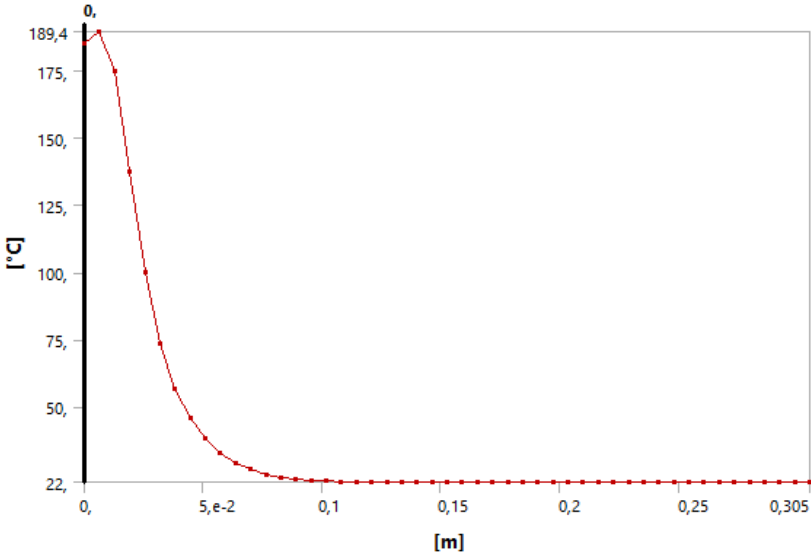
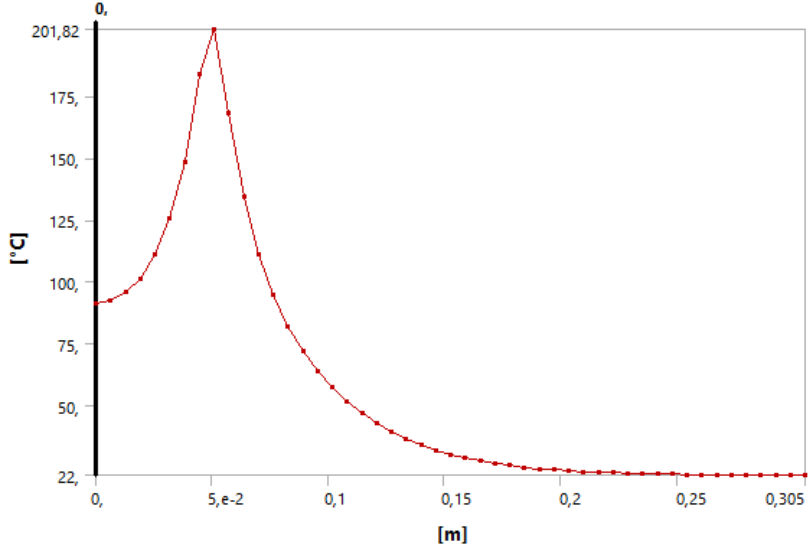
(Fuente: El autor)

Tabla 6.26 Temperatura respecto al tiempo del modelo A (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (290 segundos)</p> 		



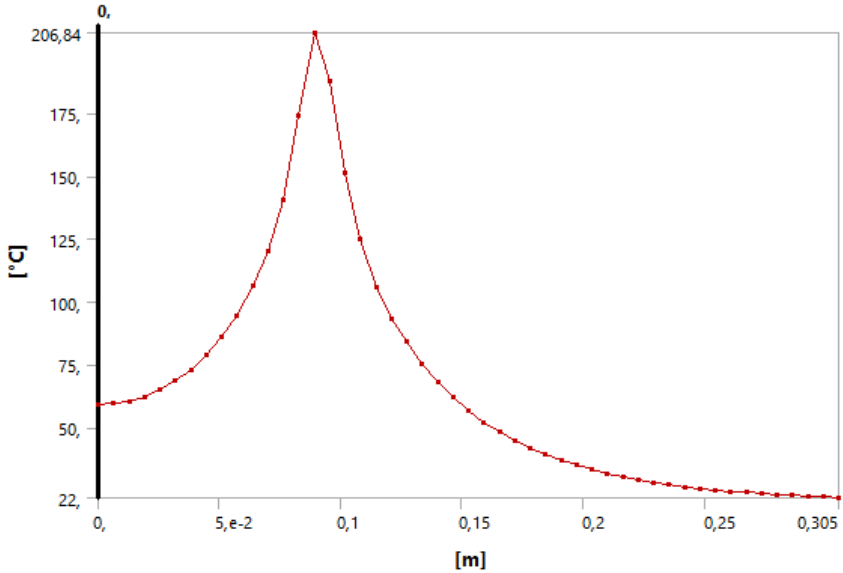
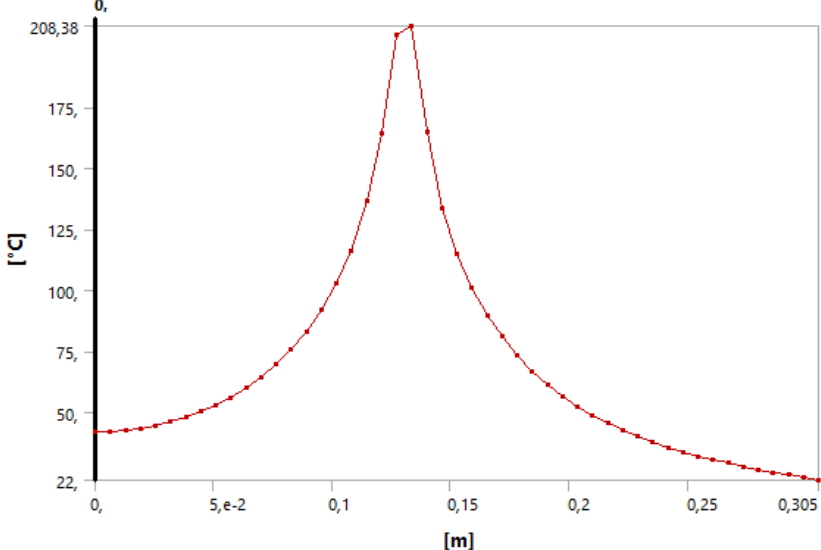
(Fuente: El autor)

Tabla 6.27 Temperatura respecto la longitud del modelo A (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (10 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (50 segundos)</p> 		



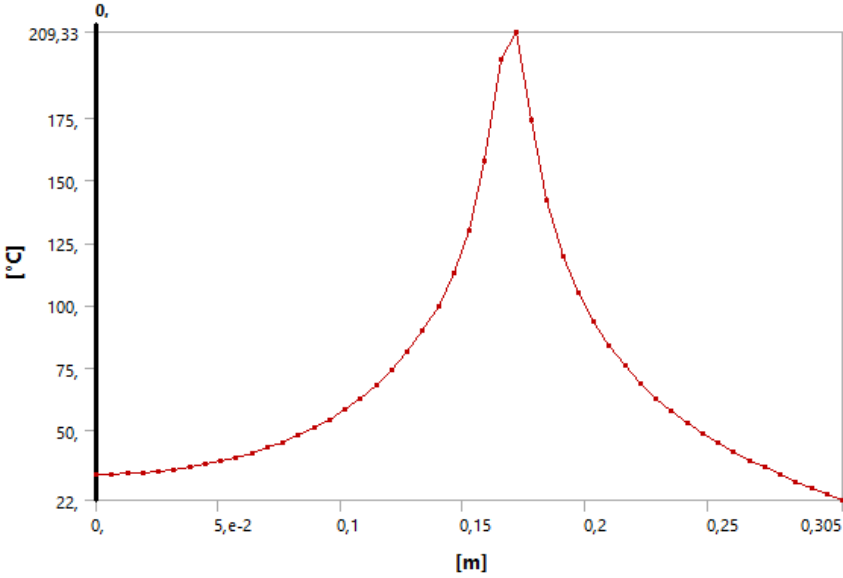
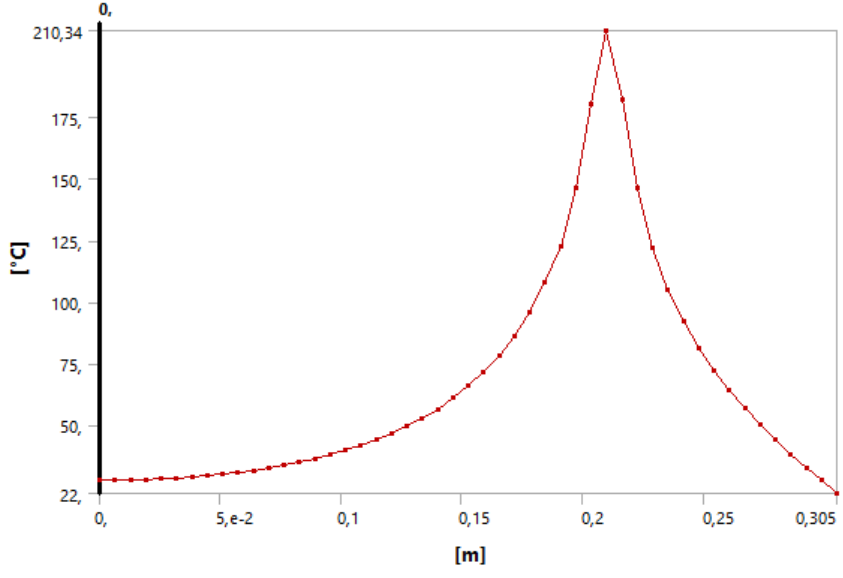
(Fuente: El autor)

Tabla 6.28 Temperatura respecto la longitud del modelo A (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (90 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (130 segundos)</p> 		



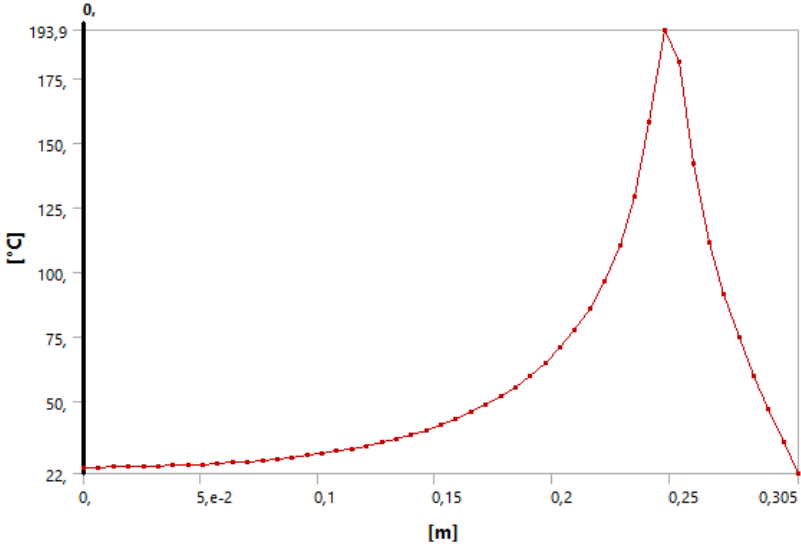
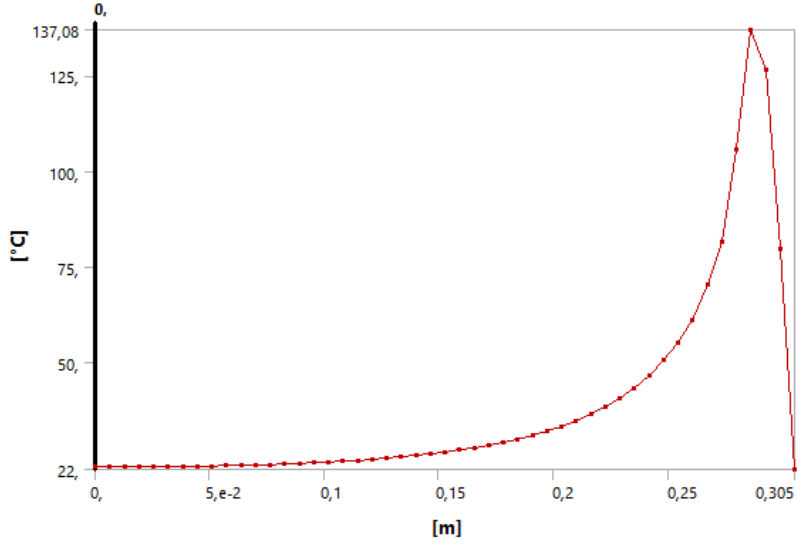
(Fuente: El autor)

Tabla 6.29 Temperatura respecto la longitud del modelo A (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (170 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (210 segundos)</p> 		



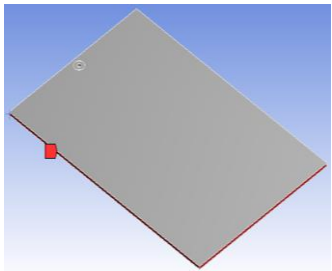
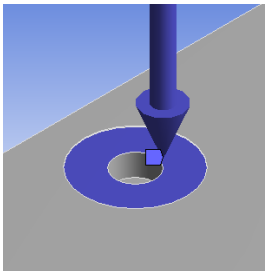
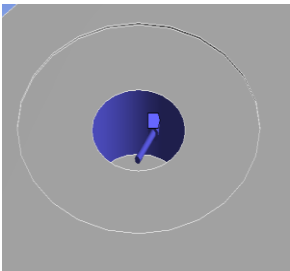
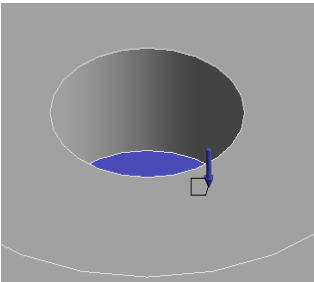
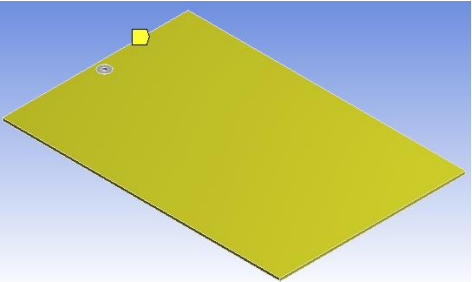
(Fuente: El autor)

Tabla 6.30 Temperatura respecto la longitud del modelo A (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: A)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (290 segundos)</p> 		



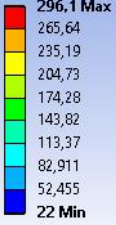
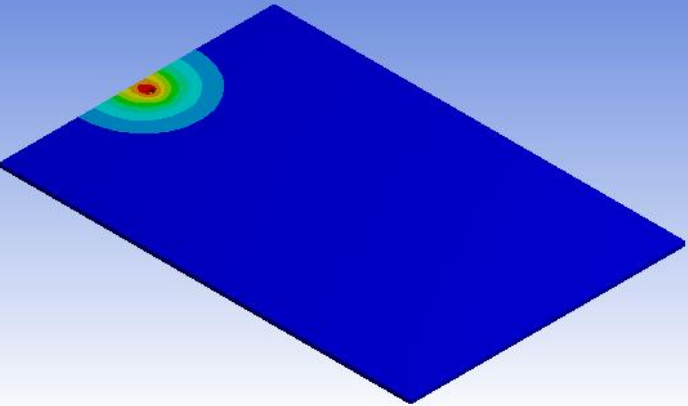
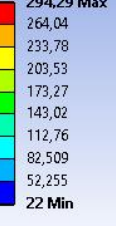
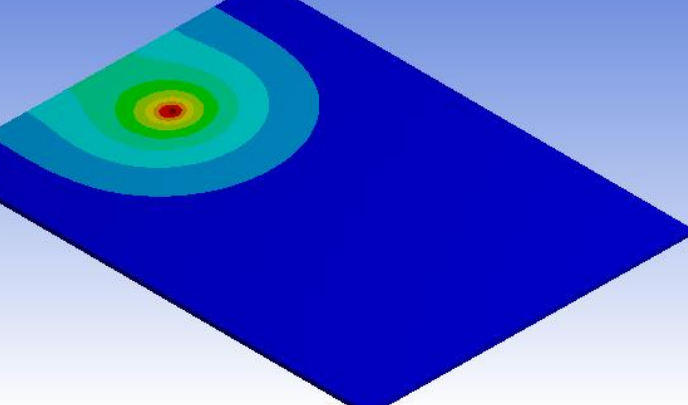

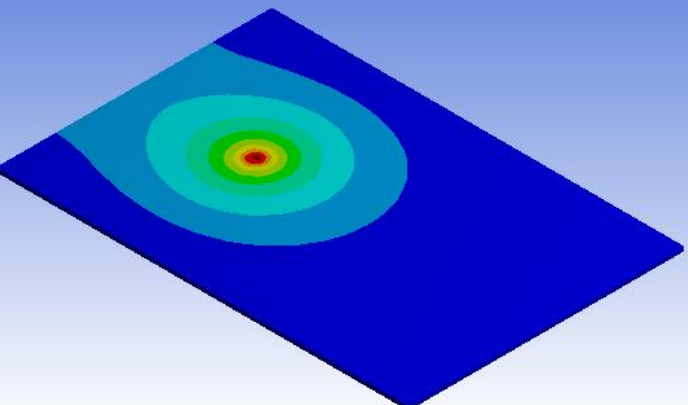
(Fuente: El autor)

Tabla 6.31 Datos para el análisis térmico del modelo B

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS					
Masa:		0.503798 kg		Densidad:	
Volumen:		0.000186592 m ³		Peso:	
				2700 kg/m ³	
				4.93722 N	
PROPIEDADES DEL MATERIAL Al 6061					
Conductividad térmica:			166.9 W/(m.K)		
Calor específico:			896 J/(kg.K)		
Densidad:			2700 kg/m ³		
CARGAS TÉRMICAS					
Imágenes de las condiciones del contorno y cargas térmicas					
 <p>Valor de la temperatura externa: 22 C</p>		 <p>Flujo de calor producido por el hombro: 212.46W</p>		 <p>Flujo de calor producido por la superficie cilíndrica del pin: 46.14W</p>	
 <p>Flujo de calor producido por la superficie circular del pin: 12.82W</p>			 <p>Coefficiente de transferencia de calor del pin: 29.809W/m²*K</p>		

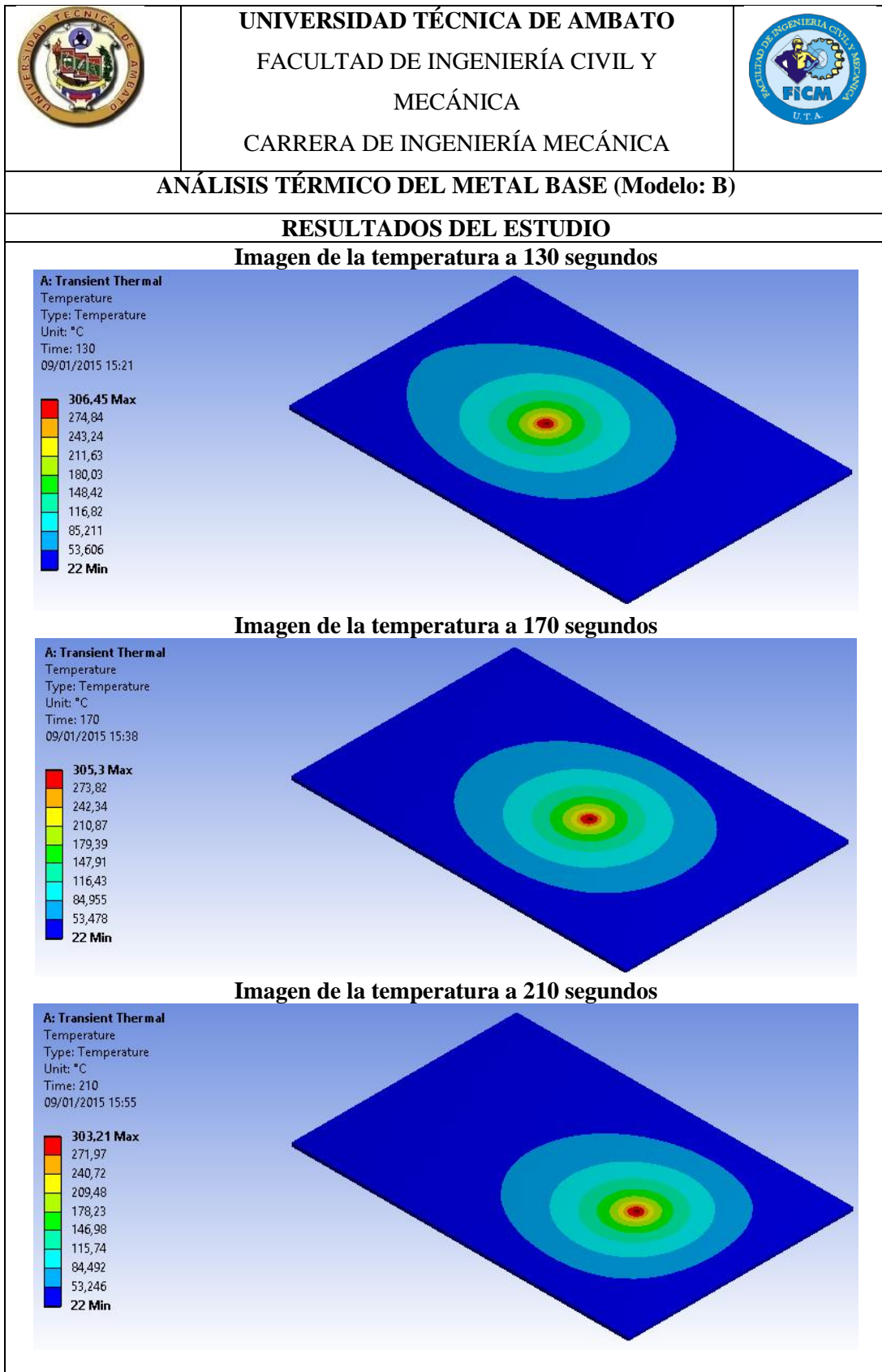
(Fuente: El autor)

Tabla 6.32 Resultados del análisis térmico del modelo B (10s, 50s y 90s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 10 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 10 09/01/2015 14:29</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 50 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 50 09/01/2015 14:47</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 90 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 90 09/01/2015 15:03</p> 		

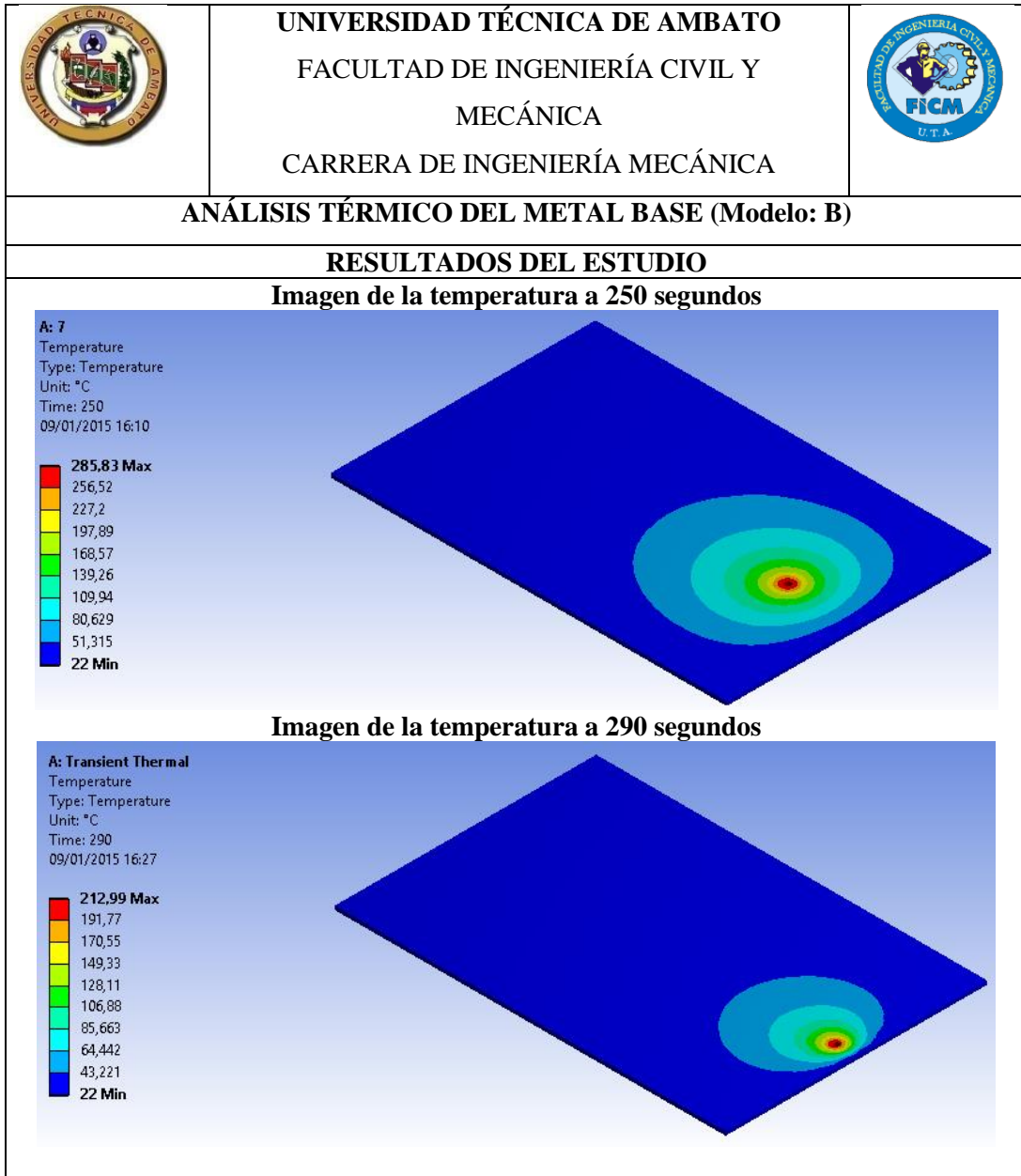
(Fuente: El autor)

Tabla 6.33 Resultados del análisis térmico del modelo B (130s, 170s y 210s)





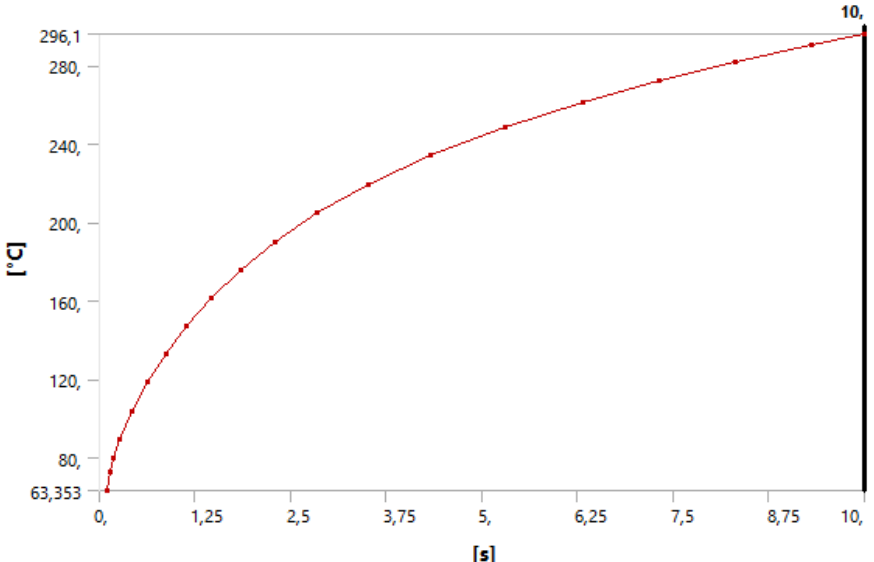
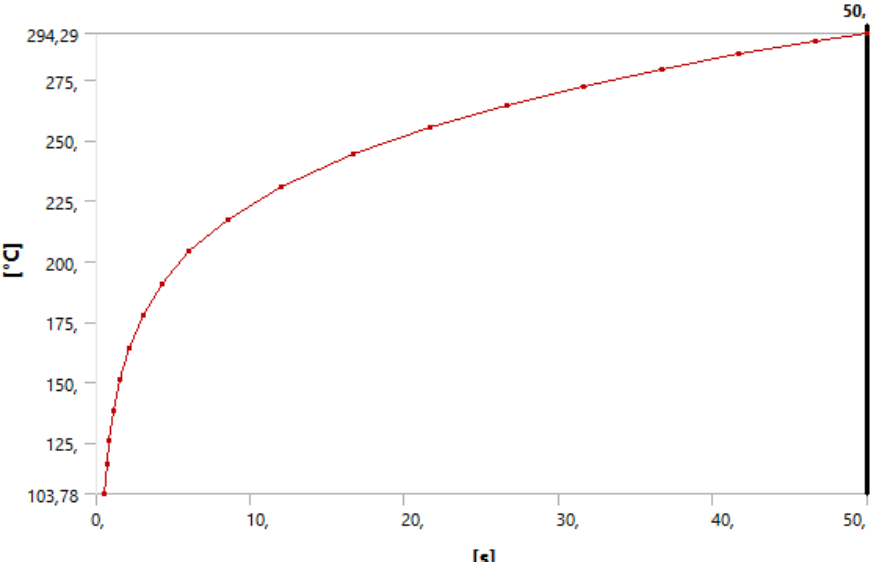
(Fuente: El autor)

Tabla 6.34 Resultados del análisis térmico del modelo B (250s y 290s)





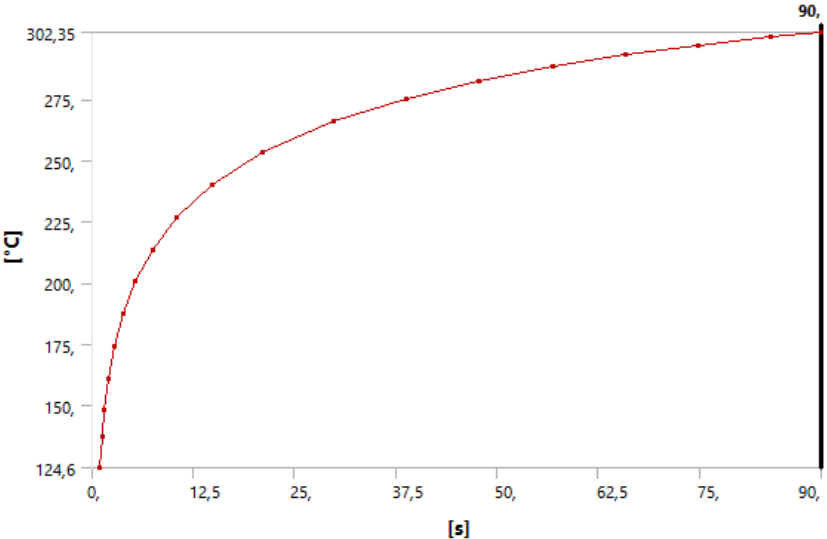
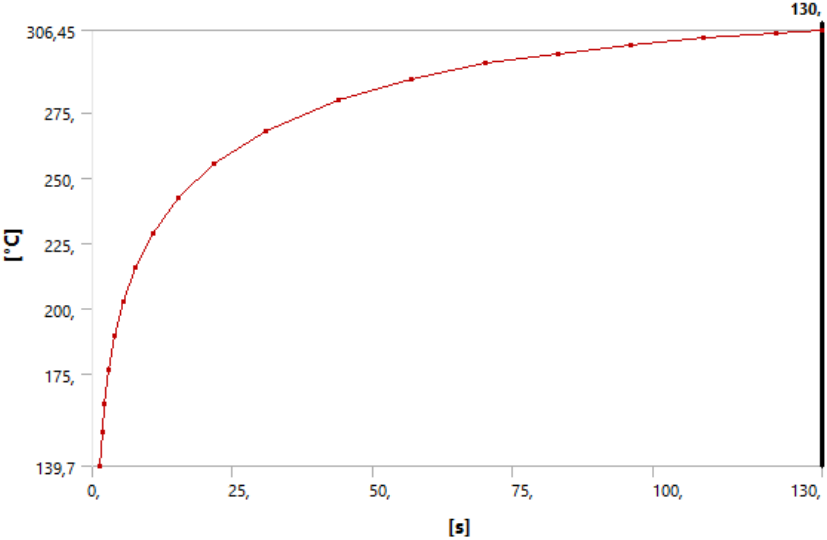
(Fuente: El autor)

Tabla 6.35 Temperatura respecto al tiempo del modelo B (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																													
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>																																																																														
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																														
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (10 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="399 672 1276 1232"> <caption>Data for 10-second temperature graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>63,353</td></tr> <tr><td>0,25</td><td>75</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>90</td></tr> <tr><td>0,75</td><td>105</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>120</td></tr> <tr><td>1,25</td><td>135</td></tr> <tr><td>1,5</td><td>150</td></tr> <tr><td>1,75</td><td>165</td></tr> <tr><td>2,0</td><td>180</td></tr> <tr><td>2,25</td><td>195</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>210</td></tr> <tr><td>2,75</td><td>225</td></tr> <tr><td>3,0</td><td>235</td></tr> <tr><td>3,25</td><td>245</td></tr> <tr><td>3,5</td><td>255</td></tr> <tr><td>3,75</td><td>265</td></tr> <tr><td>4,0</td><td>275</td></tr> <tr><td>4,25</td><td>285</td></tr> <tr><td>4,5</td><td>290</td></tr> <tr><td>4,75</td><td>295</td></tr> <tr><td>5,0</td><td>296,1</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (50 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="399 1344 1276 1904"> <caption>Data for 50-second temperature graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>103,78</td></tr> <tr><td>1</td><td>125</td></tr> <tr><td>2</td><td>145</td></tr> <tr><td>3</td><td>165</td></tr> <tr><td>4</td><td>180</td></tr> <tr><td>5</td><td>195</td></tr> <tr><td>10</td><td>215</td></tr> <tr><td>15</td><td>230</td></tr> <tr><td>20</td><td>245</td></tr> <tr><td>25</td><td>255</td></tr> <tr><td>30</td><td>265</td></tr> <tr><td>35</td><td>275</td></tr> <tr><td>40</td><td>285</td></tr> <tr><td>45</td><td>290</td></tr> <tr><td>50</td><td>294,29</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	63,353	0,25	75	0,5	90	0,75	105	1,0	120	1,25	135	1,5	150	1,75	165	2,0	180	2,25	195	2,5	210	2,75	225	3,0	235	3,25	245	3,5	255	3,75	265	4,0	275	4,25	285	4,5	290	4,75	295	5,0	296,1	Time [s]	Temperature [°C]	0	103,78	1	125	2	145	3	165	4	180	5	195	10	215	15	230	20	245	25	255	30	265	35	275	40	285	45	290	50	294,29
Time [s]	Temperature [°C]																																																																													
0	63,353																																																																													
0,25	75																																																																													
0,5	90																																																																													
0,75	105																																																																													
1,0	120																																																																													
1,25	135																																																																													
1,5	150																																																																													
1,75	165																																																																													
2,0	180																																																																													
2,25	195																																																																													
2,5	210																																																																													
2,75	225																																																																													
3,0	235																																																																													
3,25	245																																																																													
3,5	255																																																																													
3,75	265																																																																													
4,0	275																																																																													
4,25	285																																																																													
4,5	290																																																																													
4,75	295																																																																													
5,0	296,1																																																																													
Time [s]	Temperature [°C]																																																																													
0	103,78																																																																													
1	125																																																																													
2	145																																																																													
3	165																																																																													
4	180																																																																													
5	195																																																																													
10	215																																																																													
15	230																																																																													
20	245																																																																													
25	255																																																																													
30	265																																																																													
35	275																																																																													
40	285																																																																													
45	290																																																																													
50	294,29																																																																													



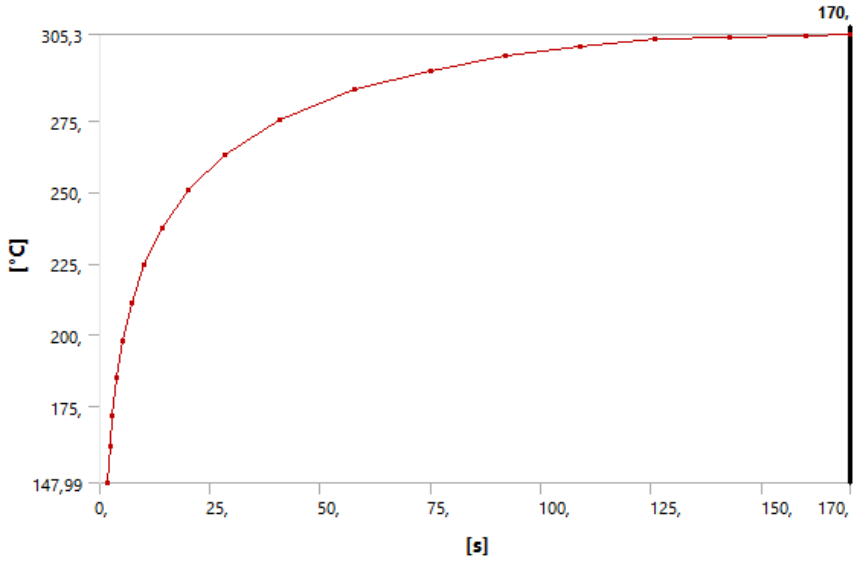
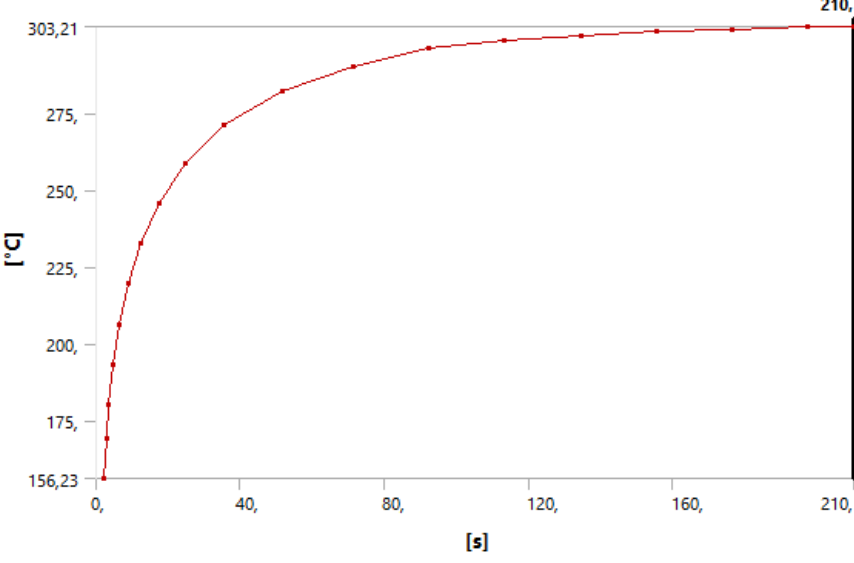
(Fuente: El autor)

Tabla 6.36 Temperatura respecto al tiempo del modelo B (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																																													
ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)																																																																																																														
RESULTADOS DEL ESTUDIO																																																																																																														
<p>Diagrama de la temperatura vs el tiempo (90 segundos)</p>  <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>Data for 90s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>124,6</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>150</td></tr> <tr><td>5</td><td>175</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>200</td></tr> <tr><td>10</td><td>215</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>225</td></tr> <tr><td>15</td><td>235</td></tr> <tr><td>20</td><td>245</td></tr> <tr><td>25</td><td>255</td></tr> <tr><td>30</td><td>265</td></tr> <tr><td>35</td><td>270</td></tr> <tr><td>40</td><td>275</td></tr> <tr><td>45</td><td>278</td></tr> <tr><td>50</td><td>280</td></tr> <tr><td>55</td><td>282</td></tr> <tr><td>60</td><td>284</td></tr> <tr><td>65</td><td>286</td></tr> <tr><td>70</td><td>288</td></tr> <tr><td>75</td><td>290</td></tr> <tr><td>80</td><td>292</td></tr> <tr><td>85</td><td>294</td></tr> <tr><td>90</td><td>302,35</td></tr> </tbody> </table> <p>Diagrama de la temperatura vs el tiempo (130 segundos)</p>  <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>Data for 130s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>139,7</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>165</td></tr> <tr><td>5</td><td>190</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>215</td></tr> <tr><td>10</td><td>230</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>240</td></tr> <tr><td>15</td><td>248</td></tr> <tr><td>20</td><td>258</td></tr> <tr><td>25</td><td>265</td></tr> <tr><td>30</td><td>270</td></tr> <tr><td>35</td><td>275</td></tr> <tr><td>40</td><td>278</td></tr> <tr><td>45</td><td>280</td></tr> <tr><td>50</td><td>282</td></tr> <tr><td>55</td><td>284</td></tr> <tr><td>60</td><td>286</td></tr> <tr><td>65</td><td>288</td></tr> <tr><td>70</td><td>290</td></tr> <tr><td>75</td><td>292</td></tr> <tr><td>80</td><td>294</td></tr> <tr><td>85</td><td>296</td></tr> <tr><td>90</td><td>298</td></tr> <tr><td>95</td><td>299</td></tr> <tr><td>100</td><td>300</td></tr> <tr><td>105</td><td>301</td></tr> <tr><td>110</td><td>302</td></tr> <tr><td>115</td><td>303</td></tr> <tr><td>120</td><td>304</td></tr> <tr><td>125</td><td>305</td></tr> <tr><td>130</td><td>306,45</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	124,6	2,5	150	5	175	7,5	200	10	215	12,5	225	15	235	20	245	25	255	30	265	35	270	40	275	45	278	50	280	55	282	60	284	65	286	70	288	75	290	80	292	85	294	90	302,35	Time [s]	Temperature [°C]	0	139,7	2,5	165	5	190	7,5	215	10	230	12,5	240	15	248	20	258	25	265	30	270	35	275	40	278	45	280	50	282	55	284	60	286	65	288	70	290	75	292	80	294	85	296	90	298	95	299	100	300	105	301	110	302	115	303	120	304	125	305	130	306,45
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																													
0	124,6																																																																																																													
2,5	150																																																																																																													
5	175																																																																																																													
7,5	200																																																																																																													
10	215																																																																																																													
12,5	225																																																																																																													
15	235																																																																																																													
20	245																																																																																																													
25	255																																																																																																													
30	265																																																																																																													
35	270																																																																																																													
40	275																																																																																																													
45	278																																																																																																													
50	280																																																																																																													
55	282																																																																																																													
60	284																																																																																																													
65	286																																																																																																													
70	288																																																																																																													
75	290																																																																																																													
80	292																																																																																																													
85	294																																																																																																													
90	302,35																																																																																																													
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																													
0	139,7																																																																																																													
2,5	165																																																																																																													
5	190																																																																																																													
7,5	215																																																																																																													
10	230																																																																																																													
12,5	240																																																																																																													
15	248																																																																																																													
20	258																																																																																																													
25	265																																																																																																													
30	270																																																																																																													
35	275																																																																																																													
40	278																																																																																																													
45	280																																																																																																													
50	282																																																																																																													
55	284																																																																																																													
60	286																																																																																																													
65	288																																																																																																													
70	290																																																																																																													
75	292																																																																																																													
80	294																																																																																																													
85	296																																																																																																													
90	298																																																																																																													
95	299																																																																																																													
100	300																																																																																																													
105	301																																																																																																													
110	302																																																																																																													
115	303																																																																																																													
120	304																																																																																																													
125	305																																																																																																													
130	306,45																																																																																																													



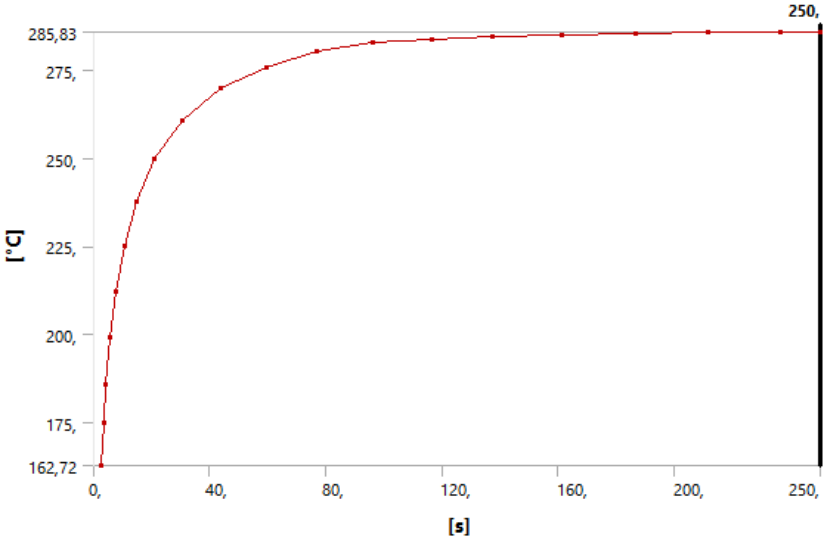
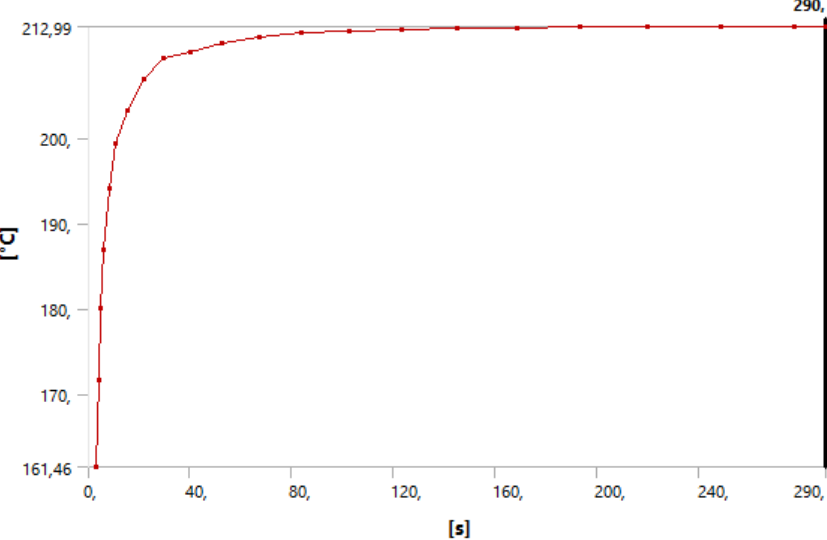
(Fuente: El autor)

Tabla 6.37 Temperatura respecto al tiempo del modelo B (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																																	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>																																																																																																		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																																		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (170 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="405 672 1262 1232"> <caption>Data for 170s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>147,99</td></tr> <tr><td>5</td><td>165</td></tr> <tr><td>10</td><td>185</td></tr> <tr><td>15</td><td>205</td></tr> <tr><td>20</td><td>225</td></tr> <tr><td>25</td><td>245</td></tr> <tr><td>30</td><td>260</td></tr> <tr><td>40</td><td>275</td></tr> <tr><td>50</td><td>285</td></tr> <tr><td>60</td><td>292</td></tr> <tr><td>70</td><td>297</td></tr> <tr><td>80</td><td>300</td></tr> <tr><td>90</td><td>302</td></tr> <tr><td>100</td><td>303</td></tr> <tr><td>110</td><td>304</td></tr> <tr><td>120</td><td>304,5</td></tr> <tr><td>130</td><td>304,8</td></tr> <tr><td>140</td><td>305,1</td></tr> <tr><td>150</td><td>305,2</td></tr> <tr><td>160</td><td>305,3</td></tr> <tr><td>170</td><td>305,3</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (210 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="405 1344 1262 1904"> <caption>Data for 210s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>156,23</td></tr> <tr><td>5</td><td>175</td></tr> <tr><td>10</td><td>195</td></tr> <tr><td>15</td><td>215</td></tr> <tr><td>20</td><td>235</td></tr> <tr><td>25</td><td>250</td></tr> <tr><td>30</td><td>260</td></tr> <tr><td>40</td><td>275</td></tr> <tr><td>50</td><td>285</td></tr> <tr><td>60</td><td>292</td></tr> <tr><td>70</td><td>297</td></tr> <tr><td>80</td><td>300</td></tr> <tr><td>90</td><td>302</td></tr> <tr><td>100</td><td>303</td></tr> <tr><td>110</td><td>303,5</td></tr> <tr><td>120</td><td>303,8</td></tr> <tr><td>130</td><td>304</td></tr> <tr><td>140</td><td>304,2</td></tr> <tr><td>150</td><td>304,4</td></tr> <tr><td>160</td><td>304,5</td></tr> <tr><td>170</td><td>304,6</td></tr> <tr><td>180</td><td>304,7</td></tr> <tr><td>190</td><td>304,8</td></tr> <tr><td>200</td><td>304,9</td></tr> <tr><td>210</td><td>303,21</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	147,99	5	165	10	185	15	205	20	225	25	245	30	260	40	275	50	285	60	292	70	297	80	300	90	302	100	303	110	304	120	304,5	130	304,8	140	305,1	150	305,2	160	305,3	170	305,3	Time [s]	Temperature [°C]	0	156,23	5	175	10	195	15	215	20	235	25	250	30	260	40	275	50	285	60	292	70	297	80	300	90	302	100	303	110	303,5	120	303,8	130	304	140	304,2	150	304,4	160	304,5	170	304,6	180	304,7	190	304,8	200	304,9	210	303,21
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	147,99																																																																																																	
5	165																																																																																																	
10	185																																																																																																	
15	205																																																																																																	
20	225																																																																																																	
25	245																																																																																																	
30	260																																																																																																	
40	275																																																																																																	
50	285																																																																																																	
60	292																																																																																																	
70	297																																																																																																	
80	300																																																																																																	
90	302																																																																																																	
100	303																																																																																																	
110	304																																																																																																	
120	304,5																																																																																																	
130	304,8																																																																																																	
140	305,1																																																																																																	
150	305,2																																																																																																	
160	305,3																																																																																																	
170	305,3																																																																																																	
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	156,23																																																																																																	
5	175																																																																																																	
10	195																																																																																																	
15	215																																																																																																	
20	235																																																																																																	
25	250																																																																																																	
30	260																																																																																																	
40	275																																																																																																	
50	285																																																																																																	
60	292																																																																																																	
70	297																																																																																																	
80	300																																																																																																	
90	302																																																																																																	
100	303																																																																																																	
110	303,5																																																																																																	
120	303,8																																																																																																	
130	304																																																																																																	
140	304,2																																																																																																	
150	304,4																																																																																																	
160	304,5																																																																																																	
170	304,6																																																																																																	
180	304,7																																																																																																	
190	304,8																																																																																																	
200	304,9																																																																																																	
210	303,21																																																																																																	



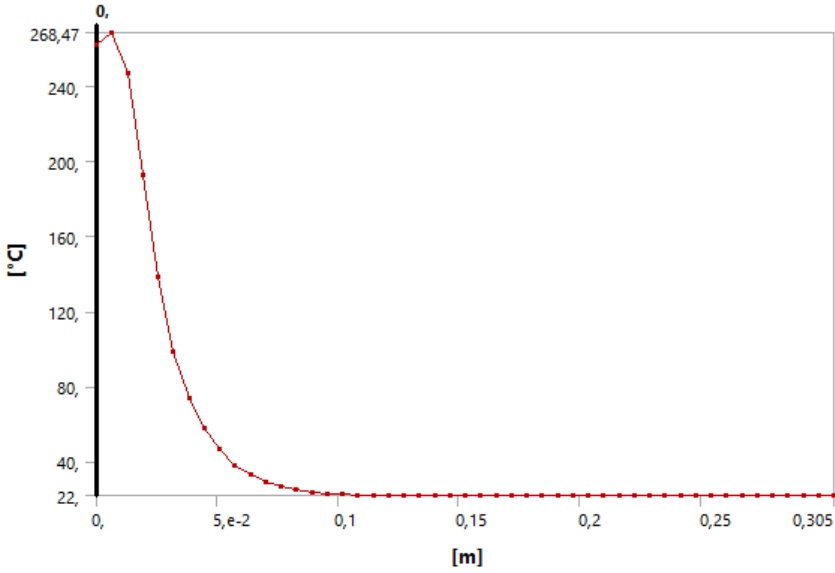
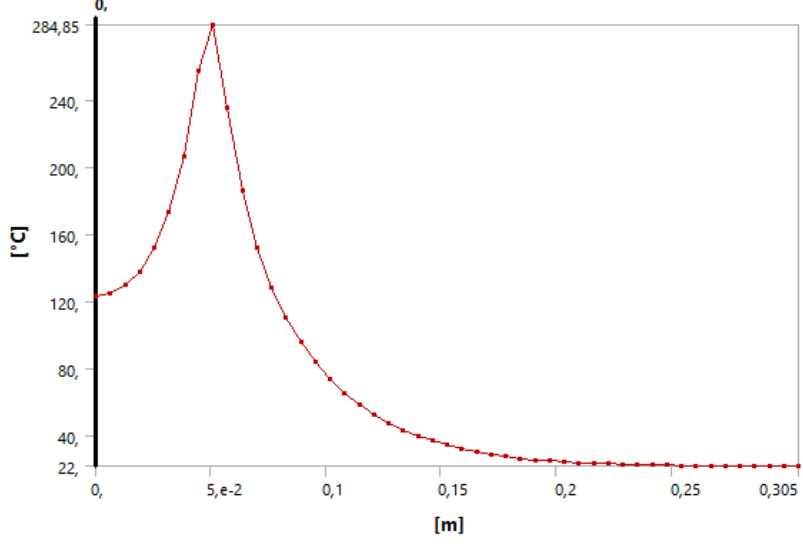
(Fuente: El autor)

Tabla 6.38 Temperatura respecto al tiempo del modelo B (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (290 segundos)</p> 		



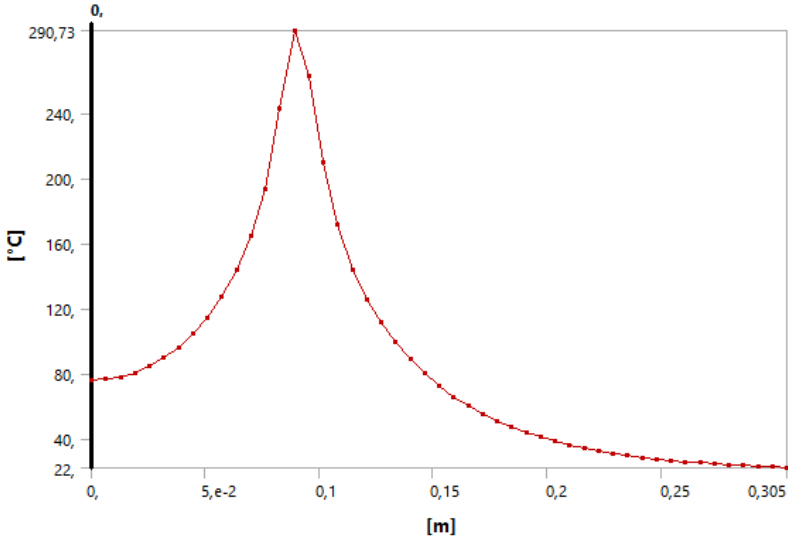
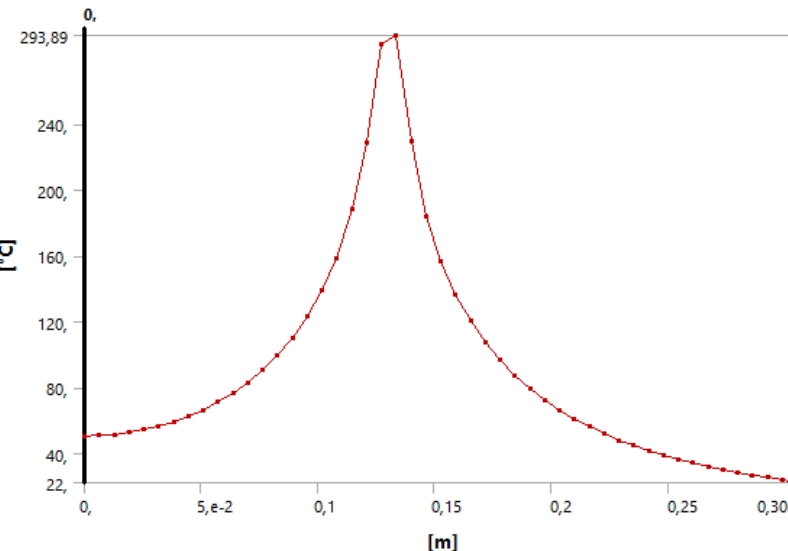
(Fuente: El autor)

Tabla 6.39 Temperatura respecto la longitud del modelo B (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (10 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (50 segundos)</p> 		



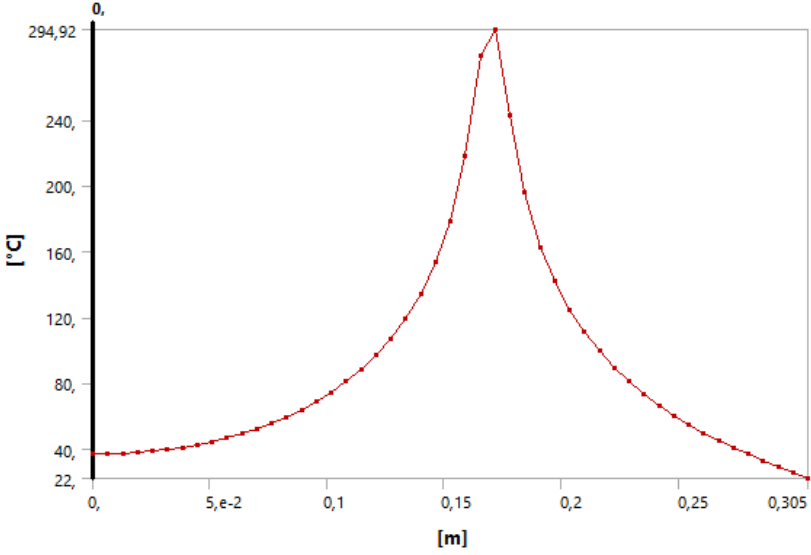
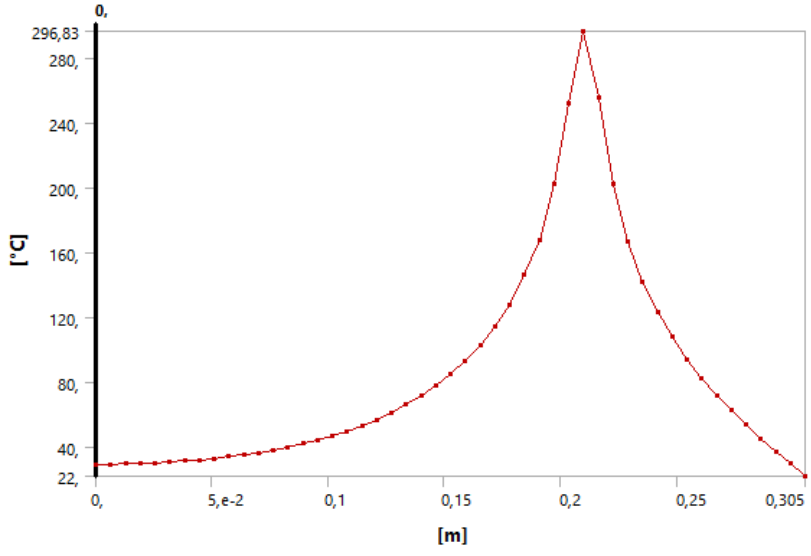
(Fuente: El autor)

Tabla 6.40 Temperatura respecto la longitud del modelo B (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (90 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (130 segundos)</p> 		



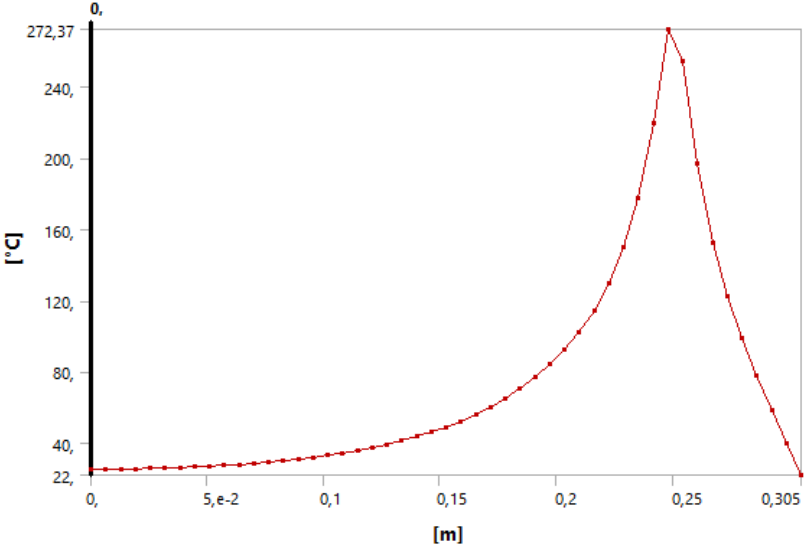
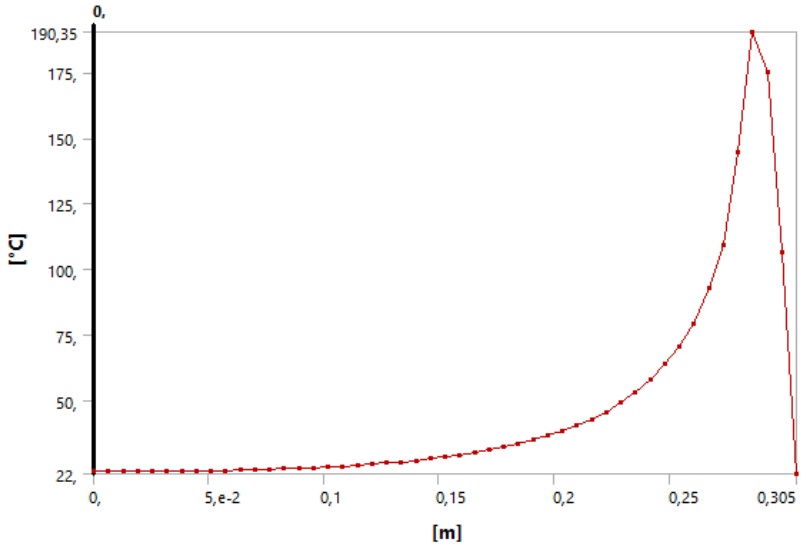
(Fuente: El autor)

Tabla 6.41 Temperatura respecto la longitud del modelo B (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (170 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (210 segundos)</p> 		



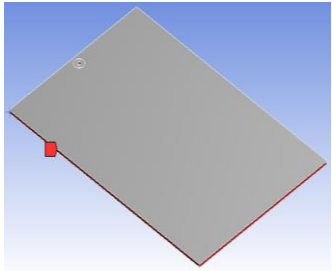
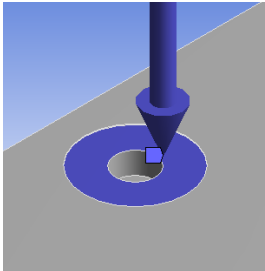
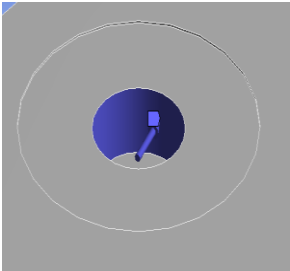
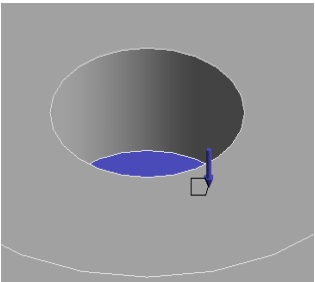
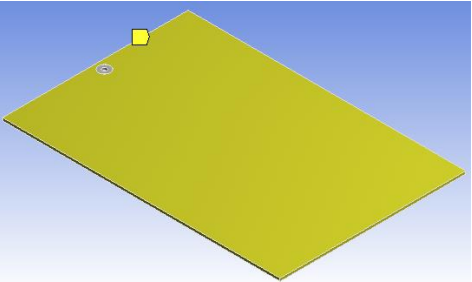
(Fuente: El autor)

Tabla 6.42 Temperatura respecto la longitud del modelo B (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: B)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (290 segundos)</p> 		

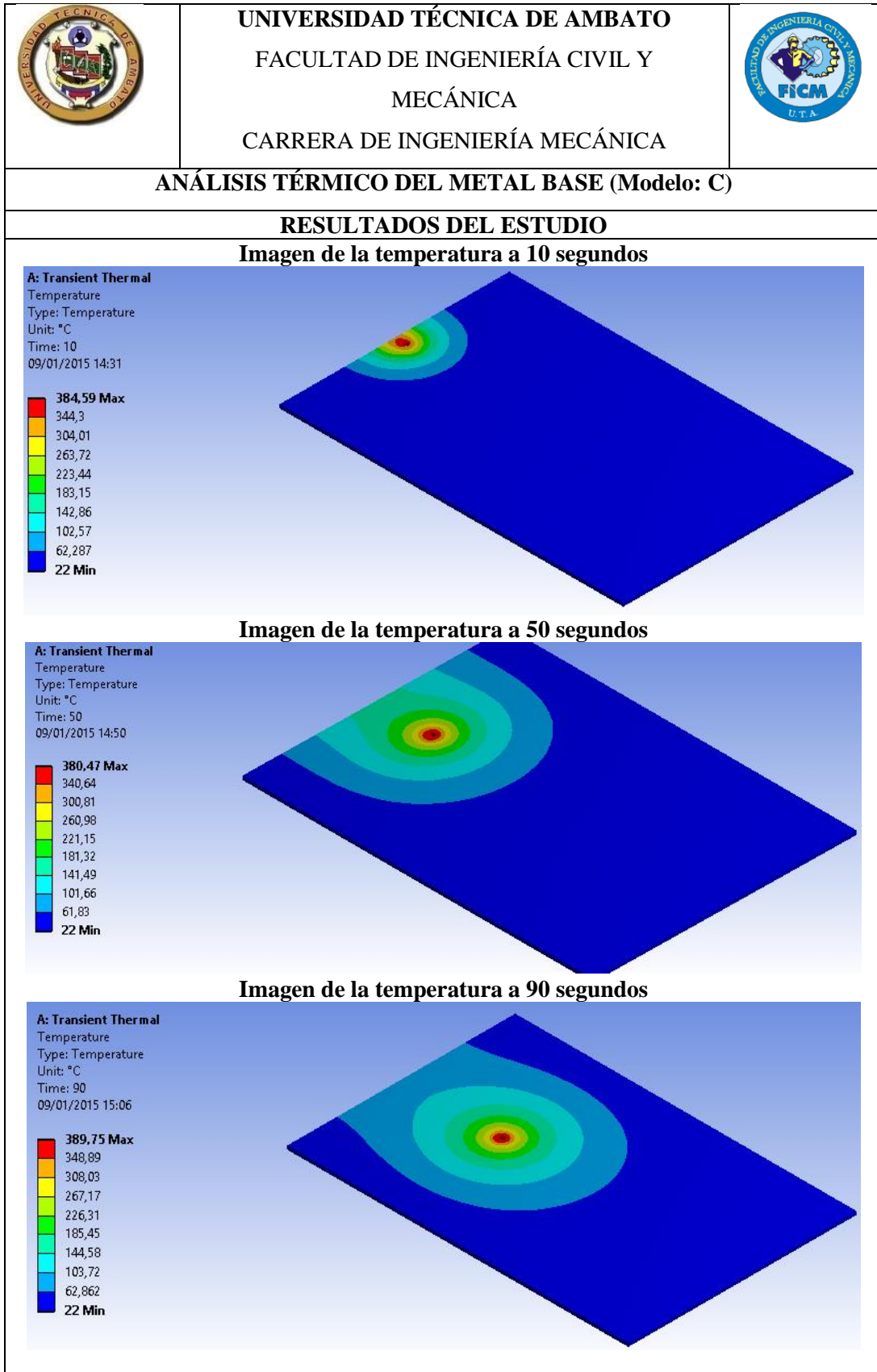
(Fuente: El autor)

Tabla 6.43 Datos para el análisis térmico del modelo C

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS					
Masa:		0.503798 kg		Densidad:	
Volumen:		0.000186592 m ³		Peso:	
				2700 kg/m ³	
				4.93722 N	
PROPIEDADES DEL MATERIAL Al 6061					
Conductividad térmica:			166.9 W/(m.K)		
Calor específico:			896 J/(kg.K)		
Densidad:			2700 kg/m ³		
CARGAS TÉRMICAS					
Imágenes de las condiciones del contorno y cargas térmicas					
 <p>Valor de la temperatura externa: 22 C</p>		 <p>Flujo de calor producido por el hombro: 283.28W</p>		 <p>Flujo de calor producido por la superficie cilíndrica del pin: 61.52W</p>	
 <p>Flujo de calor producido por la superficie circular del pin: 17.09W</p>			 <p>Coefficiente de transferencia de calor del pin: 34.229W/m²*K</p>		



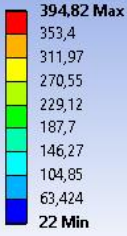
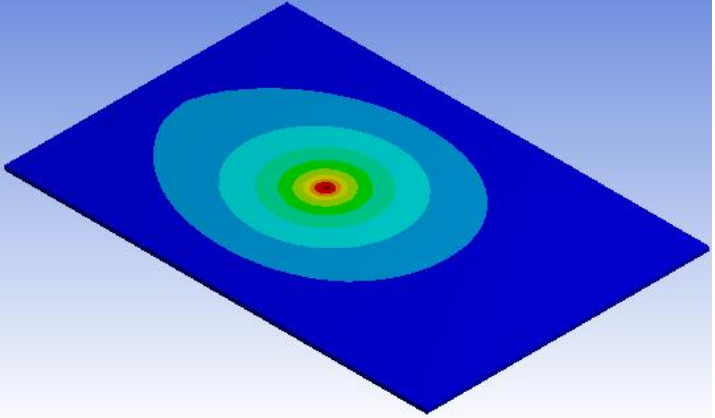
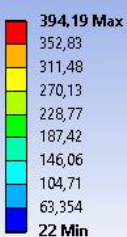
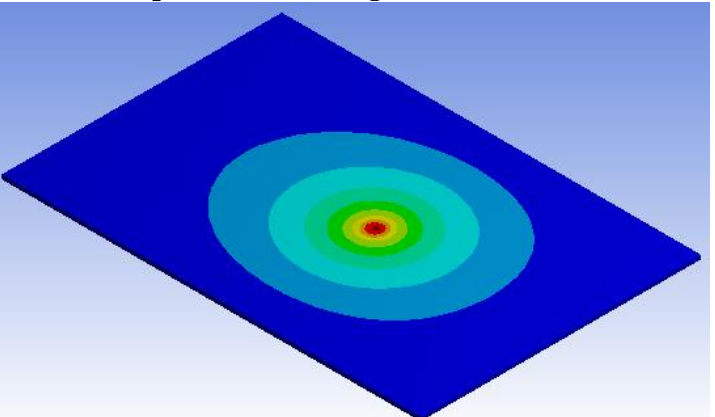
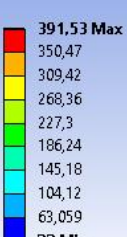
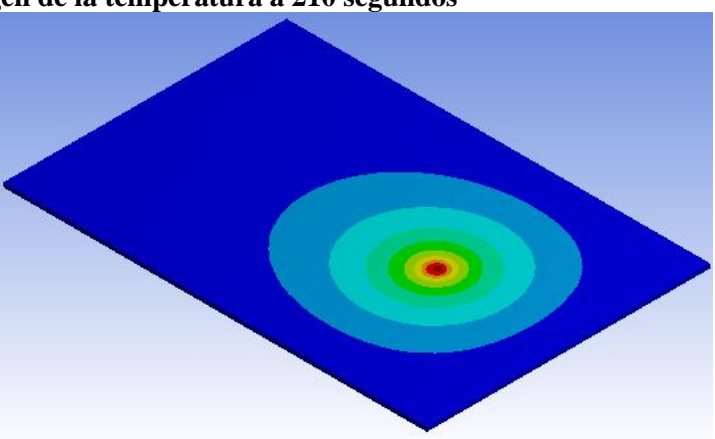
(Fuente: El autor)

Tabla 6.44 Resultados del análisis térmico del modelo C (10s, 50s y 90s)



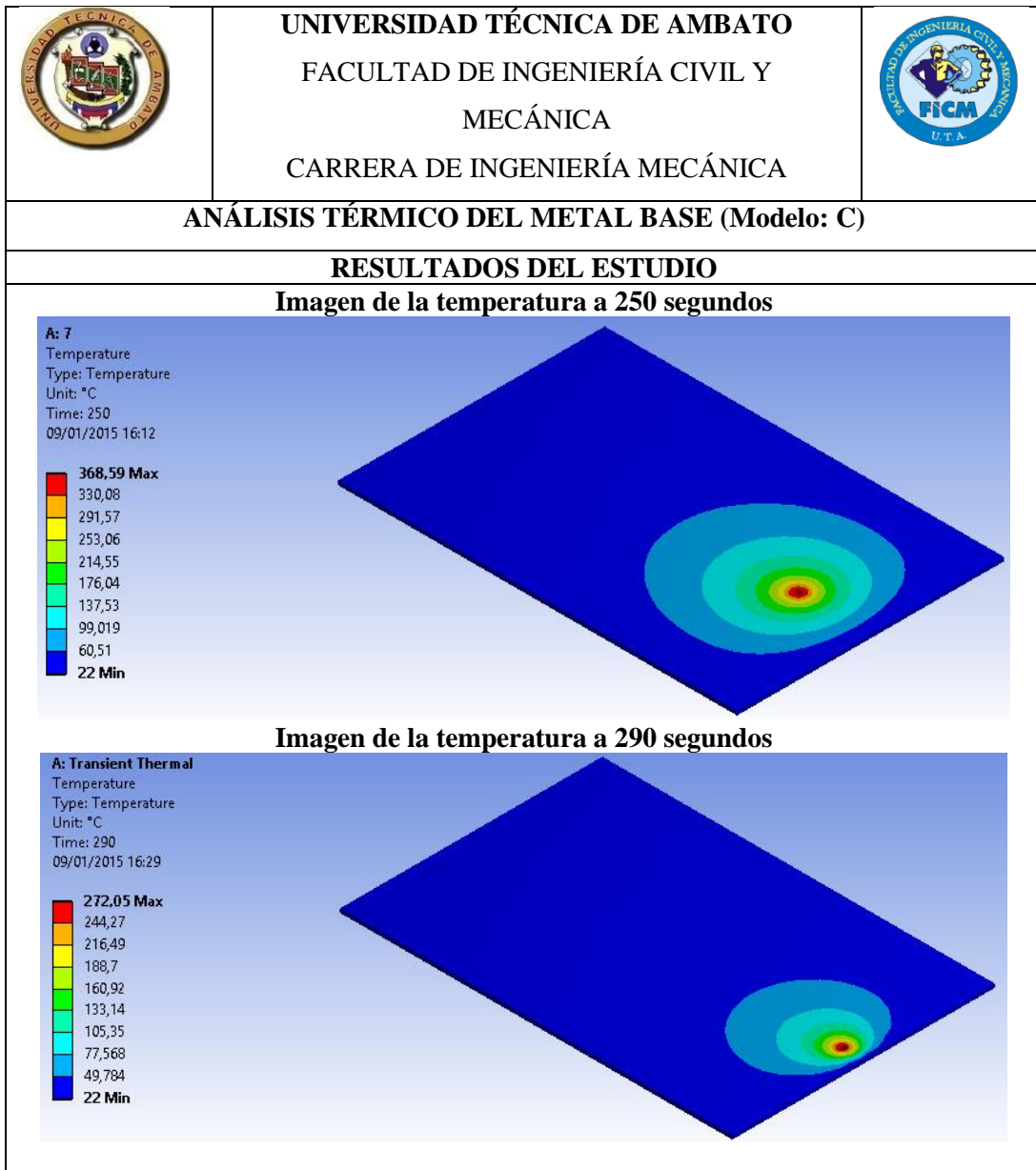
(Fuente: El autor)

Tabla 6.45 Resultados del análisis térmico del modelo C (130s, 170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 130 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 130 09/01/2015 15:24</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 170 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 170 09/01/2015 15:40</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 210 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 210 09/01/2015 15:58</p> 		



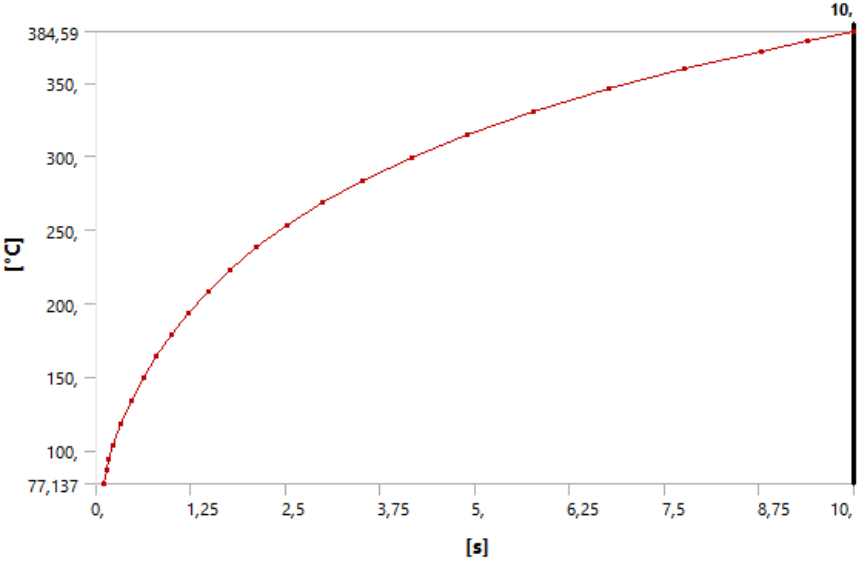
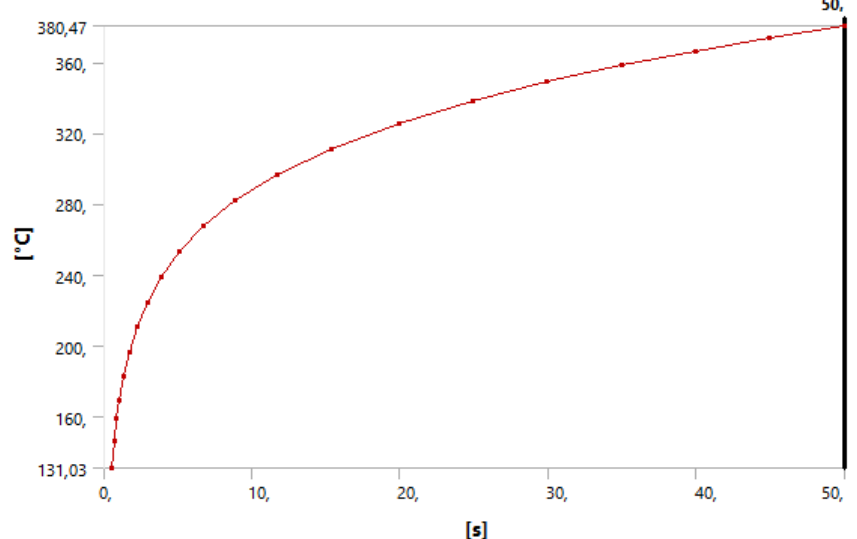
(Fuente: El autor)

Tabla 6.46 Resultados del análisis térmico del modelo C (250s y 290s)



(Fuente: El autor)

Tabla 6.47 Temperatura respecto al tiempo del modelo C (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																			
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>																																				
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																				
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (10 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="405 674 1265 1234"> <caption>Data for 10-second temperature graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>77,137</td></tr> <tr><td>1,25</td><td>190</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>250</td></tr> <tr><td>3,75</td><td>285</td></tr> <tr><td>5</td><td>310</td></tr> <tr><td>6,25</td><td>330</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>345</td></tr> <tr><td>8,75</td><td>360</td></tr> <tr><td>10</td><td>384,59</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (50 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="405 1346 1265 1883"> <caption>Data for 50-second temperature graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>131,03</td></tr> <tr><td>10</td><td>280</td></tr> <tr><td>20</td><td>320</td></tr> <tr><td>30</td><td>345</td></tr> <tr><td>40</td><td>365</td></tr> <tr><td>50</td><td>380,47</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	77,137	1,25	190	2,5	250	3,75	285	5	310	6,25	330	7,5	345	8,75	360	10	384,59	Time [s]	Temperature [°C]	0	131,03	10	280	20	320	30	345	40	365	50	380,47
Time [s]	Temperature [°C]																																			
0	77,137																																			
1,25	190																																			
2,5	250																																			
3,75	285																																			
5	310																																			
6,25	330																																			
7,5	345																																			
8,75	360																																			
10	384,59																																			
Time [s]	Temperature [°C]																																			
0	131,03																																			
10	280																																			
20	320																																			
30	345																																			
40	365																																			
50	380,47																																			

(Fuente: El autor)

Tabla 6.48 Temperatura respecto al tiempo del modelo C (90s y 130s)



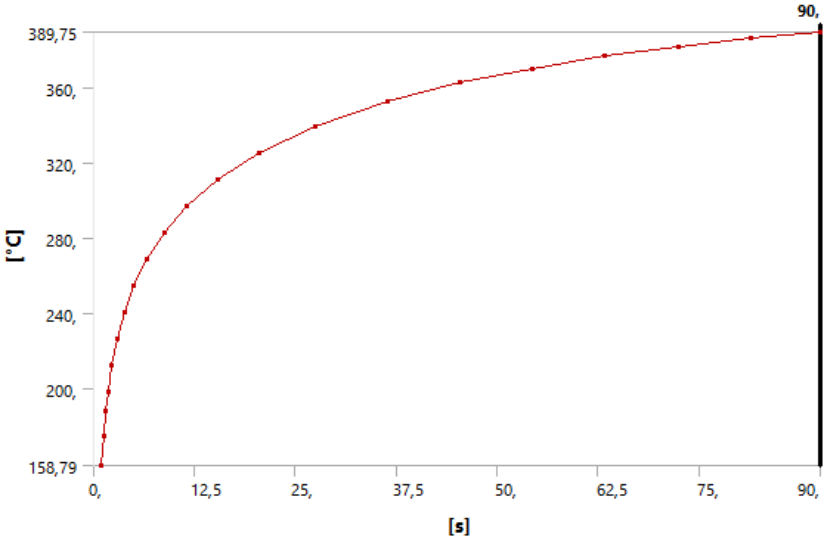
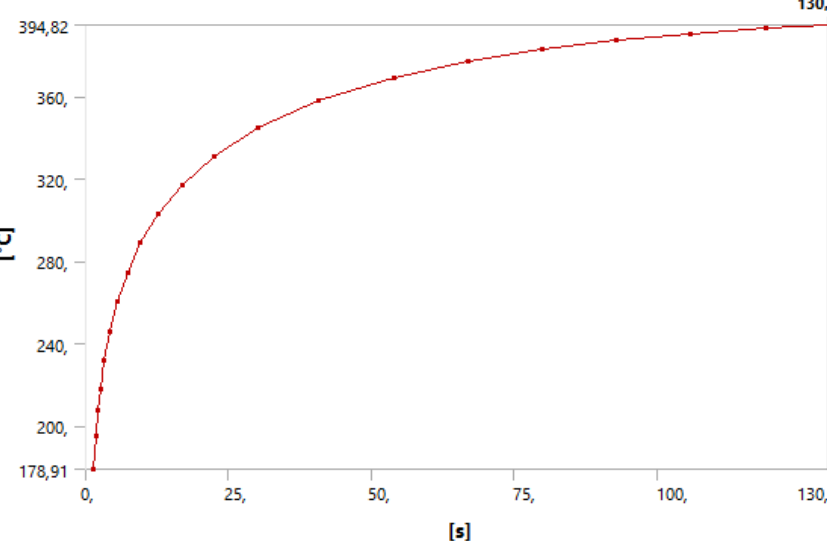


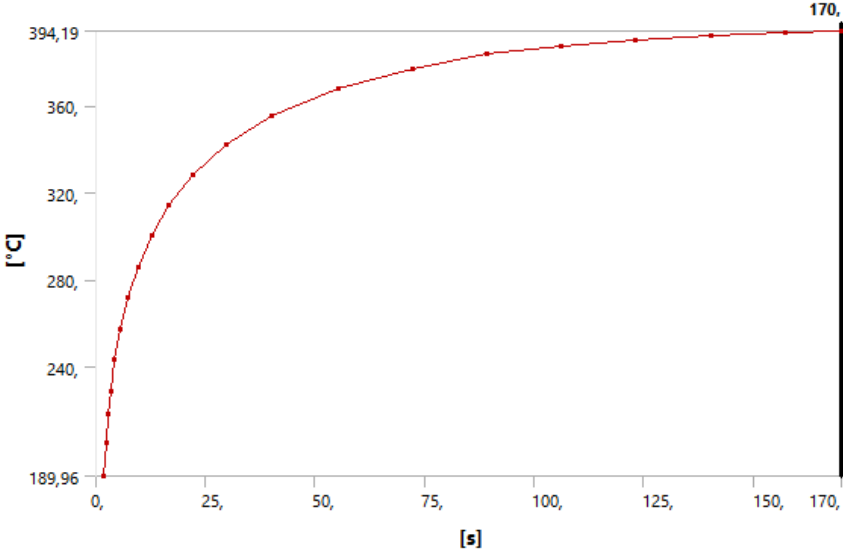
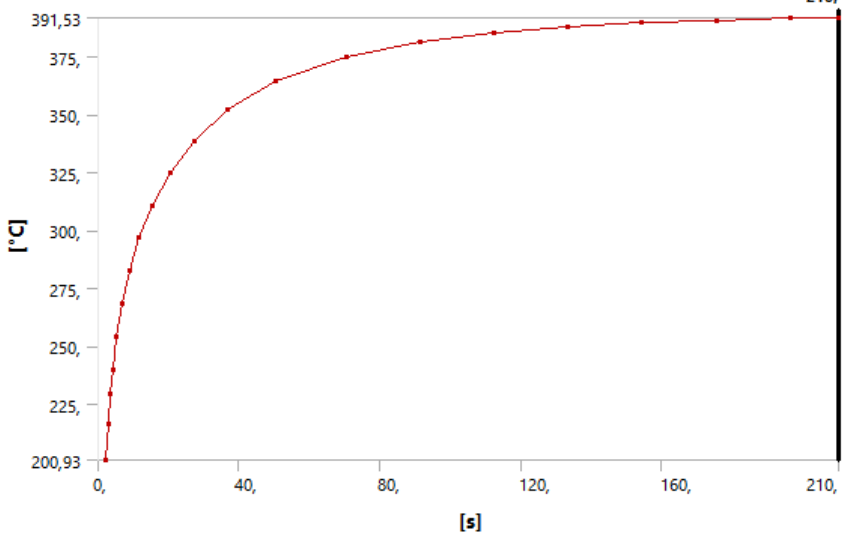


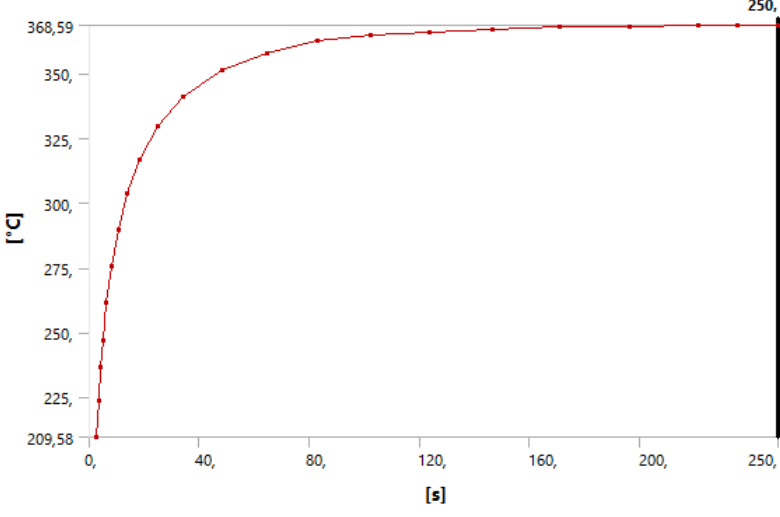
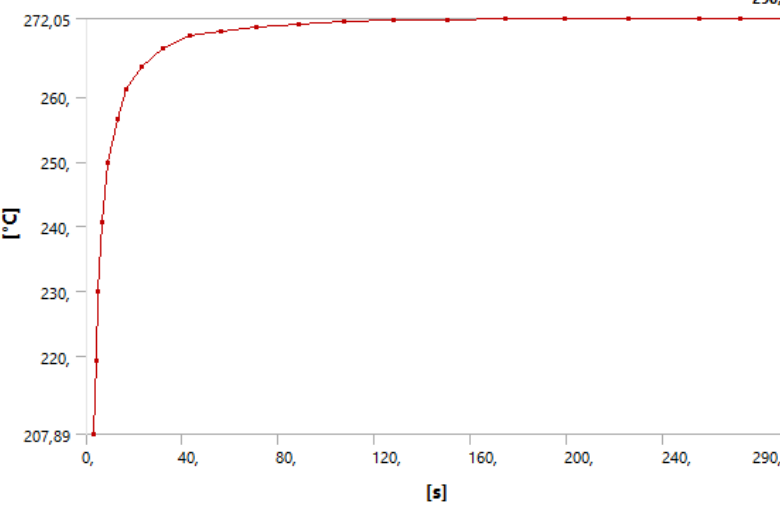
	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																																																	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>																																																																																																																		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																																																		
<div style="text-align: center;"> <p>Diagrama de la temperatura vs el tiempo (90 segundos)</p>  <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>Data for 90s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>158,79</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>180</td></tr> <tr><td>5</td><td>200</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>220</td></tr> <tr><td>10</td><td>240</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>260</td></tr> <tr><td>15</td><td>275</td></tr> <tr><td>17,5</td><td>285</td></tr> <tr><td>20</td><td>295</td></tr> <tr><td>25</td><td>310</td></tr> <tr><td>30</td><td>320</td></tr> <tr><td>35</td><td>330</td></tr> <tr><td>40</td><td>340</td></tr> <tr><td>45</td><td>348</td></tr> <tr><td>50</td><td>355</td></tr> <tr><td>55</td><td>360</td></tr> <tr><td>60</td><td>365</td></tr> <tr><td>65</td><td>370</td></tr> <tr><td>70</td><td>375</td></tr> <tr><td>75</td><td>378</td></tr> <tr><td>80</td><td>382</td></tr> <tr><td>85</td><td>385</td></tr> <tr><td>90</td><td>389,75</td></tr> </tbody> </table> <p>Diagrama de la temperatura vs el tiempo (130 segundos)</p>  <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <caption>Data for 130s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>178,91</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>195</td></tr> <tr><td>5</td><td>215</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>235</td></tr> <tr><td>10</td><td>255</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>270</td></tr> <tr><td>15</td><td>285</td></tr> <tr><td>17,5</td><td>295</td></tr> <tr><td>20</td><td>305</td></tr> <tr><td>25</td><td>320</td></tr> <tr><td>30</td><td>330</td></tr> <tr><td>35</td><td>340</td></tr> <tr><td>40</td><td>348</td></tr> <tr><td>45</td><td>355</td></tr> <tr><td>50</td><td>360</td></tr> <tr><td>55</td><td>365</td></tr> <tr><td>60</td><td>370</td></tr> <tr><td>65</td><td>375</td></tr> <tr><td>70</td><td>378</td></tr> <tr><td>75</td><td>382</td></tr> <tr><td>80</td><td>385</td></tr> <tr><td>85</td><td>388</td></tr> <tr><td>90</td><td>390</td></tr> <tr><td>95</td><td>392</td></tr> <tr><td>100</td><td>393</td></tr> <tr><td>105</td><td>394</td></tr> <tr><td>110</td><td>394,5</td></tr> <tr><td>115</td><td>394,8</td></tr> <tr><td>120</td><td>394,82</td></tr> <tr><td>125</td><td>394,82</td></tr> <tr><td>130</td><td>394,82</td></tr> </tbody> </table> </div>			Time [s]	Temperature [°C]	0	158,79	2,5	180	5	200	7,5	220	10	240	12,5	260	15	275	17,5	285	20	295	25	310	30	320	35	330	40	340	45	348	50	355	55	360	60	365	65	370	70	375	75	378	80	382	85	385	90	389,75	Time [s]	Temperature [°C]	0	178,91	2,5	195	5	215	7,5	235	10	255	12,5	270	15	285	17,5	295	20	305	25	320	30	330	35	340	40	348	45	355	50	360	55	365	60	370	65	375	70	378	75	382	80	385	85	388	90	390	95	392	100	393	105	394	110	394,5	115	394,8	120	394,82	125	394,82	130	394,82
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																																	
0	158,79																																																																																																																	
2,5	180																																																																																																																	
5	200																																																																																																																	
7,5	220																																																																																																																	
10	240																																																																																																																	
12,5	260																																																																																																																	
15	275																																																																																																																	
17,5	285																																																																																																																	
20	295																																																																																																																	
25	310																																																																																																																	
30	320																																																																																																																	
35	330																																																																																																																	
40	340																																																																																																																	
45	348																																																																																																																	
50	355																																																																																																																	
55	360																																																																																																																	
60	365																																																																																																																	
65	370																																																																																																																	
70	375																																																																																																																	
75	378																																																																																																																	
80	382																																																																																																																	
85	385																																																																																																																	
90	389,75																																																																																																																	
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																																	
0	178,91																																																																																																																	
2,5	195																																																																																																																	
5	215																																																																																																																	
7,5	235																																																																																																																	
10	255																																																																																																																	
12,5	270																																																																																																																	
15	285																																																																																																																	
17,5	295																																																																																																																	
20	305																																																																																																																	
25	320																																																																																																																	
30	330																																																																																																																	
35	340																																																																																																																	
40	348																																																																																																																	
45	355																																																																																																																	
50	360																																																																																																																	
55	365																																																																																																																	
60	370																																																																																																																	
65	375																																																																																																																	
70	378																																																																																																																	
75	382																																																																																																																	
80	385																																																																																																																	
85	388																																																																																																																	
90	390																																																																																																																	
95	392																																																																																																																	
100	393																																																																																																																	
105	394																																																																																																																	
110	394,5																																																																																																																	
115	394,8																																																																																																																	
120	394,82																																																																																																																	
125	394,82																																																																																																																	
130	394,82																																																																																																																	
<p>(Fuente: El autor)</p>																																																																																																																		

Tabla 6.49 Temperatura respecto al tiempo del modelo C (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																							
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>																																																								
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																								
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (170 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="411 674 1257 1227"> <caption>Data for 170s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>189,96</td></tr> <tr><td>5</td><td>240</td></tr> <tr><td>10</td><td>280</td></tr> <tr><td>20</td><td>320</td></tr> <tr><td>30</td><td>345</td></tr> <tr><td>40</td><td>358</td></tr> <tr><td>50</td><td>368</td></tr> <tr><td>75</td><td>382</td></tr> <tr><td>100</td><td>388</td></tr> <tr><td>125</td><td>391</td></tr> <tr><td>150</td><td>393</td></tr> <tr><td>170</td><td>394,19</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (210 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="411 1346 1257 1899"> <caption>Data for 210s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>200,93</td></tr> <tr><td>5</td><td>240</td></tr> <tr><td>10</td><td>280</td></tr> <tr><td>20</td><td>320</td></tr> <tr><td>30</td><td>345</td></tr> <tr><td>40</td><td>358</td></tr> <tr><td>50</td><td>368</td></tr> <tr><td>75</td><td>382</td></tr> <tr><td>100</td><td>388</td></tr> <tr><td>125</td><td>391</td></tr> <tr><td>150</td><td>393</td></tr> <tr><td>170</td><td>394,19</td></tr> <tr><td>210</td><td>391,53</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	189,96	5	240	10	280	20	320	30	345	40	358	50	368	75	382	100	388	125	391	150	393	170	394,19	Time [s]	Temperature [°C]	0	200,93	5	240	10	280	20	320	30	345	40	358	50	368	75	382	100	388	125	391	150	393	170	394,19	210	391,53
Time [s]	Temperature [°C]																																																							
0	189,96																																																							
5	240																																																							
10	280																																																							
20	320																																																							
30	345																																																							
40	358																																																							
50	368																																																							
75	382																																																							
100	388																																																							
125	391																																																							
150	393																																																							
170	394,19																																																							
Time [s]	Temperature [°C]																																																							
0	200,93																																																							
5	240																																																							
10	280																																																							
20	320																																																							
30	345																																																							
40	358																																																							
50	368																																																							
75	382																																																							
100	388																																																							
125	391																																																							
150	393																																																							
170	394,19																																																							
210	391,53																																																							



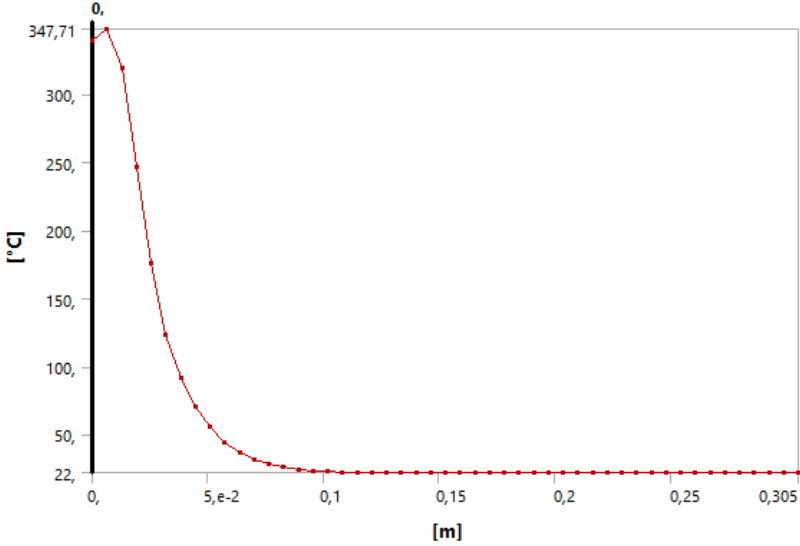
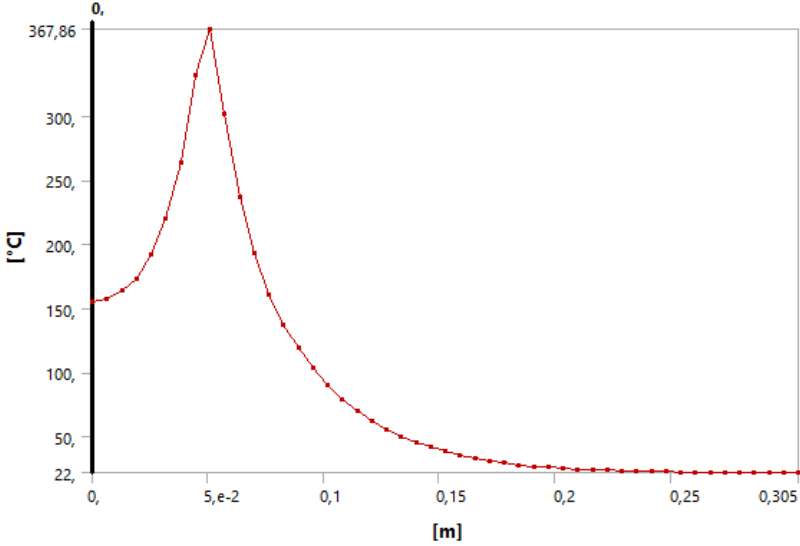
(Fuente: El autor)

Tabla 6.50 Temperatura respecto al tiempo del modelo C (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																					
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>																																																																																						
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																						
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (250 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="443 728 1225 1243"> <caption>Data for 250s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>209,58</td></tr> <tr><td>5</td><td>225</td></tr> <tr><td>10</td><td>250</td></tr> <tr><td>15</td><td>275</td></tr> <tr><td>20</td><td>295</td></tr> <tr><td>25</td><td>310</td></tr> <tr><td>30</td><td>320</td></tr> <tr><td>40</td><td>335</td></tr> <tr><td>60</td><td>350</td></tr> <tr><td>80</td><td>358</td></tr> <tr><td>100</td><td>362</td></tr> <tr><td>120</td><td>365</td></tr> <tr><td>140</td><td>366</td></tr> <tr><td>160</td><td>367</td></tr> <tr><td>180</td><td>367,5</td></tr> <tr><td>200</td><td>368</td></tr> <tr><td>220</td><td>368,2</td></tr> <tr><td>240</td><td>368,4</td></tr> <tr><td>250</td><td>368,59</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (290 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="443 1355 1225 1870"> <caption>Data for 290s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>207,89</td></tr> <tr><td>5</td><td>220</td></tr> <tr><td>10</td><td>230</td></tr> <tr><td>15</td><td>240</td></tr> <tr><td>20</td><td>250</td></tr> <tr><td>25</td><td>258</td></tr> <tr><td>30</td><td>262</td></tr> <tr><td>40</td><td>266</td></tr> <tr><td>60</td><td>270</td></tr> <tr><td>80</td><td>271,5</td></tr> <tr><td>100</td><td>271,8</td></tr> <tr><td>120</td><td>271,9</td></tr> <tr><td>140</td><td>272,0</td></tr> <tr><td>160</td><td>272,02</td></tr> <tr><td>180</td><td>272,03</td></tr> <tr><td>200</td><td>272,04</td></tr> <tr><td>220</td><td>272,045</td></tr> <tr><td>240</td><td>272,048</td></tr> <tr><td>260</td><td>272,05</td></tr> <tr><td>280</td><td>272,05</td></tr> <tr><td>290</td><td>272,05</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	209,58	5	225	10	250	15	275	20	295	25	310	30	320	40	335	60	350	80	358	100	362	120	365	140	366	160	367	180	367,5	200	368	220	368,2	240	368,4	250	368,59	Time [s]	Temperature [°C]	0	207,89	5	220	10	230	15	240	20	250	25	258	30	262	40	266	60	270	80	271,5	100	271,8	120	271,9	140	272,0	160	272,02	180	272,03	200	272,04	220	272,045	240	272,048	260	272,05	280	272,05	290	272,05
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																					
0	209,58																																																																																					
5	225																																																																																					
10	250																																																																																					
15	275																																																																																					
20	295																																																																																					
25	310																																																																																					
30	320																																																																																					
40	335																																																																																					
60	350																																																																																					
80	358																																																																																					
100	362																																																																																					
120	365																																																																																					
140	366																																																																																					
160	367																																																																																					
180	367,5																																																																																					
200	368																																																																																					
220	368,2																																																																																					
240	368,4																																																																																					
250	368,59																																																																																					
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																					
0	207,89																																																																																					
5	220																																																																																					
10	230																																																																																					
15	240																																																																																					
20	250																																																																																					
25	258																																																																																					
30	262																																																																																					
40	266																																																																																					
60	270																																																																																					
80	271,5																																																																																					
100	271,8																																																																																					
120	271,9																																																																																					
140	272,0																																																																																					
160	272,02																																																																																					
180	272,03																																																																																					
200	272,04																																																																																					
220	272,045																																																																																					
240	272,048																																																																																					
260	272,05																																																																																					
280	272,05																																																																																					
290	272,05																																																																																					



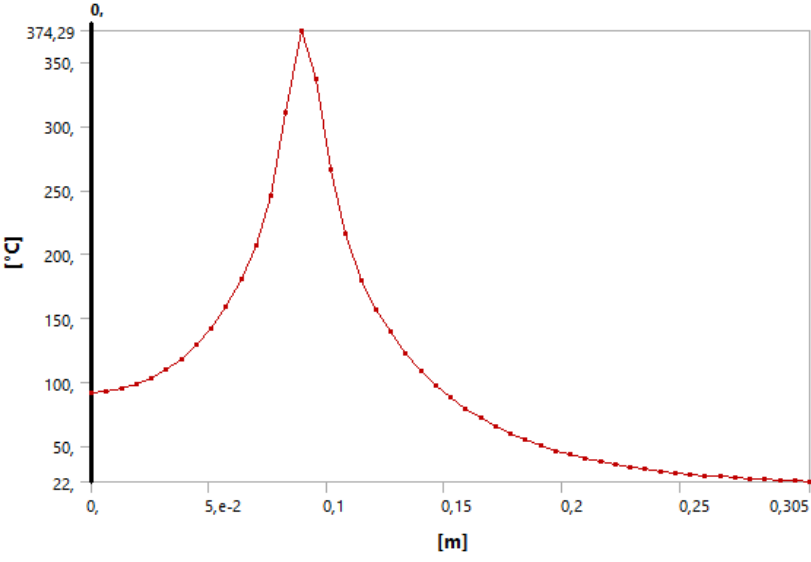
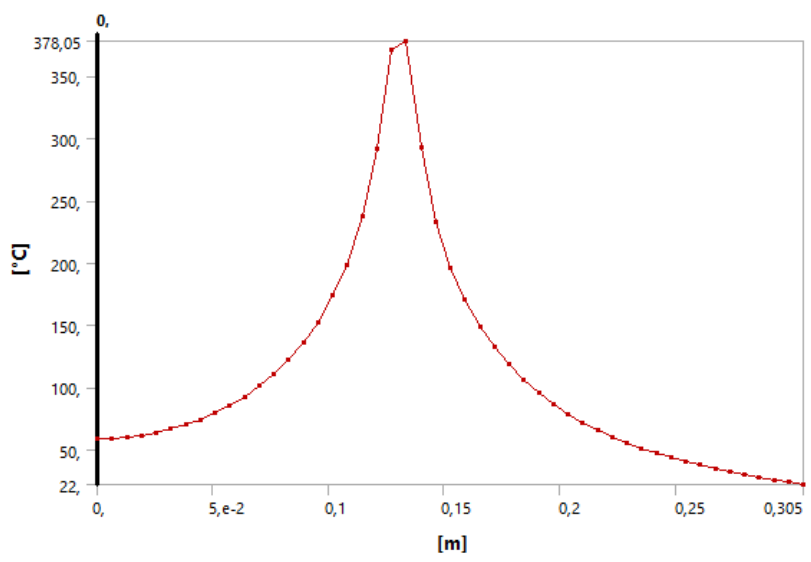
(Fuente: El autor)

Tabla 6.51 Temperatura respecto la longitud del modelo C (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (10 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (50 segundos)</p> 		



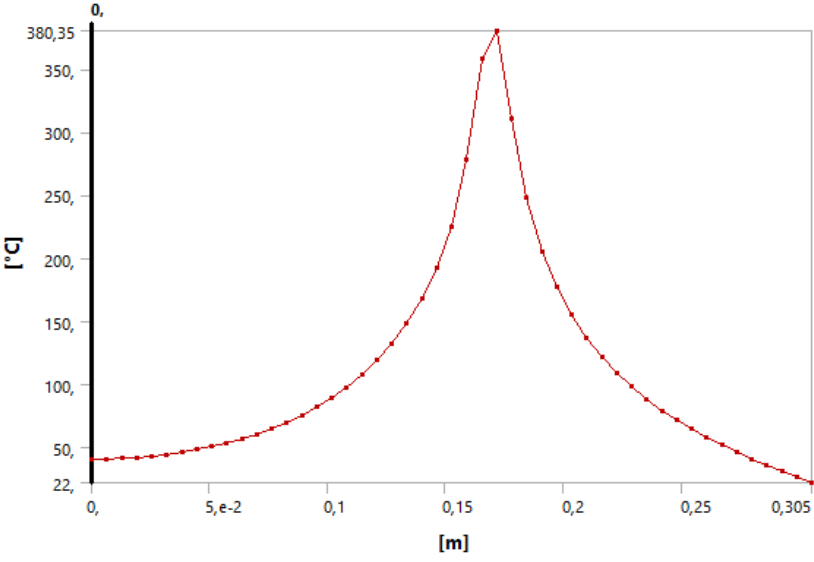
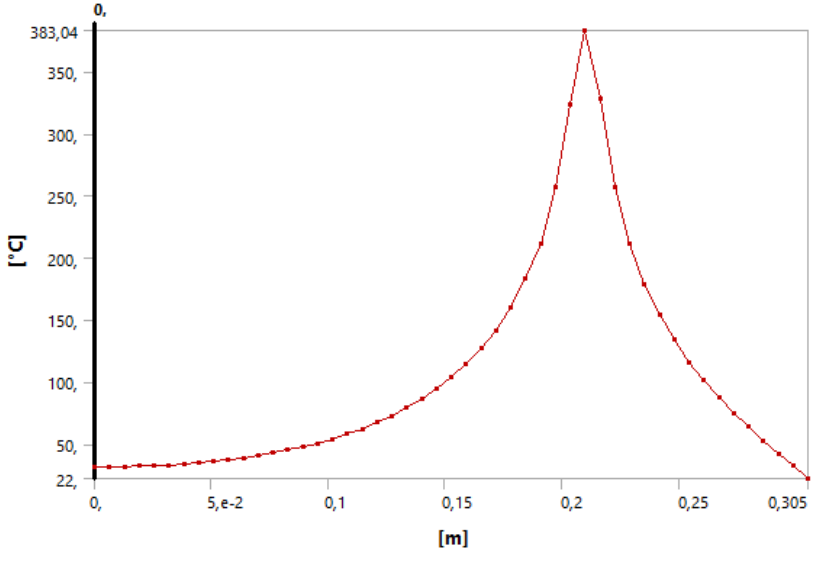
(Fuente: El autor)

Tabla 6.52 Temperatura respecto la longitud del modelo C (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (90 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (130 segundos)</p> 		



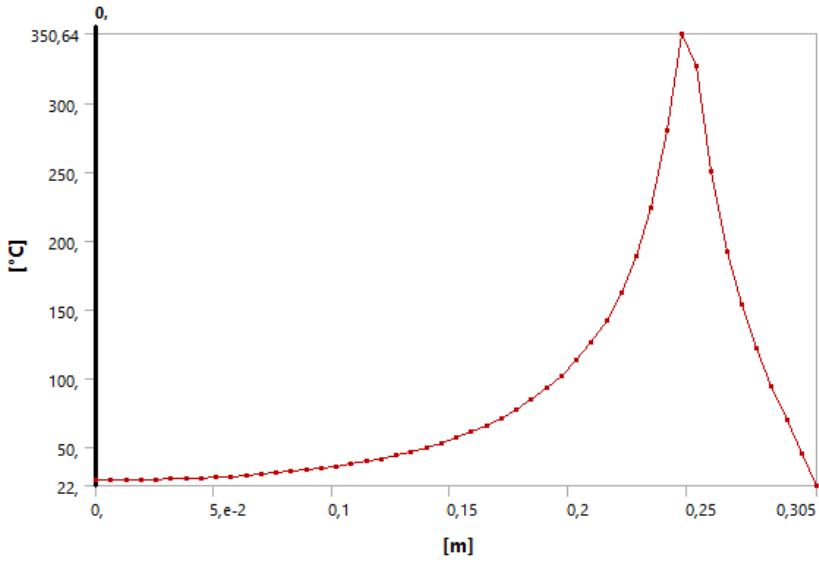
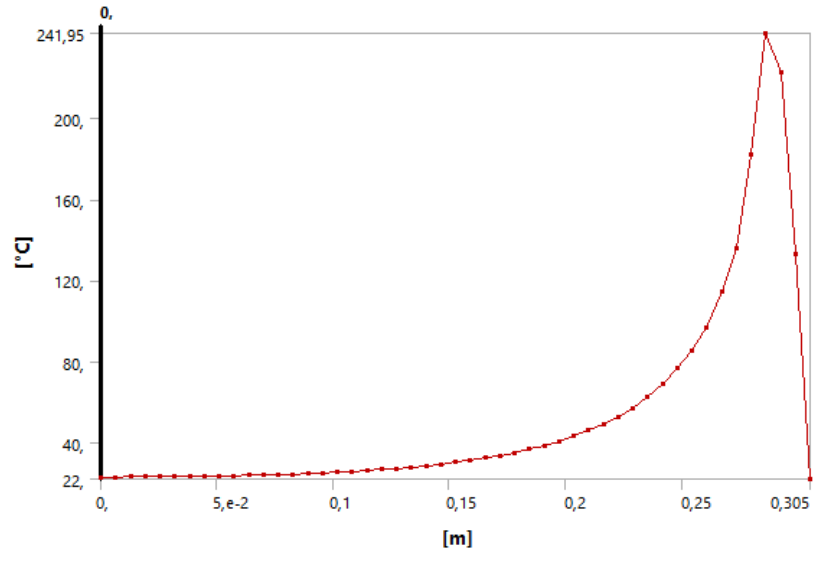
(Fuente: El autor)

Tabla 6.53 Temperatura respecto la longitud del modelo C (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (170 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (210 segundos)</p> 		



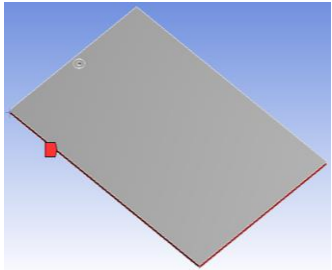
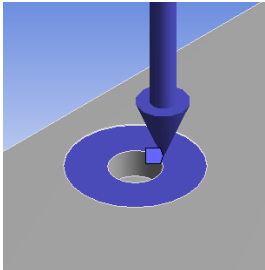
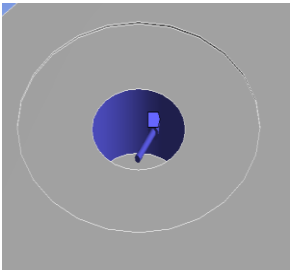
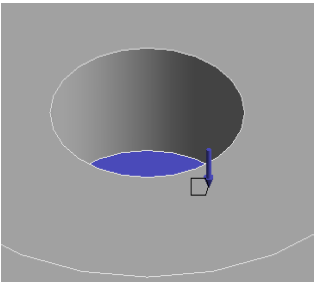
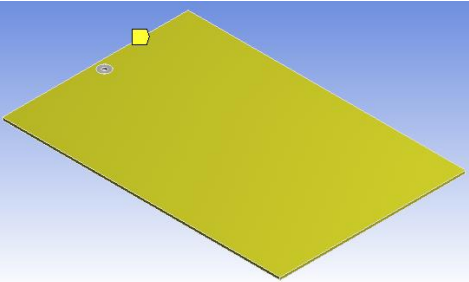
(Fuente: El autor)

Tabla 6.54 Temperatura respecto la longitud del modelo C (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: C)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (290 segundos)</p> 		



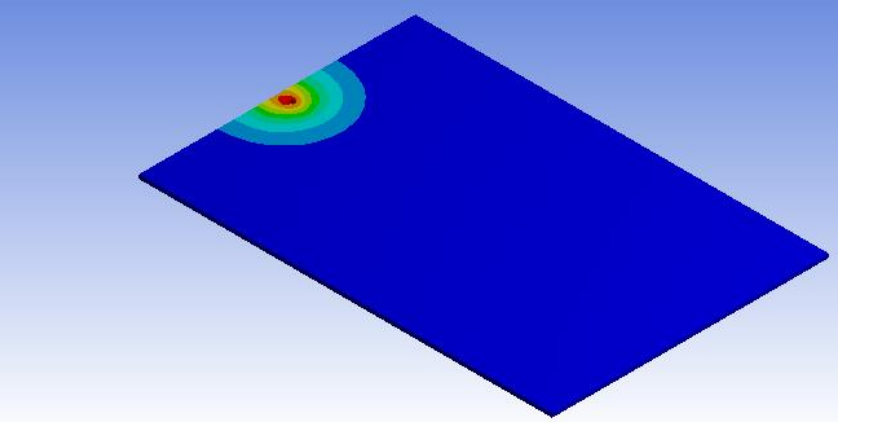
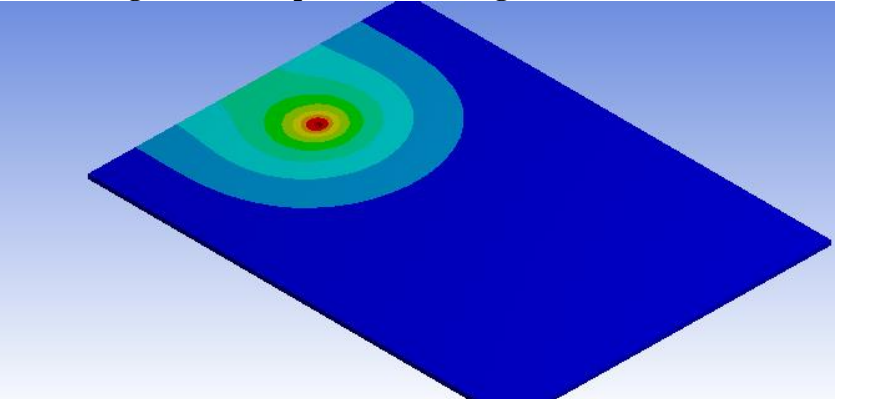
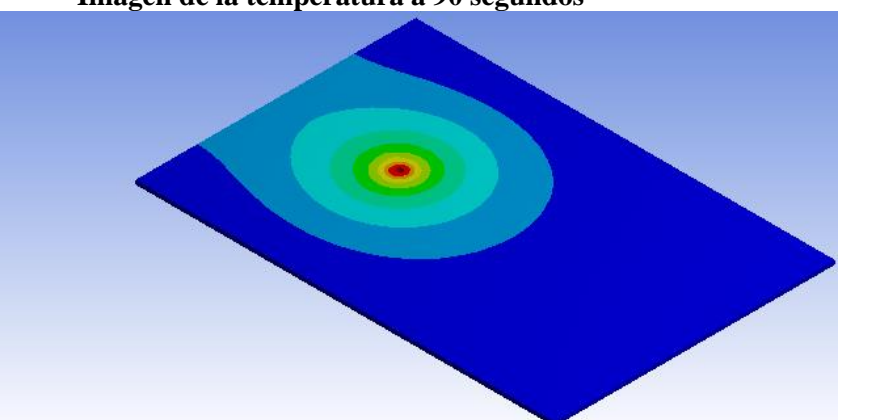
(Fuente: El autor)

Tabla 6.55 Datos para el análisis térmico del modelo D

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS					
Masa:	0.503798 kg	Densidad:	2700 kg/m ³		
Volumen:	0.000186592 m ³	Peso:	4.93722 N		
PROPIEDADES DEL MATERIAL Al 6061					
Conductividad térmica:		166.9 W/(m.K)			
Calor específico:		896 J/(kg.K)			
Densidad:		2700 kg/m ³			
CARGAS TÉRMICAS					
Imágenes de las condiciones del contorno y cargas térmicas					
 <p>Valor de la temperatura externa: 22 C</p>		 <p>Flujo de calor producido por el hombro: 354.10W</p>		 <p>Flujo de calor producido por la superficie cilíndrica del pin: 76.90W</p>	
 <p>Flujo de calor producido por la superficie circular del pin: 21.36W</p>		 <p>Coeficiente de transferencia de calor del pin: 38.133W/m²*K</p>			



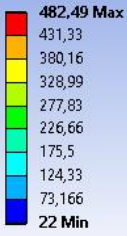
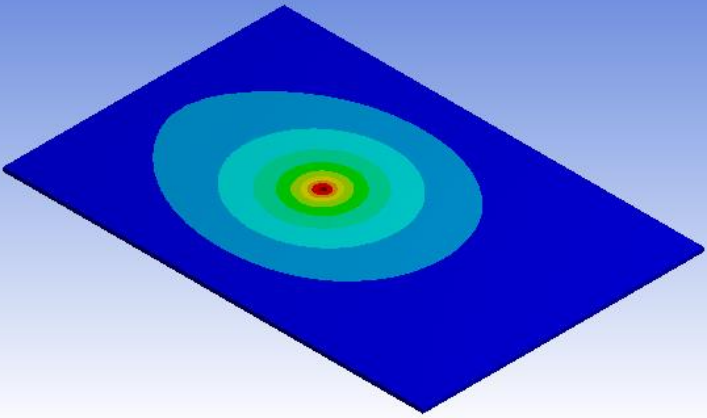
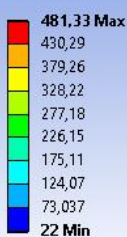
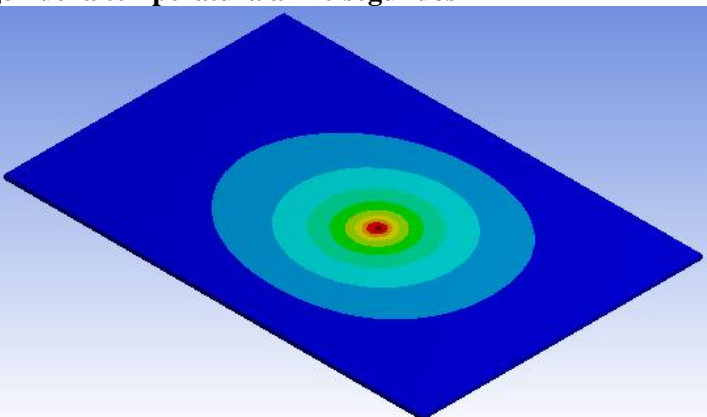
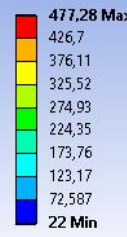
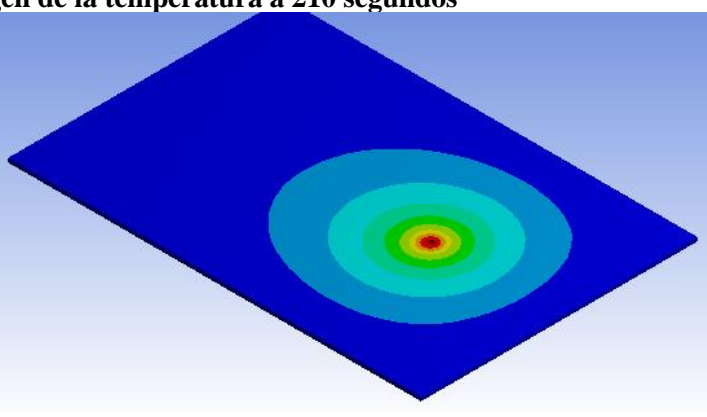
(Fuente: El autor)

Tabla 6.56 Resultados del análisis térmico del modelo D (10s, 50s y 90s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 10 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 10 09/01/2015 14:34</p> <p>473,03 Max 422,92 372,8 322,69 272,57 222,46 172,34 122,23 72,114 22 Min</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 50 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 50 09/01/2015 14:51</p> <p>466,39 Max 417,01 367,64 318,26 268,88 219,51 170,13 120,75 71,376 22 Min</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 90 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 90 09/01/2015 15:09</p> <p>476,97 Max 426,42 375,87 325,32 274,76 224,21 173,66 123,11 72,553 22 Min</p>		

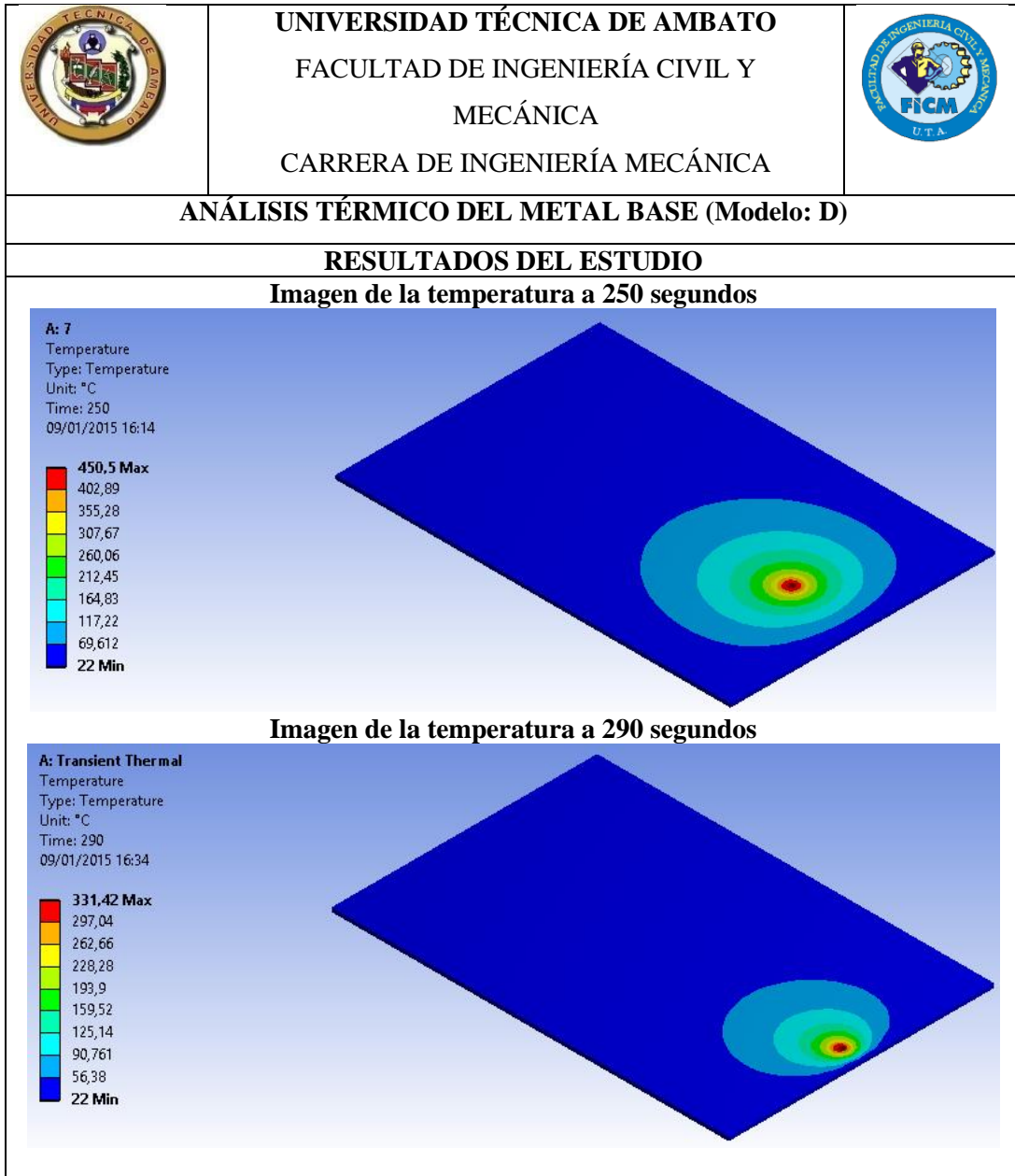
(Fuente: El autor)

Tabla 6.57 Resultados del análisis térmico del modelo D (130s, 170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 130 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 130 09/01/2015 15:26</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 170 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 170 09/01/2015 15:42</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 210 segundos</p>		
<p>Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 210 09/01/2015 16:00</p> 		



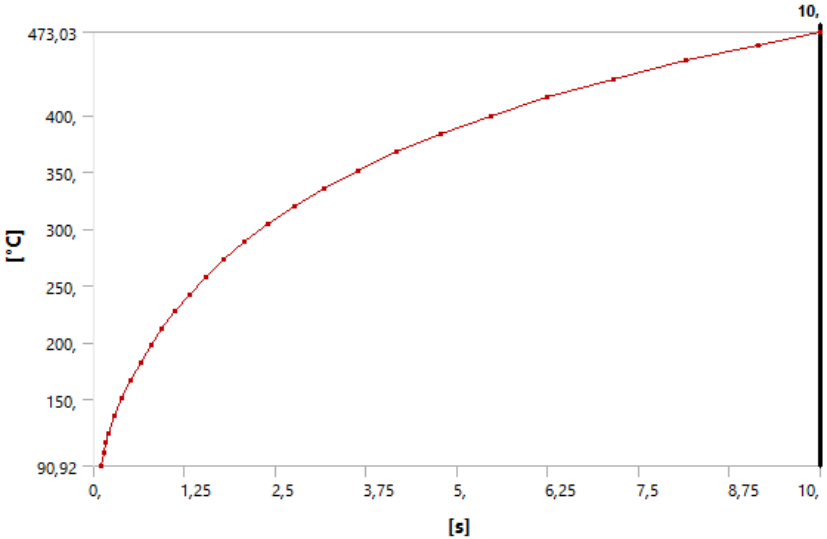
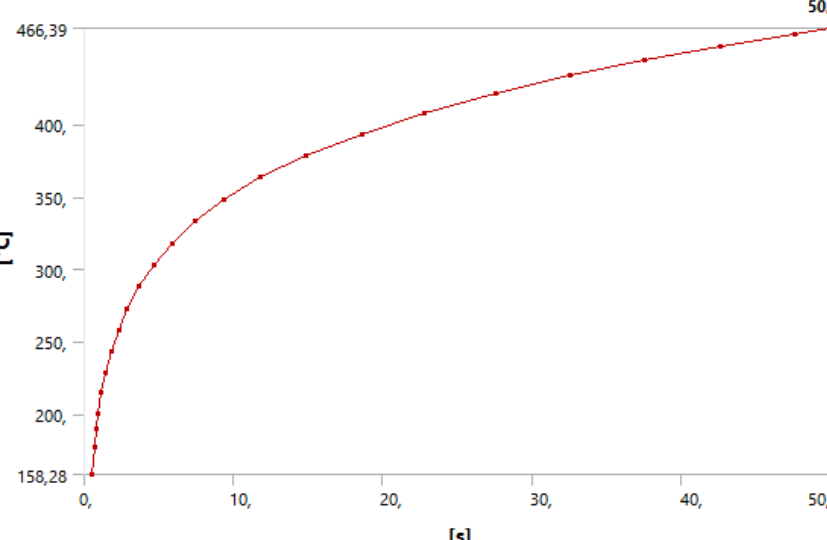
(Fuente: El autor)

Tabla 6.58 Resultados del análisis térmico del modelo D (250s y 290s)





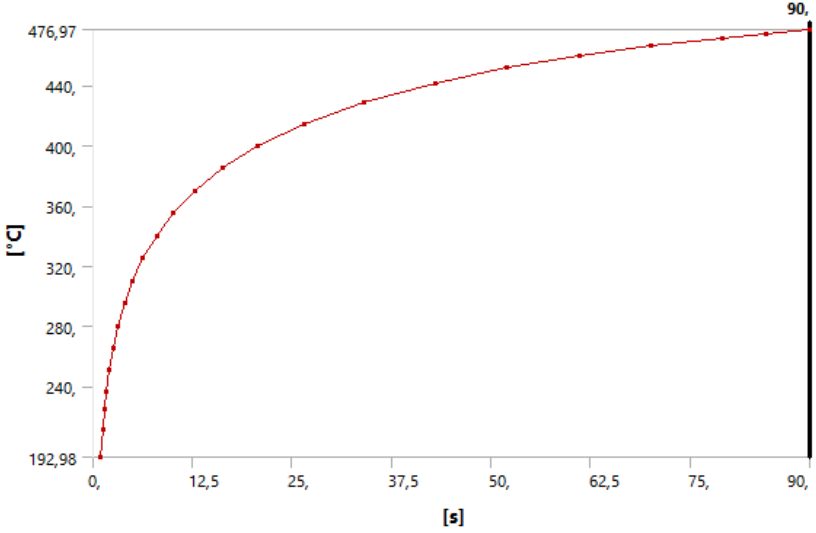
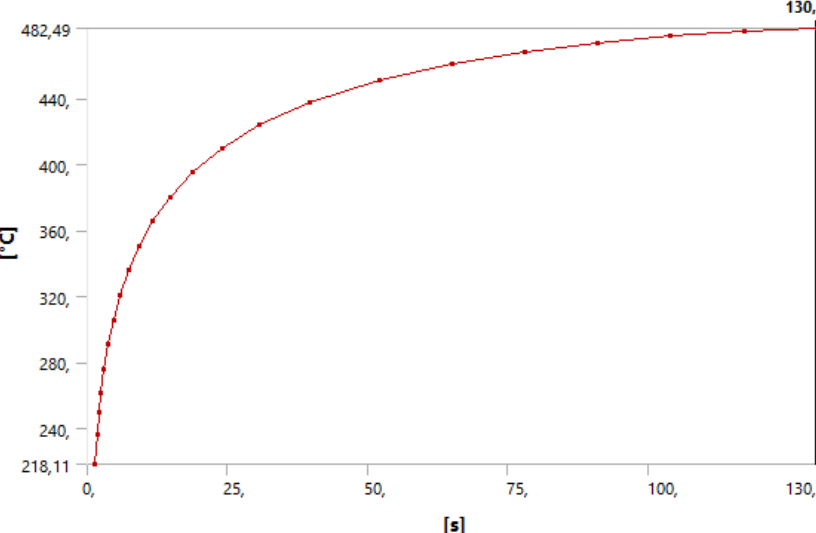
(Fuente: El autor)

Tabla 6.59 Temperatura respecto al tiempo del modelo D (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																			
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>																																				
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																				
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (10 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="422 672 1252 1209"> <caption>Data for 10-second temperature graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>90,92</td></tr> <tr><td>1,25</td><td>220</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>280</td></tr> <tr><td>3,75</td><td>330</td></tr> <tr><td>5</td><td>370</td></tr> <tr><td>6,25</td><td>400</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>420</td></tr> <tr><td>8,75</td><td>435</td></tr> <tr><td>10</td><td>473,03</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (50 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="422 1321 1252 1859"> <caption>Data for 50-second temperature graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>158,28</td></tr> <tr><td>10</td><td>350</td></tr> <tr><td>20</td><td>390</td></tr> <tr><td>30</td><td>410</td></tr> <tr><td>40</td><td>430</td></tr> <tr><td>50</td><td>466,39</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	90,92	1,25	220	2,5	280	3,75	330	5	370	6,25	400	7,5	420	8,75	435	10	473,03	Time [s]	Temperature [°C]	0	158,28	10	350	20	390	30	410	40	430	50	466,39
Time [s]	Temperature [°C]																																			
0	90,92																																			
1,25	220																																			
2,5	280																																			
3,75	330																																			
5	370																																			
6,25	400																																			
7,5	420																																			
8,75	435																																			
10	473,03																																			
Time [s]	Temperature [°C]																																			
0	158,28																																			
10	350																																			
20	390																																			
30	410																																			
40	430																																			
50	466,39																																			



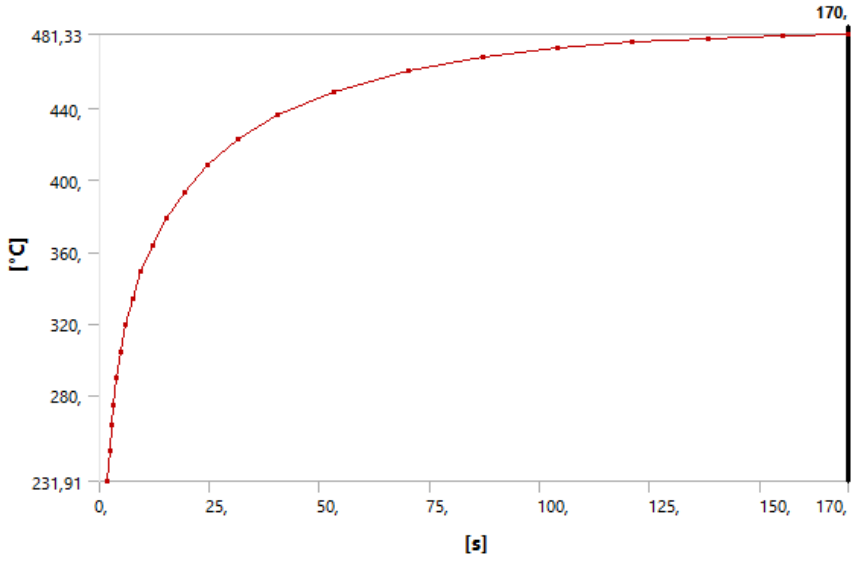
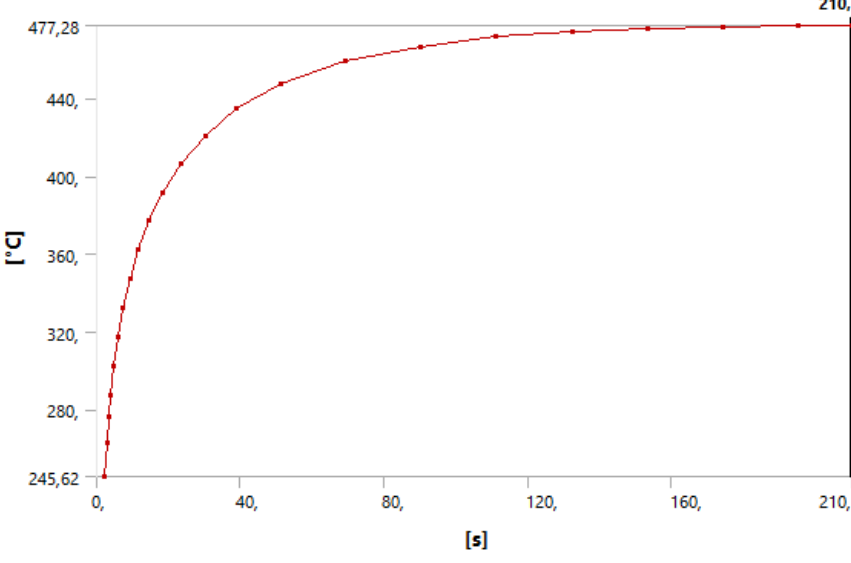
(Fuente: El autor)

Tabla 6.60 Temperatura respecto al tiempo del modelo D (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																																													
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>																																																																																																														
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																																														
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (90 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="427 674 1246 1205"> <caption>Data for 90s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>192,98</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>240</td></tr> <tr><td>5</td><td>280</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>320</td></tr> <tr><td>10</td><td>360</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>380</td></tr> <tr><td>15</td><td>395</td></tr> <tr><td>20</td><td>410</td></tr> <tr><td>25</td><td>420</td></tr> <tr><td>30</td><td>430</td></tr> <tr><td>35</td><td>438</td></tr> <tr><td>40</td><td>443</td></tr> <tr><td>45</td><td>447</td></tr> <tr><td>50</td><td>450</td></tr> <tr><td>55</td><td>453</td></tr> <tr><td>60</td><td>455</td></tr> <tr><td>65</td><td>457</td></tr> <tr><td>70</td><td>458</td></tr> <tr><td>75</td><td>459</td></tr> <tr><td>80</td><td>460</td></tr> <tr><td>85</td><td>461</td></tr> <tr><td>90</td><td>476,97</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (130 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="427 1346 1246 1877"> <caption>Data for 130s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>218,11</td></tr> <tr><td>2,5</td><td>240</td></tr> <tr><td>5</td><td>280</td></tr> <tr><td>7,5</td><td>320</td></tr> <tr><td>10</td><td>360</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>380</td></tr> <tr><td>15</td><td>395</td></tr> <tr><td>20</td><td>410</td></tr> <tr><td>25</td><td>420</td></tr> <tr><td>30</td><td>430</td></tr> <tr><td>35</td><td>438</td></tr> <tr><td>40</td><td>443</td></tr> <tr><td>45</td><td>447</td></tr> <tr><td>50</td><td>450</td></tr> <tr><td>55</td><td>453</td></tr> <tr><td>60</td><td>455</td></tr> <tr><td>65</td><td>457</td></tr> <tr><td>70</td><td>458</td></tr> <tr><td>75</td><td>459</td></tr> <tr><td>80</td><td>460</td></tr> <tr><td>85</td><td>461</td></tr> <tr><td>90</td><td>462</td></tr> <tr><td>95</td><td>463</td></tr> <tr><td>100</td><td>464</td></tr> <tr><td>105</td><td>465</td></tr> <tr><td>110</td><td>466</td></tr> <tr><td>115</td><td>467</td></tr> <tr><td>120</td><td>468</td></tr> <tr><td>125</td><td>469</td></tr> <tr><td>130</td><td>482,49</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	192,98	2,5	240	5	280	7,5	320	10	360	12,5	380	15	395	20	410	25	420	30	430	35	438	40	443	45	447	50	450	55	453	60	455	65	457	70	458	75	459	80	460	85	461	90	476,97	Time [s]	Temperature [°C]	0	218,11	2,5	240	5	280	7,5	320	10	360	12,5	380	15	395	20	410	25	420	30	430	35	438	40	443	45	447	50	450	55	453	60	455	65	457	70	458	75	459	80	460	85	461	90	462	95	463	100	464	105	465	110	466	115	467	120	468	125	469	130	482,49
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																													
0	192,98																																																																																																													
2,5	240																																																																																																													
5	280																																																																																																													
7,5	320																																																																																																													
10	360																																																																																																													
12,5	380																																																																																																													
15	395																																																																																																													
20	410																																																																																																													
25	420																																																																																																													
30	430																																																																																																													
35	438																																																																																																													
40	443																																																																																																													
45	447																																																																																																													
50	450																																																																																																													
55	453																																																																																																													
60	455																																																																																																													
65	457																																																																																																													
70	458																																																																																																													
75	459																																																																																																													
80	460																																																																																																													
85	461																																																																																																													
90	476,97																																																																																																													
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																													
0	218,11																																																																																																													
2,5	240																																																																																																													
5	280																																																																																																													
7,5	320																																																																																																													
10	360																																																																																																													
12,5	380																																																																																																													
15	395																																																																																																													
20	410																																																																																																													
25	420																																																																																																													
30	430																																																																																																													
35	438																																																																																																													
40	443																																																																																																													
45	447																																																																																																													
50	450																																																																																																													
55	453																																																																																																													
60	455																																																																																																													
65	457																																																																																																													
70	458																																																																																																													
75	459																																																																																																													
80	460																																																																																																													
85	461																																																																																																													
90	462																																																																																																													
95	463																																																																																																													
100	464																																																																																																													
105	465																																																																																																													
110	466																																																																																																													
115	467																																																																																																													
120	468																																																																																																													
125	469																																																																																																													
130	482,49																																																																																																													

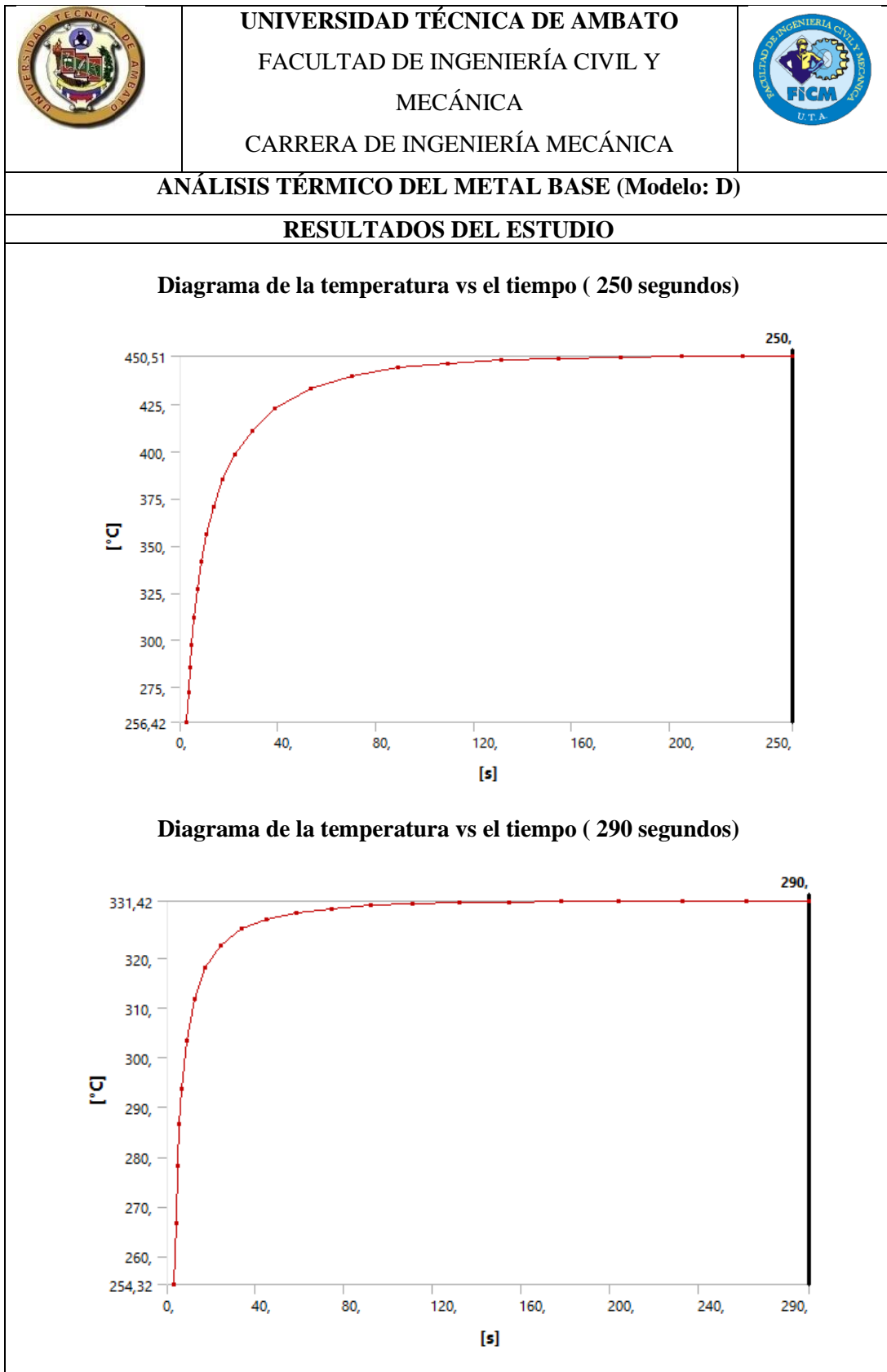
(Fuente: El autor)

Tabla 6.61 Temperatura respecto al tiempo del modelo D (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																																	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>																																																																																																		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																																		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (170 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="406 672 1260 1232"> <caption>Data points for 170s graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>231,91</td></tr> <tr><td>5</td><td>280</td></tr> <tr><td>10</td><td>320</td></tr> <tr><td>15</td><td>350</td></tr> <tr><td>20</td><td>375</td></tr> <tr><td>25</td><td>395</td></tr> <tr><td>30</td><td>410</td></tr> <tr><td>40</td><td>425</td></tr> <tr><td>50</td><td>435</td></tr> <tr><td>60</td><td>442</td></tr> <tr><td>70</td><td>447</td></tr> <tr><td>80</td><td>450</td></tr> <tr><td>90</td><td>452</td></tr> <tr><td>100</td><td>454</td></tr> <tr><td>110</td><td>456</td></tr> <tr><td>120</td><td>457</td></tr> <tr><td>130</td><td>458</td></tr> <tr><td>140</td><td>459</td></tr> <tr><td>150</td><td>460</td></tr> <tr><td>160</td><td>461</td></tr> <tr><td>170</td><td>461,33</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (210 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="406 1344 1260 1904"> <caption>Data points for 210s graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>245,62</td></tr> <tr><td>5</td><td>280</td></tr> <tr><td>10</td><td>320</td></tr> <tr><td>15</td><td>350</td></tr> <tr><td>20</td><td>375</td></tr> <tr><td>25</td><td>395</td></tr> <tr><td>30</td><td>410</td></tr> <tr><td>40</td><td>425</td></tr> <tr><td>50</td><td>435</td></tr> <tr><td>60</td><td>442</td></tr> <tr><td>70</td><td>447</td></tr> <tr><td>80</td><td>450</td></tr> <tr><td>90</td><td>452</td></tr> <tr><td>100</td><td>454</td></tr> <tr><td>110</td><td>456</td></tr> <tr><td>120</td><td>457</td></tr> <tr><td>130</td><td>458</td></tr> <tr><td>140</td><td>459</td></tr> <tr><td>150</td><td>460</td></tr> <tr><td>160</td><td>461</td></tr> <tr><td>170</td><td>461,33</td></tr> <tr><td>180</td><td>461,33</td></tr> <tr><td>190</td><td>461,33</td></tr> <tr><td>200</td><td>461,33</td></tr> <tr><td>210</td><td>477,28</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	231,91	5	280	10	320	15	350	20	375	25	395	30	410	40	425	50	435	60	442	70	447	80	450	90	452	100	454	110	456	120	457	130	458	140	459	150	460	160	461	170	461,33	Time [s]	Temperature [°C]	0	245,62	5	280	10	320	15	350	20	375	25	395	30	410	40	425	50	435	60	442	70	447	80	450	90	452	100	454	110	456	120	457	130	458	140	459	150	460	160	461	170	461,33	180	461,33	190	461,33	200	461,33	210	477,28
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	231,91																																																																																																	
5	280																																																																																																	
10	320																																																																																																	
15	350																																																																																																	
20	375																																																																																																	
25	395																																																																																																	
30	410																																																																																																	
40	425																																																																																																	
50	435																																																																																																	
60	442																																																																																																	
70	447																																																																																																	
80	450																																																																																																	
90	452																																																																																																	
100	454																																																																																																	
110	456																																																																																																	
120	457																																																																																																	
130	458																																																																																																	
140	459																																																																																																	
150	460																																																																																																	
160	461																																																																																																	
170	461,33																																																																																																	
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	245,62																																																																																																	
5	280																																																																																																	
10	320																																																																																																	
15	350																																																																																																	
20	375																																																																																																	
25	395																																																																																																	
30	410																																																																																																	
40	425																																																																																																	
50	435																																																																																																	
60	442																																																																																																	
70	447																																																																																																	
80	450																																																																																																	
90	452																																																																																																	
100	454																																																																																																	
110	456																																																																																																	
120	457																																																																																																	
130	458																																																																																																	
140	459																																																																																																	
150	460																																																																																																	
160	461																																																																																																	
170	461,33																																																																																																	
180	461,33																																																																																																	
190	461,33																																																																																																	
200	461,33																																																																																																	
210	477,28																																																																																																	



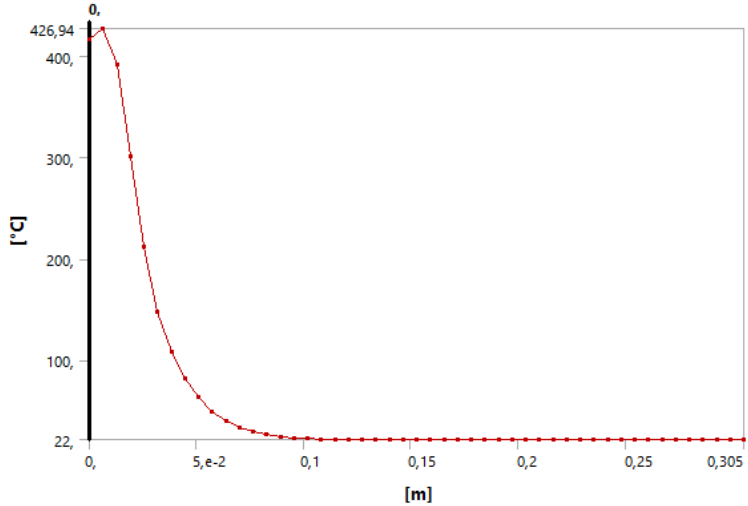
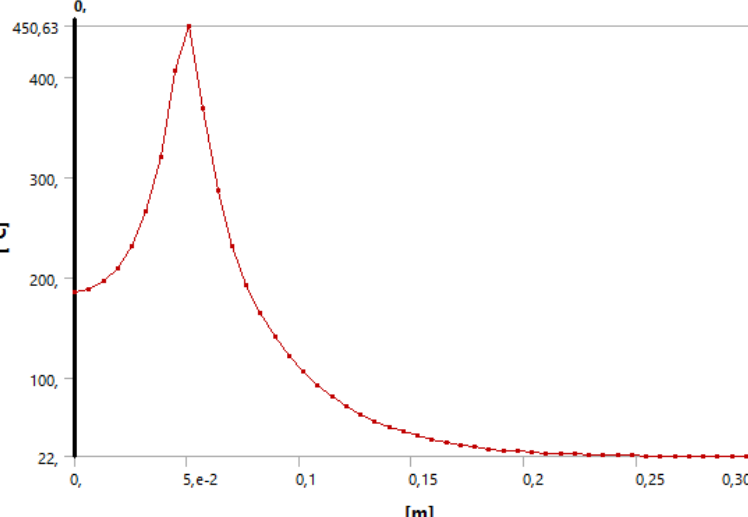
(Fuente: El autor)

Tabla 6.62 Temperatura respecto al tiempo del modelo D (250s y 290s)





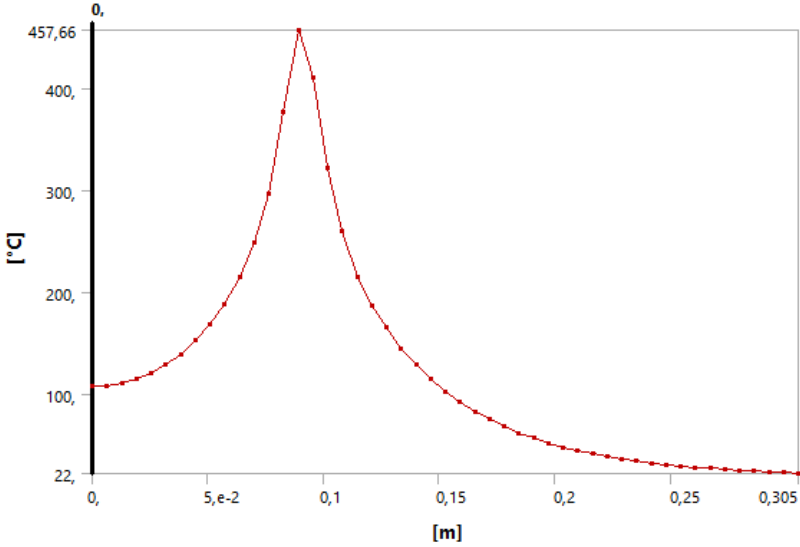
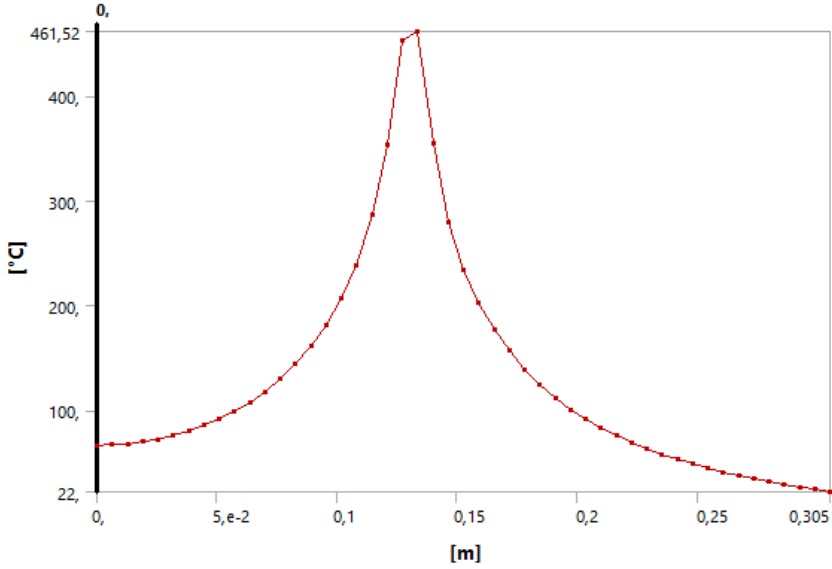
(Fuente: El autor)

Tabla 6.63 Temperatura respecto la longitud del modelo D (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (10 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (50 segundos)</p> 		



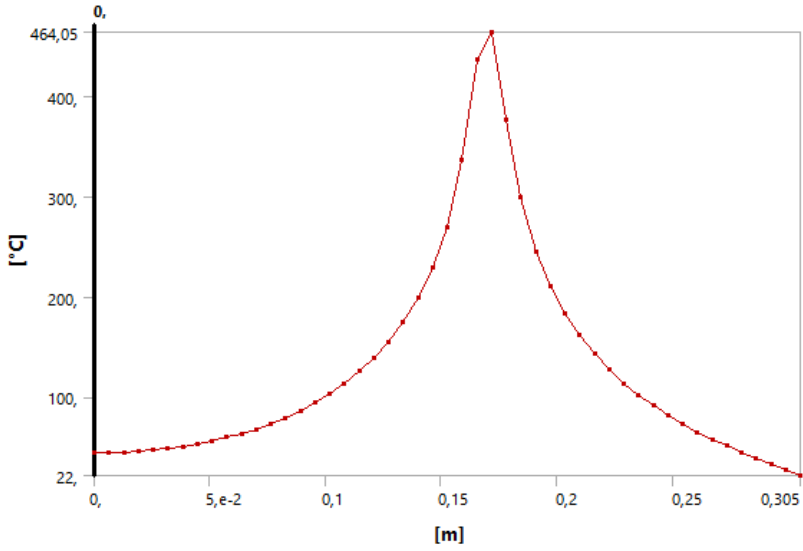
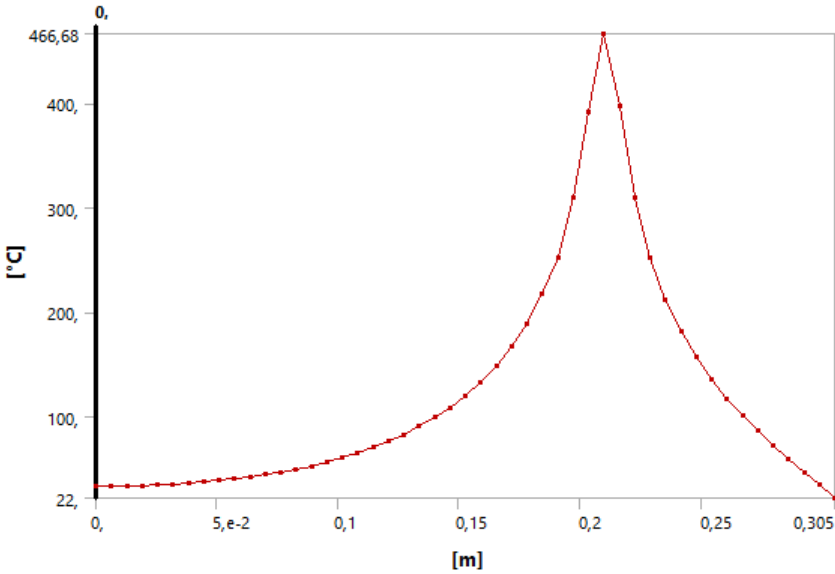
(Fuente: El autor)

Tabla 6.64 Temperatura respecto la longitud del modelo D (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (90 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (130 segundos)</p> 		



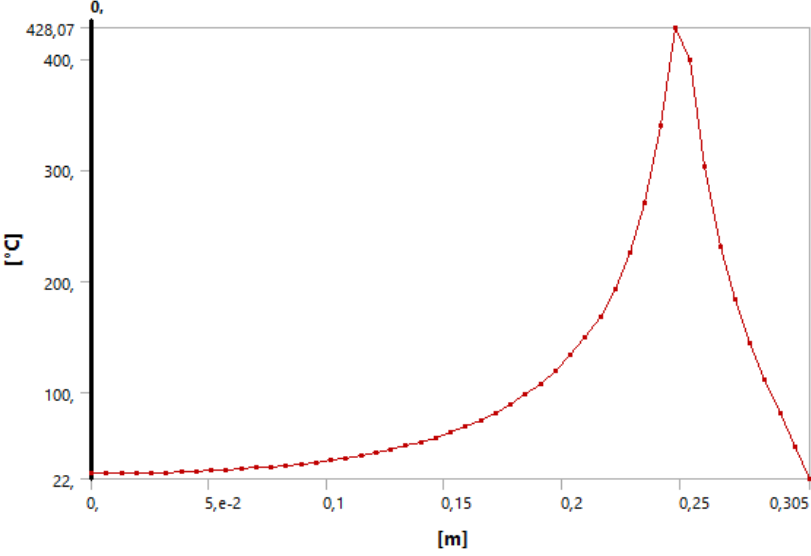
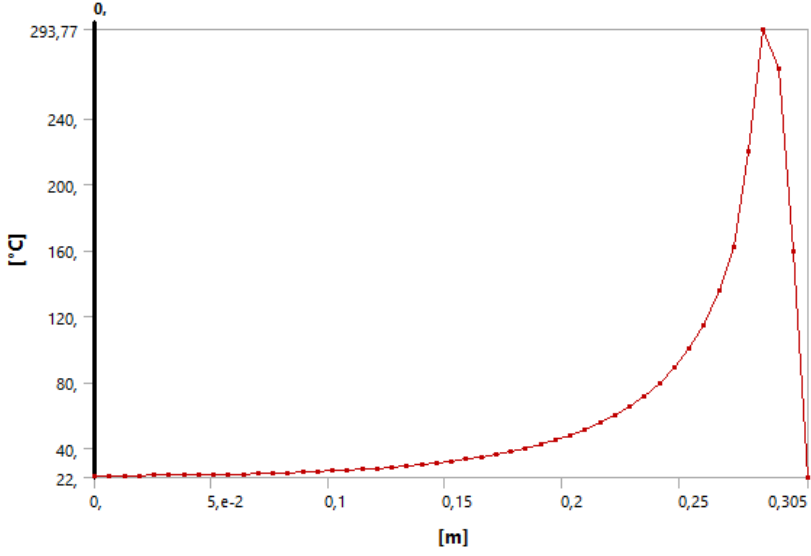
(Fuente: El autor)

Tabla 6.65 Temperatura respecto la longitud del modelo D (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (170 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (210 segundos)</p> 		



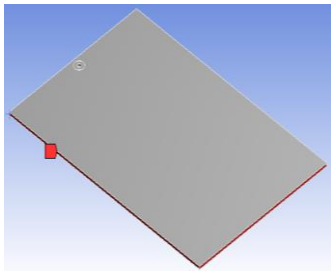
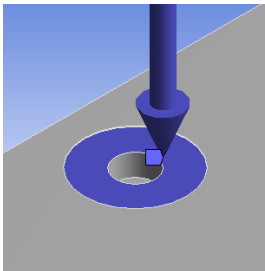
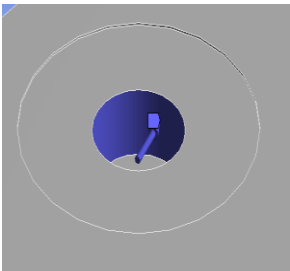
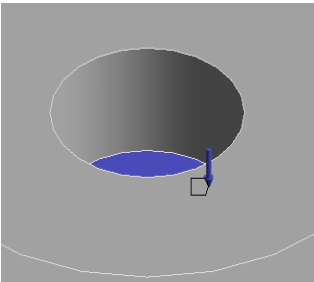
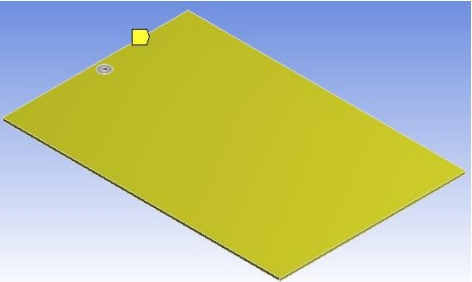
(Fuente: El autor)

Tabla 6.66 Temperatura respecto la longitud del modelo D (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: D)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (290 segundos)</p> 		

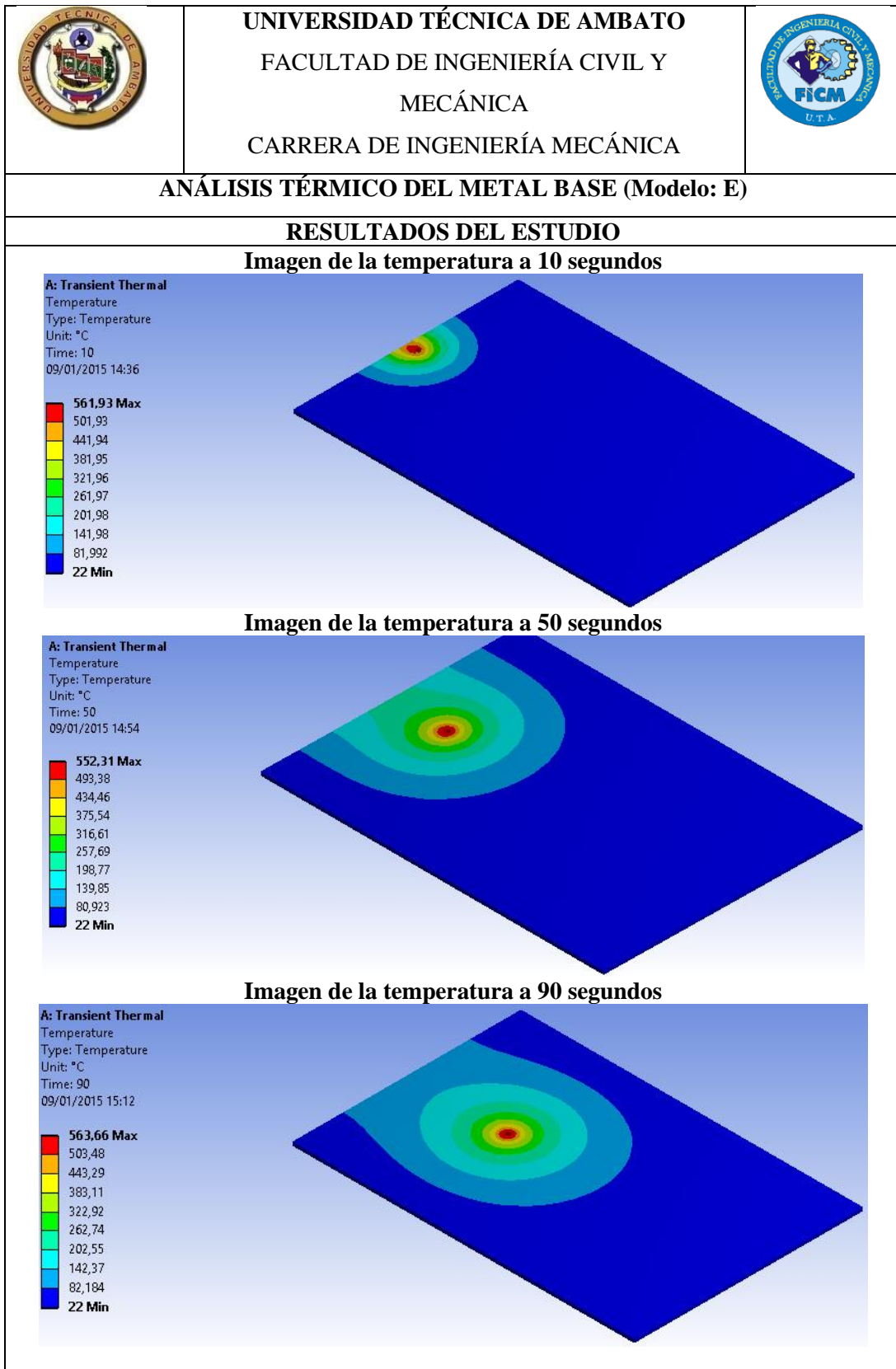
(Fuente: El autor)

Tabla 6.67 Datos para el análisis térmico del modelo E

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA			
ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)					
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS					
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS					
Masa:		0.503798 kg		Densidad:	
Volumen:		0.000186592 m ³		Peso:	
				2700 kg/m ³	
				4.93722 N	
PROPIEDADES DEL MATERIAL Al 6061					
Conductividad térmica:			166.9 W/(m.K)		
Calor específico:			896 J/(kg.K)		
Densidad:			2700 kg/m ³		
CARGAS TÉRMICAS					
Imágenes de las condiciones del contorno y cargas térmicas					
 <p>Valor de la temperatura externa: 22 C</p>		 <p>Flujo de calor producido por el hombro: 424.92W</p>		 <p>Flujo de calor producido por la superficie cilíndrica del pin: 92.28W</p>	
 <p>Flujo de calor producido por la superficie circular del pin: 25.63W</p>			 <p>Coefficiente de transferencia de calor del pin: 41.672W/m²*K</p>		



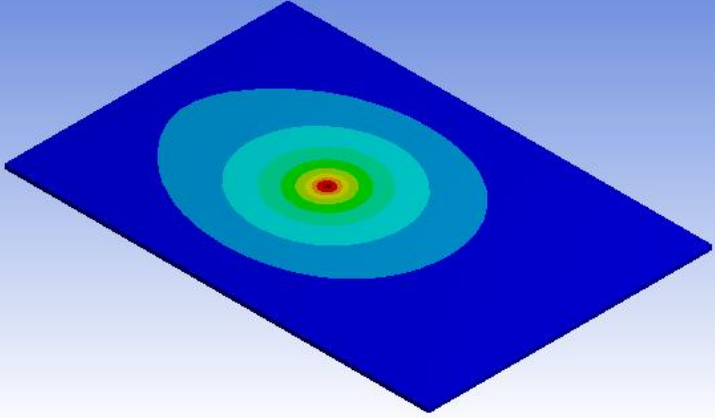
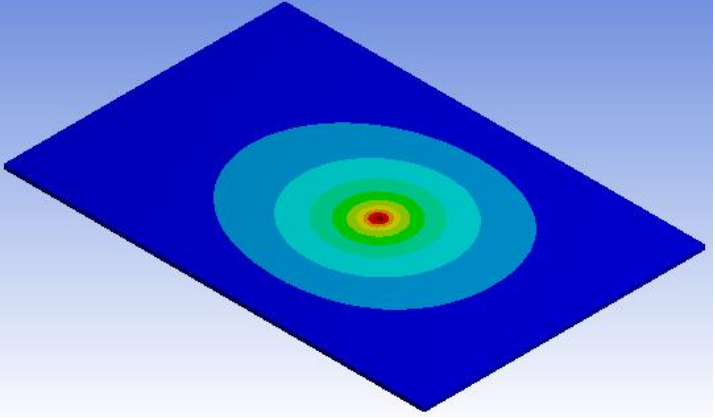
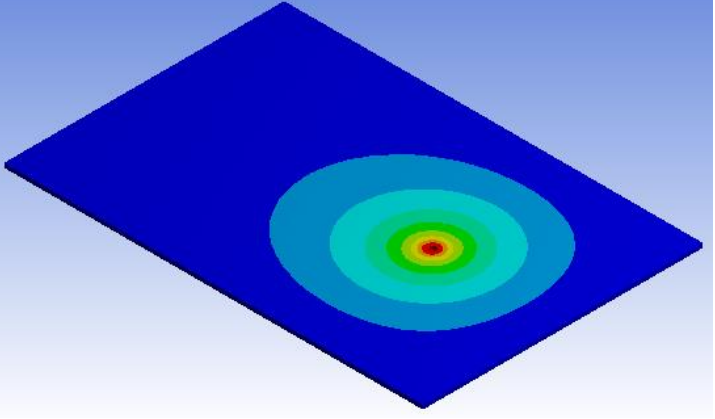
(Fuente: El autor)

Tabla 6.68 Resultados del análisis térmico del modelo E (10s, 50s y 90s)



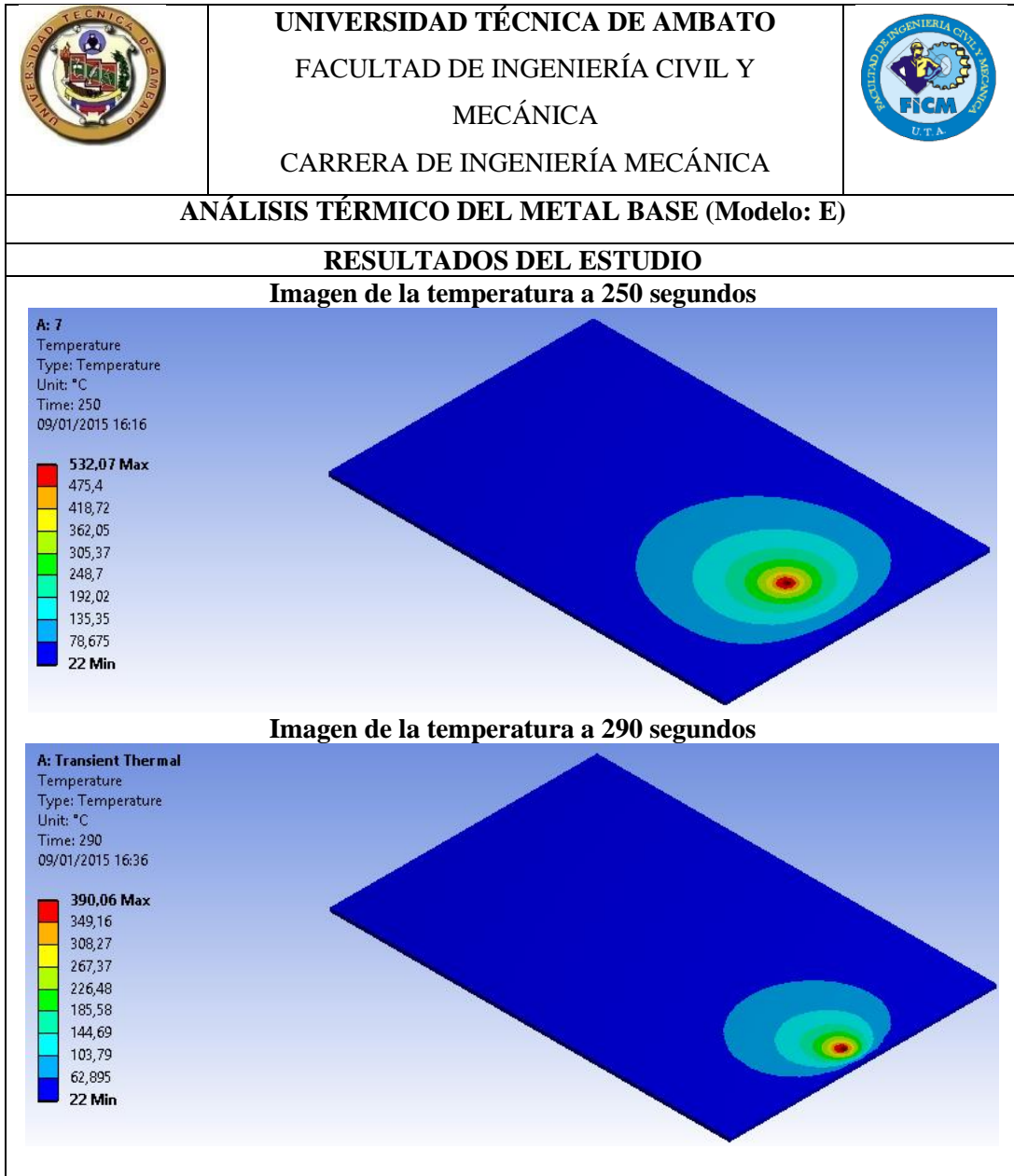
(Fuente: El autor)

Tabla 6.69 Resultados del análisis térmico del modelo E (130s, 170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 130 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 130 09/01/2015 15:28</p> <p>570,25 Max 509,33 448,41 387,5 326,58 265,67 204,75 143,83 82,916 22 Min</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 170 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 170 09/01/2015 15:45</p> <p>568,68 Max 507,94 447,19 386,45 325,71 264,97 204,23 143,48 82,742 22 Min</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 210 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 210 09/01/2015 16:02</p> <p>563,84 Max 503,64 443,43 383,23 323,02 262,82 202,61 142,41 82,205 22 Min</p>		

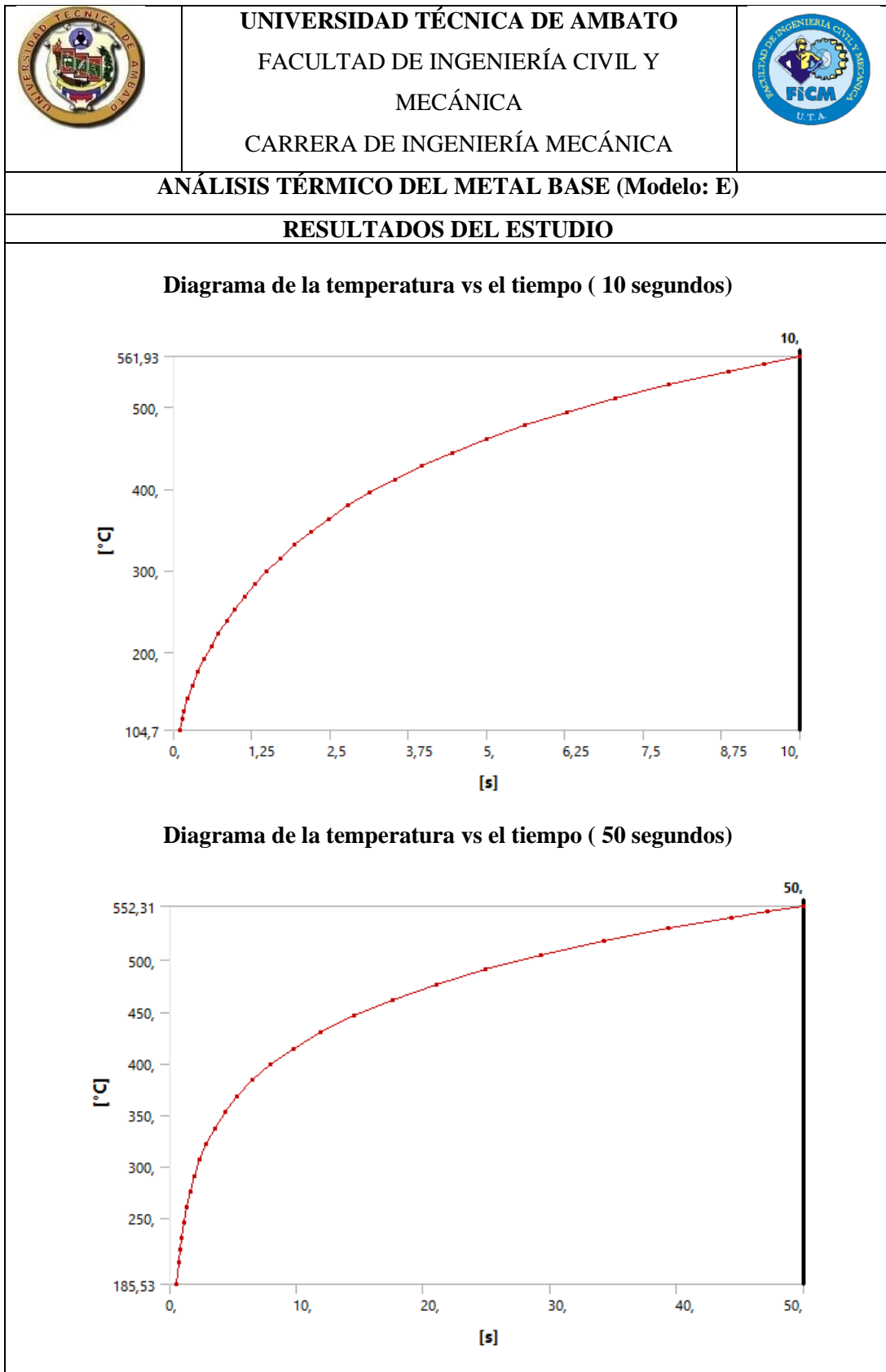
(Fuente: El autor)

Tabla 6.70 Resultados del análisis térmico del modelo E (250s y 290s)





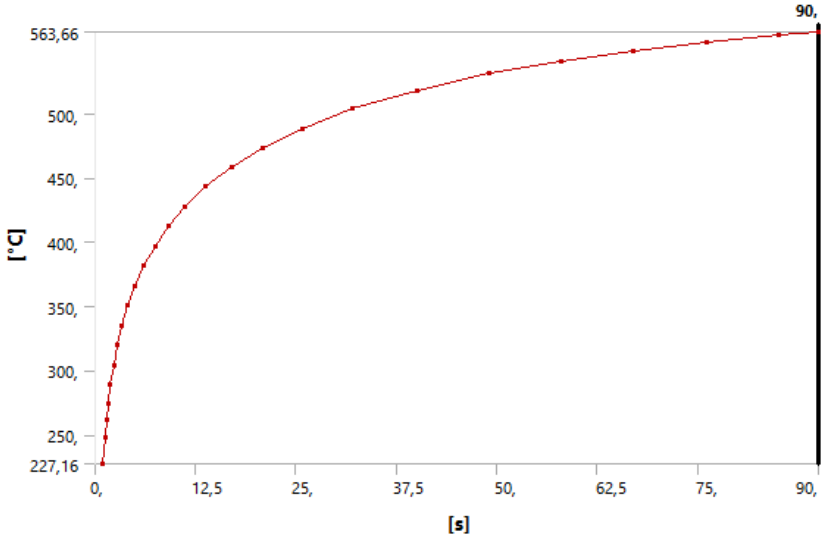
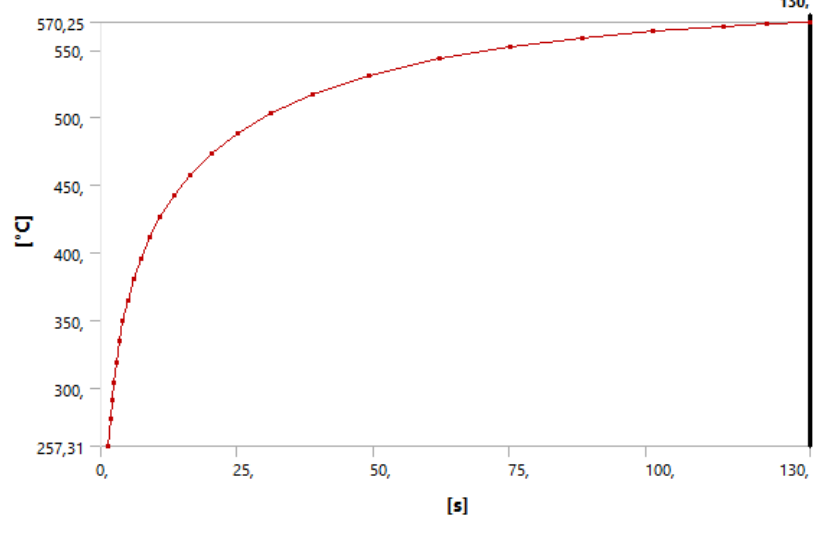
(Fuente: El autor)

Tabla 6.71 Temperatura respecto al tiempo del modelo E (10s y 50s)





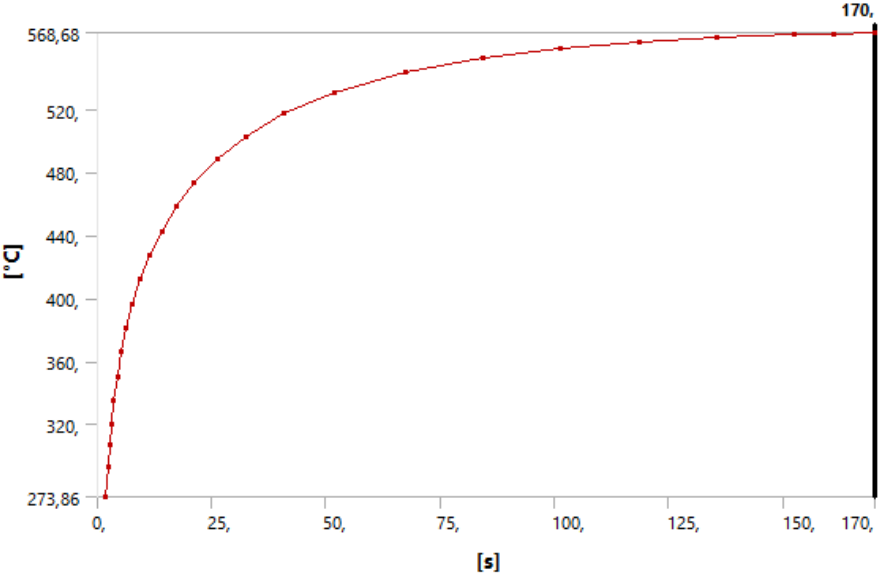
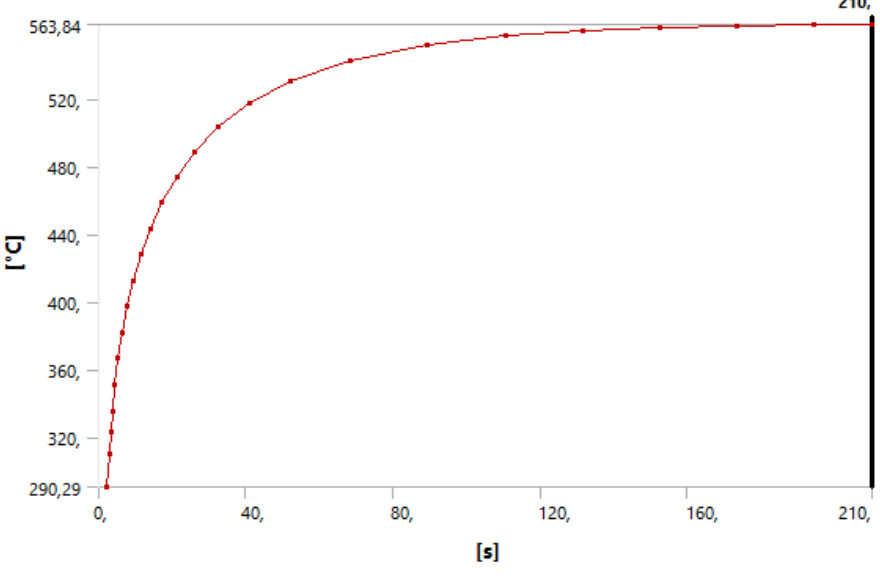
(Fuente: El autor)

Tabla 6.72 Temperatura respecto al tiempo del modelo E (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																													
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>																																														
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																														
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (90 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="422 672 1252 1209"> <caption>Data for 90s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>227,16</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>440</td></tr> <tr><td>25</td><td>480</td></tr> <tr><td>37,5</td><td>505</td></tr> <tr><td>50</td><td>520</td></tr> <tr><td>62,5</td><td>530</td></tr> <tr><td>75</td><td>540</td></tr> <tr><td>90</td><td>563,66</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (130 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="422 1321 1252 1859"> <caption>Data for 130s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>257,31</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>440</td></tr> <tr><td>25</td><td>480</td></tr> <tr><td>37,5</td><td>505</td></tr> <tr><td>50</td><td>520</td></tr> <tr><td>62,5</td><td>530</td></tr> <tr><td>75</td><td>540</td></tr> <tr><td>87,5</td><td>550</td></tr> <tr><td>100</td><td>560</td></tr> <tr><td>112,5</td><td>565</td></tr> <tr><td>125</td><td>568</td></tr> <tr><td>130</td><td>570,25</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	227,16	12,5	440	25	480	37,5	505	50	520	62,5	530	75	540	90	563,66	Time [s]	Temperature [°C]	0	257,31	12,5	440	25	480	37,5	505	50	520	62,5	530	75	540	87,5	550	100	560	112,5	565	125	568	130	570,25
Time [s]	Temperature [°C]																																													
0	227,16																																													
12,5	440																																													
25	480																																													
37,5	505																																													
50	520																																													
62,5	530																																													
75	540																																													
90	563,66																																													
Time [s]	Temperature [°C]																																													
0	257,31																																													
12,5	440																																													
25	480																																													
37,5	505																																													
50	520																																													
62,5	530																																													
75	540																																													
87,5	550																																													
100	560																																													
112,5	565																																													
125	568																																													
130	570,25																																													



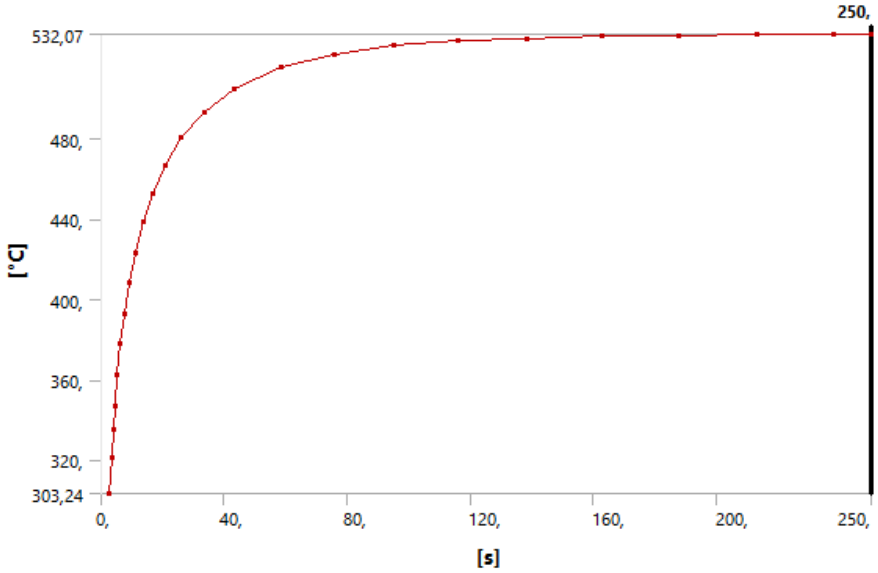
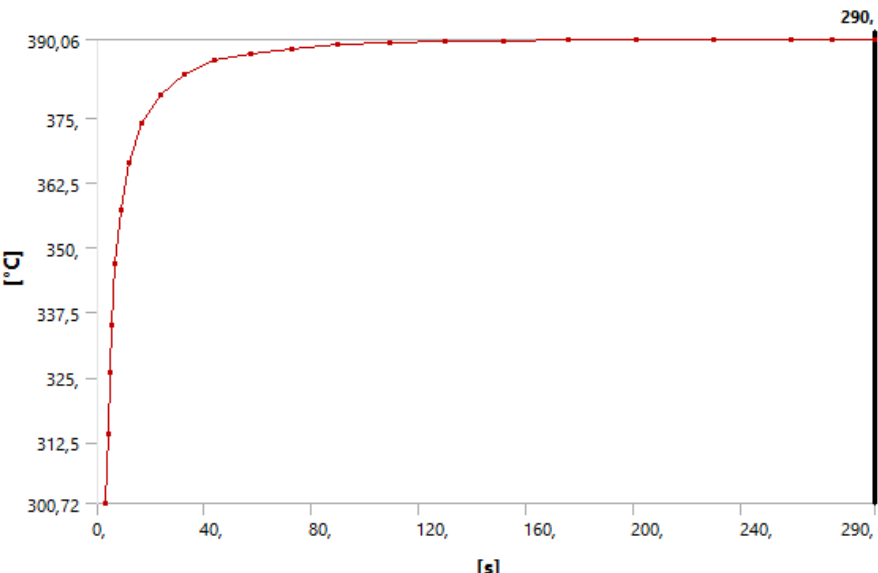
(Fuente: El autor)

Tabla 6.73 Temperatura respecto al tiempo del modelo E (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (170 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (210 segundos)</p> 		



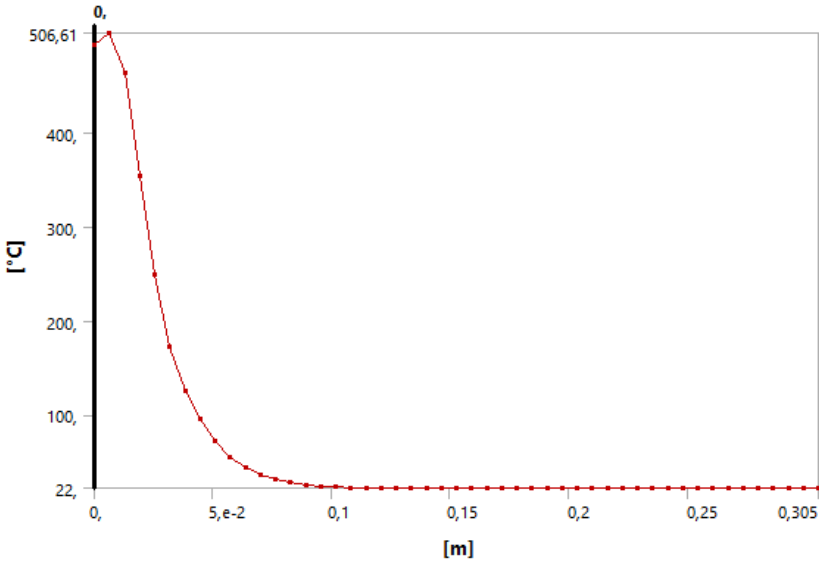
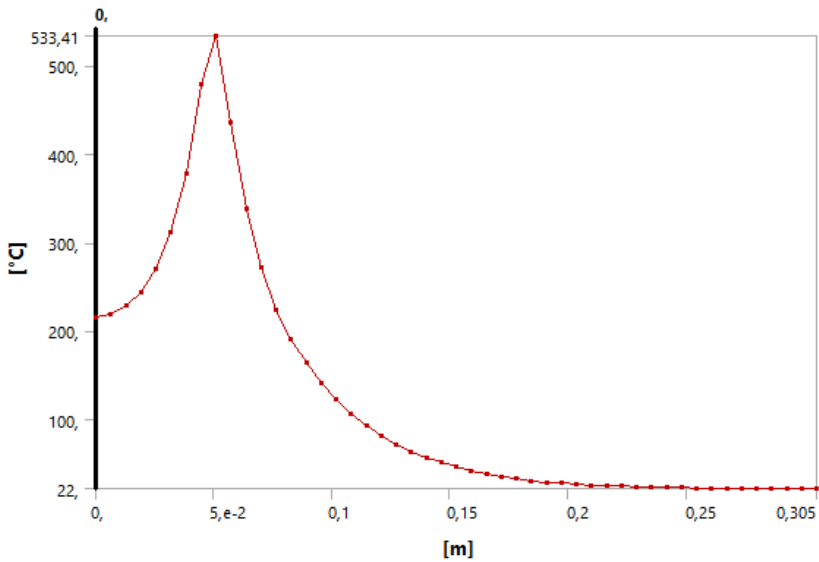
(Fuente: El autor)

Tabla 6.74 Temperatura respecto al tiempo del modelo E (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																																	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>																																																																																																		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																																		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (250 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="395 672 1276 1243"> <caption>Data for 250s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>303,24</td></tr> <tr><td>5</td><td>320</td></tr> <tr><td>10</td><td>340</td></tr> <tr><td>15</td><td>360</td></tr> <tr><td>20</td><td>380</td></tr> <tr><td>25</td><td>400</td></tr> <tr><td>30</td><td>420</td></tr> <tr><td>35</td><td>440</td></tr> <tr><td>40</td><td>460</td></tr> <tr><td>50</td><td>480</td></tr> <tr><td>60</td><td>495</td></tr> <tr><td>70</td><td>505</td></tr> <tr><td>80</td><td>510</td></tr> <tr><td>100</td><td>515</td></tr> <tr><td>120</td><td>518</td></tr> <tr><td>140</td><td>520</td></tr> <tr><td>160</td><td>521</td></tr> <tr><td>180</td><td>522</td></tr> <tr><td>200</td><td>523</td></tr> <tr><td>220</td><td>524</td></tr> <tr><td>240</td><td>525</td></tr> <tr><td>250</td><td>532,07</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (290 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="395 1344 1276 1915"> <caption>Data for 290s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>300,72</td></tr> <tr><td>5</td><td>312,5</td></tr> <tr><td>10</td><td>325</td></tr> <tr><td>15</td><td>337,5</td></tr> <tr><td>20</td><td>350</td></tr> <tr><td>25</td><td>362,5</td></tr> <tr><td>30</td><td>375</td></tr> <tr><td>35</td><td>380</td></tr> <tr><td>40</td><td>385</td></tr> <tr><td>50</td><td>388</td></tr> <tr><td>60</td><td>390</td></tr> <tr><td>70</td><td>391</td></tr> <tr><td>80</td><td>392</td></tr> <tr><td>100</td><td>393</td></tr> <tr><td>120</td><td>394</td></tr> <tr><td>140</td><td>395</td></tr> <tr><td>160</td><td>395,5</td></tr> <tr><td>180</td><td>396</td></tr> <tr><td>200</td><td>396,5</td></tr> <tr><td>220</td><td>397</td></tr> <tr><td>240</td><td>397,5</td></tr> <tr><td>260</td><td>398</td></tr> <tr><td>280</td><td>398,5</td></tr> <tr><td>290</td><td>390,06</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	303,24	5	320	10	340	15	360	20	380	25	400	30	420	35	440	40	460	50	480	60	495	70	505	80	510	100	515	120	518	140	520	160	521	180	522	200	523	220	524	240	525	250	532,07	Time [s]	Temperature [°C]	0	300,72	5	312,5	10	325	15	337,5	20	350	25	362,5	30	375	35	380	40	385	50	388	60	390	70	391	80	392	100	393	120	394	140	395	160	395,5	180	396	200	396,5	220	397	240	397,5	260	398	280	398,5	290	390,06
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	303,24																																																																																																	
5	320																																																																																																	
10	340																																																																																																	
15	360																																																																																																	
20	380																																																																																																	
25	400																																																																																																	
30	420																																																																																																	
35	440																																																																																																	
40	460																																																																																																	
50	480																																																																																																	
60	495																																																																																																	
70	505																																																																																																	
80	510																																																																																																	
100	515																																																																																																	
120	518																																																																																																	
140	520																																																																																																	
160	521																																																																																																	
180	522																																																																																																	
200	523																																																																																																	
220	524																																																																																																	
240	525																																																																																																	
250	532,07																																																																																																	
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																																	
0	300,72																																																																																																	
5	312,5																																																																																																	
10	325																																																																																																	
15	337,5																																																																																																	
20	350																																																																																																	
25	362,5																																																																																																	
30	375																																																																																																	
35	380																																																																																																	
40	385																																																																																																	
50	388																																																																																																	
60	390																																																																																																	
70	391																																																																																																	
80	392																																																																																																	
100	393																																																																																																	
120	394																																																																																																	
140	395																																																																																																	
160	395,5																																																																																																	
180	396																																																																																																	
200	396,5																																																																																																	
220	397																																																																																																	
240	397,5																																																																																																	
260	398																																																																																																	
280	398,5																																																																																																	
290	390,06																																																																																																	



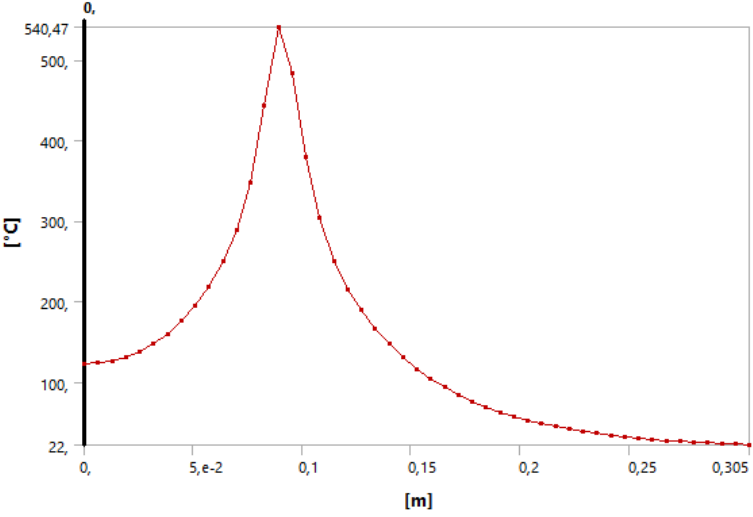
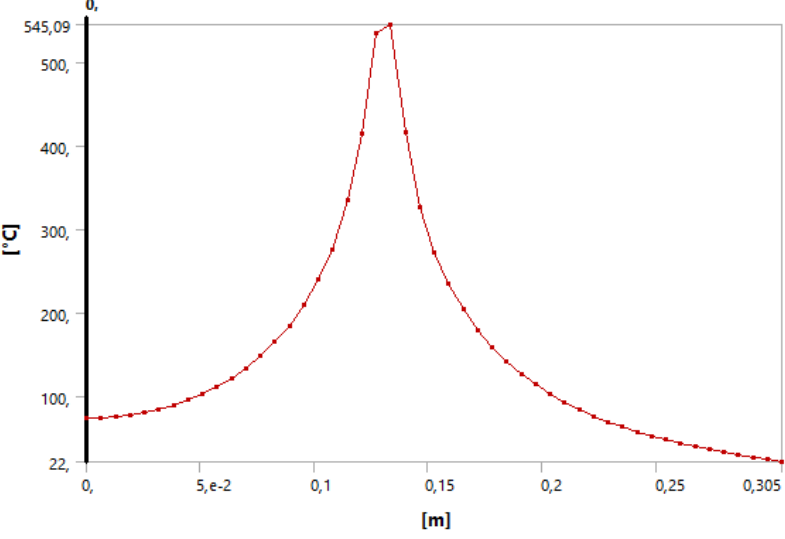
(Fuente: El autor)

Tabla 6.75 Temperatura respecto la longitud del modelo E (10s y 50s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (10 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (50 segundos)</p> 		



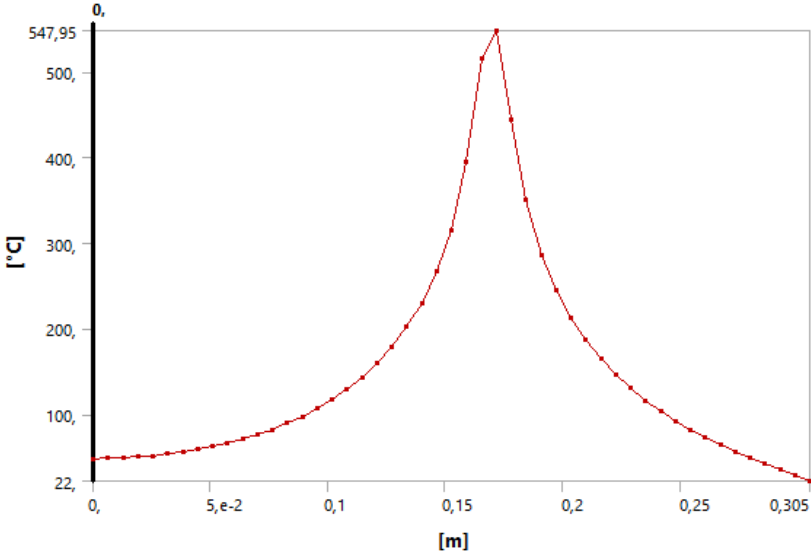
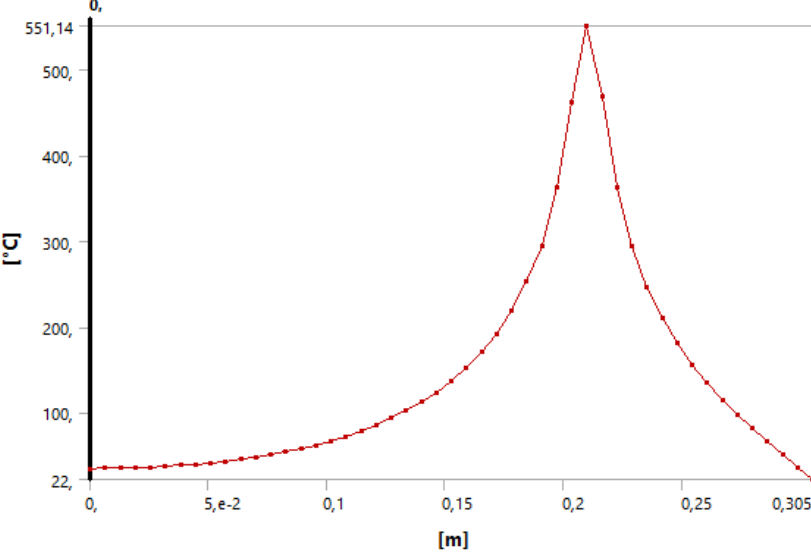
(Fuente: El autor)

Tabla 6.76 Temperatura respecto la longitud del modelo E (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (90 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (130 segundos)</p> 		



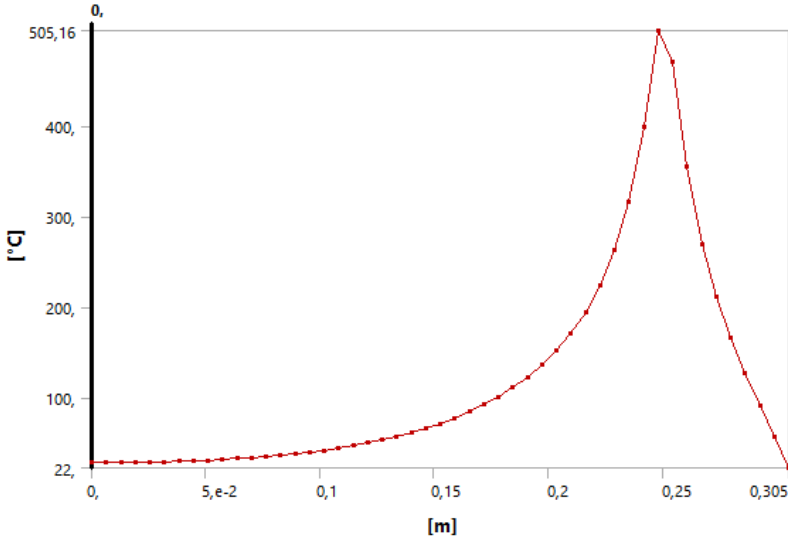
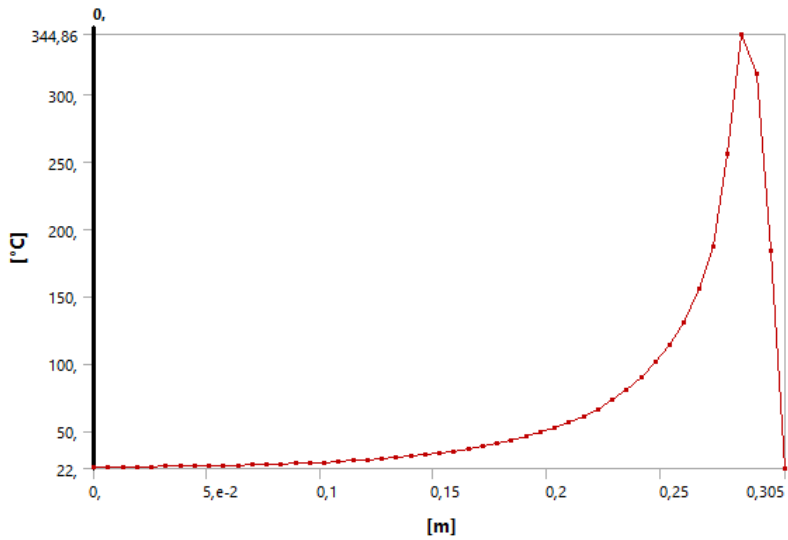
(Fuente: El autor)

Tabla 6.77 Temperatura respecto la longitud del modelo E (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (170 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (210 segundos)</p> 		



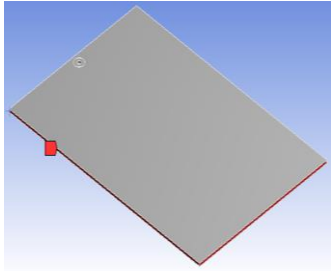
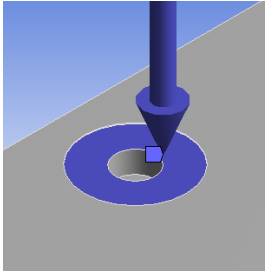
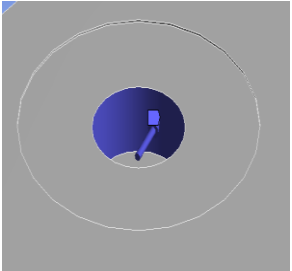
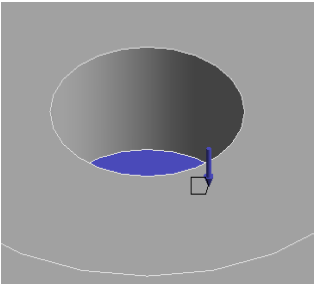
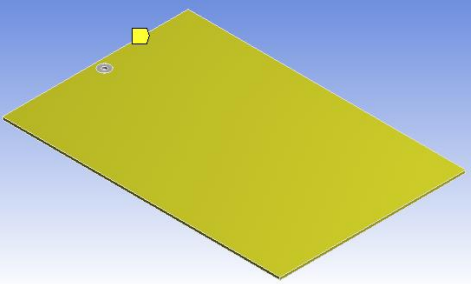
(Fuente: El autor)

Tabla 6.78 Temperatura respecto la longitud del modelo E (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: E)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (290 segundos)</p> 		

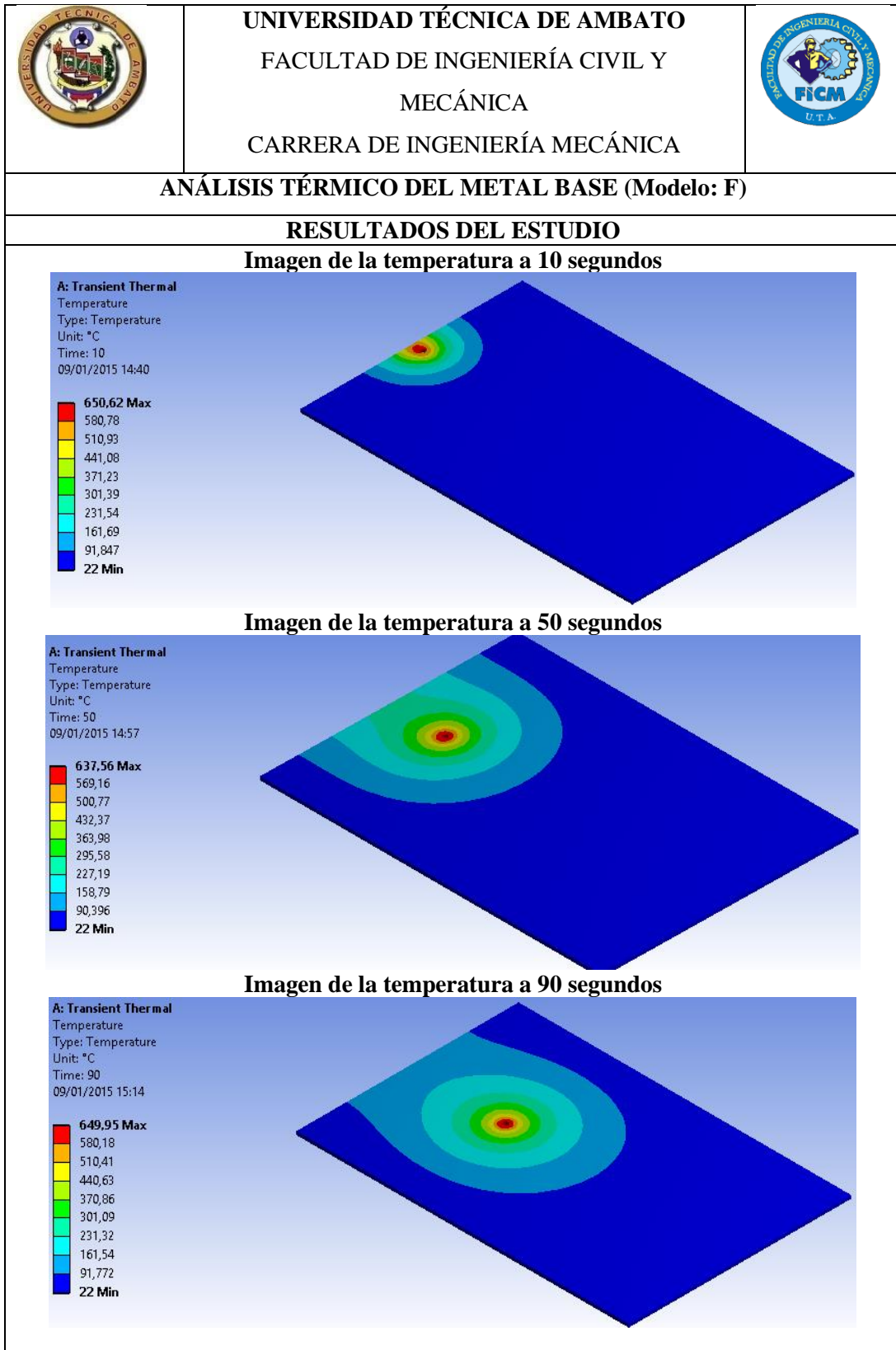
(Fuente: El autor)

Tabla 6.79 Datos para el análisis térmico del modelo F

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: F)			
REGISTRO DE DATOS INFORMATIVOS			
PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS			
Masa:	0.503798 kg	Densidad:	2700 kg/m ³
Volumen:	0.000186592 m ³	Peso:	4.93722 N
PROPIEDADES DEL MATERIAL Al 6061			
Conductividad térmica:		166.9 W/(m.K)	
Calor específico:		896 J/(kg.K)	
Densidad:		2700 kg/m ³	
CARGAS TÉRMICAS			
Imágenes de las condiciones del contorno y cargas térmicas			
			
Valor de la temperatura externa: 22 C	Flujo de calor producido por el hombro: 495.74W	Flujo de calor producido por la superficie cilíndrica del pin: 107.66W	
			
Flujo de calor producido por la superficie circular del pin: 29.91W	Coeficiente de transferencia de calor del pin: 44.934W/m ² *K		



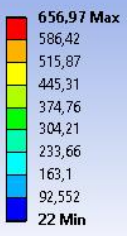
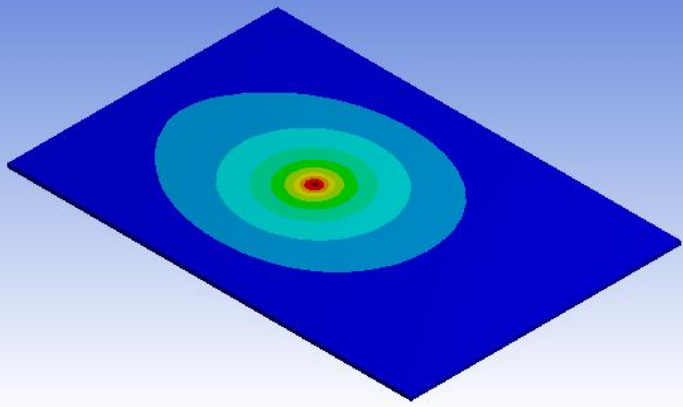
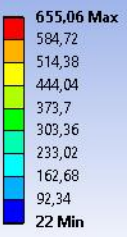
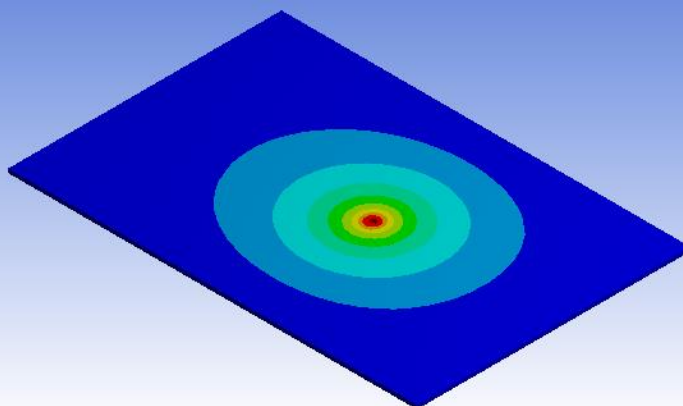
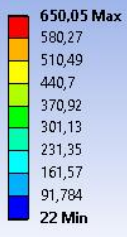
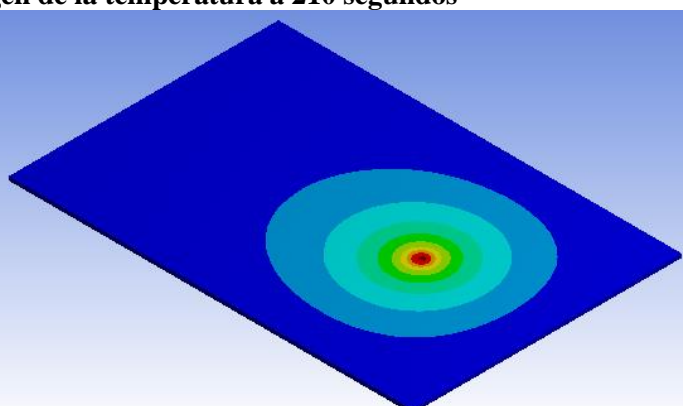
(Fuente: El autor)

Tabla 6.80 Resultados del análisis térmico del modelo F (10s, 50s y 90s)



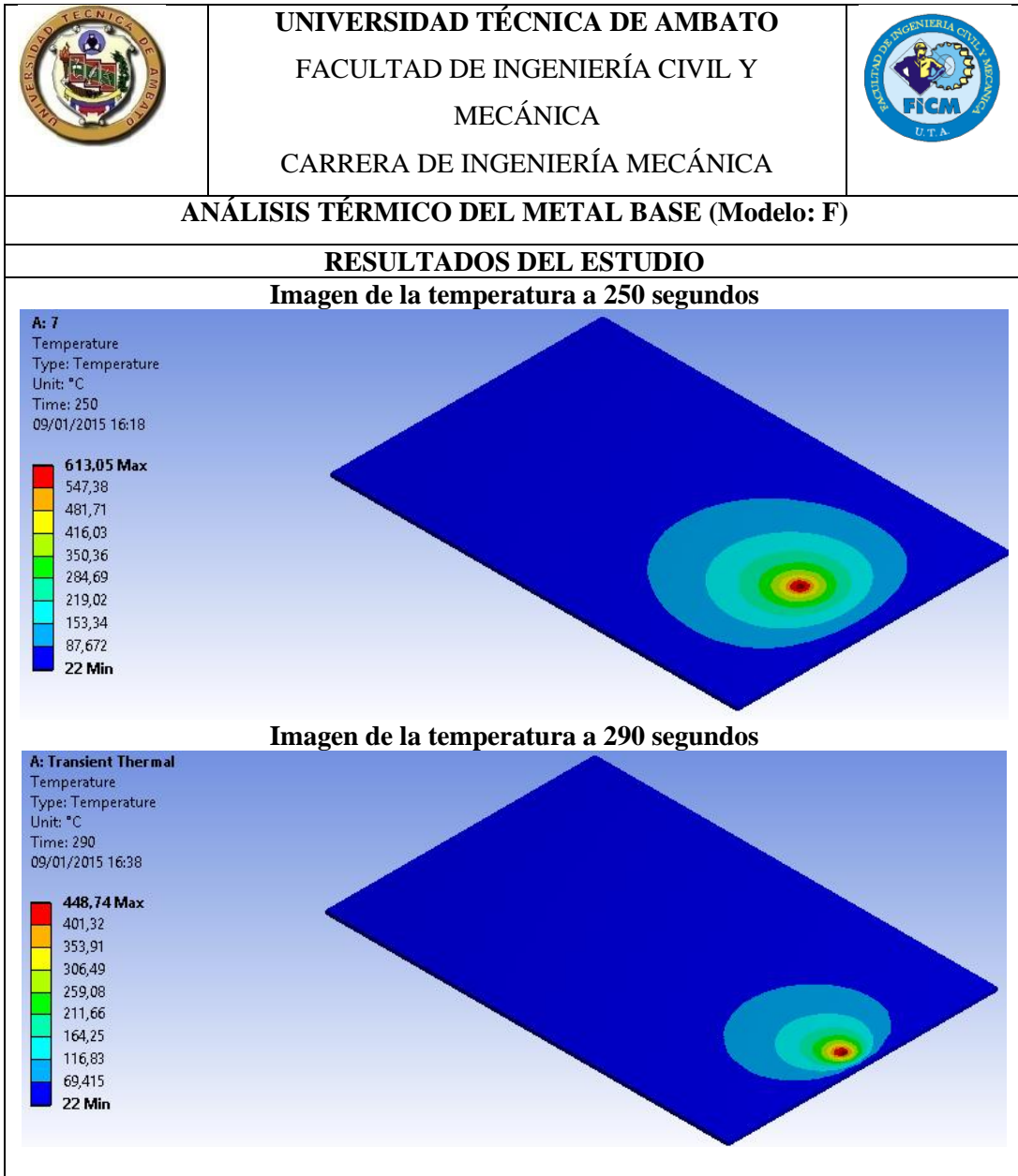
(Fuente: El autor)

Tabla 6.81 Resultados del análisis térmico del modelo F (130s, 170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: F)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p>Imagen de la temperatura a 130 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 130 09/01/2015 15:31</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 170 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 170 09/01/2015 15:49</p> 		
<p>Imagen de la temperatura a 210 segundos</p>		
<p>A: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 210 09/01/2015 16:05</p> 		

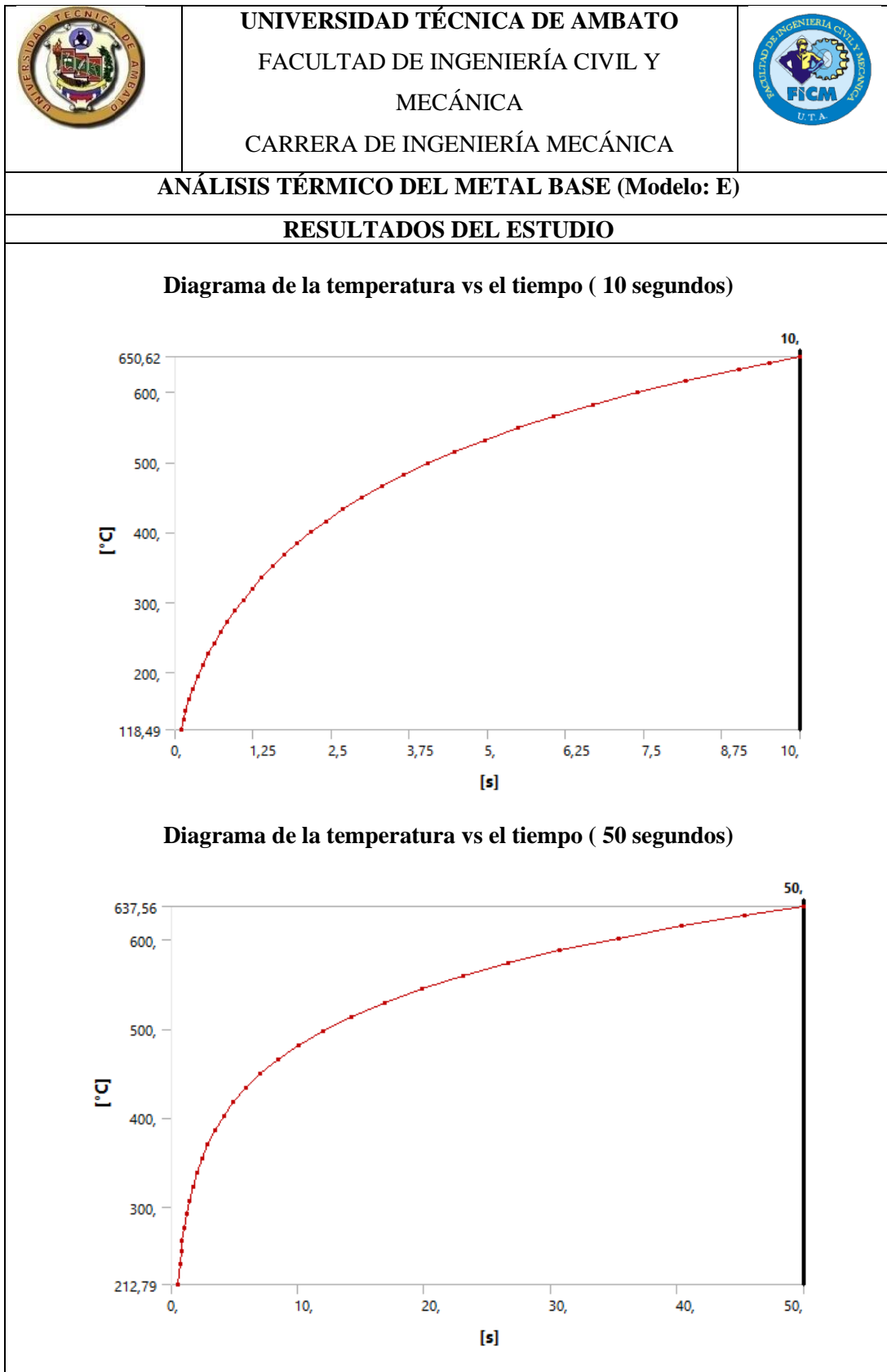
(Fuente: El autor)

Tabla 6.82 Resultados del análisis térmico del modelo F (250s y 290s)





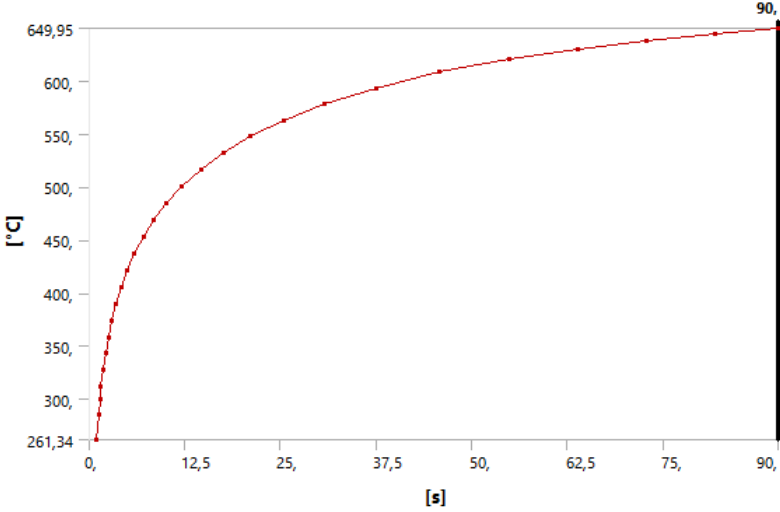
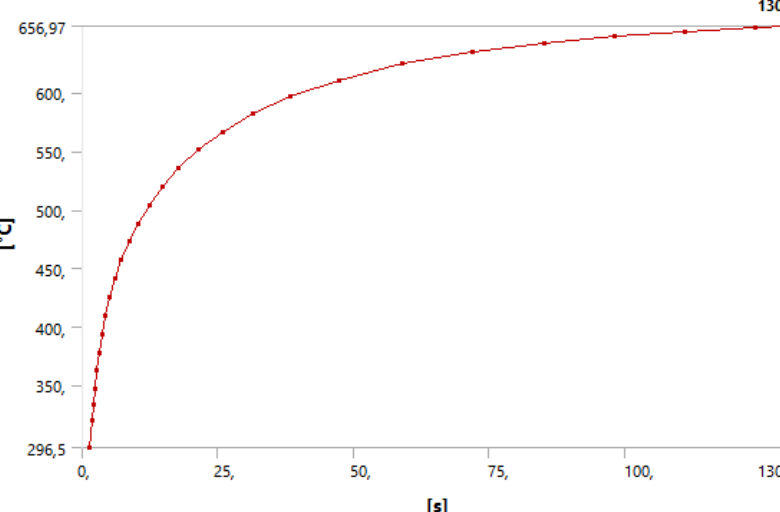
(Fuente: El autor)

Tabla 6.83 Temperatura respecto al tiempo del modelo F (10s y 50s)



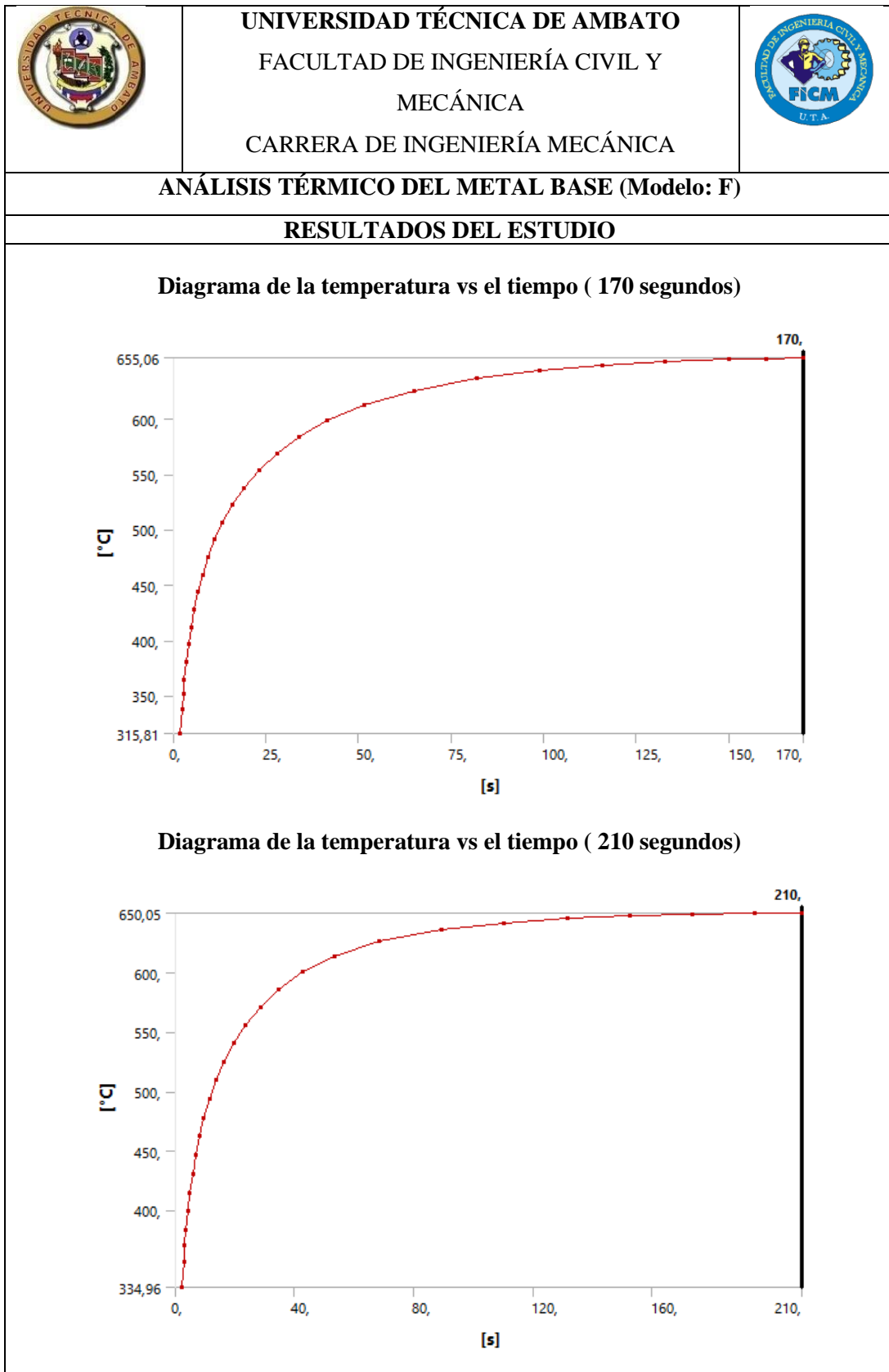
(Fuente: El autor)

Tabla 6.84 Temperatura respecto al tiempo del modelo F (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: F)</p>																																		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (90 segundos)</p>  <table border="1" style="margin: 10px auto; width: 80%;"> <caption>Data for 90s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>261,34</td></tr> <tr><td>12,5</td><td>480</td></tr> <tr><td>25</td><td>530</td></tr> <tr><td>37,5</td><td>570</td></tr> <tr><td>50</td><td>600</td></tr> <tr><td>62,5</td><td>620</td></tr> <tr><td>75</td><td>635</td></tr> <tr><td>90</td><td>649,95</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (130 segundos)</p>  <table border="1" style="margin: 10px auto; width: 80%;"> <caption>Data for 130s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>296,5</td></tr> <tr><td>25</td><td>530</td></tr> <tr><td>50</td><td>580</td></tr> <tr><td>75</td><td>610</td></tr> <tr><td>100</td><td>630</td></tr> <tr><td>130</td><td>656,97</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	261,34	12,5	480	25	530	37,5	570	50	600	62,5	620	75	635	90	649,95	Time [s]	Temperature [°C]	0	296,5	25	530	50	580	75	610	100	630	130	656,97
Time [s]	Temperature [°C]																																	
0	261,34																																	
12,5	480																																	
25	530																																	
37,5	570																																	
50	600																																	
62,5	620																																	
75	635																																	
90	649,95																																	
Time [s]	Temperature [°C]																																	
0	296,5																																	
25	530																																	
50	580																																	
75	610																																	
100	630																																	
130	656,97																																	



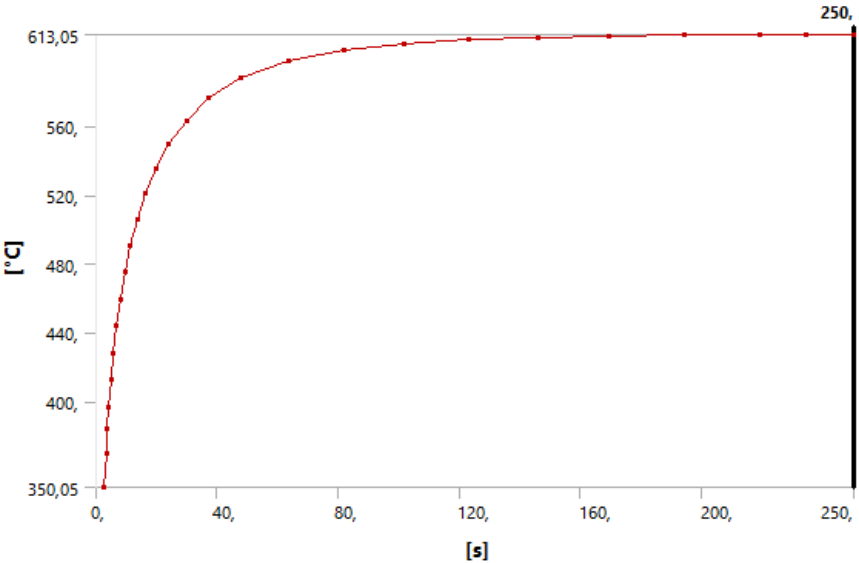
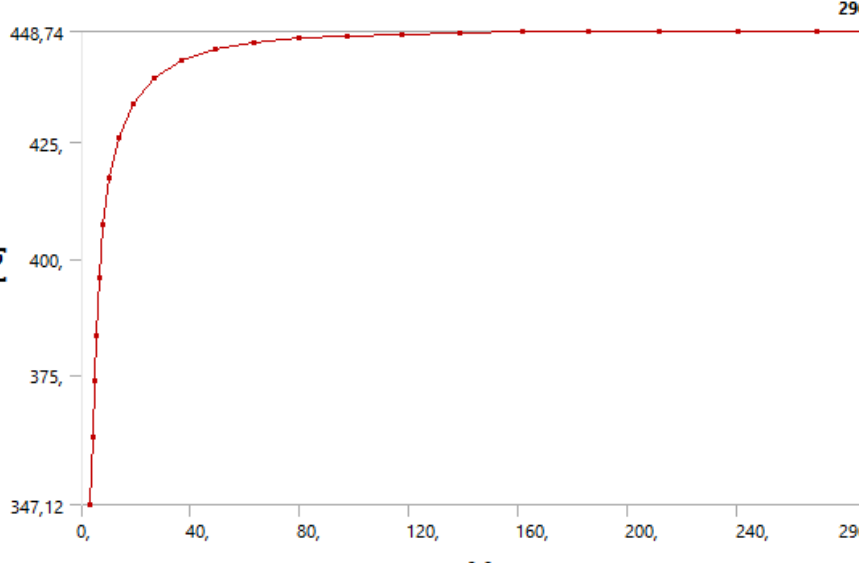
(Fuente: El autor)

Tabla 6.85 Temperatura respecto al tiempo del modelo F (170s y 210s)



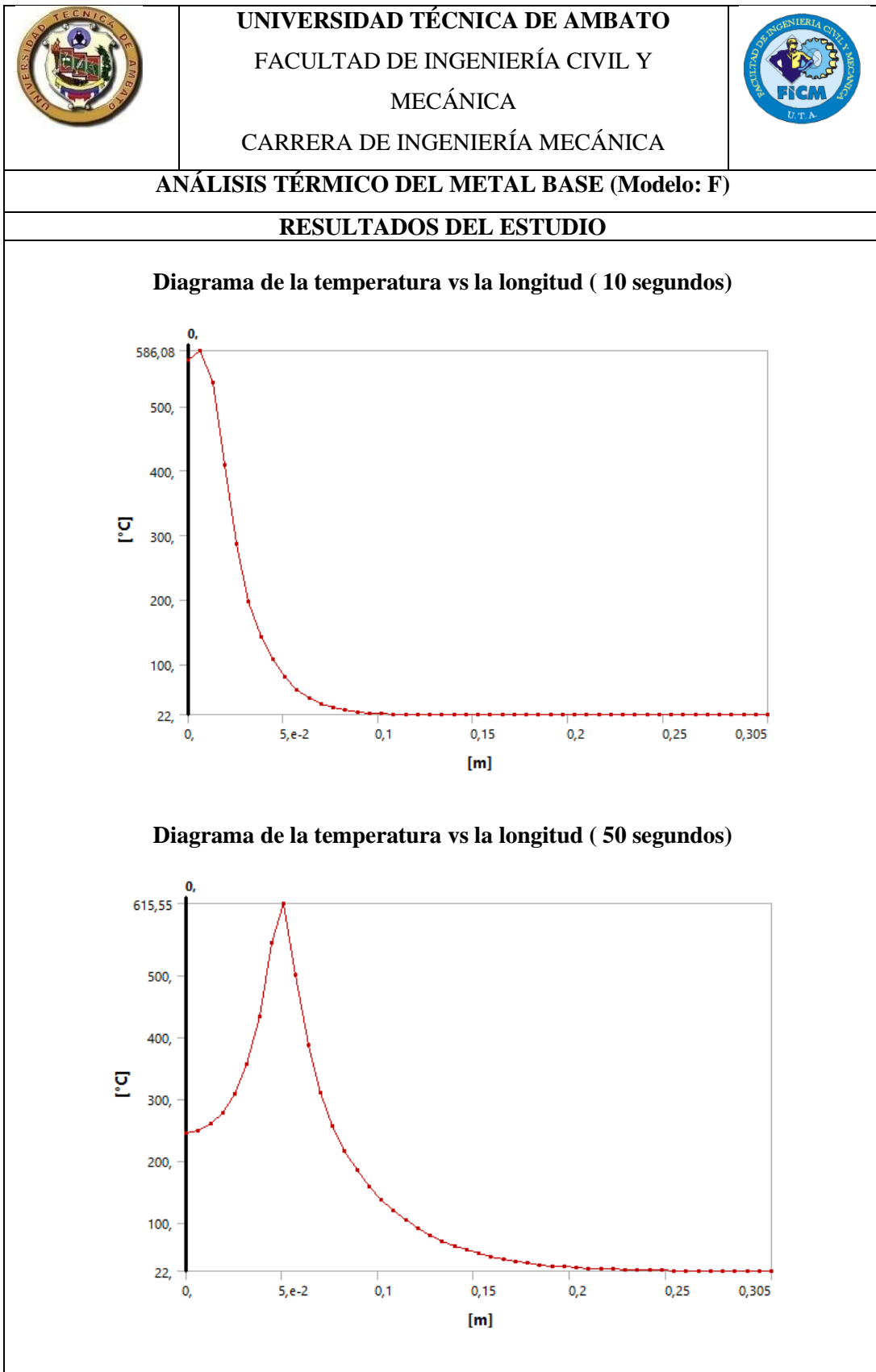
(Fuente: El autor)

Tabla 6.86 Temperatura respecto al tiempo del modelo F (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>																																																																																					
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: F)</p>																																																																																						
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>																																																																																						
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (250 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="405 672 1267 1232"> <caption>Data for 250s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>350,05</td></tr> <tr><td>5</td><td>380,00</td></tr> <tr><td>10</td><td>420,00</td></tr> <tr><td>15</td><td>450,00</td></tr> <tr><td>20</td><td>480,00</td></tr> <tr><td>25</td><td>500,00</td></tr> <tr><td>30</td><td>520,00</td></tr> <tr><td>40</td><td>550,00</td></tr> <tr><td>60</td><td>580,00</td></tr> <tr><td>80</td><td>595,00</td></tr> <tr><td>100</td><td>605,00</td></tr> <tr><td>120</td><td>610,00</td></tr> <tr><td>140</td><td>612,00</td></tr> <tr><td>160</td><td>613,00</td></tr> <tr><td>180</td><td>613,05</td></tr> <tr><td>200</td><td>613,05</td></tr> <tr><td>220</td><td>613,05</td></tr> <tr><td>240</td><td>613,05</td></tr> <tr><td>250</td><td>613,05</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs el tiempo (290 segundos)</p>  <table border="1" data-bbox="405 1344 1267 1904"> <caption>Data for 290s Temperature vs Time Graph</caption> <thead> <tr> <th>Time [s]</th> <th>Temperature [°C]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>347,12</td></tr> <tr><td>5</td><td>370,00</td></tr> <tr><td>10</td><td>390,00</td></tr> <tr><td>15</td><td>410,00</td></tr> <tr><td>20</td><td>425,00</td></tr> <tr><td>25</td><td>435,00</td></tr> <tr><td>30</td><td>440,00</td></tr> <tr><td>40</td><td>445,00</td></tr> <tr><td>60</td><td>447,00</td></tr> <tr><td>80</td><td>448,00</td></tr> <tr><td>100</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>120</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>140</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>160</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>180</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>200</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>220</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>240</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>260</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>280</td><td>448,74</td></tr> <tr><td>290</td><td>448,74</td></tr> </tbody> </table>			Time [s]	Temperature [°C]	0	350,05	5	380,00	10	420,00	15	450,00	20	480,00	25	500,00	30	520,00	40	550,00	60	580,00	80	595,00	100	605,00	120	610,00	140	612,00	160	613,00	180	613,05	200	613,05	220	613,05	240	613,05	250	613,05	Time [s]	Temperature [°C]	0	347,12	5	370,00	10	390,00	15	410,00	20	425,00	25	435,00	30	440,00	40	445,00	60	447,00	80	448,00	100	448,74	120	448,74	140	448,74	160	448,74	180	448,74	200	448,74	220	448,74	240	448,74	260	448,74	280	448,74	290	448,74
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																					
0	350,05																																																																																					
5	380,00																																																																																					
10	420,00																																																																																					
15	450,00																																																																																					
20	480,00																																																																																					
25	500,00																																																																																					
30	520,00																																																																																					
40	550,00																																																																																					
60	580,00																																																																																					
80	595,00																																																																																					
100	605,00																																																																																					
120	610,00																																																																																					
140	612,00																																																																																					
160	613,00																																																																																					
180	613,05																																																																																					
200	613,05																																																																																					
220	613,05																																																																																					
240	613,05																																																																																					
250	613,05																																																																																					
Time [s]	Temperature [°C]																																																																																					
0	347,12																																																																																					
5	370,00																																																																																					
10	390,00																																																																																					
15	410,00																																																																																					
20	425,00																																																																																					
25	435,00																																																																																					
30	440,00																																																																																					
40	445,00																																																																																					
60	447,00																																																																																					
80	448,00																																																																																					
100	448,74																																																																																					
120	448,74																																																																																					
140	448,74																																																																																					
160	448,74																																																																																					
180	448,74																																																																																					
200	448,74																																																																																					
220	448,74																																																																																					
240	448,74																																																																																					
260	448,74																																																																																					
280	448,74																																																																																					
290	448,74																																																																																					



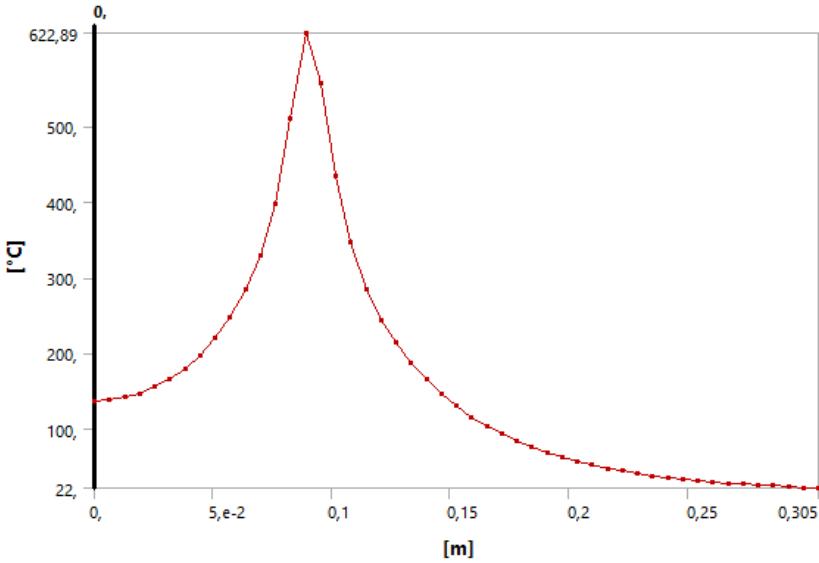
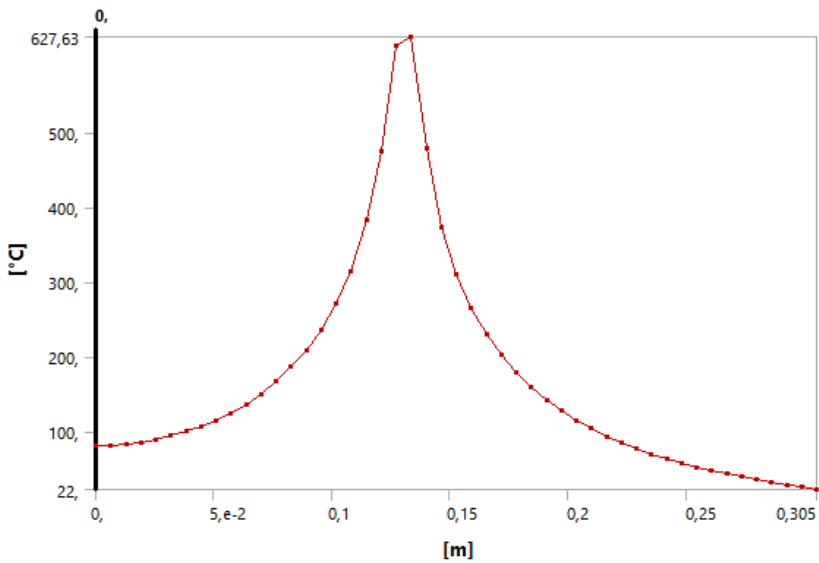
(Fuente: El autor)

Tabla 6.87 Temperatura respecto la longitud del modelo F (10s y 50s)





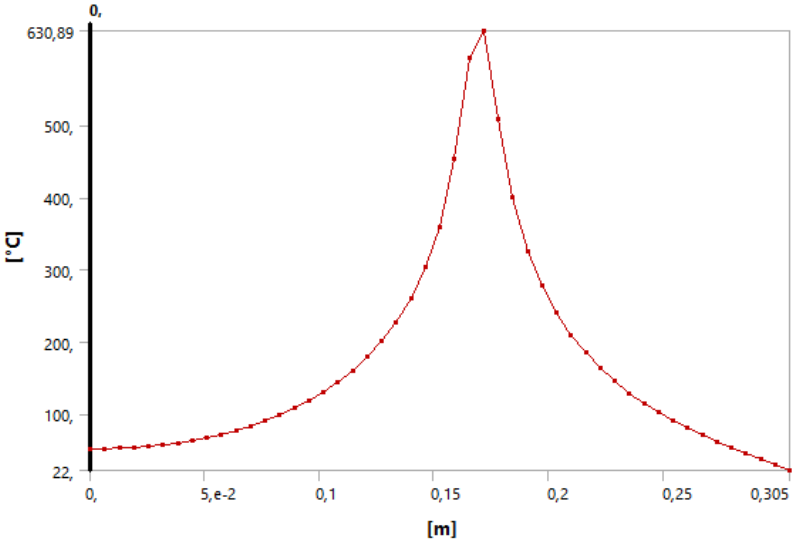
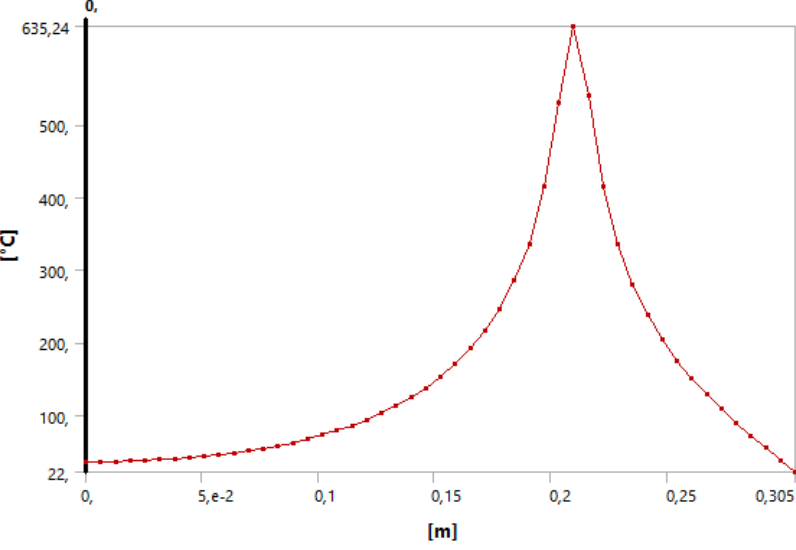
(Fuente: El autor)

Tabla 6.88 Temperatura respecto la longitud del modelo F (90s y 130s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: F)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (90 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (130 segundos)</p> 		



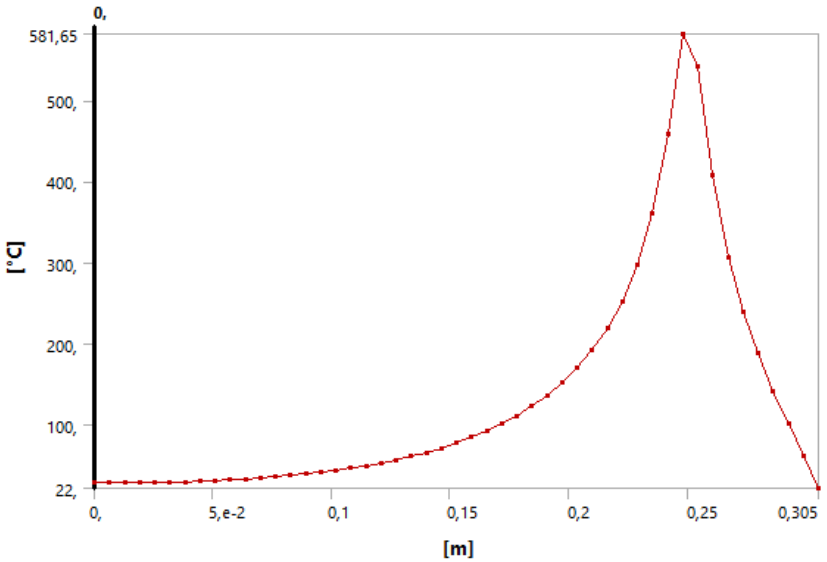
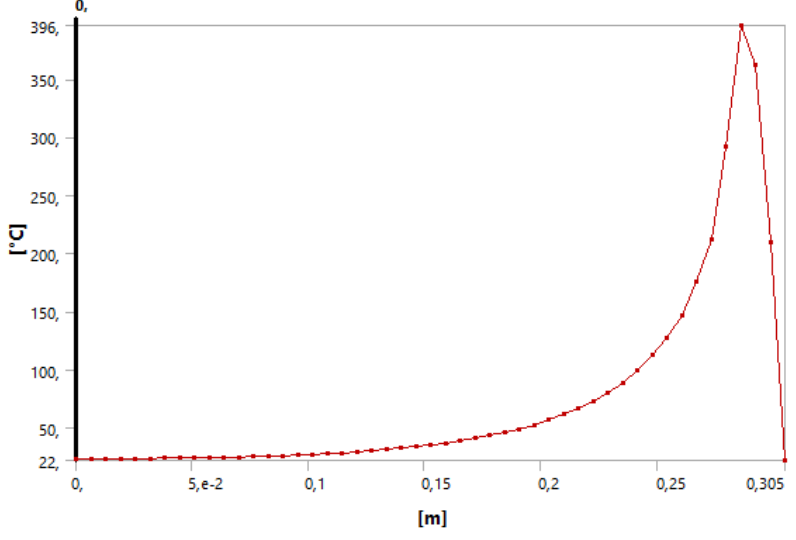
(Fuente: El autor)

Tabla 6.89 Temperatura respecto la longitud del modelo F (170s y 210s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: F)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (170 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (210 segundos)</p> 		

(Fuente: El autor)

Tabla 6.90 Temperatura respecto la longitud del modelo F (250s y 290s)

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>ANÁLISIS TÉRMICO DEL METAL BASE (Modelo: F)</p>		
<p>RESULTADOS DEL ESTUDIO</p>		
<p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (250 segundos)</p>  <p style="text-align: center;">Diagrama de la temperatura vs la longitud (290 segundos)</p> 		

(Fuente: El autor)

6.6.5 Análisis de los datos obtenidos de la herramienta de soldadura

Mediante el estudio realizado a la herramienta, se concluye que el esfuerzo principal máximo, que se produce es en el cambio de sección entre el hombro y el pin, figura 6.1. También se concluye que el material óptimo es el AISI 4340.

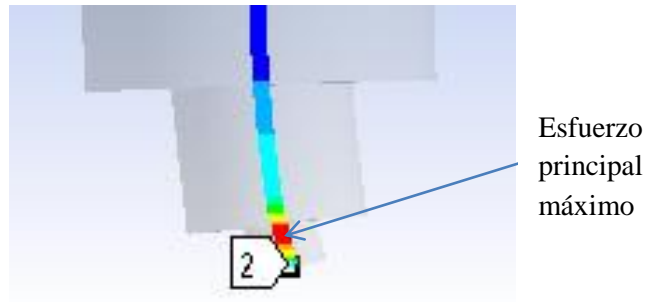


Figura 6.1 Esfuerzo principal máximo en la herramienta de soldadura
(Fuente: El autor)

6.6.6 Análisis de los datos obtenidos en el metal base

El proceso de soldadura por fricción agitación (FSW), es un método de unión en estado sólido, es decir los elementos a unir no alcanzan la temperatura de fusión, por esta razón se comparó que la temperatura máxima alcanzada durante el contacto entre la herramienta y el material base, no sea superior a la temperatura de fusión del aluminio, para así optimizar el proceso, tabla 6.8.




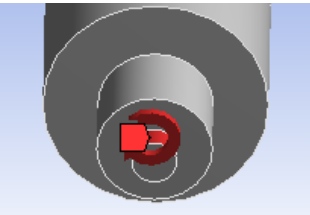
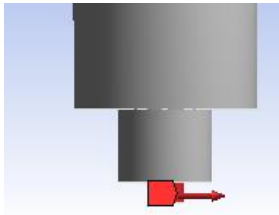
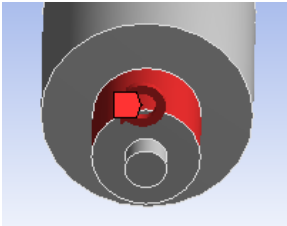
Tabla 6.91 Análisis de la temperatura alcanzada en el metal base

Modelo	Temperatura de fusión ($T_{fusión}$)	Temperatura del proceso (T)	$T < T_{fusión}$
A	660 C	216.23 C	Si cumple
B	660 C	306.45C	Si cumple
C	660 C	394.82C	Si cumple
D	660 C	482.49C	Si cumple
E	660 C	570.25 C	Si cumple
F	660 C	656.97 C	Si cumple

(Fuente: El autor)



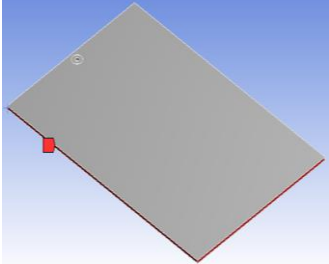
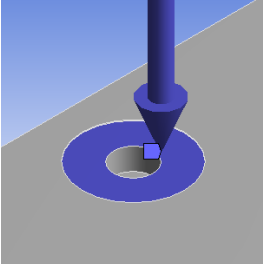
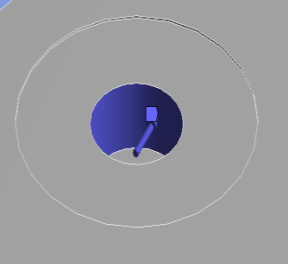
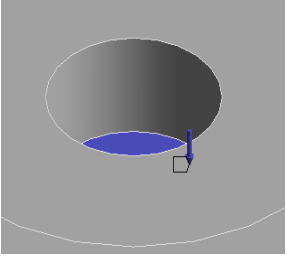
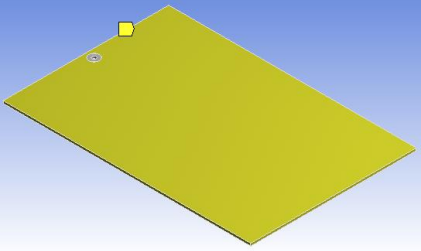
6.7 Metodología

Tabla 6.92 Procedimiento para el análisis de la herramienta

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
PASOS PARA EL MODELAMIENTO ESTÁTICO DE LA HERRAMIENTA DE SOLDADURA		
1) Modelamiento de la herramienta de soldadura		
2) Seleccionar el estudio estático para el análisis del modelo		
3) Aplicar el material al modelo		
4) Seleccionar el tipo de sujeción		
Imagen de la sujeción		
<div style="text-align: center;">  <p>Tipo de sujeción: Cylindrical Support</p> </div>		
5) Aplicar las cargas presentes en la herramienta de soldadura		
Imagen de la torsión sobre el pin	Imagen de la fuerza sobre el pin	
<div style="text-align: center;">  <p>Valor de la carga de torsión: 5.11 N*m</p> </div>	<div style="text-align: center;">  <p>Valor de la fuerza: 2187.8 N</p> </div>	
Imagen de la torsión sobre el hombro		
<div style="text-align: center;">  <p>Valor de la carga de torsión: 1.42 N*m</p> </div>		
6) Ejecutar simulación del modelo		
7) Revisión de los resultados obtenidos		

(Fuente: El autor)

Tabla 6.93 Procedimiento para el análisis del metal base

	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>	
<p>PASOS PARA EL MODELAMIENTO TÉRMICO DEL MATERIAL BASE</p>		
<p>1) Modelamiento del material base</p>		
<p>2) Seleccionar el estudio térmico para el análisis</p>		
<p>3) Aplicar el material para el material base</p>		
<p>4) Aplicar las cargas térmicas en el modelo</p>		
<p>Imágenes de las condiciones del contorno y cargas térmicas</p>		
 <p>Ingresar el valor de la temperatura externa</p>	 <p>Ingresar el valor del flujo de calor producido por el hombro</p>	
 <p>Ingresar el valor del flujo de calor producido por la superficie cilíndrica del pin</p>	 <p>Ingresar el valor del flujo de calor producido por la superficie circular del pin</p>	
 <p>Ingresar el valor del coeficiente de transferencia de calor del pin</p>		
<p>5) Ejecutar simulación del modelo</p>		
<p>6) Revisión de los resultados obtenidos</p>		

(Fuente: El autor)

6.8 Administración

6.8.1 Costos de Investigación

El análisis económico de la investigación y propuesta se presenta en la tabla 6.9

Tabla 6.94 **Costos de Investigación**

ITEM	Detalle	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
RECURSOS MATERIALES					
1	Eje de acero de maquinaria para cementación, d:1”	0.5	m	\$12.00	\$6.00
2	Plancha de aluminio 6061	0.5	m ²	\$400.00	\$200.00
3	Platina de acero remanente, a:40mm, l:400mm, e:18mm	4	kg	\$0.50	\$2.00
4	Placa de acero remanente, a:220mm, l:400mm, e:38mm	40	kg	\$0.50	\$20.00
5	Pernos de 1/2in para la placa base	4	u	\$0.40	\$1.60
6	Pernos de 1/4in para los sujetadores	18	u	\$0.25	\$4.50
TOTAL:					\$234.10
ITEM	Detalle	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
UTILIZACIÓN DE MAQUINARIA					
1	Corte de las placas con oxicorte	0.1	m	\$5.00	\$0.50
2	Corte de la placa base con oxicorte	0.22	m	\$10.00	\$2.20
3	Roscado de los sujetadores y placa base	22	u	\$0.20	\$22.20
4	Corte de la placas de aluminio	30	u	\$1.20	\$36.00
5	Mecanizado en torno de la barra de acero AISI 3115	0.5	m	\$20.00	\$10.00
6	Taladrado de la placa base	4	u	\$0.50	\$2.00
7	Taladrado de los sujetadores	18	u	\$0.20	\$3.60
8	Fresadora para soldar las placas	10	u	\$10.00	\$100.00
TOTAL:					\$176.50

ITEM	Detalle	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
ENSAYOS MECÁNICOS					
1	Ensayo de Tracción	6	u	\$10.00	\$60.00
2	Ensayo de Doblado	6	h	\$20.00	\$120.00
3	Ensayo de Dureza	6	u	\$20.00	\$120.00
TOTAL:					\$300.00
ITEM	Detalle	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
VARIOS					
1	Maestro mecánico	1	u	\$100.00	\$100.00
2	Internet	120	h	\$0.80	\$96.00
3	Impresiones	600	u	\$0.10	\$60.00
4	Anillados	1	u	\$1.50	\$1.50
5	Empastados	1	u	\$10.00	\$10.00
6	Trasporte	.....	.....	\$200.00	\$200.00
TOTAL:					\$367.50
SUBTOTAL:					\$1178.10
IMPREVISTOS 10%:					\$117.81
COSTO TOTAL:					\$1295.91

(Fuente: El autor)

6.9 Previsión de la Evaluación

Una vez culminado el presente proyecto de investigación, acerca del proceso de soldadura por fricción agitación FSW y su influencia sobre las propiedades mecánicas del cordón de soldadura, se concluye que es un proceso de unión, que se realiza en estado sólido y sin aporte de material, para realizar la junta se emplea una herramienta de soldadura no consumible. Para obtener excelentes propiedades mecánicas del cordón de soldadura se debe optimizar los parámetros de soldadura: geometría de la herramienta, las velocidades de rotación y de avance de la herramienta y un diseño adecuado de las sujeciones de las placas, con la finalidad de evitar defectos de soldadura por desplazamiento de las mismas.

Bibliografía

a) Libros

1. Cengel A. & Ghajar J. (2011). *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones*. (4ta Edición). McGRAW-HILL/Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
2. Mishra R. & Nilesh P. (2014). *Friction Stir Welding and Processing Science and Engineering*. (1ra Edición). Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.
3. Richard Rowe y Larry Jeffus (2008). *Manual de Soldadura GMAW*. Impreso en España por paraninfo.
4. Robert L. Mott (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. (4ta Edición). D. R. 2006 Por Pearson Educación de México S.A. de C.V.
5. Rodríguez P. C. (2007). *Manual de Soldadura*. (1ra Edición). Argentina: Librería y Editorial Alsina.
6. Ruiz D. (2006). *Fundamentos y ensayos en materiales metálicos* (1ra Edición). Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
7. Sami B. & Sahin Z. (2014). *Friction Welding Thermal and Metallurgical Characteristics* (1ra Edición). Springer Briefs in Applied Sciences and Technology.
8. Smith William F. y Hashemi J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. (4ta Edición). McGRAW-HILL Interamericana Editores, S. A. DE C.V.

b) Tesis

1. Carabali L. (2006, Marzo 09). *Welding process in the Engineering*. Atlantic International University Honolulu, Hawaii.
2. Fernández Espinoza M. (2010). *La importancia de la inspección de soldadura en la fabricación y montaje de estructuras metálicas*. Que para obtener el título de: Ingeniero Civil. Universidad Veracruzana.

3. García Vernal M. A. (2009). *Propiedades súper plásticas de la aleación 6061 Procesada por Fricción Agitación*. Que para obtener el título de: Doctor en Ciencias Metalurgia y Materiales. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.
4. López Martínez A. (2013). *Fabricación Industrial*. Que para obtener el título de: Ingeniero Mecánico. Universidad de Almería.
5. Melendo J.C. (2010). *Evaluación de tensiones residuales en soldadura de aluminio por FSW y GMAW*. Que para obtener el título de: Ingeniero Mecánico. Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.
6. Santiago, D. Lombera, G. (2007). *Análisis Bidimensional del Flujo de Material en Soldadura por Fricción-Agitación*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, CONICET, Mar del Plata, Argentina.
7. Zapata Sánchez J. C. (2013). *Evaluación de los esfuerzos residuales en juntas de aluminio unidas mediante el proceso de Soldadura por Fricción Agitación*. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magíster en Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Colombia.
8. Zarate Monje J. L. (2007). *Comparación de las características en el soldeo de las aleaciones de aluminio con materiales de aporte ER4043 y ER5356 mediante el proceso MIG*. Que para obtener el título de: Ingeniero Mecánico. Pontificia Universidad Católica del Perú.

c) Revistas

1. Bolser R. (2010). *No Hay Fusión Milagrosa - la Industria de la Soldadura se convierte en una de alta tecnología*. Revista ISO Focus.
2. Hernán Svoboda G. (2009). *Proceso de Soldadura por Fricción-Agitación (FSW)*. Argentina: Centro de Investigación, Desarrollo, Innovación y Diseño en Ingeniería, CIDIDI.
3. Llano Uribe C. (2008). *Soldadura G.M.A.W - MIG/MAG Un proceso rápido, limpio y versátil*. Revista Metal actual.
4. OXGASA (2010). *Manual de Soldadura*. Revista OXGASA.

d) Artículos de Internet

1. Córdova A. (2013). *Soldadura de Aluminio por Fricción*. Disponible en URL: <http://www.esabna.com/mx/sp/educacion/Procesos/Soldadura-de-Aluminio-mediante-Batido-por-Friccion.cfm> [Consulta 05 de Enero el 2014].
2. European Aluminium Association (2010). *Aluminio y Sostenibilidad*. Disponible en URL: www.aluminium.org [Consulta 23 de Marzo del 2014].
3. Giménez C. (2010). *Fundamentos de Ciencia de los Materiales*. Disponible en URL: <http://libreria-universitaria.blogspot.com> [Consulta 18 de Marzo del 2014].
4. Indura (2009). *Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura*. Disponible en URL: www.Indura.cl [Consulta 23 de Marzo del 2014].
5. Semorile M. (2010). *Mecánica y Metalurgia, El Milagro de la Soldadura sin Fusión*. Disponible en URL: www.iram.org.ar [Consulta 09 de Enero el 2014].
6. Soldexa (2007). *Conceptos Generales de Soldadura y Procesos*. Disponible en URL: www.soldexa.com.pe [Consulta 05 de Febrero del 2014].

ANEXOS

ANEXOS A

ENSAYOS MECÁNICOS

Imágenes del Ensayo de Tracción



Figura A.1 Probetas para el Ensayo de Tracción

(Fuente: El autor)



Figura A.2 Máquina Universal de Ensayos (Escuela Politécnica Nacional)

(Fuente: El autor)



Figura A.3 Colocación de la probeta en las mordazas de la Máquina Universal de Ensayos
(Fuente: El autor)



Figura A.4 Ejecución del programa para la aplicación de la carga a la probeta
(Fuente: El autor)

Imágenes del ensayo de doblado de soldadura



Figura A.7 Probetas para el ensayo de doblado de soldadura

(Fuente: El autor)



Figura A.8 Máquina Universal (ESPOCH)

(Fuente: El autor)



Figura A.9 Método de doblado guiado mediante enrollado
(Fuente: El autor)

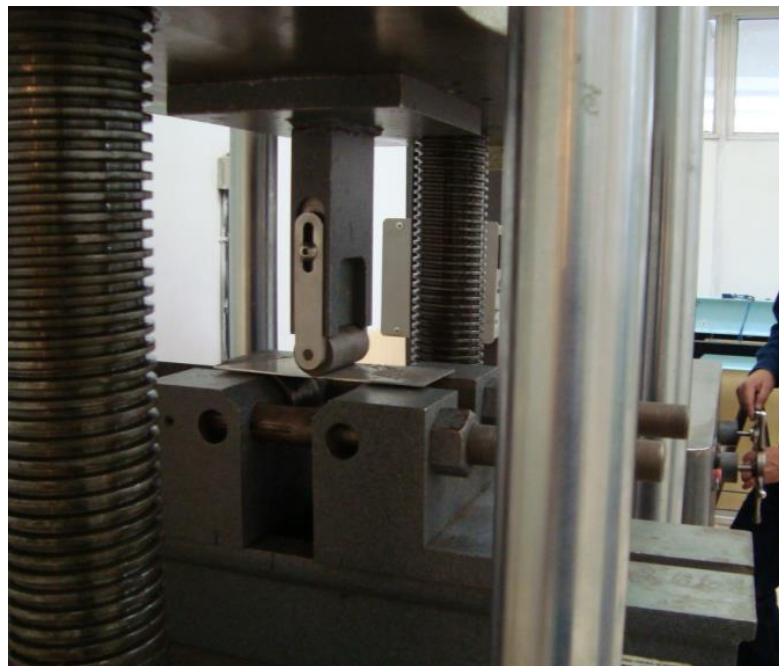


Figura A.10 Colocación de la probeta sobre el equipo para el doblado
(Fuente: El autor)



Figura A.11 Aplicación de la carga gradualmente sobre la probeta
(Fuente: El autor)

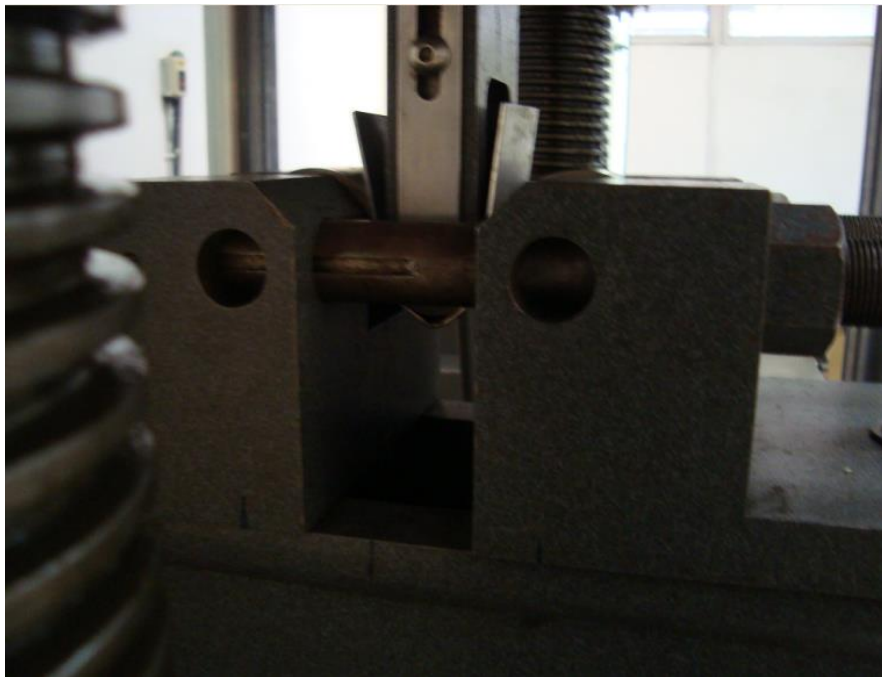


Figura A.12 Finalización de la carga sobre la probeta
(Fuente: El autor)

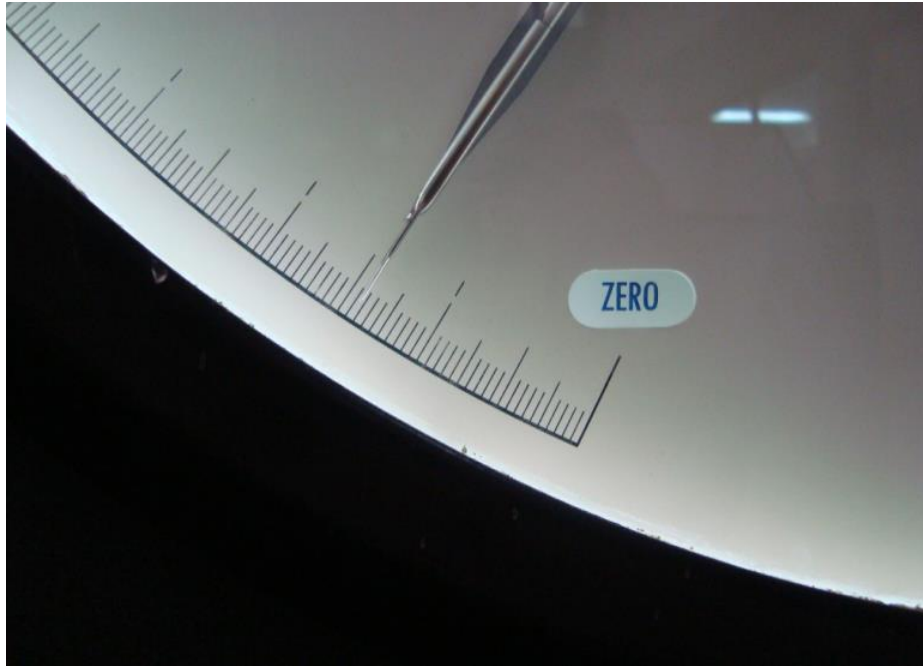


Figura A.13 Lectura de la carga que soporta la probeta
(Fuente: El autor)



Figura A.14 Probeta ensayada
(Fuente: El autor)

Imágenes del Ensayo de Dureza

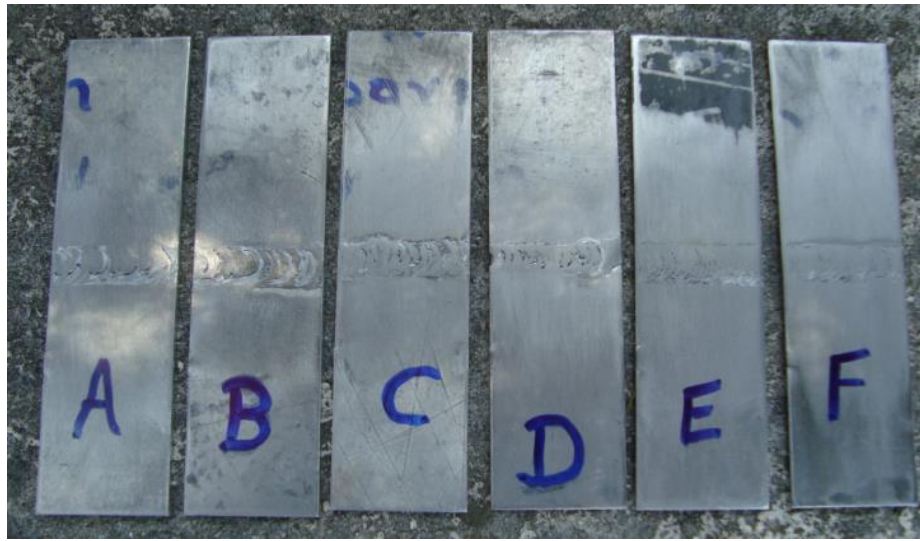


Figura A.15 Probetas para el Ensayo de Dureza

(Fuente: El autor)



Figura A.16 Durómetro utilizado para el Ensayo de Dureza

(Fuente: El autor)



Figura A.17 Colocación de la probeta sobre la base del durómetro
(Fuente: El autor)



Figura A.18 Calibración de la carga del durómetro en 1839N
(Fuente: El autor)



Figura A.19 Contacto entre el penetrador con la probeta
(Fuente: El autor)



Figura A.20 Regulación de la precarga hasta el nivel 100
(Fuente: El autor)



Figura A.21 Aplicación de la precarga sobre la probeta
(Fuente: El autor)



Figura A.22 Observación del diámetro de la huella en el microscopio
(Fuente: El autor)

ANEXOS B

PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN AGITACIÓN (FSW)

Imágenes de la construcción de la herramienta de soldadura FSW:



Figura B.1 Mecanizado de la barra de acero AISI 3115 en el torno

(Fuente: El autor)



Figura B.2 Herramienta de soldadura construida

(Fuente: El autor)

Imágenes de la construcción de la sujeción de las probetas:



Figura B.3 Corte de la placa base de materiales remanentes
(Fuente: El autor)



Figura B.4 Taladrado de la placa base
(Fuente: El autor)



Figura B.5 Taladrado de los sujetadores
(Fuente: El autor)



Figura B.6 Sujetadores construido
(Fuente: El autor)



Figura B.7 Placa base construida
(Fuente: El autor)



Figura B.8 Pernos de 1/2in para la placa base y de 1/4in para los sujetadores
(Fuente: El autor)

Imágenes del proceso de soldadura FSW



Figura B.9 Herramienta de soldadura sujeta a las mordazas de la fresadora
(Fuente: El autor)



Figura B.10 Colocación de la herramienta de soldadura en la fresadora
(Fuente: El autor)



Figura B.11 Ensamblaje de los sujetadores sobre la placa base
(Fuente: El autor)



Figura B.12 Fijación de las placas de aluminio para soldar
(Fuente: El autor)



Figura B.13 Fijación de la placa base y de los sujetadores a la mesa de la fresadora
(Fuente: El autor)



Figura B.14 Rotación de la herramienta de soldadura
(Fuente: El autor)



Figura B.15 Posicionamiento de la herramienta soldadura

(Fuente: El autor)



Figura B.16 Introducción de la herramienta de soldadura sobre la línea de unión

(Fuente: El autor)



Figura B.17 Avance de la herramienta de soldadura sobre la línea de unión
(Fuente: El autor)

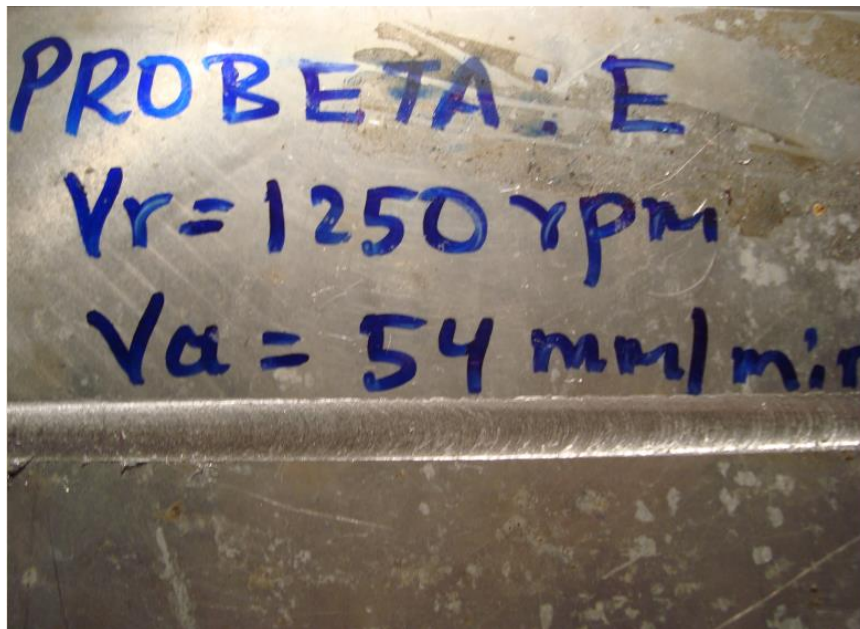


Figura B.18 Placas de aluminio unidas con el proceso FSW
(Fuente: El autor)

ANEXOS C

NORMA AWS D17.3

Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Hardware

1. Scope

This specification contains the requirements for designing, friction stir welding, and inspecting aluminum, aerospace hardware. Friction stir welding (FSW) produces a weld between two butting workpieces by the friction heating and plastic material displacement caused by a rotating tool that traverses along the weld joint.

1.1 Units of Measure. This standard makes use of both U. S. Customary Units and the International System of Units (SI). The latter are shown within brackets [] or in appropriate columns in tables and figures. The measurements may not be the exact equivalents; therefore, each system shall be used independently. Consult AWS A1.1, *Metric Practice Guide for the Welding Industry*, for additional information.

1.2 Health and Safety. Safety and health issues and concerns are beyond the scope of this standard and therefore are not fully addressed herein. Safety and health information is available from other sources, including, but not limited to, ANSI Z49.1, *Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes*, and applicable federal, state, and local regulations.

2. Normative References

The following standards contain provisions, which through reference in this AWS Standard, constitute mandatory provisions of this AWS Standard. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

AIA/NAS document:¹

NAS 410, *NAS Certification & Qualification of Nondestructive Test Personnel*.

ANSI document:²

ANSI Z49.1, *Safety in Welding, and Cutting and Allied Processes*.

ASTM documents:³

ASTM E 164, *Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments*;

ASTM E 1417, *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination*;

ASTM E 1742, *Standard Practice for Radiographic Examination*.

¹ AIA/NAS standards are published by the Aerospace Industries Association, 1000 Wilson Boulevard, Suite 1700, Arlington, VA 22209-3928.

² ANSI standards are published by the American Welding Society, 550 N.W. LeJeune Rd, Miami, FL 33126.

³ ASTM standards are published by the American Society for Testing and Materials, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, Pennsylvania 19428.

AWS documents:⁴

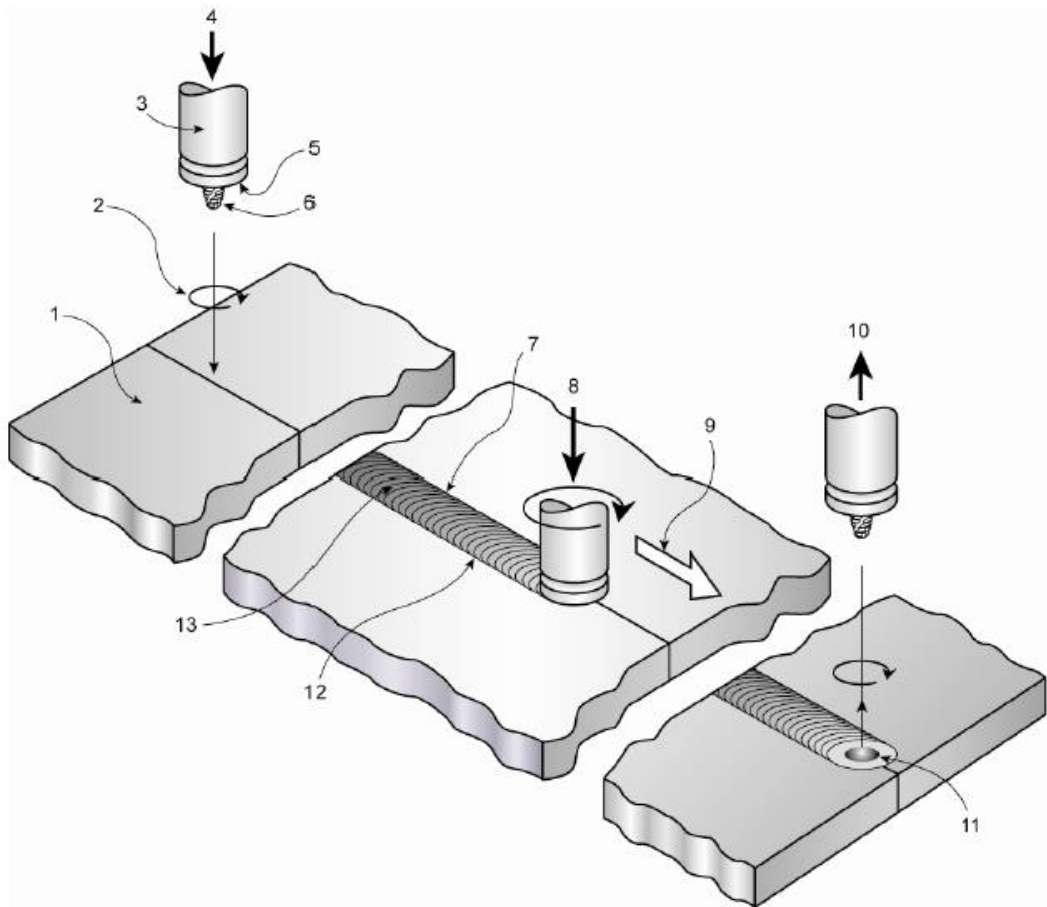
- AWS A1.1, *Metric Practice Guide for the Welding Industry*;
- AWS A2.4, *Standard Symbols for Welding, Brazing and Nondestructive Examination*;
- AWS A3.0, *Standard Welding Terms and Definitions*;
- AWS B5.1, *Specification for the Qualification of Welding Inspectors*;
- AWS QC1, *Standard for AWS Certification of Welding Inspectors*.

3. Terms and Definitions

The welding terms used in this specification shall be interpreted in accordance with the definitions given in the latest edition of AWS A3.0, *Standard Welding Terms and Definitions*, and the following definitions. If there is a conflict between AWS A3.0 and Clause 3, Clause 3 shall take precedence.

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply:

advancing side of weld. Side of the weld where the direction of tool rotation is the same as the direction of welding. See Figure 3.1.



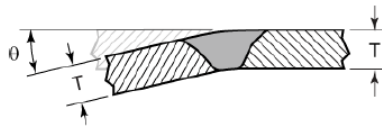
Key

- 1 Base metal
- 2 Direction of tool rotation (clockwise)
- 3 Weld tool
- 4 Downward movement of tool
- 5 Tool shoulder
- 6 Probe
- 7 Advancing side of weld
- 8 Axial force
- 9 Direction of welding
- 10 Upward movement of tool
- 11 Exit hole
- 12 Retreating side of weld
- 13 Weld face

Source: TWI, W. T. Thomas – WMT104/04Lr1

Figure 3.1 — Friction Stir Welding Nomenclature

angular distortion of the joint. Distortion between two welded pieces such that their surface planes are not parallel or at the intended angle. See Figure 3.2.



Key

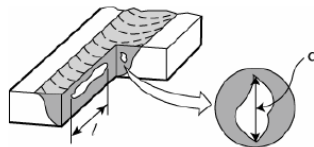
- T Thickness of base metal
- θ Angle between original surface and postweld surface

Figure 3.2 — Angular Distortion of the Joint

anvil. Structure supporting the root side of the joint.

axial force. Force applied to the work piece along the axis of tool rotation. See Figure 3.1.

cavity. Void-type discontinuity within a solid-state weld. See Figure 3.3.



Key

- d Maximum transverse cross-sectional dimension of the cavity
- l Length of a cavity in the longitudinal direction of the weld

NOTE: A cavity can also break through the surface of the workpiece.

Figure 3.3 — Cavity

complex weld joint. Continuous weld joint with variations in section thickness and/or tapered thickness transitions.

direction of tool rotation. Rotation as viewed from the spindle that is rotating the tool. See Figure 3.1.

engineering drawing. Technical information, given on an information carrier, graphically presented in accordance with agreed rules and usually to scale.

Engineering Authority. Contracting agency or corporate organization that acts for and in behalf of the Customer on all matters within the scope of this standard. The Engineering Authority has the responsibility for the structural integrity or maintenance of airworthiness of the hardware and compliance with all contract documents.

exit hole. Hole remaining at the end of a weld after the withdrawal of the tool. See Figure 3.1.

Fabricator. Person or organization responsible for production welding.

flash. Material expelled along the weld toe during FSW. See Figure 3.4.

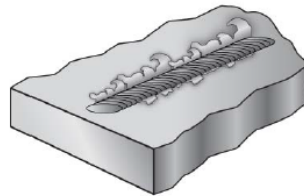
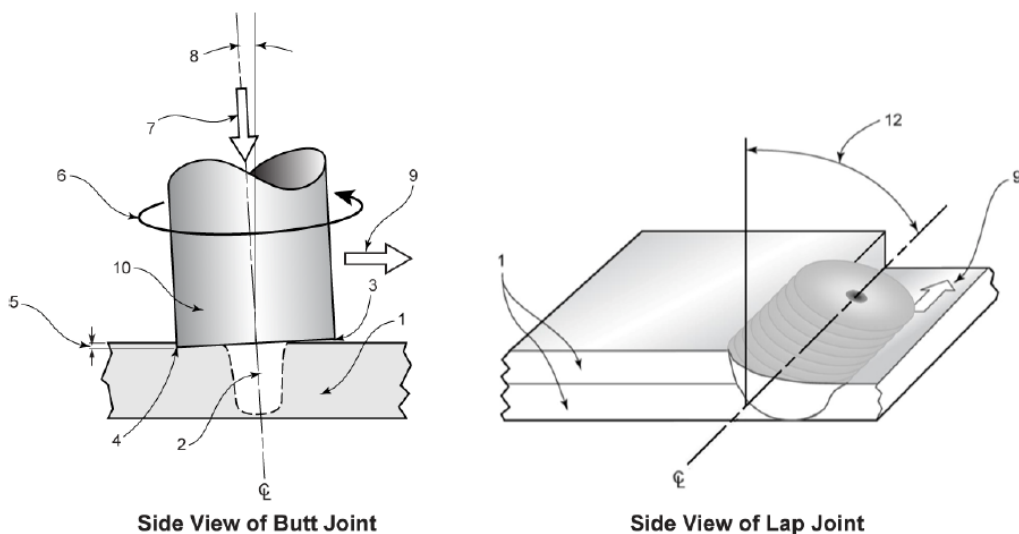


Figure 3.4 — Flash

friction stir welding methods. Methods include, but are not limited to, robotic, single spindle, multiple spindles, self-reacting tool, and simultaneous two-sided welding.

heel. Part of the tool shoulder that is at the rear of the tool relative to its forward motion. See Figure 3.5.

heel plunge depth. Distance the heel extends into the workpiece. See Figure 3.5.

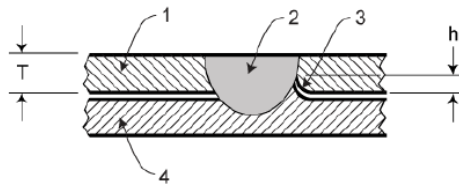


Key

- 1 Workpiece
- 2 Probe
- 3 Shoulder (leading edge)
- 4 Heel (shoulder trailing edge)
- 5 Heel plunge depth
- 6 Direction of tool rotation (counterclockwise)
- 7 Axial force
- 8 Tilt angle
- 9 Direction of welding
- 10 Tool
- 11 Weld face
- 12 Side tilt angle

Figure 3.5 — Heel and Heel Plunge Depth

hook. Faying surface that curves upward or downward along the side of the weld metal in a friction stir welded lap joint. See Figure 3.6.

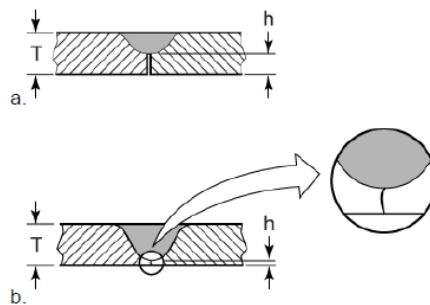


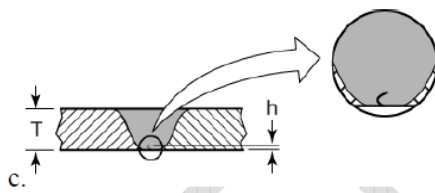
Key

- 1 Upper workpiece
- 2 Weld
- 3 Hook
- 4 Lower workpiece
- h Height of hook
- T Thickness of upper workpiece

Figure 3.6 — Hook

incomplete joint penetration. Discontinuity where the full thickness of the joint has not been welded. See Figure 3.7.





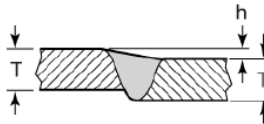
Key

- T nominal thickness of the base metal
- h height of discontinuity

NOTE: There are three types of incomplete joint penetration. They include the original joint line with (a) no plastic deformation of the unfused edge of the joint, as shown in graphic "a," (2) minor plastic deformation of the unfused edge of the joint, as shown in graphic "b," and (3) severe plastic deformation of the unfused edge of the joint, as shown in graphic "c."

Figure 3.7— Incomplete Joint Penetration

linear mismatch across joint: Misalignment between two welded pieces such that while their surface planes are parallel, they are not in the required plane. See Figure 3.8.



Key

- T nominal thickness of the base metal
- h height of mismatch

Figure 3.8— Linear Mismatch Across Joint

pipe. Tube in standardized combination of outside diameter and wall thickness.⁵

NOTE: In this standard, the term pipe will be used for pipe and tube.

plate. Rolled, extruded, cast, forged, or deposited products other than pipe in any thickness greater than 0.006 inches [0.152 mm].

NOTE: In this standard, the term plate is being used to describe all metal products, other than pipe.

probe. Part of the welding tool that extends into the workpiece to make the weld. See Figure 3.1.

preliminary welding procedure specification (pWPS). Document containing the required variables of the welding procedure which has to be qualified.

procedure qualification variable. Controllable detail, which, if changed beyond the limitations of the welding procedure specification, requires requalification of the WPS.

Referencing Document. Fabrication code, specification, contract document, or internal document, such as the engineering drawing, quality control or quality assurance manuals, that invoke this specification.

retreating side of weld. Side of the weld where the direction of tool rotation is opposite to the welding direction. See Figure 3.1.

self-reacting tool. Tool with two shoulders separated by a fixed length probe or an adjustable length probe.

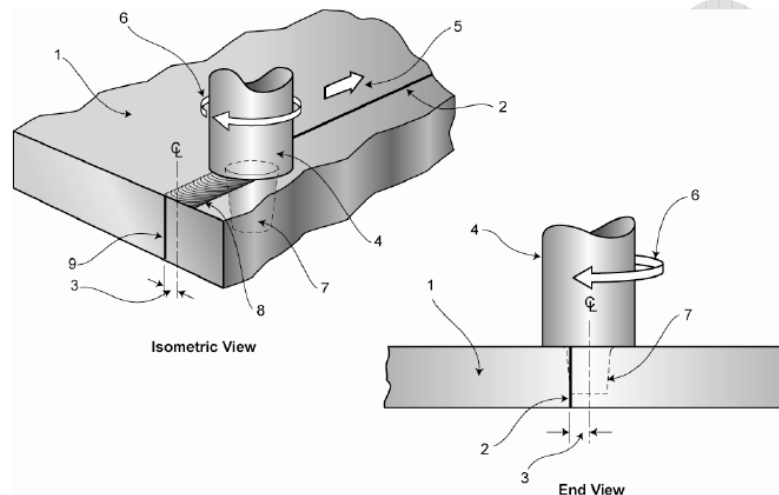
test piece. weldment which is used for testing purposes.

test specimen. Portion cut from a test piece in order to perform a specified destructive test.

test specimen blank. Portion of a test piece removed for the production of a destructive test specimen.

NOTE: In some cases, the test specimen blank is also the test specimen.

tool offset: shortest distance from the tool axis to the joint. See Figure 3.8.



Key

- 1 Workpiece
- 2 Joint
- 3 Tool offset
- 4 Tool
- 5 Direction of welding
- 6 Direction of tool rotation (clockwise)
- 7 Probe
- 8 Weld face
- 9 Location of joint before welding

Figure 3.9 — Tool Offset

tool shoulder. Surface of the tool that contacts the workpiece surface during welding. See Figure 3.1.

tube. Hollow, wrought product that is long in relation to its cross section, which is symmetrical and is round, elliptical, a regular hexagon or octagon, or square or rectangular with sharp or rounded corners, and has uniform wall thickness except as affected by corner radii.⁶

test weldment. Workpieces joined by welding to qualify welding procedures or welding operators.

tool rotation speed. Angular speed of the welding tool in revolutions per minute.

travel speed. Rate at which the welding operation progresses in the direction of welding.

welding tool. Rotating component that passes entirely through or partially through the workpiece, and may or may not have a shoulder.

4. General Requirements

4.1 Classification. All welds produced in accordance with this specification shall be classified as Class A, Class B, or Class C. Classification is based on the function and the use of the welded joint. The Engineering Authority shall consider material and process aspects that affect mission or systems requirements. A weld joint may be zoned with multiple classifications.

Class A – Critical application. A welded joint whose failure would cause significant danger to personnel, loss of the flight vehicle, loss of control, loss of a system, loss of a major component, unintentional release of critical stores, inability to release armament stores, abortion of the mission, or an operating penalty.

Class B – Semicritical application. A welded joint whose failure would reduce the overall strength of the equipment or system or preclude the intended functioning or use of equipment, but loss of the system or the endangerment of people would not occur.

Class C – Noncritical application. A welded joint whose failure would not affect the efficiency of the system or endanger people.

4.2 Approval. All references to the need for approval shall be interpreted to mean approval by the Customer or the Engineering Authority.

4.3. Drawing Precedence. When requirements in this specification conflict with those on the engineering drawing, the requirements on the drawing shall take precedence.

4.4. Specification Precedence. In the event of a conflict between the text of this specification and the references cited herein, the text of this specification shall take precedence.

5. Design of Weld Joints

5.1 Weldment Design Data. The Engineering Authority shall develop or obtain appropriate material property data to support the weldment design. In addition, the Engineering Authority shall either account for the residual stresses resulting from the welding process or provide a method for controlling or minimizing those residual stresses (e.g., annealing, aging after welding).

5.1.1. Butt Joint. A weld in a butt joint shall have full penetration, except when a partial joint penetration weld is required.

5.1.2 Lap Joint. The distance from the centerline of the tool to the edge of each overlapping member shall be a minimum of two times the diameter of the tool's shoulder (see Figure 7.1).

5.1.3 Hook. The acceptability or the extent of a hook that is allowed in a seam weld is dependent on the fatigue and static load requirements for the weld. Therefore, the size of a hook that is allowed in the seam weld shall be defined by the Referencing Document. See Figure 3.5 for an illustration of a hook.

5.2. Drawing Information Requirements. The engineering drawing shall show the profile (transverse cross-section) of a complex weld joint. Welding terminology shall be in accordance with AWS A3.0, *Standard Welding Terms and Definitions*. Welding symbols shall be in accordance with AWS A2.4, *Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination*. Special conditions shall be fully explained by adding notes or details on the engineering drawing.

5.2.1 Essential Information. For all welds, the engineering drawing or referenced supporting documents shall specify the following:

- (1) Aluminum alloy and the temper at the time of welding.
- (2) Preweld preparation.
- (3) Weld location and extent of welding.
- (4) Final weld contour and weld finishing requirements (as-welded or subsequently finished).
- (5) Weld classification in accordance with 4.1.
- (6) Postweld heat treatment.

5.2.2 Weld Dimensions. Dimensions on the drawing shall indicate the final dimensions and dimensional tolerances of the weldment.

5.2.3 Inspection Requirements. A single weld may employ more than one set of inspection requirements through the use of separate zones applied to the weld. Table 9.1 provides acceptance levels for discontinuities. The weld acceptance levels given in Table 9.1 are based on the classifications given in 4.1.

6. Development and Qualification of a Welding Procedure

6.1 General. Prior to production welding, the Fabricator shall develop and qualify a welding procedure, in accordance with the sequence shown in Table 6.1.

Table 6.1
Sequence for Qualifying a Welding Procedure Specification

Activity	Result	Party Involved
Development of the procedure	Preliminary Welding Procedure Specification (pWPS)	Fabricator
Qualification by any method	Welding Procedure Qualification record (WPQR) including the range of validity based on the relevant standard of qualification	Fabricator and, if applicable, examiner/examining body
Finalization of the procedure	Welding Procedure Specification (WPS) based on this WPQR	Fabricator
Release for production	Copy of WPS or work instruction	Fabricator

Figure 6.1 contains a flow diagram that illustrates the steps required for the development and qualification of a welding procedure.

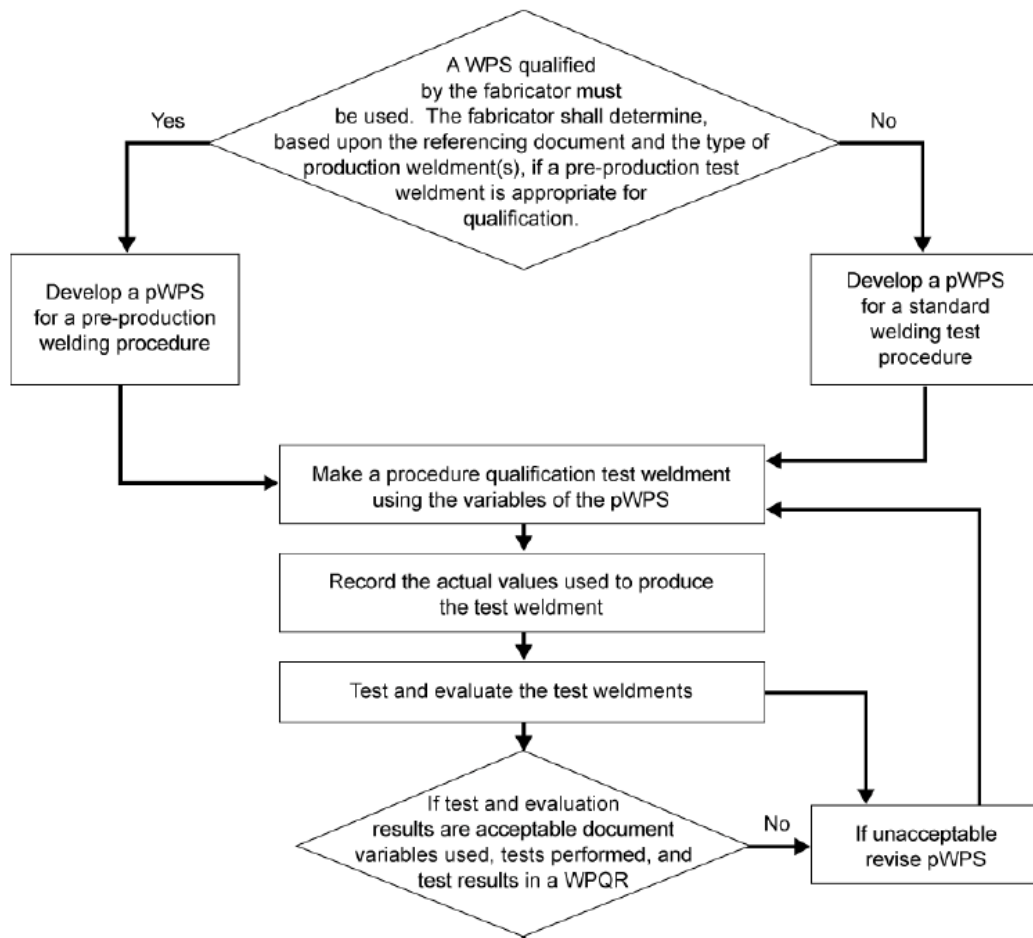
6.1.2 Previous Welding Procedure Specification. A WPS used previously by a Fabricator to meet other codes or specifications may be used by the Fabricator to support a WPS in accordance with this specification, if approved by the Engineering Authority. A WPS used by one Fabricator is not transferable to another Fabricator.

6.1.3 Identification of a WPS and a WPQR. WPSs and WPQRs shall be identified in accordance with a system that allows permanent traceability from the WPS to its supporting WPQRs.

6.2 Selection of a Welding Procedure Qualification Method. The two methods for qualifying a welding procedure are shown in Table 6.2.

Table 6.2
Methods for Qualifying a Welding Procedure

Method Based on	Application
Standard welding procedure test (see 6.2.1)	Can always be applied, unless the procedure test does not adequately correspond to the joint geometry, restraint, or accessibility of the actual welds.
Preproduction welding procedure test (see 6.2.2)	Can always be applied in principle, but requires a test piece be manufactured under production conditions. Suitable for mass production.



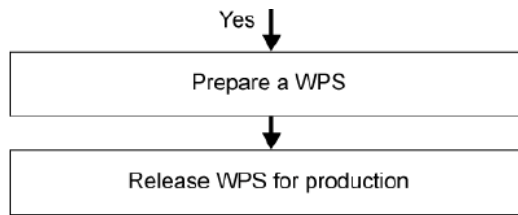


Figure 6.1—Flow Diagram for the Development and Qualification of a Welding Procedure

6.2.1 Qualification Based on a Standard Welding Procedure Test. This method specifies how a welding procedure can be qualified by welding and testing a standardized test piece. A standard test weldment of a square groove weld in pipe is illustrated in Figures 6.2. A standard test weldment of a square groove weld in plate is illustrated in Figure 6.3. A standard test weldment of a fillet weld is illustrated in Figure 6.4. A standard test weldment of a seam weld test is illustrated in Figure 6.5.

6.2.2 Qualification Based on a Preproduction Welding Procedure Test. When the production joint geometry requirements are not represented by the standardized test pieces shown in Figures 6.2 through 6.5, then the preproduction qualification test method shall be required. One or more preproduction test pieces shall be made to simulate the production joint in all essential features. The preproduction test piece shall be welded prior to, and under the conditions to be used in production.

6.3 Preparation of a Preliminary Welding Procedure Specification (pWPS). The Fabricator shall prepare a preliminary welding procedure specification (pWPS). The pWPS shall provide all of the information required to make a weld. The minimum information required in a pWPS is given, below, in 1 – 12. An example of a pWPS form is given in Annex D, Figure D1. A pWPS may be presented in any format, in either written or electronic form, provided all applicable information is recorded. The pWPS shall list the variables to be recorded on the WPQR.

1. Fabricator's information

- (1) identification of the Fabricator, and
- (2) identification of the pWPS.

2. Base metal type(s), base metal temper(s), and reference standard(s)

3. Base metal dimensions

- (1) thickness of the members composing the welded joint, and
- (2) outside diameter of pipe.

4. Equipment identification

- (1) model number,
- (2) serial number, and
- (3) equipment manufacturer.

5. Tool identification

- (1) material; and
- (2) Engineering drawing or drawing number.

6. Clamping arrangement

- (1) the method and type of fixtures, rollers, and anvil; and

- (2) friction stir tack welding and fusion tack welding.

7. Joint design

- (1) a sketch of the weld joint design and dimensional tolerances;
- (2) weld run sequence and welding direction given on the sketch, if applicable; and
- (3) placement of the exit hole.

8. Joint and surface preparation

- (1) maximum allowable root opening;
- (2) maximum allowable weld joint mismatch;
- (3) dimensions of starting weld tab and runoff weld tab plates, aluminum alloy type and reference standard; and
- (4) cleaning procedure.

9. Welding details

- (1) tool motion (for example, rotation in either the clockwise or counter-clockwise direction, rotation speed including ramp-up/ramp-down rotation speeds);
- (2) heel plunge depth, axial force, as applicable;
- (3) tilt angle;
- (4) side tilt angle;
- (5) dwell time;
- (6) lap joint: lapped length between start and end of weld;
- (7) lap joint: advancing or retreating side near the edge of the sheet against which the tool is in contact;
- (8) lap joint: direction of welding; and
- (9) primary control method: force control or position control.

10. Travel speed

- (1) ramp-up/ramp-down, upslope/downslope speeds; and
- (2) travel speed.

11. Preheating

- (1) base metal and other items that shall be preheated and to what temperature; and
- (2) location or zone to which preheat should be applied.

12. Postweld processing and heat treatment

- (1) solution heat treatment, natural and artificial aging, stress relieving (or the methods to correct distortion and straighten distorted parts), removal of flash, or any other post weld processing of the weldment.

6.4 Welding. When welding the procedure qualification test pieces, the welding operator shall be under the full control and supervision of the Fabricator.

6.5 Evaluation of Test Welds

6.5.1 Visual Inspection. Prior to removing test specimen blanks from the completed test piece, the weld shall be visually inspected for cracks, incomplete penetration, cavities open to the surface, linear and angular mismatch across the joint, overlap, underfill, and weld flash. These discontinuities shall be evaluated in accordance with the acceptance criteria in Table 9.1.

6.5.2 Destructive Tests

6.5.2.1 Standard Test Weld. The test weld shall be evaluated using the tests required in Figures 6.2 through 6.5, as a minimum. Test specimen blanks shall be removed from the locations shown in Figure 6.2 for square groove welds in pipe, Figure 6.3 for square groove welds in plate, Figure 6.4 for fillet welds in lap joints, or Figure 6.5 for seam welds. The preparation and dimensions of test specimens shall be in accordance with Annex A. The test results shall be recorded on or appended to a WPQR containing the actual variables used for welding the welding procedure qualification test piece.

6.5.2.2 Preproduction Test Weld. The preproduction test welds shall be subjected to the applicable destructive tests listed in Table 6.3. The type, quantity, and location of the test specimens shall be as given in the Referencing Document.

6.5.2.2 Preproduction Test Weld. The preproduction test welds shall be subjected to the applicable destructive tests listed in Table 6.3. The type, quantity, and location of the test specimens shall be as given in the Referencing Document.

**Table 6.3
Destructive Tests Required for Qualifying a Welding Procedure**

Type	Groove Weld	Fillet & Lap Welds
Tension tests	Yes	[Note (2)]
Macro-examination	Yes	Yes
Fracture toughness tests	[Note (1)]	[Note (2)]
Bend tests	[Note (1)]	[Note (2)]
Shear tests	[Note (2)]	Yes

Notes:

(1) When specified in the Referencing Document.

(2) No test is required.

6.5.2.3 Acceptance Criteria

Macroetch Test. The macroetch test specimens shall meet the requirements of Table 9.1, except

where partial joint penetration weld joints are specified in the Referencing Document.

Tensile Test. Each transverse-weld tensile test specimen shall meet the requirements of Table 6.4.

Table 6.4^a
Efficiency Requirements for Welded Butt Joint Tensile Strength

Material type	Temper condition of base metal before welding ^b	Postweld condition ^c	Joint efficiency factor ^{d, e}
Pure aluminum	All tempers	As welded	1.0 ^f
Non heat treatable alloys	All tempers	As welded	1.0 ^f
Heat treatable alloys ^h	T4	Natural aging	0.7
	T4	Artificial aging	0.7 ^g
	T5 and T6	Natural aging	0.6
	T5 and T6	Artificial aging	0.7 ^g

^a The data in this Table were taken from fusion welding specifications because no A-basis friction stir weld data were available.
^b For base metal in other tempers not shown in this Table, the ultimate tensile strength of the welded test specimen shall be in accordance with the Referencing Document.
^c Aging conditions shall be in accordance with the Referencing Document.
^d Joint efficiency factor = ultimate tensile strength of the welded test specimen after all postweld heat treatments have been conducted divided by the specified minimum tensile strength of the parent material required in the relevant specification.
^e For combinations between different alloys, the lowest individual efficiency factor value shall be achieved.
^f The ultimate tensile strength of the base metal is based on the specified minimum ultimate tensile strength of the "O" condition, irrespective of the actual base metal temper used for the test.
^g Higher properties may be achieved, if a full postweld heat treatment is applied. The ultimate tensile strength of the welded test specimen shall be in accordance with the Referencing Document.
^h Only applies to 6000 series alloys. For 2000 series and 7000 series alloys, the temper of the base metal before welding and the postweld aging conditions shall be in accordance with the Referencing Document.

Shear Test. The shear strength of the fillet weld or seam weld test specimen shall not be less than 60 percent of the minimum specified tensile strength of the base metal.

6.6 Welding Procedure Qualification Record (WPQR). The welding procedure qualification record (WPQR) is a statement of the test results of each test specimen. The WPQR shall contain the actual welding procedure qualification test variables, the items listed in the pWPS, and the acceptance test results of Clause 9. If no rejectable features or unacceptable test results are found, a WPQR detailing the welding procedure test piece results is qualified and shall be signed and dated by the examiner or the examining body.

See Annex D, Figures D.1 and D.2 for two examples of WPQR forms.

6.7 Welding Procedure Qualification Variables. Subclauses 6.7.1 through 6.7.5 list the welding procedure qualification test variables to be recorded on the WPQR. The values of the actual variables used shall be listed on the WPQR. A change in a welding procedure qualification

test variable requires requalification of the welding procedure.

6.7.1. Joint Design

- (1) A change from a fillet to a groove weld;
- (2) The addition or deletion of backing, and
- (3) An increase in the root opening beyond that used in the qualification test.

6.7.2 Base Metal

- (1) A change in base metal thickness beyond ± 5 percent;
- (2) A change from uncoated aluminum to coated aluminum (e.g. conversion coat, anodize) unless the coating is removed from the weld area prior to welding, but not vice versa;
- (3) A change to clad aluminum from bare aluminum or vice versa, or a change in cladding type, unless the cladding is removed from the weld area prior to welding; and
- (4) A change in alloy type, preweld temper, or postweld temper, whether it is in a single alloy weld or a multi-alloy weld.

6.7.3 Preheat Temperature

- (1) A decrease in preheat temperature of more than 100 °F [55 °C] from that qualified; and
- (2) For heat treatable alloys, an increase in the preheat temperature of more than 100 °F [55 °C] from that qualified.

6.7.4 Postweld Heat Treatment (PWHT)

- (1) A change from PWHT to no PWHT, and vice versa.

6.7.5 Other Variables

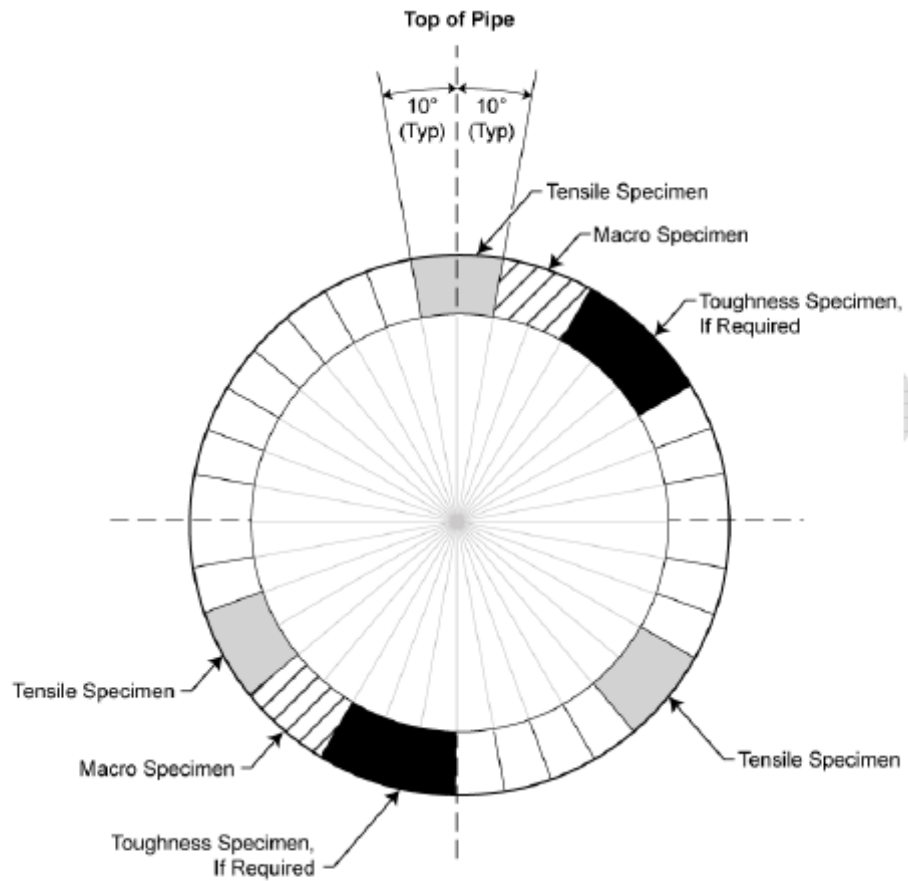
- (1) A change in welding method;
- (2) A change in the anvil design or material; and
- (3) A change in any of the variables identified in 6.3, or by the Referencing Document.

6.8 Welding Procedure Specification (WPS). The Fabricator shall prepare the WPS for production welding based on the entries in the WPQR. The WPS shall contain all of the information that is in the pWPS. Each WPS shall specify a minimum and maximum value or a single value for each welding variable identified in 6.7. A WPS shall include a statement acknowledging the validity of the data, and certifying that the weldments were made and tested, in accordance with the requirements of this specification. An example of a WPS form is given in Annex C, Figure C2. A pWPS form and a WPS form are interchangeable except for the title.

6.8.1 Application of a WPQR. A WPS may require the support of more than one WPQR. One WPQR may support more than one WPS.

6.9 Revising a WPQR or WPS. Revisions to WPQRs and WPSs shall be permitted where procedures and process information have been incorrectly documented, omitted, or new information is available. New information includes information that wasn't available when the WPQR was prepared, e.g., fatigue test results when only static test results were required for

qualification. All revisions shall be authorized, identified, traceable, and dated on the WPQR and WPS.



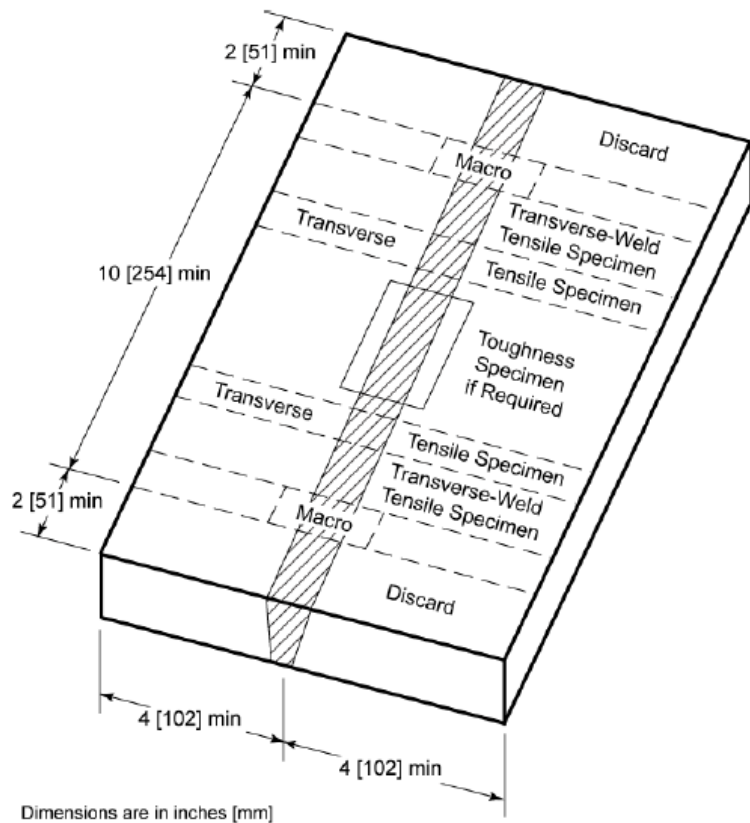
Note: The angular measurements are approximate

General Notes:

- The base metal thickness shall be determined in accordance with 6.7.2(1).
- The dimensions for test specimen blanks and details are given in Annex A.

Source: Adapted from AWS B2.1:2000, *Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*, Figure 2.2.

Figure 6.2— Location of Square Groove Weld Test Specimens—Pipe

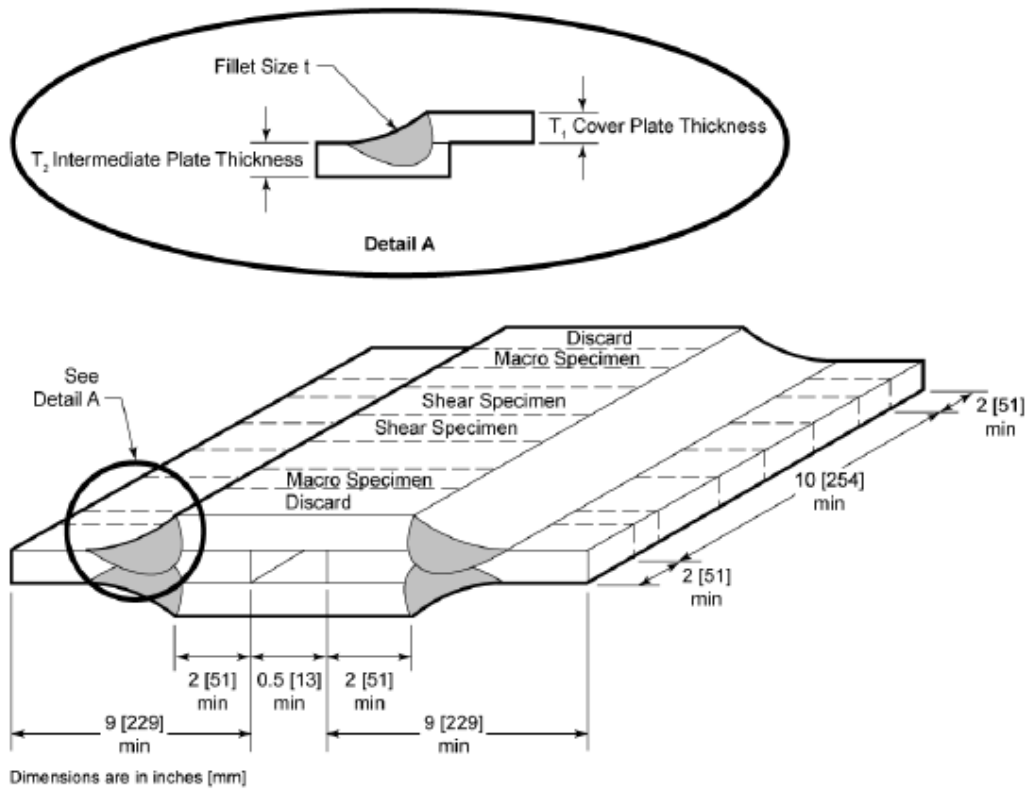


General Notes:

- The base metal thickness shall be determined in accordance with 6.7.2(1).
- The dimensions for test specimen blanks and details are given in Annex A.
- The test plate length shall be sufficient for the required number and type of specimens.

Source: Adapted from AWS B2.1:2000 *Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*, Figure 2.5.

Figure 6.3—Location of Square Groove Weld Test Specimens—Plate

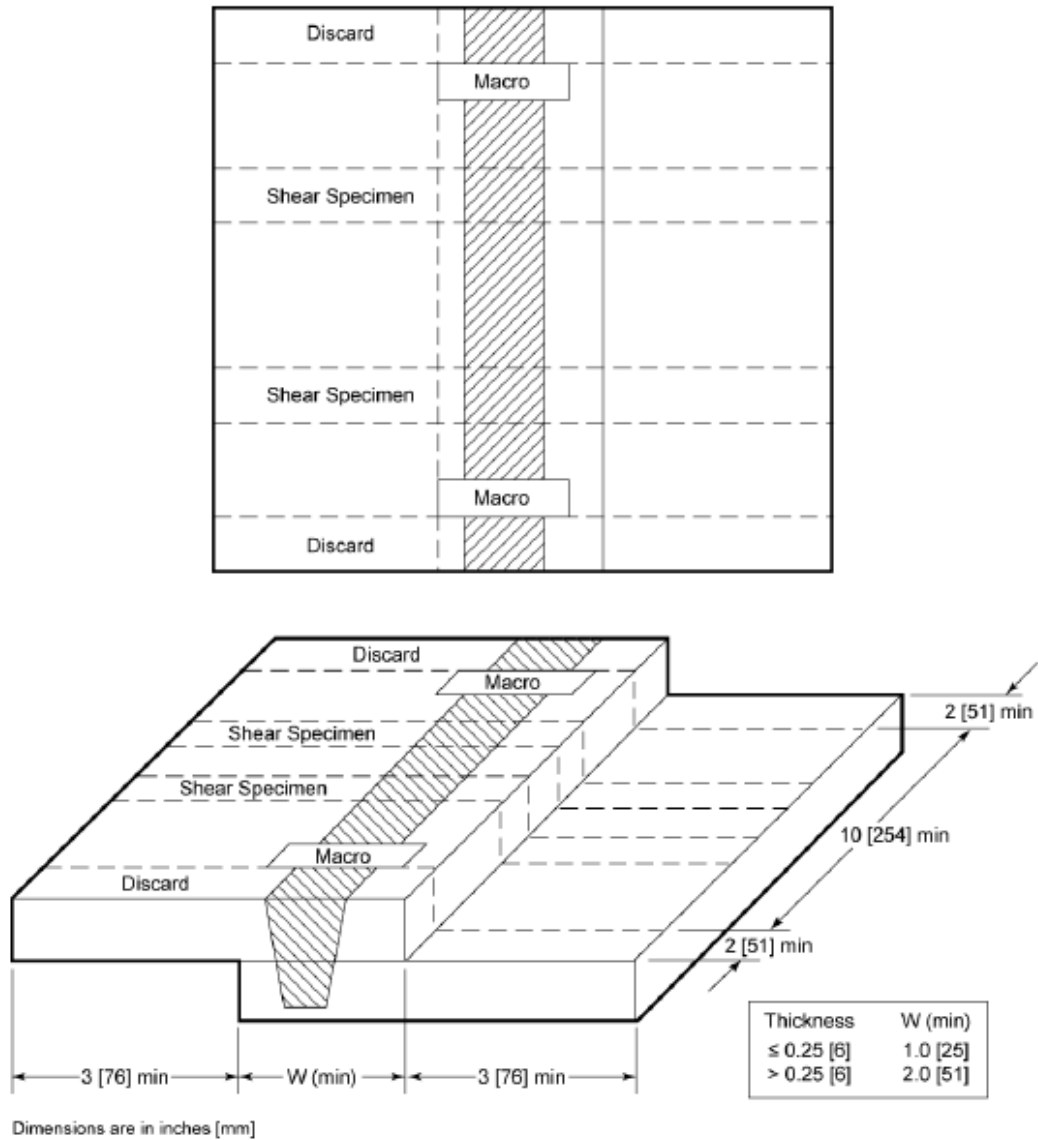


General Notes:

- The base metal thickness shall be determined in accordance with 6.7.2(1).
- The dimensions for test specimen blanks and details are given in Annex A.
- The test plate length shall be sufficient for the required number and type of specimens.

Source: Adapted from AWS B2.1:2000 *Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*, Figure 2.6.

Figure 6.4—Location of Fillet Weld Test Specimens—Plate



General Notes:

- The base metal thickness shall be determined in accordance with 6.7.2(1).
- The dimensions for test specimen blanks and details are given in Annex A.
- The test plate length shall be sufficient for the required number and type of specimens.

Figure 6.5—Location of Seam Weld Test Specimens—Plate

7. Welding Operator Qualification

7.1 Qualification Requirements. To become qualified, the welding operator shall demonstrate his skill by producing an acceptable test weld in accordance with an approved WPS. Qualifications, certifications, requalifications, and recertifications given under this document do not transfer from one Fabricator to another.

7.1.1 Vision Test. The welding operator shall have vision acuity of 20/30 or better in either eye and shall be able to read the Jaeger No. 2 Eye Chart at 16 inches [406 mm]. Corrected or uncorrected vision may be used to achieve eye test requirements. Vision shall be tested to these requirements at least every two years.

7.1.2 Test Weld. One of the test pieces in Figures 7.1 – 7.4 shall be used for the welding operator qualification test. The test piece shall be welded in accordance with a WPS. When none of the test pieces described above are applicable to a given production weld, then a special welding operator qualification that is limited to the specific application may be achieved with a test piece consisting of the given production weld or a test weld representative of the given production weld.

7.1.3 Inspection. The test weld shall be inspected in accordance with the class specified in the WPS, except a two inch long discard may be taken at the ends of groove and fillet weld coupons in plate. Visual inspection shall be accomplished in the as-welded condition.

7.2 Qualification Limitations

7.2.1 FSW Methods. A test weld made with any type of friction stir welding method qualifies only for that friction stir welding method.

7.2.2 Base Metals. A test weld made in any aluminum alloy qualifies for all aluminum alloys.

7.2.3 Base Metal Form and Weld Type. A successful qualification of any Figure 7.1 – 7.4 test weld qualifies the welding operator to weld all base metal forms (plate or pipe), groove welds, and fillet welds. A successful qualification of a preproduction test weld, as described in 7.1.2, qualifies the welding operator to weld that particular production weld joint and all base metal forms (plate or pipe) and groove welds and fillet welds.

7.2.4 Qualified Thickness Range. A test weld made with any base metal thickness shall qualify the welding operator to weld any base metal thickness.

7.3 Qualification/Certification Validity

7.3.1 Initial Certification. Successful completion of welding operator qualification tests shall be justification for issuance of a certification valid for a period of two years from the acceptance date of the qualification test results.

7.3.2 Extended Certification. A welding operator's certification may be extended indefinitely, provided an auditable record is maintained from the date of the initial qualification that verifies the welding operator has used the process within the previous six-month period.

7.3.3 Disqualification. Disqualification and revocation of a welding operator's certification shall result under any one or more of the following conditions:

- (1) The welding operator failed the vision test or has not passed the required vision test within the previous two years, as required by 7.1.1.
- (2) The welding operator qualification tests were not performed successfully within the previous two years, as required in 7.3.1.
- (3) An auditable record of the welding operator's performance was not maintained by the Fabricator, as required in 7.3.2.
- (4) There is a specific reason to question the ability of the welding operator to meet the welding operator qualification requirements.

7.3.4 Reinstatement. An individual who has been disqualified shall be recertified by meeting the requirements of 7.1.

7.3.5 Identification. The Fabricator shall assign a unique number or other identification to each welding operator upon certification.

7.4 Test Records. The Fabricator shall complete a test record containing the essential information required as evidence of welding operator certification. An example of a test record form, entitled, *Welding Operator Qualification Test Record for All Aluminum Alloys*, is given in Annex B, Figure B.1.

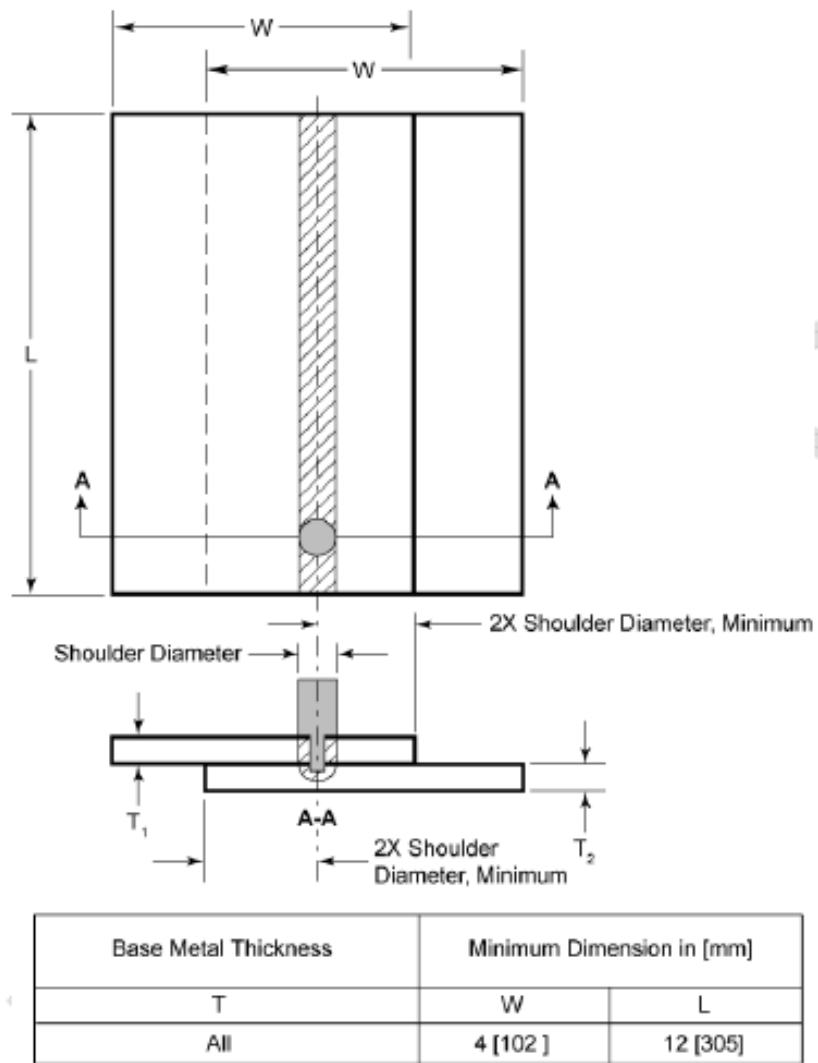


Figure 7.1— Seam Weld Test in Plate

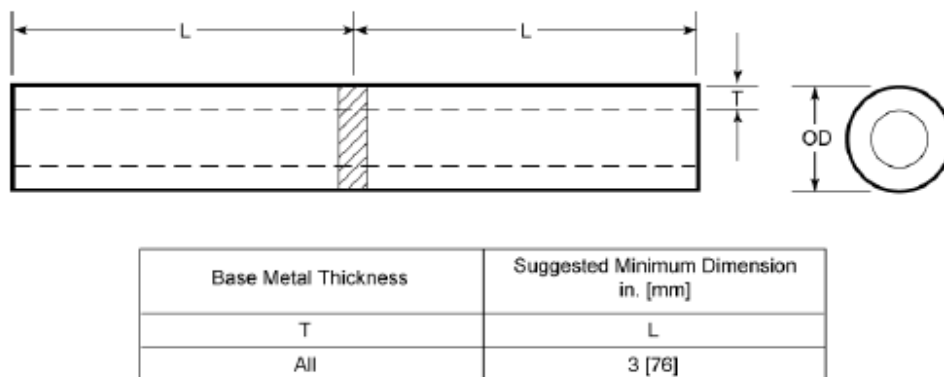
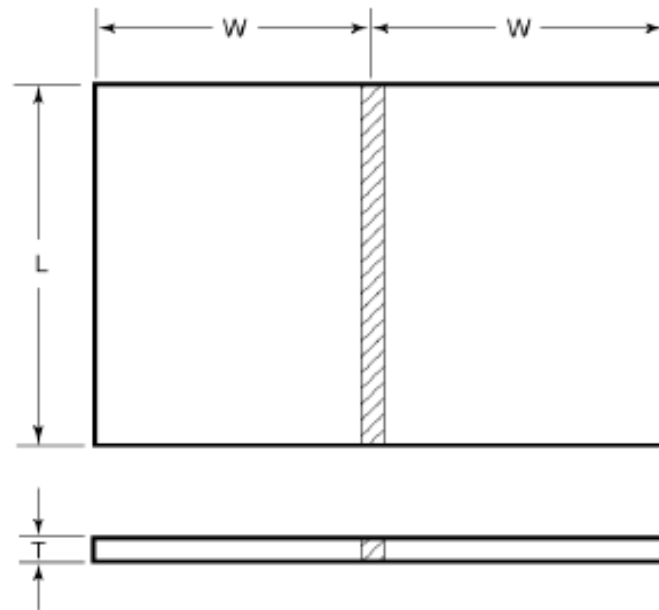
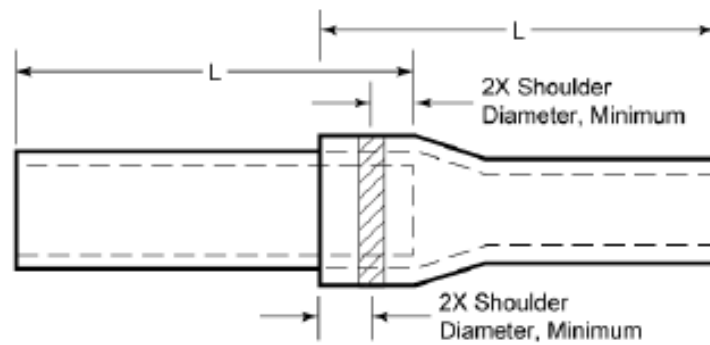


Figure 7.2— Square Groove Weld Test in Pipe



Base Metal Thickness	Minimum Dimension in [mm]	
	W	L
T		
All	4 [102]	12 [305]

Figure 7.3— Square Groove Weld Test in Plate



Base Metal Thickness	Minimum Dimension in [mm]
	L
T	
All	3 [76]

Figure 7.4— Seam Weld Test in Pipe

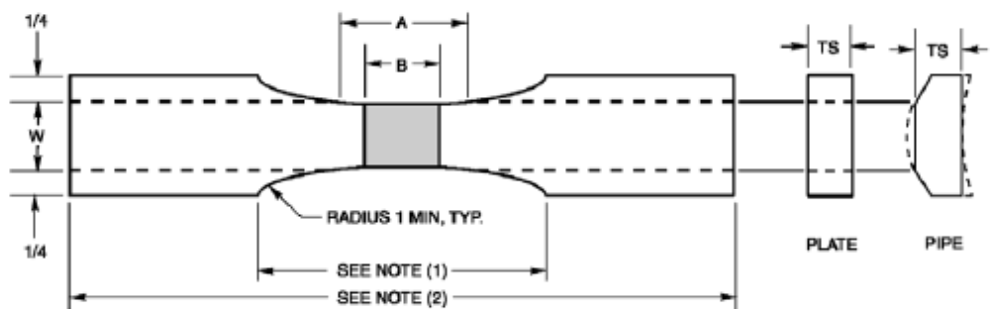
Annex A (Normative) Illustrations of Test Specimens and Test Fixtures

This annex is part of AWS D17.3/D17.3M:200X, *Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications*, and includes mandatory elements for use with this standard.

A1. Tension Specimens

Tension test specimens are illustrated in Figures A.1, A.2, A.3, and A.4. A single test specimen may be used for a base metal thickness of 1 inch [25 mm] or less.

A1.1 For thicknesses over 1 inch [25 mm], single or multiple specimens may be used provided that: (1) collectively, multiple specimens representing the full thickness of the weld at one location, shall comprise a set, (2) The entire thickness shall be mechanically cut into approximately equal thickness strips. For specimens that are not round (turned on a lathe), the test specimens' thickness shall be the maximum size that can be tested in the available equipment.



in.	mm	Test Weldment			
		Dimensions	Plate	Pipe	
				Outside Diameter	
1/4	6.4			<3	>3
1/2	13				
3/4	19				
1	25				
3	76				
		B	← See Note (3) →		
		A	← See Note (4) →		
		W	3/4	1/2	3/4
		TS	TS ^{(5),(6)}	← See Note (5) →	

ALL DIMENSIONS IN INCHES

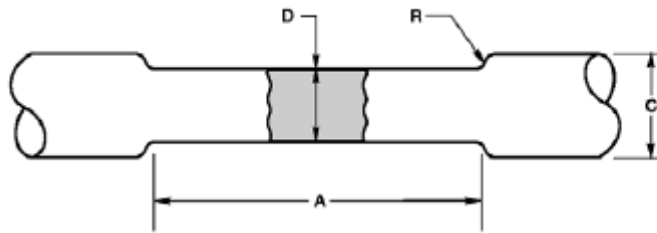
Notes:

- (1) This section shall be cut by machining or grinding.
- (2) The specimen length shall be as required by the tension testing equipment.
- (3) B shall be equal to the greater dimension of the weld metal in the direction of the specimen's longitudinal axis.
- (4) The length of the reduced section A shall be equal to B plus 1/2 in [13 mm] with a minimum of 2-1/4 in [57 mm]. The ends shall not differ in width from the ends to the center, but the width at either end shall not be more than 0.015 in [0.38 mm] greater than the width at the center. The weld shall be in the center of the reduced section.
- (5) The amount removed shall be the minimum needed to obtain plane parallel surfaces across the width of the reduced section.

Source: Adapted from AWS B2.1:2000, *Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*, Figure II-3A.

Figure A.1—Reduced Section Tension Specimen—Rectangular

in.	mm
.188	4.77
.250	6.35
.350	8.89
.500	12.70
1/4	6.4
3/8	9.5
1/2	13
3/4	19



Standard Specimen Dimensions, in. ^{(1), (3)}				
Dimensions	0.505	0.353	0.252	0.188
A = Length of Reduced Section ^{(2), (4)}	← See Note (4) →			
D = Diameter	0.500 ± 0.010	0.350 ± 0.007	0.250 ± 0.005	0.188 ± 0.003
R = Radius, inches minimum	3/8 min.	1/4 min.	3/16 min.	1/8 min.
C = Diameter	3/4	1/2	3/8	1/4

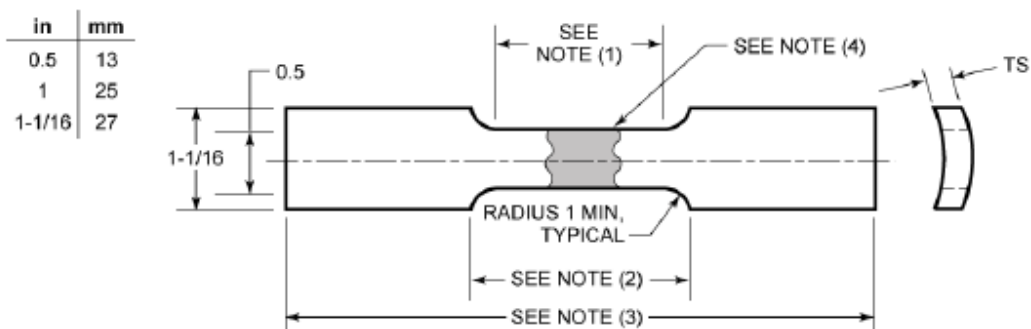
General Note: For base metal thicknesses over 1 in [25 mm], multiple specimens are required and one complete set shall be made for each required test. The specimen blank shall be cut into strips of approximately equal thickness with their centerlines no more than 1 in [25 mm] apart. The centerline of the surface shall be within 5/8 in [16 mm] of that surface.

Notes:

- (1) The standard specimen that is selected shall be based upon the maximum diameter specimen that can be cut from the specimen blank.
- (2) The weld shall be in the center of the reduced section.
- (3) Where only a single specimen from a blank is required, the specimen's longitudinal axis shall be midway between the base metal surfaces.
- (4) The length of the reduced section shall be not less than the width of the weld metal plus 2D. It may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 percent greater in diameter than the center, which shall be the dimension D. The ends may be of any length and shape as required by the testing machine.

Source: Adapted from AWS B2.1:2000, *Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*, Figure II-3B.

Figure A.2—Reduced Section Tension Specimen—Round



All DIMENSIONS IN INCHES

Notes:

- (1) The length of the reduced section shall be equal to the greater dimension of the weld metal in the direction of the specimen's longitudinal axis, plus 2T. The sides shall be approximately parallel. The weld shall be in the center of the reduced section.
- (2) The reduced section shall be cut by machining or grinding.
- (3) The specimen length shall be as required by the tension testing equipment.
- (4) The weld metal thickness shall equal the base metal thickness.

Source: Adapted from AWS B2.1:2000, *Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*, Figure II-3C.

Figure A.3—Alternate Tension Specimen for Pipe 3 in [76 mm] O.D. or Less

PLANOS

1

2

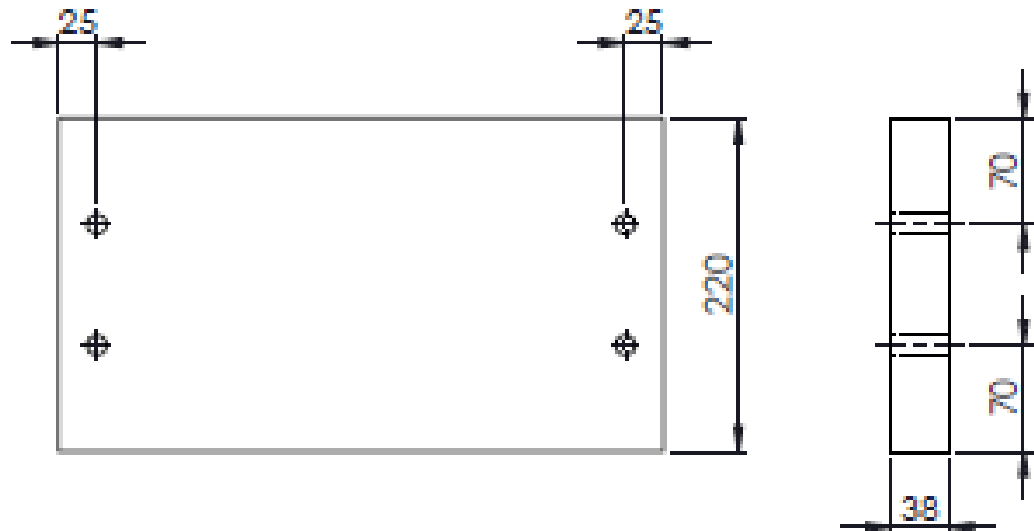
3

4

A

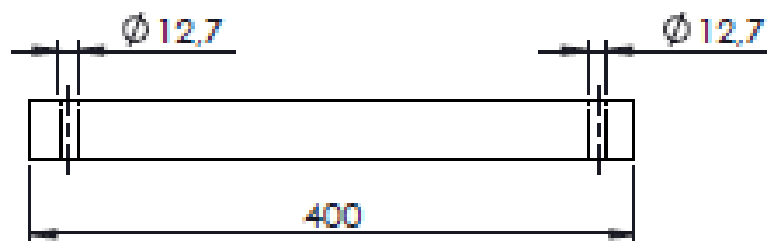
1.6

B



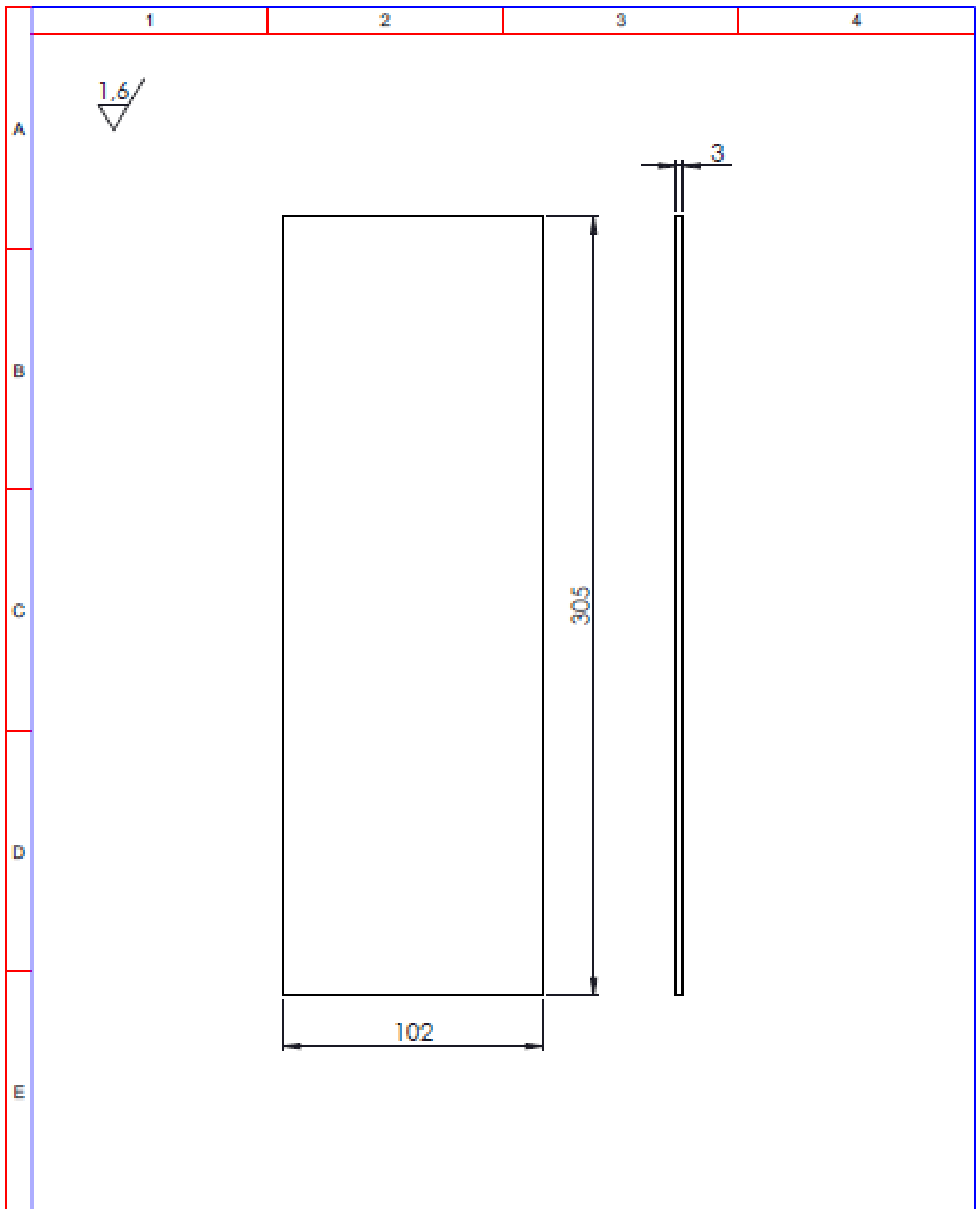
C

D

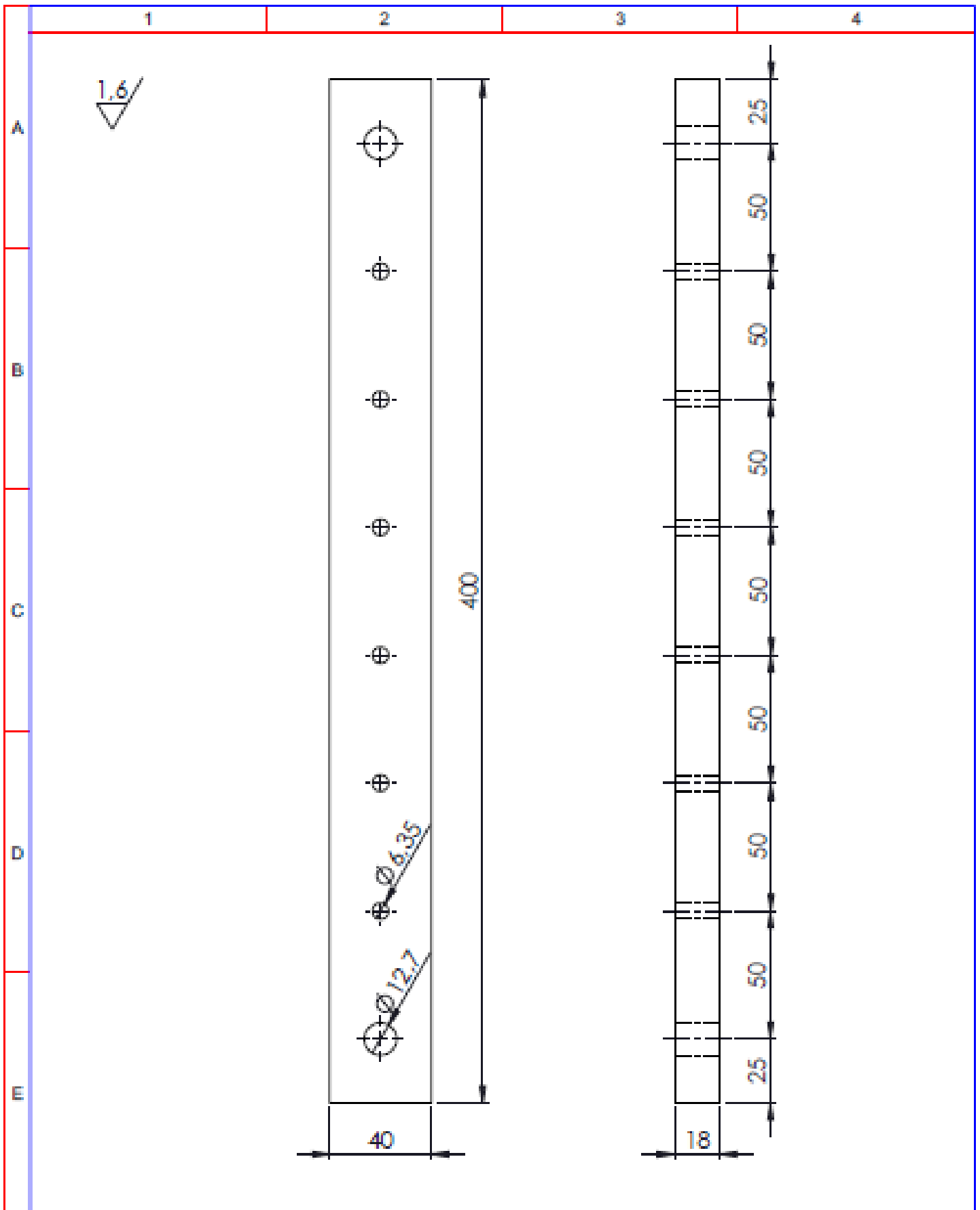



E

				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				$\pm 0,1$	3,3 Kg	Acero A 36	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 10/01/15	Toispena WL	PLACA BASE	1:5
				Revisó: 10/01/15	Ing. Anibal C.		
				Aprobó: 10/01/15	Ing. Anibal C.		
				UTA		Número del dibujo: 02 de 05	
				Ing. Mecánica		(Sustitución)	
Estado	Modificación	Fecha	Nombre				



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	0,093 Kg	Aluminio 6061 T6	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 10/01/15	Toisante WL	PLACA DE ALUMINIO	1:2
				Revisó: 10/01/15	Ing. Arroba C.		
				Aprobó: 10/01/15	Ing. Arroba C.		
				UTA		Número del dibujo: 03 de 05	
Estado	Modificación	Fecha	Nombre	Ing. Mecánica		(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	0,28 Kg	Acero A 38	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 10/01/15	Toxpanza WL	SUJETADORES	1:2
				Revisó: 10/01/15	Ing. Arriba C.		
				Aprobó: 10/01/15	Ing. Arriba C.		
				UTA		Número del dibujo: 04 de 05	
				Ing. Mecánica		(Sustitución)	
Revision	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

A

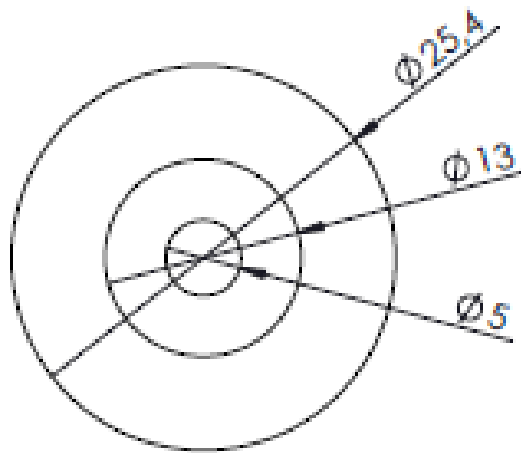
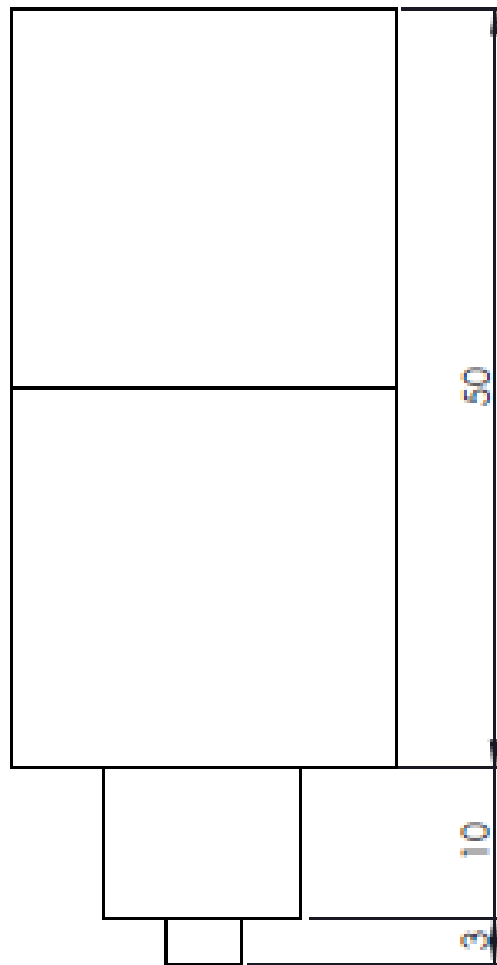
1.6

B

C

D

E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:		
				±0,1	0,0267 Kg	Acero AISI 4340		
				Fecha	Nombre	Denominación:		
				Dibujó: 10/01/15	Toapanta WL	HERRAMIENTA		
				Revisó: 10/01/15	Ing. Amoba C.			Escala:
				Aprobó: 10/01/15	Ing. Amoba C.			2:1
				UTA		Número del dibujo:	05 de 05	
				Ing. Mecánica		(Sustitución)		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			