

# Tabla de Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	3
1.2	Motivación . . . . .	3
1.3	Alcances . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Antecedentes Específicos</b>	<b>5</b>
2.1	Soldadura por Fricción-Agitación y sus Aplicaciones . . . . .	5
2.2	El Desafío de Modelar para Ingenieros . . . . .	6
2.3	Modelamiento con Análisis Dimensional . . . . .	8
2.4	Lista de Símbolos . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Desarrollo del Modelo</b>	<b>15</b>
4.1	Transferencia de Calor en la Zona de Deformación . . . . .	15
4.2	Generación de Calor en la Zona de Deformación . . . . .	21
4.2.1	Esfuerzo de corte en la FSW . . . . .	25
4.3	Comportamiento Constitutivo y Tasa de Deformación en la Zona Deformada . . . . .	26
4.4	Conducción de Calor Fuera de la Zona de Deformación . . . . .	29
4.5	Expresiones Explícitas Obtenidas del Modelo Acoplado Termo-mecánico	30
<b>5</b>	<b>Recopilación de Experimentos</b>	<b>32</b>
5.1	Selección de Experimentos . . . . .	32
5.2	Formas de Medición . . . . .	33
5.2.1	Medición de Temperatura . . . . .	33
5.2.2	Medición de Fuerza y Torque . . . . .	34
5.2.3	Medición de la Zona de Deformación . . . . .	34
5.2.4	Base de Datos . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Propiedades de los Materiales</b>	<b>37</b>
6.0.1	Propiedades Térmicas y Mecánicas . . . . .	37
6.0.2	Constantes de Zener-Hollomon . . . . .	39
6.1	Datos Trabajados . . . . .	43

<b>7</b>	<b>Corroboración de Ecuaciones Fundamentales</b>	<b>44</b>
7.1	Comprobación de Supuestos . . . . .	44
7.2	Aporte del Hombro . . . . .	46
7.3	Comprobación de Aproximaciones . . . . .	47
7.3.1	Tasa de Deformación Lineal Secante . . . . .	47
7.3.2	Tasa de Deformación Lineal Tangente . . . . .	47
7.3.3	Variación de Límites en la Integral . . . . .	48
7.3.4	Zener-Hollomon para Bajos Esfuerzos . . . . .	48
7.4	Factores de Corrección . . . . .	48
<b>8</b>	<b>Resultados Obtenidos</b>	<b>50</b>
8.1	Esfuerzo de Corte Constante . . . . .	50
8.2	Efecto del Hombro . . . . .	52
8.3	Aproximaciones . . . . .	53
8.3.1	Tasa de Deformación Lineal Secante . . . . .	53
8.3.2	Tasa de Deformación Lineal Tangente . . . . .	57
8.3.3	Variación de Límites en la Integral . . . . .	59
8.3.4	Zener-Hollomon para Bajos Esfuerzos . . . . .	61
8.4	Comportamiento de las ecuaciones y Factores de Corrección . . . . .	63
<b>9</b>	<b>Discusión y Análisis de los Resultados</b>	<b>67</b>
9.1	Esfuerzo de Corte Constante . . . . .	67
9.2	Efecto del Hombro . . . . .	68
9.3	Aproximaciones . . . . .	69
9.3.1	Relación entre la Función Secante y Exponencial para la Tasa de Deformación . . . . .	69
9.3.2	Relación entre la Función Tangente y Exponencial para la Tasa de Deformación . . . . .	70
9.3.3	Variación de la Integral con Diferentes Límites . . . . .	70
9.3.4	Aproximación del Modelo de Zener-Hollomon . . . . .	70
9.4	Comportamiento de las ecuaciones y Factores de Corrección . . . . .	71
<b>10</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>74</b>
10.1	Trabajo Futuro . . . . .	77
	<b>Bibliografía</b>	<b>79</b>
<b>11</b>	<b>Anexos</b>	<b>86</b>
11.1	Anexo 1: Imágenes de las muestras de Jordan Tsui [1] . . . . .	87
11.2	Anexo 2: Base de Datos . . . . .	90
11.3	Anexo 3: Resultados para los distintos $f$ . . . . .	94
11.4	Anexo 4: Función Lineal Secante . . . . .	96
11.5	Anexo 5: Función Lineal Tangente . . . . .	103
11.6	Anexo 6: Variación de la Integral entre 0 y $\delta$ . . . . .	111

11.7 Anexo 7: Aproximación para Bajos Esfuerzos de Zener-Hollomon . . . 119

# Índice de Tablas

6.1	Propiedades Térmicas y Mecánicas de los Materiales Trabajados . . . . .	38
6.2	Constantes de Zener-Hollomon para diversos materiales . . . . .	42
6.3	Datos utilizados . . . . .	43
8.1	Resultados para $f = 0, 1$ . . . . .	52
8.2	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 1	55
8.3	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 9	57
8.4	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 1 . . . . .	59
8.5	Diferencia en el valor de la Integral, dato 1 . . . . .	60
8.6	Comparación de la aproximación para Bajos Esfuerzos y Caso General de Z-H, material AA7075 . . . . .	62
8.7	Factores de Corrección . . . . .	66
11.1	Resultados para $f = 0, 2$ . . . . .	94
11.2	Resultados para $f = 0, 3$ . . . . .	94
11.3	Resultados para $f = 0, 4$ . . . . .	95
11.4	Resultados para $f = 0, 5$ . . . . .	95
11.5	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 2	96
11.6	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 3	97
11.7	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 4	98
11.8	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 5	99
11.9	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 6	100
11.10	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 7	101
11.11	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Secante, dato 8	102
11.12	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 2 . . . . .	103
11.13	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 3 . . . . .	104
11.14	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 4 . . . . .	105
11.15	Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 5 . . . . .	106

11.16Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 6 . . . . .	107
11.17Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 7 . . . . .	108
11.18Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 8 . . . . .	109
11.19Resultados de las Integrales para la Función Exponencial y Tangente, dato 9 . . . . .	110
11.20Diferencia en el valor de la Integral, dato 2 . . . . .	111
11.21Diferencia en el valor de la Integral, dato 3 . . . . .	112
11.22Diferencia en el valor de la Integral, dato 4 . . . . .	113
11.23Diferencia en el valor de la Integral, dato 5 . . . . .	114
11.24Diferencia en el valor de la Integral, dato 6 . . . . .	115
11.25Diferencia en el valor de la Integral, dato 7 . . . . .	116
11.26Diferencia en el valor de la Integral, dato 8 . . . . .	117
11.27Diferencia en el valor de la Integral, dato 9 . . . . .	118
11.28Comparación de la Aproximación para Bajos Esfuerzos y Caso General de Z-H, material AA5059 . . . . .	119

# Índice de Figuras

1.1	Esquema de FSW. . . . .	2
2.1	Nomenclatura de la FSW . . . . .	5
4.1	Perfil de Temperaturas . . . . .	16
4.2	Perfil de Velocidad . . . . .	17
4.3	Comportamiento constitutivo del material y su Aproximación Lineal . . . . .	27
5.1	Ejemplo del Corte Transversal de 2 materiales soldados por FSW <sup>4</sup> . . . . .	34
5.2	Ejemplificación para medición de Capa de Deformación . . . . .	35
7.1	Área y Perímetro en FSW . . . . .	45
8.1	Comportamiento de Componentes asociadas al Esfuerzo de Corte . . . . .	51
8.2	Imagen que ejemplifica las “capas“ que quedan en el material, debido a sus distintas velocidades y temperaturas . . . . .	51
8.3	Evolución de la tasa de Deformación con respecto a la temperatura, dato 1 . . . . .	54
8.4	Evolución de la tasa de Deformación en la Capa de Deformación, dato 1 . . . . .	54
8.5	Evolución de la tasa de Deformación con respecto a la temperatura, dato 9 . . . . .	56
8.6	Evolución de la tasa de Deformación en la Capa de Deformación, dato 9 . . . . .	56
8.7	Evolución de la tasa de Deformación con respecto a la temperatura, dato 1 . . . . .	58
8.8	Evolución de la tasa de Deformación en la Capa de Deformación, dato 1 . . . . .	58
8.9	Ejemplificación del comportamiento de la Tasa de Deformación con distintos límites . . . . .	61
8.10	Tasa de Deformación para el modelo de Z-H General y para Bajos Esfuerzos, material AA7075 . . . . .	63
8.11	Comportamiento del lado Izquierdo y Derecho de la ecuación de Rosenthal, dato 1 . . . . .	64
8.12	Comportamiento del lado Izquierdo y Derecho de la ecuación de la temperatura, dato 1 . . . . .	65
8.13	Comportamiento del lado Izquierdo y Derecho de la ecuación de la tasa de deformación, dato 1 . . . . .	65
11.1	Imagen del Dato 1 . . . . .	87
11.2	Imagen del Dato 2 . . . . .	87

11.3 Imagen del Dato 3 . . . . .	87
11.4 Imagen del Dato 4 . . . . .	88
11.5 Imagen del Dato 5 . . . . .	88
11.6 Imagen del Dato 6 . . . . .	88
11.7 Imagen del Dato 7 . . . . .	89
11.8 Imagen del Dato 8 . . . . .	89
11.9 Primera sección de la Base de Datos . . . . .	91
11.10 Segunda sección de la Base de Datos . . . . .	92
11.11 Tercera sección de la Base de Datos . . . . .	93
11.12 Función Lineal Secante, Dato 2 . . . . .	96
11.13 Función Lineal Secante, Dato 3 . . . . .	97
11.14 Función Lineal Secante, Dato 4 . . . . .	98
11.15 Función Lineal Secante, Dato 5 . . . . .	99
11.16 Función Lineal Secante, Dato 6 . . . . .	100
11.17 Función Lineal Secante, Dato 7 . . . . .	101
11.18 Función Lineal Secante, Dato 8 . . . . .	102
11.19 Función Lineal Tangente, Dato 2 . . . . .	103
11.20 Función Lineal Tangente, Dato 3 . . . . .	104
11.21 Función Lineal Tangente, Dato 4 . . . . .	105
11.22 Función Lineal Tangente, Dato 5 . . . . .	106
11.23 Función Lineal Tangente, Dato 6 . . . . .	107
11.24 Función Lineal Tangente, Dato 7 . . . . .	108
11.25 Función Lineal Tangente, Dato 8 . . . . .	109
11.26 Función Lineal Tangente, Dato 9 . . . . .	110
11.27 Tasa de Deformación para modelo de Z-H, material AA5059 . . . . .	120