



**CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL**

---

---

**POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES**

**SOLDADAS DE Ti-6Al-4V CON DAÑO**

**PREVIO POR FATIGA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO**

**ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**EN LA ESPECIALIDAD**

**DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECANICOS**

**PRESENTA**

**ING. IVAN ARTURO LEÓN MÉNDEZ**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO**

**DICIEMBRE 2011**



## RESUMEN

Las aleaciones de titanio son materiales con propiedades físicas muy especiales entre las que cabe mencionar menor densidad comparativamente con otras aleaciones metálicas, una alta tenacidad, gran resistencia a la tensión y resistencia a la corrosión a diferentes ambientes, lo que las hace idóneas para su aplicación en diversos sectores.

La microestructura y por lo tanto las propiedades mecánicas de las aleaciones de titanio dependen mucho de la historia térmica que experimenta el material. Procesos de fabricación como la soldadura por fusión que implica ciclos repetitivos de enfriamiento y calentamiento, así como dilución y difusión de gases en el material determinan una microestructura específica. Hoy en día, existe una amplia gama de componentes que requieren ser fabricados con este tipo material y que consecuentemente tendrán que ser unidos con soldadura por fusión, por lo cual es de gran interés para la ingeniería el comprender el comportamiento mecánico de las uniones de soldadura, que nos permita diseñar y fabricar sistemas mecánicos confiables en servicio.

La soldadura en aleaciones de Titanio presenta ciertas complicaciones, la más considerable es que el metal es muy reactivo a alta temperatura, los gases constitutivos de la atmosfera (O, N y H) se alojan intersticialmente en la malla cristalina lo que promueve una muy fuerte tendencia a fisurarse, por lo cual se requiere de una protección perfecta de la unión soldadura, para evitar el contacto de cualquier zona de la misma arriba de 550 °C.

Por tal motivo este trabajo de investigación tiene como finalidad fatigar uniones soldadas de Titanio para determinar el daño ocasionado y conocer la degradación de sus propiedades mecánicas después de un determinado número de ciclos. El comportamiento cuasi-estático fue estudiado en especímenes con diferentes niveles de daño por fatiga. La respuesta de las uniones soldadas fue comparada con la del material base.

## ÍNDICE

### *CAPITULO I. Introducción.*

1.1 Introducción. -----	1
1.2 Justificación. -----	3
1.3 Hipótesis. -----	3
1.4 Objetivos. -----	3
1.4.1 General. -----	3
1.4.2 Especifico. -----	4

### *CAPITULO II. Antecedentes*

2.1 Revisión bibliográfica. -----	5
2.2 Titanio. -----	5
2.2.1 Propiedades. -----	7
2.2.1.1 Características físicas. -----	7
2.2.1.2 Características mecánicas. -----	8
2.2.2 Estructura cristalina y fases fundamentales. -----	9
2.2.2.1 Estructura cristalina Cúbica Centrada en el cuerpo (BCC). -----	10
2.2.2.2 Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HC). -----	11
2.2.3 Evolución del uso del titanio. -----	12
2.2.4 Clasificaciones del titanio. -----	17
2.2.5 Aleaciones de titanio. -----	18
2.2.5.1 Aleación Ti6Al4V. -----	23
2.3 Fundamentos teóricos del comportamiento mecánico de materiales. -----	25
2.3.1 Caracterización de materiales. -----	25



2.3.2 Propiedades mecánicas de los materiales. -----	26
2.3.3 Ensayo uniaxial de tensión. -----	26
2.3.4 Diagrama esfuerzo-deformación. -----	28
2.4 Fundamentos teóricos pruebas metalográficas. -----	31
2.5 Fundamentos de fatiga. -----	35
2.5.1 Descripción de las cargas cíclicas. -----	37
2.5.2 Esfuerzos puntuales contra esfuerzos nominales. -----	39
2.5.3 Las curvas S – N. -----	40
2.5.4 La naturaleza física del daño por fatiga. -----	41
2.5.5 La regla de Palmer – Miner. -----	42
2.5.6 Fatiga en soldadura. -----	44
2.5.6.1 Curva Esfuerzo – Ciclos de vida para uniones soldadas (S – N). -----	45
2.5.6.2 Mejora de la resistencia a la fatiga en soldadura. -----	46
2.5.6.3 Estimación de la vida a la fatiga en soldadura. -----	47
2.6 Procesos de soldadura. -----	47
2.6.1 Tipos de soldadura. -----	47
2.6.2 Selección del tipo de junta. -----	49
2.6.3 Geometría de la junta. -----	49
2.6.4 Soldadura GTAW. -----	50
2.6.4.1 Fundamentos del proceso. -----	52
2.6.4.2 Equipamiento. -----	53
2.6.4.3 Antorcha. -----	53
2.6.4.4 Electrodo. -----	54
2.6.4.4.1 Extensión del electrodo. -----	55

2.6.4.4.2 Orientación de electrodo. -----	56
2.6.4.5 Fuente de poder. -----	57
2.6.4.5.1 Polaridad. -----	57
2.6.4.5.2 Corriente Continua. -----	58
2.6.4.5.3 Corriente Alterna. -----	59
2.6.4.6 Gas de protección. -----	62
2.6.4.6.1 Argón. -----	62
2.6.4.7 Material de aporte. -----	62
2.6.4.7.1 Selección de los materiales de aporte. -----	63
2.6.4.8 Generación de calor. -----	64
2.6.4.9 Zona afectada por el calor. -----	65
2.6.4.10 Velocidad de avance. -----	67
2.6.4.11 Defectos y fallas. -----	68
2.6.5 Soldadura GTAW en Ti y sus aleaciones. -----	69
2.6.5.1 Protección de las uniones soldadas. -----	75
2.6.5.2 Grietas de contaminación. -----	78
2.6.5.3 Grietas de solidificación. -----	79
2.6.5.4 Pre calentamiento y temperatura entre pasada. -----	80
2.9.5.5 Esfuerzos residuales en el proceso TIG. -----	80

*CAPITULO III. Desarrollo experimental.*

3.1 El material. -----	82
3.2 Preparación de especímenes. -----	83
3.3 Soldadura GTAW. -----	84

3.3.1 Equipo GTAW <i>cold wire</i> utilizado. -----	84
3.3.2 Protección gaseosa de la atmosfera. -----	86
3.3.3 Procedimiento GTAW aplicable. -----	87
3.3.4 Limpieza de la superficie. -----	88
3.3.5 Preparación de especímenes con soldadura. -----	89
3.4 Ensayos cuasi-estáticos uniaxiales. -----	89
3.5 Ensayos uniaxiales de fatiga. -----	91
3.6 Micro indentación. -----	92
3.7 Metalografías. -----	93
3.8 MicFractografías. -----	94
3.9 Medición superficie soldadura (esfuerzos residuales). -----	94
3.9.1 Método de contorno. -----	94
3.9.2 Elemento Finito. -----	95

*CAPITULO IV. Resultados y discusión.*

4.1 Ensayo uniaxial de tensión sin daño previo por fatiga. -----	100
4.1.1 Ensayo de tensión metal base. -----	100
4.1.2 Ensayo de tensión unión GTAW. -----	101
4.2 Fatiga -----	103
4.2.1 Curvas S-N metal base. -----	104
4.2.2 Curvas esfuerzo – ciclos ( S-N ) unión GTAW. -----	105
4.2.3 Acumulación de daño por fatiga. -----	107
4.3 Ensayo uniaxial de tensión con daño previo. -----	107
4.3.1 Metal base. -----	108

4.3.2 Unión GTAW. -----	109
4.4 Metalografía. -----	112
4.5 Fractografía. -----	114
4.5.1 Fatiga en Metal Base MB. -----	114
4.5.2 Fatiga en la unión GTAW. -----	116
4.5.3 Daño previo en la unión GTAW. -----	120
4.5.3.1 Daño previo de 25%. -----	120
4.5.3.2 Daño previo de 50%. -----	124
4.5.3.3 Daño previo de 75%. -----	126
4.6 Micro indentacion. -----	129
4.7 Esfuerzos residuales. -----	130

*CAPITULO V. Conclusiones.*

Referencias. -----	133
<i>Apéndice A.</i> Programa mat lab. -----	138
<i>Apéndice B.</i> Procedimiento de soldadura. -----	142
<i>Apéndice C.</i> Publicación	

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 2-1	A) Estructura cristalina Hexagonal compacta (HC). -----	10
	B) Estructura cristalina Cubica Centrada en el Cuerpo (BCC). -----	10
Figura 2-2	Estructura cristalina Cubica Centrada en el Cuerpo (BCC). -----	11
Figura 2-3	Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HC). -----	12
Figura 2-4	Aleaciones de Uso en Aviación. -----	13
Figura 2-5	Aplicaciones en la industria aeroespacial. -----	14
Figura 2-6	A) Helicóptero A109. -----	14
	B) Rotor del A109 fabricado Ti10V2Fe3Al. -----	14
Figura 2-7	A) Wing box, bombardero B1-B en Ti6Al4V. -----	15
	B) Pieza del tren de aterrizaje fabricado en Ti6Al4V forjada y mecanizada. -----	15
Figura 2-8	Asientos de aeronaves con nuevos diseños más ergonómicos. -----	15
Figura 2-9	Turbinas aeronaves. -----	16
Figura 2-10	Trenes de aterrizaje de aeronaves con menor peso. -----	17
Figura 2-11	Estructuras aleaciones $\alpha$ : -----	22
	A) Granos equiaxiales 100x.	
	B) Agujas aciculares 150x.	
	C) Estructura P. windmanstatten 100x.	
Figura 2-12	Microestructura Windmanstatten. -----	24
Figura 2-13	Maquina universal MTS 810. -----	27
Figura 2-14	Curva esfuerzo – deformación Ti6Al4V. -----	30
Figura 2-15	Probetas típicas para prueba de tensión. -----	30
Figura 2-16	Ciclos con amplitud constante y sus respectivas nomenclaturas. -----	38

A) Esfuerzos completamente invertidos,  $\sigma_m=0$ .

B) Esfuerzo medio  $\sigma_m \neq 0$ .

C) Esfuerzo de cero a tensión,  $\sigma_{\min}=0$ .

Figura 2-17	Esfuerzos actual o nominal para: -----	40
	A) Tensión simple.	
	B) Flexión.	
	C) Miembro muescado.	
Figura 2-18	Curvas S-N ( $R = -1$ ). -----	41
Figura 2-19	Secuencia fotográfica de la aparición y el crecimiento de una grieta durante una carga cíclica. -----	42
Figura 2-20	Uso de la regla Palmgren-Miner para la predicción de vida para una amplitud variable de carga completamente invertida. -----	43
Figura 2-21	Predicción de vida para una historia de esfuerzos repetidos con cambio de valor medio. -----	44
Figura 2-22	Influencia de la forma de reforzamiento en la resistencia a la fatiga de soldaduras transversales a tope. -----	45
Figura 2-23	Curvas S-N para soldaduras transversales a tope de acero al carbono Q&T, $S_u=785$ MPa, $R=0$ [35]. -----	46
Figura 2-24	Representación esquemática de los tipos de soldaduras. -----	48
Figura. 2-25	Representación esquemática de la geometría de las juntas: -----	50

	A) abertura adecuada	
	B) abertura excesiva	
	C) separación de la junta	
	D) altura del talón.	
Figura 2-26	Esquema del proceso TIG. -----	51
Figura 2-27	Esquema del equipo para la soldadura TIG. -----	53
Figura 2-28	Tipos de corriente. -----	58
Figura 2-29	Corriente eléctrica: -----	60
	A) Corriente continua CC.	
	B) Corriente alterna CA.	
Figura 2-30	Representación esquemática del calor generado durante el proceso por fusión. -----	65
Figura 2-31	A) Representación esquemática de la sección transversal de una unión soldada por TIG. -----	66
	B) zonas identificadas en una unión soldada de una aleación de titanio Ti6Al4V.	
Figura 2-32	Efecto del calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura. -----	67
	A) Ancho de ZAT (sombreado)	
	B) Ciclos térmicos cerca la frontera de fusión,	
	C) Perfil de resistencia o dureza.	
Figura 2-33	Cabina de soldadura TIG inflable y rígida. -----	75
Figura 2-34	Colores de la contaminación en Ti. -----	77

Figura 2-35	Cambios de temperatura y esfuerzos durante el proceso de soldadura. -----	81
Figura 2-36	Típica distribución de esfuerzos residuales longitudinal $\sigma_x$ y transversal $\sigma_y$ . -----	82
Figura 3-1	Ilustración esquemática del espécimen usado en los ensayos cuasi-estáticos, fatiga. (Dimensiones en mm.) -----	83
Figura 3-2	Equipo GTAW <i>cold wire</i> . -----	85
	A) Fuente de poder.	
	B) Alimentador automático.	
	C) Antorcha Robacta.	
Figura 3-3	Avance automático “Go-FerIII”. -----	86
Figura 3-4	A) Diseño protección de atmosfera. -----	86
	B) Protección lateral y de respaldo.	
Figura 3-5	Bisel en V ángulo 60° sin hombro a tope. -----	87
Figura 3-6	Maquina MTS 810. -----	90
Figura 3-7	Método del offset para determinar la cedencia. -----	91
Figura 3-8	Microindentador FUTURE-TECH. -----	92
Figura 3-9	A) Estereoscopio Leica Zoom 2000. -----	93
	B) Microscopio óptico Zeiss Jenatech-Inspection.	
Figura 3-10	Mallado de la pieza en ANSYS® para el análisis de los esfuerzos residuales. -----	97
Figura 3-11	Desplazamientos generados en MatLab®, inducidos en ANSYS®, para el análisis de los esfuerzos residuales. -----	98
Figura 4-1	A) Unión soldada GTAW. -----	99



	B) Especímenes utilizados.	
Figura 4-2	Ensayo tensión material base. -----	101
Figura 4-3	Ensayo tensión unión soldada. -----	102
Figura 4-4	Ensayo tensión unión soldada vs Metal Base. -----	103
Figura 4-5	Curva “esfuerzo-ciclos” S-N Metal Base. -----	105
Figura 4-6	Curva S – N unión GTAW. -----	106
Figura 4-7	Ensayo tensión metal base con daño previo. -----	109
Figura 4-8	Ensayo de tensión unión GTAW con daño previo. -----	110
Figura 4-9	% elongación y reducción de área. -----	112
Figura 4-10	Metal base Fase $\alpha$ / $\beta$ longitudinal 20X, 200X. -----	113
Figura 4-11	Estructura windmanstatten y crecimiento del grano en el material de aporte ELI 20X. -----	113
Figura 4-12	Transformación de fase en la ZAT 100X. -----	114
Figura 4-13	A) Inicio de la falla inducido por fatiga. ----- B) Vista perpendicular a la superficie de falla.	115
Figura 4-14	Grietas de fatiga en toda la superficie de falla del espécimen 330X. -----	115
Figura 4-15	A) Falla inducida por fatiga. ----- B) Grietas de fatiga.	116
Figura 4-16	Zonas con micro poros. -----	117
Figura 4-17	Regiones con micro poros agrupados de diferentes tamaños. -----	117
Figura 4-18	Micro poro de mayores dimensiones. -----	117
Figura 4-19	Micro poros redondeados. -----	118
Figura 4-20	Micro poros actúan como concentradores de esfuerzos. -----	118
Figura 4-21	Mirco poro seleccionado para análisis E.D.S. -----	119

Figura 4-22	Resultados análisis EDS a micro poros. -----	119
Figura 4-23	Falta de fusión en la soldadura. -----	120
Figura 4-24	Fractura probeta 25% daño. -----	121
Figura 4-25	Sobre carga del material. -----	121
Figura 4-26	Inicio de la falla 30x, 55X. -----	122
Figura 4-27	“Dimples” morfología del modo de falla. -----	122
Figura 4-28	Región con “dimples” y “flutes”. -----	123
Figura 4-29	Falta de fusion de la soldadura. -----	123
Figura 4-30	Poros rodeado por dimples. -----	124
Figura 4-31	Fractura del espécimen. -----	124
Figura 4-32	Poros y zona de “dimples”. -----	125
Figura 4-33	Zonas de poros agrupados. -----	125
Figura 4-34	Marcas de fatiga ocasionadas por el daño previo. -----	126
Figura 4-35	Estrías de la fatiga previa. -----	126
Figura 4-36	Dimples en toda el área de fractura. -----	126
Figura 4-37	Sobre carga del material. -----	127
Figura 4-38	Morfología “Dimples”. -----	127
Figura 4-39	Fallo por sobre carga. -----	128
Figura 4-40	“Dimples” en el área de fractura. -----	128
Figura 4-41	Microporos localizados en el borde. -----	128
Figura 4-42	Ruta seguida durante la medición de dureza. -----	129
Figura 4-43	Perfil de dureza Vickers. -----	130
Figura 4-44	Regiones de la unión soldada. -----	130
Figura 4-45	Superficie de soldadura sin suavizado. -----	131

Figura 4-46	Nube suavizada de puntos de la superficie deformada. -----	131
Figura 4-47	Distribución de esfuerzos residuales de la muestra. -----	132

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 2-1	Clasificaciones del titanio según ASTM. -----	18
Tabla 2-2	Comparación características mecánicas fase $\alpha + \beta$ y $\beta$ . -----	19
Tabla 2-3	Elementos de aleación en fase $\alpha$ $\beta$ y neutro. -----	19
Tabla 2-4	Boquillas para soldadura TIG. -----	54
Tabla 2-5	Código de color y elementos de aleación del tungsteno. -----	55
Tabla 2-6	Rangos típicos de corrientes para electrodos de tungsteno. -----	57
Tabla 2-7	Selección del tipo de corriente para soldaduras TIG. -----	61
Tabla 2-8	Requerimientos de composición química de electrodos de titanio y aleaciones de titanio. -----	64
Tabla 2-9	A) Diseño de ranuras típico para soldadura de Titanio y aleaciones de titanio. -----	70
	B) Condiciones de soldadura TIG para titanio y aleaciones de titanio. ---	71
Tabla 2-10	Grados de soldabilidad del titanio y sus aleaciones. -----	74
Tabla 3-1	Composición química de la aleación de Titanio 6Al4V. -----	82
Tabal 3-2	Ventajas y desventajas proceso TIG. -----	84
Tabla 3-3	Variables eléctricas del proceso de soldadura. -----	88
Tabla 3-4	Composición química del metal de aporte ERTi-5ELI. -----	88

Tabla 3-5	Propiedades mecánicas de la unión GTAW utilizada para el análisis de los esfuerzos residuales. -----	96
Tabla 4-1	Características mecánicas del metal base libre de daño. -----	100
Tabla 4-2	Características mecánicas de la unión soldada libre de daño. -----	101
Tabla 4-3	Datos de las pruebas de fatiga en el metal base. -----	104
Tabla 4-4	Datos de fatiga unión GTAW. -----	106
Tabla 4-5	Numero de ciclos y porcentaje de daño. -----	107
Tabla 4-6	Características mecánicas del metal base con daño previo. -----	108
Tabla 4-7	Características mecánicas de la unión GTAW con daño previo. -----	110
Tabla 4-8	Características mecánicas obtenidas ensayos de tensión Ti6Al4V. -----	111

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### *1.1 Introducción*

El titanio puro tiene una densidad de  $4,5 \text{ g/cm}^3$  [1], prácticamente la mitad de la de los aceros, por lo que algunas aleaciones de titanio compiten con las aleaciones de aluminio y los aceros en la industria aeroespacial. Su temperatura de fusión es de  $1668^\circ\text{C}$  [2].

Debido a su acusada afinidad por el oxígeno, se cubre de una finísima película de óxido a la temperatura ambiente, gracias a la cual el titanio es resistente a la corrosión, tanto en ambientes salinos como en contacto con soluciones ácidas.

La afinidad del titanio por el oxígeno aumenta gradualmente con la temperatura, al igual que el espesor de la película de óxido, que de ser una tenue y fina capa pasa a convertirse en una capa gruesa. Por encima de los  $649^\circ\text{C}$  [2], la resistencia a la oxidación decrece rápidamente y tanto el titanio como sus aleaciones deben protegerse del aire debido a su posible combinación con el oxígeno. La presencia de este elemento y del nitrógeno del aire aumenta la dureza y fragiliza el metal.

La adición de elementos de aleación aumenta la resistencia a la tracción del metal y disminuye simultáneamente su ductilidad. Tanto el titanio como algunas de sus aleaciones tienen buenas características de resistencia a la tensión y de ductilidad y baja fragilidad hasta  $-240^\circ\text{C}$  [2]. Los bajos coeficientes de dilatación y de conductividad térmica, comparados con los de los aceros, contribuyen a su buena soldabilidad.

El titanio presenta una estructura cristalina hexagonal compacta, conocida como fase alfa ( $\alpha$ ) cuando se encuentra a temperaturas de hasta  $885^\circ\text{C}$ .

Por encima de esta temperatura el metal sufre una transformación alotrópica a estructura cúbica centrada en el cuerpo, o fase beta ( $\beta$ ). Esta temperatura de transformación sufre variaciones de acuerdo a la cantidad de impurezas o elementos de aleación presentes en el titanio.

En el caso de la aleación de titanio grado 5 (Ti-6Al-4V) se tiene presente una fase  $\alpha/\beta$  a temperatura ambiente ocasionada por sus elementos de aleación.

La soldadura de titanio y sus aleaciones siempre han representado un gran reto para los diseñadores y tecnólogos. Las aleaciones de titanio, especialmente las tratadas térmicamente, son difíciles de unir por medio de técnicas de soldadura por fusión, ya que algunos defectos de soldadura como grietas y porosidad se forman durante la solidificación de la soldadura [1].

En muchas aplicaciones, tales como en la industria aeronáutica, automotriz, en la marina, en la construcción, etc., las estructuras soldadas pueden ser sujetas a cargas cíclicas. Por lo tanto, es importante entender las propiedades mecánicas de los materiales estructurales bajo condiciones de fatiga para predecir el comportamiento de los componentes durante el servicio.

El objetivo de este trabajo es investigar el efecto del daño previo por fatiga en el comportamiento a tensión de muestras obtenidas de las uniones soldadas de la aleación de titanio Ti-6Al 4V (*grado 5*). El proceso de soldadura aplicado, fue el método TIG (Gas Inerte de Tungsteno, o también conocido como Soldadura de Arco por Tungsteno, GTAW). Diferentes tipos de carga y diferentes niveles de daño previos por fatiga son considerados. El daño por fatiga fue introducido en los especímenes por la aplicación de carga cíclica bajo la condición de control de esfuerzo. Se comparara la respuesta de las uniones soldadas y la del material base. La influencia del daño previo por fatiga en las propiedades mecánicas cuasi-estáticas y los modos de falla en el material base y el la unión soldada son analizadas.

## *1.2 Justificación*

Las aleaciones de titanio son materiales con propiedades físicas muy especiales, lo que las hace idóneas para su aplicación en diversos sectores como la industria aeroespacial, plantas químicas, plantas de generación eléctrica (nucleares y térmicas), industria del papel, industria alimenticia, industria farmacéutica.

En la actualidad, en diversas aplicaciones de estos sectores se requiere unir por medio de un proceso de fusión este material, usualmente las estructuras soldadas están sometidas a cargas dinámicas, es por eso, necesario entender y conocer la respuesta mecánica de las estructuras soldadas a altos niveles de ciclos a los que los componentes pueden estar sometidos durante su servicio, fatigando uniones soldadas de Titanio para determinar el daño ocasionado y conocer la alteración de sus características mecánicas después de un determinado número de ciclos.

Hoy en día, existe una vasta cantidad de componentes en servicio fabricados con dicho material que requieren ser evaluados.

## *1.3 Hipótesis*

El proceso de soldadura por fusión debe ofrecer características mecánicas cuasi estáticas en la junta, por lo menos de la misma eficiencia que el metal base.

El metal base y la unión soldada con daño acumulado por fatiga presenta alteraciones en sus propiedades mecánicas.

## *1.4 Objetivos*

### *1.4.1 General*

El objetivo de este trabajo de investigación es determinar el efecto del daño por fatiga en el comportamiento cuasi-estático de las uniones soldadas de aleación de Titanio (Ti-6Al-4V) por fusión con daño previo por fatiga.

#### 1.4.2 Especifico

Medir el efecto del daño previo inducido por fatiga en especímenes con y sin soldadura.

Relacionar los resultados de ensayos del material base con los resultados de pruebas a especímenes con soldadura.

Obtener por medio del método del contorno los esfuerzos residuales en la unión soldada.



## CAPITULO II.

### ANTECEDENTES

#### *2.1 Revisión bibliográfica*

En este capítulo se presenta información referente al material con que se trabajó durante la investigación, su clasificación, descripción y especificación de la aleación utilizada, sus propiedades micro estructurales, de la misma manera se describen las bases teóricas de las técnicas destructivas y metalográficas utilizadas así como la técnica para realizar la unión del material.

#### *2.2 Titanio*

El titanio puro es un metal blanco y lustroso muy parecido al color de la plata, fue descubierto en 1791. Es el noveno elemento más abundante en la corteza de la Tierra, con una concentración media del 0.8% en peso, si bien su existencia en concentraciones que permitan una extracción económicamente viable no es muy frecuente, excepto como Rutilio ( $\text{TiO}_2$ ) e ilmenita ( $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ ). Debido a su elevada reactividad, no se obtuvo una muestra impura hasta 1887. A pesar de que se intentó obtener este metal en forma pura durante mucho tiempo, ello no se logró hasta el año 1910, mediante la reducción del compuesto  $\text{TiCl}_4$  con sodio, si bien las cantidades obtenidas eran muy reducidas.

En 1937 Kroll desarrolló un proceso para la obtención de titanio consistente en la reducción del compuesto tetracloruro de titanio con magnesio en una atmosfera de argón para evitar la oxidación. Este fue el primer proceso que permitió la obtención de cantidades apreciables de titanio puro, y es el método utilizado en la actualidad [1].

En la década de los años cincuenta el gobierno de los E.U.A. potenció los estudios relativos al titanio y a sus aleaciones, ya que, debido a sus excelentes propiedades, como lo son una densidad reducida, una excelente relación resistencia mecánica/densidad y un buen

comportamiento a altas temperaturas, las aleaciones de titanio constituyen un material muy útil en los campos de la industria aeroespacial y militar entre otras como se menciona posteriormente.

En la década de los sesenta se amplió su uso a otras aplicaciones, como la industria química, debido a su excelente resistencia a la corrosión. Esta resistencia es causada por una capa de pasivado formada por óxidos de titanio, que se forman espontáneamente en la superficie del titanio al entrar en contacto con la atmosfera, es decir el material se cubre de una finísima película de óxido a la temperatura ambiente gracias a la cual el titanio es resistente a la corrosión, soporta el ataque de los ácidos inorgánicos, de la mayoría de los ácidos orgánicos. Dicha reactividad depende fuertemente de la temperatura, la afinidad del titanio por el oxígeno aumenta gradualmente con la temperatura al igual que el espesor de la película de óxido, que, de ser una tenue y fina capa pasa a convertirse en una capa gruesa. Por encima de los 649°C, la resistencia a la oxidación decrece rápidamente y tanto el titanio como sus aleaciones deben protegerse del aire debido a su posible combinación con el oxígeno. La presencia de este elemento y del nitrógeno del aire aumenta la dureza y fragiliza el metal. A altas temperaturas, la reactividad del titanio aumenta exponencialmente.

Con grandes intervalos de tiempo y altas temperaturas (mayores de 700°C) los gases llegan a difundirse en la red cristalina del titanio. Otras aplicaciones estudiadas del titanio y sus aleaciones son las aplicaciones estructurales en ambientes salinos, por su resistencia a la corrosión, y en el campo de los biomateriales, gracias a su excelente biocompatibilidad.

Entre otras propiedades cabe destacar su punto de fusión, indicio de las posibilidades de su uso de este metal en condiciones de trabajo a altas temperaturas, como fuselajes de avión o álabes de turbinas de gas. De la misma manera se debe destacar sus bajos coeficientes de conductividad y dilatación térmica.

### 2.2.1 Propiedades

El titanio comercialmente puro se divide en varios grados y su clasificación se realiza a partir de las propiedades mecánicas mínimas y de sus contenidos máximos de impurezas intersticiales. El titanio puro es muy dúctil y su resistencia a la tracción es relativamente baja. En general, las variaciones de resistencia dependen de los diferentes contenidos de impurezas tales como, el oxígeno, el nitrógeno y el carbono, que corresponden a elementos que forman soluciones intersticiales, y al hierro, que forma soluciones sólidas. Al aumentar los contenidos de estos elementos, aumenta también la resistencia mecánica, lo que permite que estas aleaciones puedan someterse a operaciones de trabajo en frío, aunque raras veces se utiliza [2].

El titanio es un elemento de transición, como el hierro, el níquel o el cobalto, cuya estructura electrónica presenta una capa *d* incompleta. Dicha estructura electrónica permite que el titanio forme soluciones sólidas con muchos elementos sustitucionales, con un factor de tamaño atómico de hasta un 20%. Desde un primer momento, ha sido clasificado como metal ligero, a pesar de que su densidad es casi el doble de la densidad del aluminio pero prácticamente la mitad de la de los aceros.

#### 2.2.1.1 Características físicas [1].

- Densidad es de  $4,5\text{g/cm}^3$ .
- Punto de fusión de  $1675\text{ }^\circ\text{C}$  ( $1941\text{ K}$ ).
- Masa atómica de  $47,867\text{ u}$ .
- Es de color plateado grisáceo.
- Es paramagnético, es decir, no se imanta debido a su estructura electrónica.
- Abundante en la naturaleza.
- Reciclable.

- Forma aleaciones con otros elementos para mejorar las propiedades mecánicas.
- Es muy resistente a la corrosión y oxidación.
- Refractario.
- Poca conductividad: No es muy buen conductor del calor ni de la electricidad.

### *2.2.1.2 Características mecánicas*

- Mecanizado por arranque de viruta similar al acero inoxidable.
- Maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- Dúctil, permite la fabricación de alambre delgado.
- El titanio comercial tiene una resistencia a la tracción entre los 242 y 552 MPa
- Límite elástico (0,2%) entre 173 y 483 MPa
- Un alargamiento (2 pulg.) entre el 15 y el 25%.
- Dureza en escala de Mohs 6.
- Gran tenacidad.
- Permite la fabricación de piezas por fundición y moldeo.
- Material soldable.
- Permite varias clases de tratamientos tanto termoquímicos como superficiales.
- Puede mantener una alta memoria de su forma.

### 2.2.2 Estructura cristalina y fases fundamentales.

Los materiales sólidos se pueden clasificar de acuerdo a la regularidad con que los átomos o iones están ordenados uno con respecto al otro. Un material cristalino es aquel en que los átomos se encuentran situados en un arreglo repetitivo o periódico dentro de grandes distancias atómicas; tal como las estructuras solidificadas, los átomos se posicionarán de una manera repetitiva tridimensional en el cual cada átomo está enlazado al átomo vecino más cercano. Todos los metales, muchos cerámicos y algunos polímeros forman estructuras cristalinas bajo condiciones normales de solidificación.

La estructura cristalina de un sólido depende del tipo de enlace atómico, del tamaño de los átomos (o iones), y la carga eléctrica de los iones en su caso).

Existen siete estructuras cristalinas las cuales se distinguen entre sí por la longitud de sus aristas de la celda (llamados parámetros de la celda) y los ángulos entre los bordes de ésta. Estas estructuras son: cúbico, tetragonal, ortorrómbico, romboédrica (o trigonal), hexagonal, monoclinico y triclínico.

El titanio presenta una estructura cristalina hexagonal compacta como se muestra en la figura 2-1A), conocida como fase alfa ( $\alpha$ ) cuando se encuentra a temperaturas de hasta 885°C. , por encima de esta temperatura el metal sufre una transformación alotrópica a estructura cúbica centrada en el cuerpo como se ve en la figura 2-1B), o fase beta ( $\beta$ ).

Esta temperatura de transformación sufre variaciones de acuerdo a la cantidad de impurezas o elementos de aleación presentes en el titanio [2].

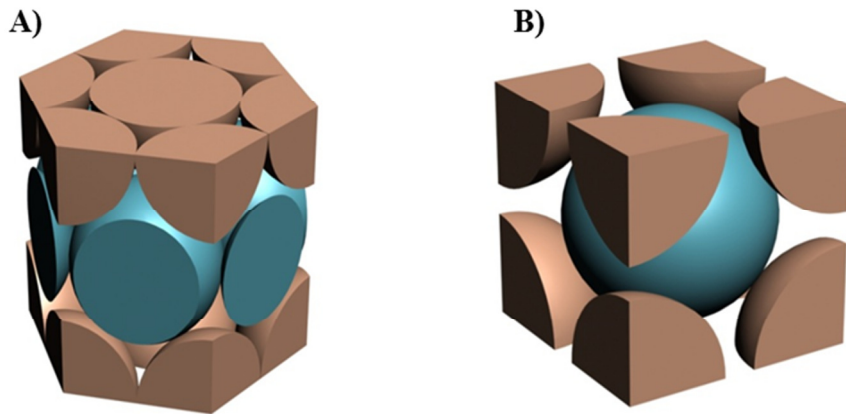


Figura 2-1.- A) Estructura cristalina Hexagonal compacta (HC), B) Estructura cristalina Cubica Centrada en el Cuerpo (BCC).

### 2.2.2.1 Estructura cristalina Cúbica Centrada en el cuerpo (BCC)

En la estructura cúbica centrada en el cuerpo (figura 2-2), los átomos están situados en los vértices de la celdilla cúbica y en su centro. Dicha estructura se obtiene situando átomos idénticos en los nudos de la red de Bravais del mismo nombre.

Algunas de las características más importantes de este tipo de estructura son:

Respecto a su número de átomos por celdilla, contiene sólo 2 átomos: 1 átomo (en el centro) y  $\frac{1}{8} \times 8$  átomos (en los vértices).

Su número de Coordinación, cada átomo está rodeado por 8 átomos primeros vecinos, esto es, el número de coordinación es 8 para esta estructura.

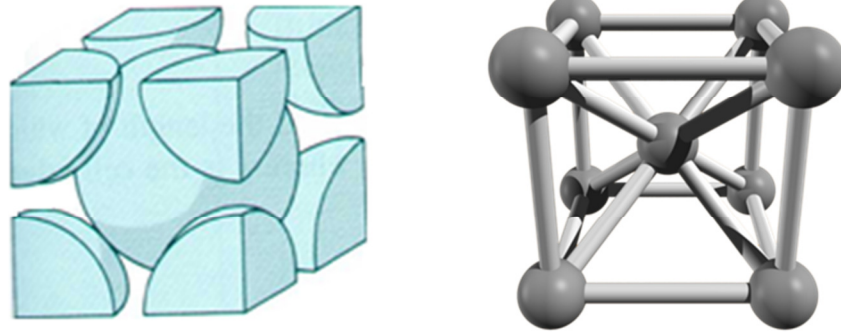


Figura 2-2.- Estructura cristalina Cubica Centrada en el Cuerpo (BCC).

#### 2.2.2.2 Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HC)

En la estructura hexagonal compacta (figura 2-3) los átomos ocupan los vértices de un prisma hexagonal regular, los centros de las bases y los centros de los triángulos alternos en que puede descomponerse la sección intermedia del prisma. Las longitudes axiales de esta estructura son la arista de la base,  $a$ , y la altura del prisma,  $c$ .

Esta estructura se construye a partir de la red de Bravais denominada hexagonal simple HS, pero asociando a cada nudo de la red no un único átomo, la estructura obtenida en ese caso no aprovecharía bien el espacio, sino una pareja de átomos, situados en las posiciones  $N$  y  $N + \left(\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}\right)$ , siendo  $N$  la posición de cualquier nudo de la red Hexagonal Simple HS.

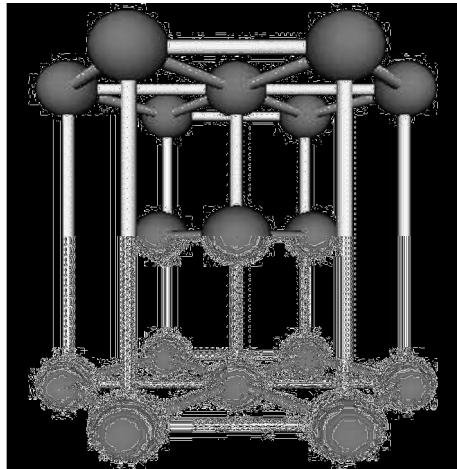


Figura 2-3.- Estructura cristalina Hexagonal Compacta (HC).

Como puede observarse en la figura 2-3, esta celda consiste en dos caras, una superior y otra la base de la celda unidad que consiste de 6 átomos que forman un hexágono y un átomo simple en el centro de estas caras. Hay además otro plano que provee 3 átomos adicionales en la celda, que está ubicado entre las caras superior e inferior. (Estos tres átomos están en el interior de la celda y no en la mitad de la cara).

El número de átomos será entonces:

$$N= 3 + \frac{2}{2} + \frac{12}{6} = 6 \text{ átomos}$$

### 2.2.3 Evolución del uso del titanio

El titanio es un material tenaz y resistente, lo que lo hace idóneo para diversas aplicación, entre las más frecuentes tenemos: industria naval, industria aeroespacial, plantas químicas, plantas de generación eléctrica (nucleares y térmicas), instalaciones en alta mar, industria de la pulpa y el papel, industria alimenticia y médico farmacéutica. [2]

Actualmente el titanio se utiliza principalmente en la industria aeroespacial (figura 2-4), en la industria química y en aplicaciones médicas. Cabe destacar que solo un 10% de la producción total se destina a la obtención de titanio en forma metálica. El 90% se destina a la fabricación



de dióxido de titanio, el cual es usado en forma de pintura protectora antioxidante. Del 10% restante, el 50% es utilizado para la fabricación de la aleación Ti6Al4V.

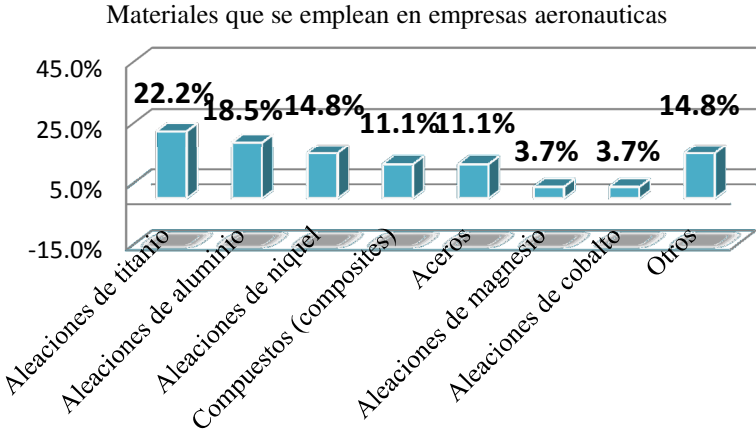


Figura 2-4.- Aleaciones de Uso en Aviación [3].

El uso del titanio en el sector aeronáutico ha tenido un uso muy abundante ya que sus características mecánicas y físicas lo hacen idóneo para diversas aplicaciones dentro de esta industria como se puede observar en figura 2-5, sus usos más habituales es en compontes como: vigas del piso, sujetadores, puertas y marcos de puertas, accesorios de equipaje, partes motor, partes sujeción motor, inversores de empuje, largueros, estructura, asientos etc.



Figura 2-5.- Aplicaciones en la industria aeroespacial.

En la fabricación y diseño de componentes el criterio estructural es de suma importancia, es por esto que la selección de materiales debe de realizarse detalladamente, por ejemplo; dadas las propiedades del titanio como lo son su alta resistencia y bajo peso se fabrican rotores de helicóptero figura 2-6.

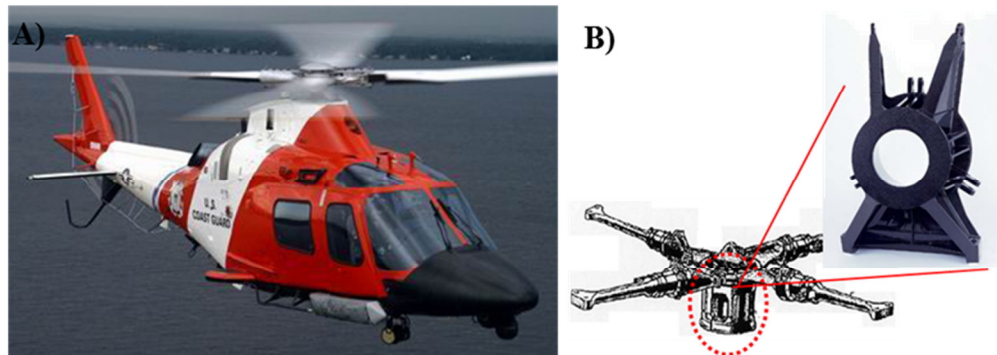


Figura 2-6.- A) Helicóptero A109, B) Rotor del A109 fabricado Ti10V2Fe3Al.

Las aleaciones de titanio, se han utilizado como materiales de sustitución de las aleaciones de hierro y aluminio, como en la fabricación del bombardero B1-B (figura 2-7A), y los trenes de aterrizaje de aviones (figura 2-7B).

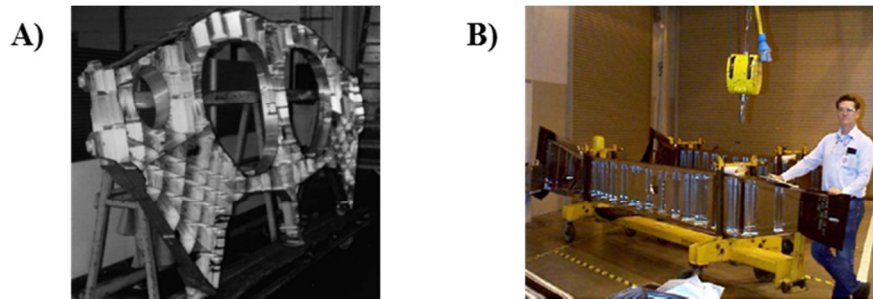


Figura 2-7.- A) Wing box, bombardero B1-B en Ti6Al4V B) Pieza del tren de aterrizaje fabricado en Ti6Al4V forjada y mecanizada.

La proporción fuerza-peso del titanio lo hace más atractivo que otros metales más pesados o más débiles para componentes estructurales, como filas de asientos figura 2-8, los cuales se pueden desarrollar en formas complejas, a fin de reducir el peso general y aprovechar mejor el espacio sin perder ergonomía [3].



Figura 2-8.- Asientos de aeronaves con nuevos diseños más ergonómicos.

El titanio se utiliza para cumplir con los más altos estándares de rendimiento a alta temperatura, altos niveles de esfuerzos, resistencia a las deformaciones, que son características

de vital importancia para los materiales que se utilizan en componentes de motores y turbinas figura 2-9.

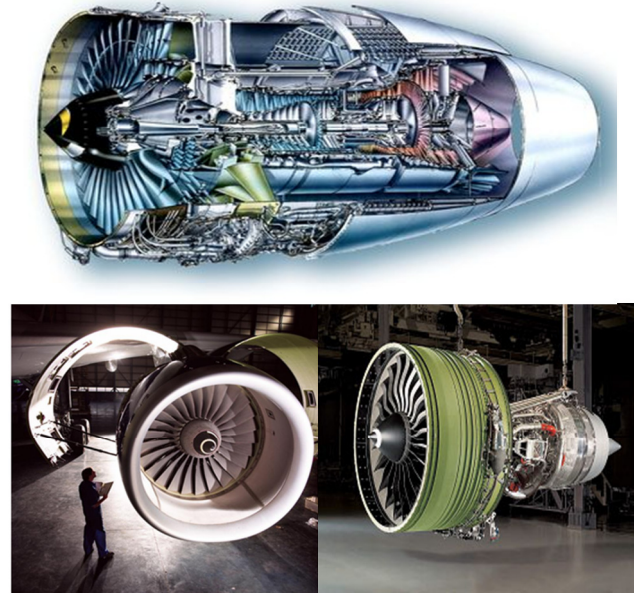


Figura 2-9.- Turbinas aeronaves.

El tren de aterrizaje (figura 2-10) brinda otra oportunidad de reducir el peso general de la aeronave. El titanio permite la reducción de peso sin tener una pérdida de la resistencia de los materiales.

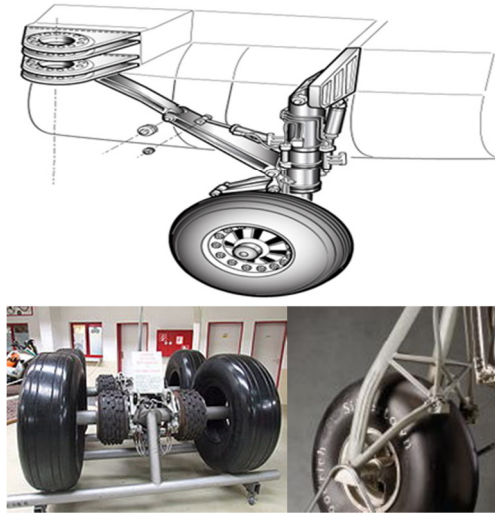


Figura 2-10.- Trenes de aterrizaje de aeronaves con menor peso.

#### 2.2.4 Clasificaciones del titanio

El sistema de designación del titanio está compuesto por letras y números, comenzando por las letras Ti que indica que es una aleación de titanio, seguida por los símbolos químicos de los elementos de aleación, antecidos de la cuantía en centésimas de tanto por ciento [2].

El titanio y sus aleaciones se clasifican de la forma siguiente:

- Titanio comercialmente puro.
- Titanio  $\alpha$
- Titanio cuasi  $\alpha$
- Titanio  $\alpha + \beta$
- Titanio  $\beta$

En la tabla 2-1 se muestra una clasificación de algunas aleaciones de titanio según ASTM.

<b>COMERCIALMETE PURO</b>	<b>ALEACIONES CASI BETA</b>
ASTM GRADO 1	Ti-3Al-2.5V
ASTM GRADO 2	Ti-6Al-4V
ASTM GRADO 3	Ti-7Al-4Mo
ASTM GRADO 4	Ti-6Al-6V-2Sn
<b>ALEACIONES ALPHA</b>	Ti-6Al-6Mo-4Zr-2Sn
Ti-0.2 Pd	Ti-8Mn
Ti-08 Ni-0.3 Mo	Ti-10V-2Fe-3Al
<b>ALEACIONES CASI ALPHA</b>	<b>ALEACIONES BETA</b>
Ti-8Al – 1Mo- 1V	Ti-13V-11Cr-3Al
Ti-2Al- 11Sn-5Zr-1Mo	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn
Ti-5Al-5Sn-2Mo-2Zr	Ti-8Mo-8V-3Al-2Fe

Tabla 2-1.- Clasificaciones del titanio según ASTM.

### 2.2.5 Aleaciones de Ti

La adición de elementos de aleación aumenta la resistencia a la tensión del metal y disminuye simultáneamente su ductilidad. Tanto el titanio como algunas de sus aleaciones tienen buenas características de resistencia a la tracción y de ductilidad y baja fragilidad hasta - 240°C. Los bajos coeficientes de dilatación y de conductividad térmica, comparados con los de los aceros, contribuyen a su buena soldabilidad.

Existen diversos parámetros que determinan la tenacidad de las aleaciones del titanio, entre los que destacan, el nivel de elementos intersticiales y sustitucionales, el tamaño de grano, la morfología micro estructural, fracciones relativas de fase  $\alpha$  y  $\beta$ , así como la textura cristalográfica.

Las aleaciones con mejor combinación de resistencia y tenacidad son las  $\beta$  meta estables, cuya microestructura consiste en una elevada fracción de fase  $\beta$  con precipitados muy finos de fase  $\alpha$  como se muestra en la tabla 2-2.

	$\alpha + \beta$	$\beta$
Esfuerzo ultimo (MPa)	978	991
Esfuerzo de cedencia (MPa)	940	912
% de elongación	16	12
% reducción de área	45	22

Tabla 2-2.- Comparación características mecánicas fase  $\alpha + \beta$  y  $\beta$ .

Los elementos de aleación son adicionados intencionalmente, para proporcionar a estas aleaciones propiedades especiales.

Cuando a un metal se le añade un segundo elemento, los átomos de ambos tipos se ajustan a posiciones que se definen, respectivamente como (tabla 2-3):

- Soluciones sólidas de sustitución, en la que los átomos del elemento aleante se sitúan sustituyendo los átomos del elemento base (titanio) en la red cristalina.
- Soluciones sólidas intersticiales, en la que los átomos del aleante son tan pequeños que pueden situarse entre los átomos del elemento base (titanio) [2].

Estabilizados de fase $\alpha$	Estabilizados de fase $\beta$	Neutro
Elementos de aleación por sustitución		
Al	Cr, Nb, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Si, Ta, W, Va	Sn, Zr
Elementos de aleación por inserción		
O, N, C	H	

Tabla 2-3.- Elementos de aleación en fase  $\alpha$   $\beta$  y neutro.

En la aleación por sustitución, los elementos cuyo radio atómico sea grande, formarán mejor una solución sólida de sustitución, por lo que un elemento aleante estabilizará la fase  $\alpha$  o  $\beta$ ; es decir, aquella fase que tenga más solubilidad en estado sólido.

Por ejemplo, las adiciones de aluminio estabilizan la fase  $\alpha$  y aumentan la temperatura de transformación, en tanto que el cromo, el molibdeno y el vanadio estabilizan la fase  $\beta$  y reducen la temperatura de transformación.

Cuando hay gran cantidad de elementos estabilizadores de la fase  $\beta$ , ésta es estable a temperatura ambiente y por debajo de ella. Unido a esto la presencia de elementos de aleación influyen en el rango de transformación de una fase en la otra.

Cuando existen ambos elementos estabilizadores de las fases  $\alpha$  y  $\beta$ , la segunda de ellas se encuentra presente en pequeñas cantidades en la matriz de la fase  $\alpha$  y ambas son estables a temperatura ambiente. Las propiedades mecánicas de estas aleaciones dependen de la relación de fases presentes en la microestructura.

Es importante, asimismo, la relación entre las fases  $\alpha$  y  $\beta$ , de forma que la presencia de esta última ejerce los siguientes efectos: mejora la capacidad de deformación en caliente de las aleaciones de titanio, afina el grano, y aumenta la resistencia, garantiza respuesta al tratamiento térmico, mejora la tenacidad, excepto a muy bajas temperaturas, en algunas aleaciones, perjudica la soldabilidad y la resistencia a la fluencia en caliente (creep).

Existen también elementos intersticiales, cuando los átomos del aleante son muy pequeños como los del carbono, el nitrógeno, el oxígeno y el hidrógeno, forman solución sólida intersticial con el titanio. El nitrógeno, el carbono y el oxígeno son más solubles en la fase  $\alpha$ , por lo que se les conoce como estabilizadores de dicha fase. El hidrógeno por el contrario es más soluble en la fase  $\beta$ , por ello se le conoce como estabilizador de esa fase.

Las diferencias en propiedades mecánicas de varias aleaciones comerciales de titanio no aleado es el producto de los diferentes grados de contenidos de elementos intersticiales, principalmente el oxígeno.



Estos elementos intersticiales constituyen las impurezas que pueden contaminar al titanio durante la soldadura. Una protección deficiente del titanio a alta temperatura respecto a la atmósfera circundante provocará que aumente el contenido de oxígeno debido a su preferencial afinidad por este elemento. Si está presente la humedad en la atmósfera de la soldadura aumentarán los contenidos de oxígeno e hidrógeno en el metal. Los residuos de aceites, agentes limpiadores y otros contaminantes provocarán su contaminación con hidrógeno y carbono.

En las aleaciones bifásicas de titanio, la acción de los elementos intersticiales es más compleja. La resistencia mecánica de las aleaciones  $\alpha$  y  $\beta$ , con elementos intersticiales depende de la relación entre las cantidades y distribución de ambas fases.

A temperatura ambiente el hidrógeno solo es ligeramente soluble en el titanio  $\alpha$ , en tanto que, por encima de 299°C, la solubilidad puede llegar al 8%. Cuando el titanio se enfría lentamente, el hidrógeno puede causar fragilización, mientras que si se temple, el efecto del hidrógeno en lo que respecta a tenacidad, es más débil. Sin embargo un envejecimiento posterior a temperatura ambiente da como resultado una acumulación de hidrógeno que origina una disminución de la tenacidad.

Según se ha visto, el titanio  $\beta$  disuelve una cantidad de hidrógeno sustancialmente mayor que el titanio  $\alpha$ . Por su parte las aleaciones  $\alpha + \beta$ , pueden disolver cantidades considerables de hidrógeno sin que se formen hidruros. Sin embargo las aleaciones  $\alpha + \beta$  que contienen altos porcentajes de hidrógeno están expuestas a fragilidad a bajas razones de deformación [2].

Las aleaciones de titanio  $\alpha$  no suelen tratarse térmicamente para aumentar su resistencia mecánica, presentan siempre un alto contenido de fase  $\alpha$  y, en algunos casos, solo contienen dicha fase. Comúnmente a temperaturas elevadas, conservan sus propiedades de resistencia mecánica y a la fluencia. Su fractura presenta clivaje, crecimiento y coalescencia de cavidades. La adición de O y Al, aumentan el esfuerzo de cizalladura crítico para deslizamiento de dislocaciones, disminuyendo la tenacidad. Dentro de las aleaciones  $\alpha$  se encuentran diferentes

formaciones de estructuras como granos equiaxiales figura 2-11A, agujas aciculares figura 2-11B y estructura de P. windmanstatten figura 2-11C.

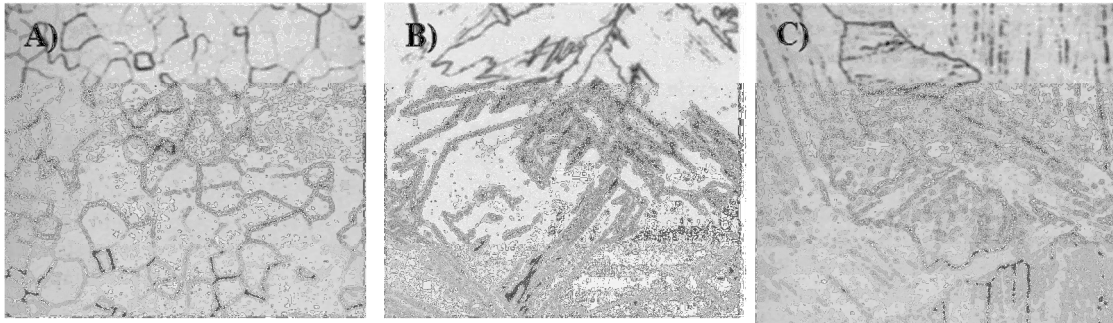


Figura 2-11.- Estructuras aleaciones  $\alpha$  A) Granos equiaxiales 100X, B) Agujas aciculares 150X , C) Estructura de P. windmanstatten 100X. [36]

Las aleaciones de titanio cuasi  $\alpha$ , se utilizan por su destacada resistencia a la fluencia térmica y su estabilidad a temperaturas elevadas, puesto que contienen pequeñas cantidades de elementos estabilizadores de la fase  $\beta$ .

Las aleaciones Ti-0.2Pd y Ti-0.8Ni-0.3Mo presentan mayor resistencia a la corrosión que la media de las aleaciones de titanio comercialmente puro. La última aleación es más fuerte que el titanio comercialmente puro [2], pequeñas cantidades de fase  $\beta$  mejoran la forjabilidad, presentado una mayor resistencia que las aleaciones  $\alpha$  a temperatura ambiente, teniendo una gran resistencia a la fluencia por encima de los 400°C. [4]

Las aleaciones  $\beta$ , presentan elevada cantidad de elementos de aleación que estabilizan esa fase, aun cuando su contenido de dicha fase es mayoritario, no son realmente monofásicas, en ellas la transformación en fase  $\alpha$  es muy lenta y casi se puede afirmar que a temperatura ambiente, son totalmente  $\beta$ . Pueden envejecerse durante períodos prolongados y someténdolas a tratamiento térmico a bajas temperaturas aumenta su resistencia a la tracción. En general las aleaciones  $\beta$  se caracterizan por su excelente capacidad de conformación. Al someterlas a tratamiento térmico, muestran una elevada relación resistencia - peso, pero

presentan relativamente baja ductilidad y tenacidad. Sus características en lo que se refiere al endurecimiento por deformación, son buenas, por lo que se utilizan en la fabricación de muelles y resortes. Sus mecanismos de falla se caracterizan por nucleación y crecimiento de pequeñas cavidades en intercaras  $\alpha/\beta$ , teniendo la fase  $\alpha$  una influencia, disminuyendo la tenacidad de fractura.

Las aleaciones  $\alpha/\beta$ , contienen combinaciones balanceadas de fases  $\alpha$  y  $\beta$  (tienen un contenido  $\alpha/\beta$  de granos equiaxiales), puede aumentarse su resistencia sometidas a un tratamiento de solubilización y envejecimiento. Algunas aleaciones se usan también en estado de recocido, y poseen excelente resistencia a la fractura frágil, pero con una tenacidad de fractura mayor para la estructura de recocido en fase  $\beta$ . [2]

#### 2.2.5.1 Aleación Ti-6Al-4V

Esta aleación  $\alpha$ - $\beta$ , es la más usada dentro de las composiciones del titanio, se utiliza en diversas formas de productos como componentes de aviones, y en componentes de turbinas de gas para aviones, y en diversas aplicaciones para trabajar con grandes cargas, puede ser sometida a tratamientos térmicos para mejorar sus características mecánicas [4].

El Ti6Al4V es la aleación de titanio de uso más común, en esta aleación es de suma importancia controlar el contenido de ciertos elementos, cuanto mayor es el contenido en oxígeno, nitrógeno, aluminio o vanadio, mayor es la resistencia, y a la inversa, cuando menor es su contenido, mayor es la tenacidad a la fractura, la ductilidad, la resistencia a la corrosión inducida por tensión y la velocidad de propagación de grieta.

El Ti6Al4V se usa frecuentemente con una micro estructura mil-annealed, la cual presenta una buena combinación de resistencia, tenacidad, ductilidad, y resistencia a la fatiga. El límite elástico mínimo varía desde 760 a 895 MPA, dependiendo del proceso, tratamiento térmico y composición química (principalmente del oxígeno) del material.

Al enfriar lentamente desde temperaturas donde todo el material está en fase  $\beta$ , se genera una estructura laminar de placas  $\alpha$  de windmanstatten como se ve en la figura 2-12, con una mayor tenacidad a fractura y mayor resistencia a la corrosión inducida por tensión y a la fluencia, y una menor velocidad de propagación de grieta. A veces se realiza un recocido de recristalización en los materiales trabajados, el cual mejora la ductilidad y la vida a fatiga.

Las aleaciones  $\alpha/\beta$  permiten tener una estructura martensítica  $\alpha'$  al ser enfriadas rápidamente desde temperaturas superiores a la temperatura de  $\beta$ -transus, o bien  $\alpha'+\alpha$  si se enfría desde  $900^{\circ}\text{C}$  a  $1.000^{\circ}\text{C}$ . Estas estructuras sirven como punto de partida a diferentes tratamientos térmicos.



Figura 2-12.- Microestructura windmanstatten Ti grado 3, 50X. [36]

Dentro de su microestructura, como aleaciones  $\alpha/\beta$ , el Ti6Al4V puede presentar diferentes composiciones de fase  $\alpha$  y  $\beta$ , dependiendo del tratamiento térmico y el contenido en elementos intersticiales. Los parámetros típicos de red para fase  $\alpha$  (HC) en el Ti6Al4V son  $a=2.925 \text{ \AA}$ ,  $c=4.670 \text{ \AA}$ . Estos parámetros pueden variar ligeramente, ya que dependen de la composición química de la fase  $\alpha$ . La fase  $\beta$  es estable a temperatura ambiente solo si está enriquecida con más de un 15% en peso de vanadio. Este enriquecimiento se obtiene al enfriar lentamente por debajo de  $750^{\circ}\text{C}$  y se suele conseguir un 10% de fase  $\beta$ . El parámetro de red para la fase  $\beta$  (BCC) en condiciones estables es  $a = 3.190 \text{ \AA}$ . Al igual que la fase  $\alpha$ , este parámetro varía con el contenido en aleantes.

El Ti6Al4V puede adquirir gran variedad de microestructuras, según el tratamiento termomecánico empleado. La microestructura se puede clasificar en varias categorías, destacando la equiaxial, la martensítica, la laminar y la bimodal (mezcla de equiaxial y laminar) [1,5].

### *2.3 Fundamentos teóricos del comportamiento mecánico de materiales*

La mecánica de materiales busca el conocimiento sobre la estructura interna, el comportamiento de los cuerpos sólidos bajo la acción de fuerzas incluyendo deformación, fallas, efectos del tiempo, repetición de carga (fatiga), y otros fenómenos, así como el procesado de materiales, el cual está principalmente ligado con el uso de conocimientos y su aplicación para la conversión de esto en productos necesarios o requeridos.

#### *2.3.1 Caracterización de materiales*

La caracterización de materiales representa diversas disciplinas; dependiendo del campo que se trate, el concepto se extiende desde el enfoque de un científico que piensa en ésta en términos atómicos, hasta el ingeniero de procesos, que la considera en términos tales como de distribución de esfuerzos, transferencia térmica, entre otros. De manera que la caracterización describe la composición y estructura de un material, incluyendo los defectos que son significantes para una situación en particular, estudio de propiedades o uso.

Para propósitos de diseño, se requiere entre otros aspectos, una óptima selección de materiales en base a la caracterización de su deformación, modo de fractura, capacidad de carga, etc., de ahí que los métodos de caracterización de materiales son diversos. En nuestro caso nos referimos a la caracterización de materiales realizada mediante pruebas mecánicas con el fin de conocer su respuesta bajo condiciones conocidas.

### *2.3.2 Propiedades mecánicas de los materiales*

La capacidad de un material para reunir los requerimientos de diseño y servicio se determina mediante el análisis de sus propiedades físicas y mecánicas. La medición de las propiedades mecánicas requiere la aplicación de fuerzas externas que se describen como la relación entre las fuerzas o esfuerzos que actúan sobre un material y la resistencia del material a la deformación y/o fractura, considerando que la deformación puede o no ser evidentemente observada después de retirada la fuerza externa.

Una observación importante es el hecho de que las propiedades mecánicas están íntimamente relacionadas con la microestructura del material, por lo que la determinación de éstas es un aspecto importante en las diversas aplicaciones estructurales, en análisis de fallas y en el desarrollo de nuevos materiales.

Los ensayos empleados para la medición de las propiedades mecánicas, tales como el módulo elástico, el esfuerzo de fluencia, la deformación elástica y plástica, la dureza, la resistencia a la fatiga y la fractura, son diversos. Algunas de las pruebas mecánicas más comunes son las realizadas en especímenes sometidos a ensayos de tensión y compresión en condiciones cuasi estáticas. En estos ensayos no existe una gran variación de la velocidad con que la carga se aplica, he aquí donde las técnicas comunes se diferencian de los ensayos dinámicos.

### *2.3.3 Ensayo uniaxial de tensión*

El ensayo de tensión es el más utilizado en la prueba de materiales, el cual mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. El dispositivo de ensayo utilizado comúnmente es la maquina universal de tensión (figura 2-13), donde una probeta se coloca en la máquina y se le aplica una fuerza  $F$ , que se conoce como carga.

Para realizar el ensayo se emplean probetas de sección circular o rectangular según sea requerido, y para hacer comparables los resultados obtenidos de diversos ensayos se han establecido las probetas en dimensiones estándar. Las cabezas de las probetas tiene mayor

sección para evitar que la probeta rompa en las secciones de sujeción de la maquina [6], para medir la deformación del material causado por la aplicación de fuerza en la longitud calibrada se utiliza un extensómetro, de dicho ensayo se obtiene una curva esfuerzo-deformación, que posteriormente será explicada.

Se le llama ensayo uniaxial ya que las cargas aplicadas van en una sola dirección.

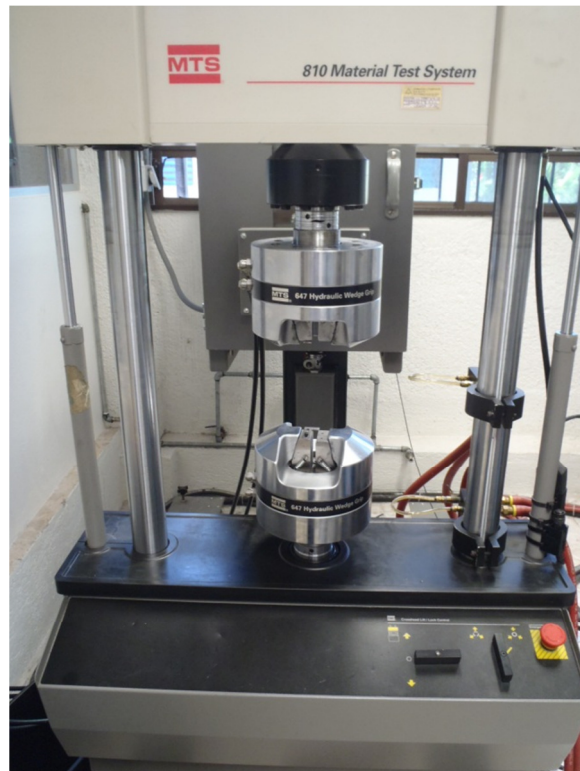


Figura 2-13.- Maquina universal MTS 810.

Las pruebas o ensayos cuasi-estáticos se caracterizan por la baja velocidad de deformación a la que se prueban los especímenes (materiales a probar), ya sean pruebas de tensión o de compresión. Cuando el cambio de velocidad de las fuerzas aplicadas es lento, uno puede considerar el proceso de deformación como una secuencia de pasos en que el cuerpo puede ser considerado en equilibrio estático.

Este tipo de ensayo (a tensión o compresión) permite caracterizar el material ensayado mediante el diagrama esfuerzo-deformación que se obtiene, porque del diagrama se puede obtener el módulo de elasticidad del material ensayado. El diagrama se obtiene mediante el equipo que se utiliza para realizar dicho prueba, ya que estos equipos que se utilizan para realizar ensayos cuasi-estáticos cuentan con sistema de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos va conectado a la máquina y a una computadora, este sistema permite que la computadora reciba todos los datos que se van generando durante la duración de la prueba; la computadora almacena los datos de carga a la que se va sometiendo el espécimen y el desplazamiento que este va sufriendo conforme la carga que está recibiendo. La computadora cuenta con un software que se sincroniza automáticamente con la máquina, este software al recibir los datos de carga y desplazamiento, automáticamente va generando la gráfica esfuerzo-deformación. Como ya se sabe la máquina cuenta con una celda de carga que es la que va proporcionando los datos de la carga aplicada, y un extensómetro que va midiendo el desplazamiento del material ensayado (en el caso de una prueba de tensión).

#### *2.3.4 Diagrama esfuerzo-deformación*

El desplazamiento por unidad de longitud se llama deformación. La deformación, en ingeniería, se define como un desplazamiento por unidad de longitud original[6]. Para carga uniaxial, la deformación se llama deformación normal, para distribución uniforme de deformación sobre una longitud inicial se aplica la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L_0}$$



En donde  $\delta$  es el incremento de la longitud, medida con respecto a la longitud original  $L_0$ . A la deformación normal se le llama, arbitrariamente, positiva para un aumento longitudinal y donde  $L_0$  se le llama longitud calibrada.

Todos los “medidores de deformación” o extensómetros e instrumentos similares miden desplazamiento (un cambio de longitud), la cual se debe dividir entre otra longitud medida para obtener deformación.

La fuerza por unidad de área de la sección transversal es llamada esfuerzo, que se define como una fuerza por unidad de área de sección transversal (sin carga). Para carga uniaxial pura, se aplica la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

En donde  $P$  es la fuerza axial, y  $A_0$  es el área original de la sección transversal, normal a la línea de acción de la fuerza.

Como la fuerza actúa normal al área, el esfuerzo se cataloga como esfuerzo normal.

El diagrama esfuerzo deformación nos puede brindar bastante información sobre el comportamiento del material, figura 2-14, como lo son la zona elástica, la pendiente, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último, la ruptura y las regiones elásticas y plásticas en caso de que el material cuente con ambas.

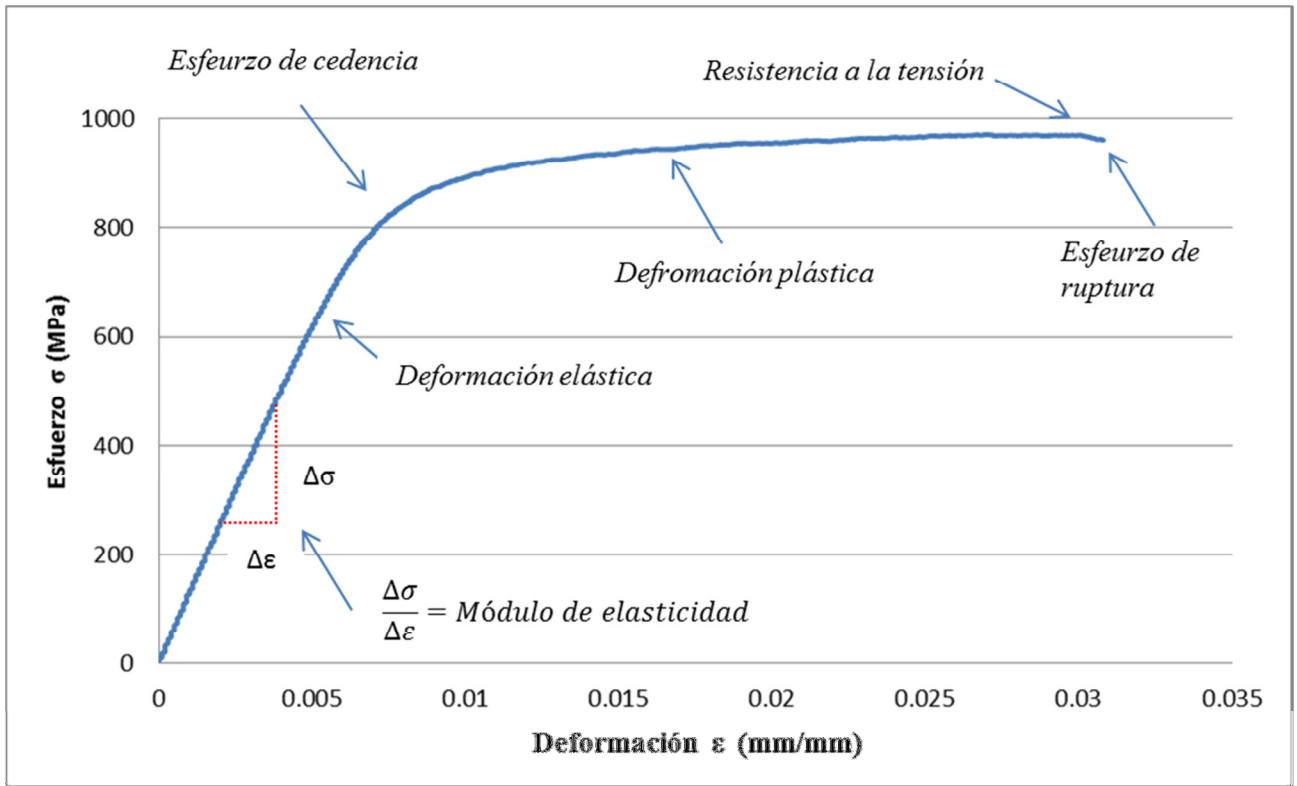


Figura 2-14.- Curva esfuerzo – deformación Ti6Al4V.

Para obtener el diagrama esfuerzo-deformación de un material, se realiza usualmente una prueba de tensión a una probeta del material, o en su defecto una prueba de compresión, cuando es necesario. En la figura 2-15, se muestra uno de los tipos de probeta que se utilizan para realizar la prueba de tensión.

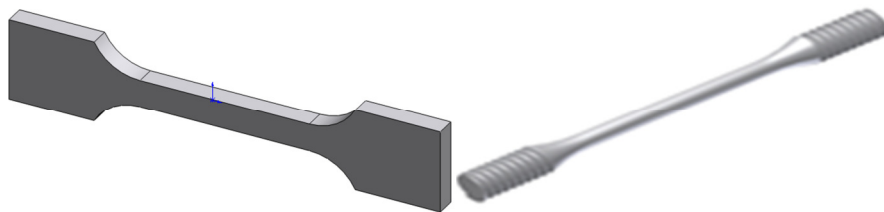


Figura 2-15.- Probetas típicas para prueba de tensión.

Otro parámetro muy importante, que caracteriza el comportamiento de un material y se saca de la curva del diagrama esfuerzo-deformación es el Módulo de Elasticidad.

Tanto el módulo de elasticidad como el límite elástico son distintos para los diversos materiales; el módulo de elasticidad es una constante elástica que, al igual que el límite elástico, puede calcularse empíricamente en base al ensayo de tensión o compresión del material.

#### *2.4 Fundamentos teóricos pruebas metalográficas*

La metalografía es el estudio de las características micro estructurales o constitutivas de un metal o aleación, las cuales están relacionadas con sus propiedades físicas químicas y mecánicas, un análisis metalográfico puede suministrar mucha información, el examen estructural de los materiales y aleaciones por vía microscópica es una de las herramientas principales que posee el estudio metalúrgico.

La importancia de la observación micrográfica está dada por la influencia que ejercen los componentes químicos de una aleación que pueden encontrarse en forma de una solución sólida homogénea, en forma de un compuesto intermetálico de composición química definida, dispersa en el seno de una solución sólida, en forma de una mezcla eutéctica, etc.

Estos componentes reciben el nombre de constituyentes metalográficos y de sus proporciones, formas y estados dependen las propiedades físicas de una aleación. Por lo tanto, el desarrollo de la técnica que nos permite observar dichos constituyentes deberá ser objeto de un trabajo consiente y delicado.

Para obtener un análisis es necesario tener muestras que sean representativas y que no tengan alteraciones debido a la extracción, manipulación o preparación del material.

El análisis metalográfico consiste en varios pasos:

El primer paso es determinar la zona micrográfica a estudiar y que deberá ser representativa del fenómeno a observar, teniendo en cuenta la forma, función y origen del material.

La muestra debe seleccionarse teniendo cuidado en los parámetros como la localización, el número de muestras y la orientación de la microestructura. Muchos materiales son homogéneos y tienen diversas propiedades en su volumen. La selección de la muestra debe dar una muestra significativa del material. El número de muestras requerido del tamaño y complejidad del espécimen, además de sus condiciones de servicio o uso. En general las secciones críticas son objeto de prueba. La orientación del plano de prueba depende del proceso de manufactura, forma del producto y características a ser estudiadas.

El corte es un paso muy delicado pues es aquí donde se puede hacer mucho daño físico a la muestra. En la mayoría de los casos es necesario cortar la muestra a un tamaño adecuado para su manejo. Para esto se pueden elegir una variedad de métodos pero el mejor es el que dañe menos a la muestra. La muestra puede ser dañada en la microestructura por calentamiento hasta una cierta profundidad y la profundidad del daño varía según la técnica de corte, dentro de las técnicas de corte las más usadas son la fractura, el cizallamiento, corte con sierra mecánica, corte abrasivo, corte con electro erosionado de hilo.

El montaje de la muestra es el paso siguiente para el cual se han desarrollado diversos materiales poliméricos, estos materiales se pueden clasificar en dos categorías: los que requieren calentamiento y presión y los solidifican en temperatura normal. El primer grupo se obtiene en forma de polvos y el segundo como líquidos. Los plásticos que requieren calentamiento y presión para solidificar pueden ser de dos tipos. Las resinas termoendurecibles que pueden ser sacadas del molde a la temperatura de moldeo.

Para los materiales que requieren calentamiento y presión es necesario utilizar una montadora de resina, existen montadoras automáticas que mantienen la presión y temperatura adecuadas durante un tiempo dado para después enfriar automáticamente el sistema.

El desbaste y pulido es una parte muy importante de la preparación de la muestra, pues si existe algún daño hecho por los cortes debe ser removido en este paso. El desbaste también daña la superficie entonces se deben usar abrasivos más finos cada vez. La superficie es preparada usando una secuencia graduada de papeles abrasivos, empezando por el más grueso, a menudo en el rango de 60 a 180 mallas y después progresivamente hasta 600 mallas o más

finos en algunos casos. Para minimizar el calor generado se usa agua durante el desbaste. Una variedad de medios de desbaste pueden ser usados incluyendo partículas de silicio, óxido de aluminio, esmeril, diamante. El desbaste es clasificado en grueso (hasta 150 mallas) o fino (de 180 a 600 mallas).

Como segunda etapa del desbaste se encuentra el pulido el cual tiene la finalidad de eliminar todas las rayas producidas por el desbaste, de tal forma que estas no interfieran al observar la microestructura. El pulido es clasificado en grueso y fino. El pulido grueso usa abrasivos en el rango de 30 a 3 micras mientras que para el pulido fino se usan abrasivos de 1 micra a más pequeñas. El pulido grueso envuelve uno o más pasos abrasivos y telas. El pulido fino también usa uno o más micro telas. Los materiales de estas telas pueden ser el nylon, seda, lona, pellón, paño de billar, fieltro rojo, selvyt, piel sintética, kitten ear, terciopelo o chemomet. Los abrasivos que se usan son la alúmina, el óxido de magnesio, pastas de diamante, etc.

Es necesario realizar un ataque en donde una superficie pulida revela ya una serie de hechos interesantes, como pueden ser grietas, inclusiones, fases (si su forma y color las hacen diferenciables), poros, etc. Pero, normalmente, la probeta hay que atacarla para "revelar" la microestructura (fases, límites de grano, impurezas, zonas deformadas, etc).

La elección de los reactivos de ataque y de los aumentos a los que serán observados los distintos constituyentes, están dentro de las variables que juegan en un análisis metalográfico, como son la calidad de lo que se quiere observar y la dimensión apropiada de su magnificación para interpretar el problema que se desea estudiar.

El ataque puede realizarse mediante diferentes formas, a saber:

- Ataque óptico: campo claro, campo oscuro, luz polarizada, contraste de fase y contraste por interferencia (óptica Nomarski).
- Ataque químico: para la gran mayoría de los materiales metálicos éste el método más empleado. Puede realizarse por frotamiento (empleando un algodón impregnado o un hisopo en el reactivo que se pasa sucesivamente por la superficie pulida) o mediante inmersión de la muestra en el reactivo. Inmediatamente después del ataque la probeta debe ser lavada con agua y secada con un chorro de alcohol y aire caliente.

- Ataque electrolítico: se coloca la muestra como ánodo en una solución del electrolito suspendida por un hilo de platino sujeta por pinzas conectadas al polo positivo de una batería.
- Ataque mecánico: se puede conseguir este efecto en muestras que contengan un componente duro, si el pulido de la superficie se hace de manera normal y luego se continúa sobre un pergamino baldó o almohadilla de paño, impregnado con un poco de sulfato de calcio, lavando con agua a intervalos.

Como paso final está la Microscopia que consta de varias técnicas de observación en diferentes tipos de microscopios siendo el más universal el microscopio óptico el cual posee numerosas aplicaciones. La aplicación más importante es la determinación de las fases estructurales presentes, el tamaño de grano, la constitución del metal (la constitución del metal es la caracterización física total del material las cuales consisten de las cualidades inherentes a las fases determinadas por las modificaciones y el medio y el modo y la manera en que estas fases están distribuidas en el material, composición y características). La observación microscópica es de importancia práctica porque la estructura y la constitución del material poseen una fuerte influencia sobre el comportamiento de los mismos.

Hay numerosas técnicas microscópicas que pueden ser usadas para la observación de la microestructura de los materiales y estas técnicas producen el contraste necesario para la observación de los especímenes. Los tipos de superficies examinadas por estas técnicas son las siguientes:

- Superficies pulidas (para la observación de inclusiones y precipitados)
- Superficies pulidas de metales ópticamente anisótropos.
- Relieves de superficies pulidas no atacadas.
- Superficies atacadas.

Las técnicas usadas están determinadas por la naturaleza del problema, la experiencia del investigador, y del equipo disponible. Los métodos microscópicos para la observación incluyen los siguientes:

- Iluminación en campo claro (método tradicional).
- Iluminación en campo oscuro.
- Luz polarizada.
- Contraste de fase.
- Métodos de interferencia.
- Filtros.

Se tiene otra poderosa herramienta para realizar análisis metalográficos, el microscopio óptico de barrido (SEM), que consiste de cuatro partes principales: una pistola de electrones, una unidad de demagnificación, una unidad de barrido y un sistema detector.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) consiste en la generación de una imagen de electrones secundarios o retrodispersados de la muestra a observar mediante el barrido de un haz de electrones acelerados y enfocados sobre su superficie. Los electrones reemitidos son colectados por un detector de estado sólido cuya señal eléctrica es informatizada. Esta técnica permite observar, además de la topografía, cambios en la densidad y composición superficial de la muestra hasta profundidades máximas del orden de 1  $\mu\text{m}$ .

Se puede concluir entonces, que el objetivo de la preparación de una muestra metalografía es la revelación de la estructura verdadera, llamando en teoría estructura verdadera a la cual no posea deformaciones, rayas, arranques de material, elementos extraños, aplastamientos, relieves, bordes redondeados y daños térmicos.

### *2.5 Fundamentos de fatiga*

A menudo un componente está sujeto a la aplicación de un esfuerzo inferior al esfuerzo de cedencia del material. Este esfuerzo cíclico puede ocurrir como resultado de rotación, flexión

o vibración. Aun cuando el esfuerzo este por debajo del límite elástico, el material puede fallar después de numerosas aplicaciones de este esfuerzo. Este tipo de falla se conoce como fatiga.

El ensayo de fatiga dice el tiempo o número de ciclos que resistirá una pieza, o la carga máxima permisible que se puede aplicar para prevenir la falla de un componente, la vida a fatiga indica cuanto resiste un componente a un esfuerzo en particular, la resistencia a la fatiga es el esfuerzo máximo con el cual no ocurrirá fatiga en un numero particular de ciclos.

La mayor parte de los materiales son sensibles a las muescas, siendo las propiedades a la fatiga particularmente sensibles a defectos en la superficie. Los defectos de diseño o de fabricación concentran los esfuerzos, reduciendo el esfuerzo vida y resistencia límite del material a la fatiga. Algunas veces la superficie del material debe pulirse finamente para minimizar la posibilidad de falla por fatiga. Ejemplos de piezas de máquinas en las cuales es común la fractura por fatiga son piezas móviles como ejes de transmisión de movimiento, barras de conexión y cajas de cambios.

Los fallos por fatiga usualmente ocurren en tres etapas [7]:

- 1.- Se inicia una micro grieta sobre la superficie, generalmente ya que ha pasado algún tiempo de la aplicación de la carga.
2. La grieta se propaga gradualmente por todo el espécimen conforme la carga sigue siendo aplicada.
- 3.- Finalmente cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado dañado y su área es muy pequeña para soportar la carga aplicada, ocurre la fractura súbita del material.

Una fractura por fatiga usualmente se origina en algún punto de concentración de la tensión como en alguna esquina, alguna melladura, o en una inclusión metálica o alguna grieta. Una vez nucleada, la grieta se propaga a través de la pieza debido a las tensiones cíclicas.

Durante este proceso de la fatiga, se crean las “marcas de playa” o conchas de almeja, finalmente la sección que queda se vuelve tan pequeña que no puede soportar la carga y ocurre



la fractura completa. Por tal motivo usualmente hay dos tipos distintos de superficies de fractura que se pueden reconocer; 1.- región superficial suave debida a la acción de fricción entre la región de superficie abierta mientras se propaga la grieta a través de la sección y otra área de superficie; 2.- rugosa que se forma por la fractura cuando la carga se vuelve demasiado grande para la sección que queda antes de la fractura final.

Algunos factores principales que afectan a la resistencia de la fatiga de un material son la concentración de esfuerzos debido a la presencia de mellas, agujeros, hendiduras o cambio bruscos en la sección, la rugosidad superficial es sumamente importante, en general cuanto mejor sea el acabado superficial (mas liso) mayor será la resistencia a la fatiga ya que las superficies rugosas cran concentradores de esfuerzos que facilitan la formación de grietas por fatiga, el medio ambiente debes de ser tomado en cuenta, ya que si se está presente un ambiente corrosivo durante la carga cíclica de un metal, el ataque químico acelerara considerablemente la velocidad a la cual se propagaran las grietas por fatiga.

Usualmente los resultados se presentan graficando el esfuerzo en función del número de ciclos a los cuales ha ocurrido la falla, en las gráficas llamadas curvas S-N.

### 2.5.1 Descripción de cargas cíclicas

Algunas aplicaciones prácticas y también muchas pruebas de fatiga de materiales, involucran esfuerzos cíclicos entre los niveles máximos y mínimos que son constantes. Esto es llamado amplitud de esfuerzo constante, y se muestra en la figura 2-16. El rango de esfuerzos,  $\Delta\sigma$ , es la diferencia entre los valores máximo y mínimo. Promediando los valores máximo y mínimo da el esfuerzo medio,  $\sigma_m$ . El esfuerzo medio puede ser cero, como se muestra en la Figura 2-16(a), pero no siempre es así, como en 2-16(b). La mitad del rango es llamado amplitud de esfuerzo,  $\sigma_a$ , así que ésta es la variación del medio. Las expresiones básicas para estas definiciones son:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}$$

El término esfuerzo alternante es usado por algunos autores y tiene el mismo significado que amplitud de esfuerzo. Y también es usual notar que:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad \sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

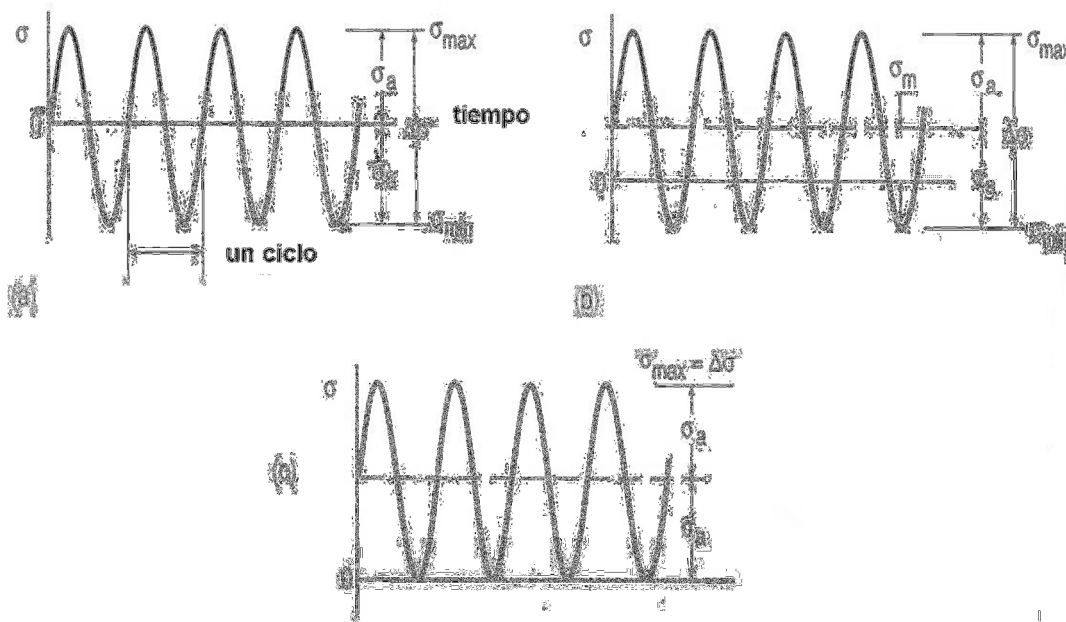


Figura 2-16.- Ciclos con amplitud constante y sus respectivas nomenclaturas. A) Esfuerzos completamente invertidos,  $\sigma_m=0$ , B) Esfuerzo medio  $\sigma_m \neq 0$ , C) Esfuerzo de cero a tensión,  $\sigma_{min}=0$ .

Los signos de  $\sigma_a$  y  $\Delta\sigma$  siempre son positivos, ya que  $\sigma_{max} > \sigma_{min}$ , donde tensión es considerado positivo. Las cantidades  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$  y  $\sigma_m$  pueden ser también positivas o negativas. Algunas razones de ciertos pares de variables son a veces usadas.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

Donde R es llamada razón de esfuerzos y A razón de amplitud. Algunas relaciones adicionales derivadas de las ecuaciones anteriores también son usadas:

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{max}(1 - R), \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2}(1 + R) \quad (a, b)$$

$$R = \frac{1 - A}{1 + A}, \quad A = \frac{(1 - R)}{(1 + R)} \quad (c, d)$$

### 2.5.2 Esfuerzos Puntuales vs. Esfuerzos Nominales

Es importante distinguir entre el esfuerzo en un punto,  $\sigma$ , y el esfuerzo nominal o promedio,  $S$ , y por esta razón usamos dos símbolos diferentes. El esfuerzo nominal ( $S$ ) es calculado con la carga o momento y solo es igual a  $\sigma$  en ciertas situaciones. Considere los tres casos de la Figura 2-17. Para carga axial simple (a), el esfuerzo  $\sigma$  es el mismo en todo y también es igual al valor promedio  $S=P/A$ , donde  $A$  es el área de sección transversal.

Para la flexión, es conveniente calcular  $S$  de la ecuación de flexión elástica,  $S=Mc/I$ , donde  $c$  es la distancia al eje neutro desde la orilla e  $I$  es el momento de inercia de área sobre el eje flexionante. Aquí,  $\sigma=S$  en la orilla del miembro flexionado.

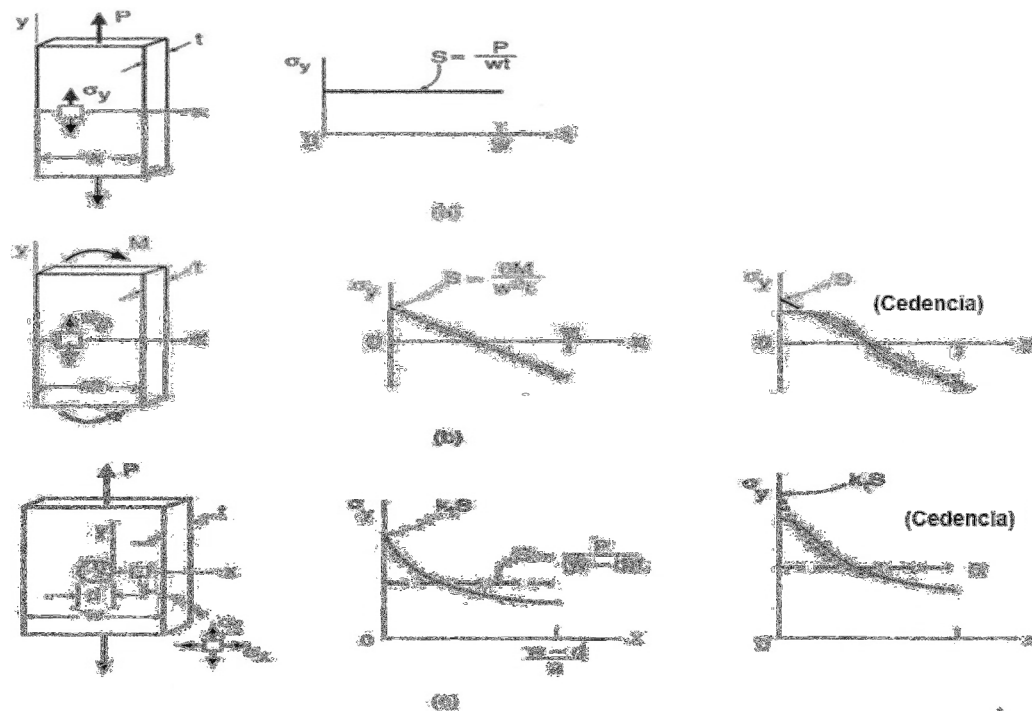


Figura 2-17.- Esfuerzos actual o nominal para A) tensión simple, B) flexión, y C) miembro muescado. Las distribuciones de esfuerzos actuales  $\sigma_y$  vs.  $x$  se muestran como líneas sólidas, y las distribuciones hipotéticas asociadas con el esfuerzo nominal  $S$  como líneas interrumpidas. En (c), se muestra con líneas punteadas la distribución de esfuerzo que ocurrirá si no hubiera fluencia.

### 2.5.3 Las curvas $S - N$

Los datos del ensayo de fatiga se dibujan en estas curvas un ejemplo de ellas se da en la figura 2-18, en las cuales la tensión  $S$  que causa la fractura se presenta respecto al número de ciclos  $N$  a los cuales ocurre la fractura.

Las curvas  $S-N$  o curvas de Wöhler [7], se obtiene experimentalmente tras someter a distintas muestras a estados cíclicos de carga y establecer la relación de perdida de resistencia en función del número de ciclos de carga. La definición de la carga, se realiza mediante su periodo, su relación de amplitudes  $\Delta\sigma$  o la relación de reversión :  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$  . [7]

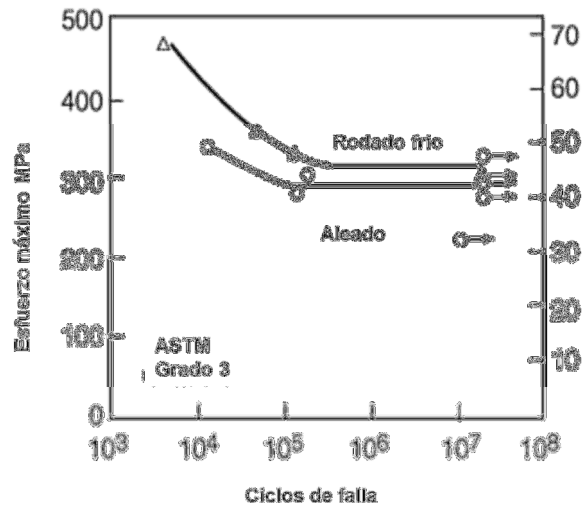


Figura 2-18.- Curvas S-N ( $R = -1$ ) [8].

#### 2.5.4 La naturaleza física del daño por fatiga

Cuando examinamos un material a una escala lo suficientemente pequeña, todos los materiales son anisotrópicos y no homogéneos. Por ejemplo, los metales de ingeniería están compuestos de un agregado de granos de cristal pequeños, dentro de cada grano el comportamiento es anisotrópico debido a los planos cristalográficos, y si un límite de grano es cruzado, la orientación de esos granos cambia. Existen no homogeneidades, no solo debido a la estructura granular, esta también puede ser ocasionada por pequeñas vacancias o partículas de una composición química diferente dentro del material, tales como inclusiones de silicato o alúmina en el acero. Fases múltiples, involucrando límites de granos u otras regiones de mayor composición química. Como resultado de tales microestructuras no uniformes, los esfuerzos son distribuidos de manera no uniforme cuando observamos a pequeña escala la estructura. Estas son las regiones donde se concentran los esfuerzos y son usualmente los puntos donde los daños por fatiga empiezan, una pequeña grieta se desarrolla en las vacancias, inclusiones, bandas de deslizamiento, límites de grano o rasguños, los cuales pueden ser defectos agudos inicialmente presentes que son en esencia una grieta. Estas grietas crecen en planos generalmente normales a los esfuerzos de tensión hasta que causan la falla, a veces se unen con otras grietas en el proceso. A continuación se muestran las fotografías del daño progresivo por fatiga en la Figura 2-19.

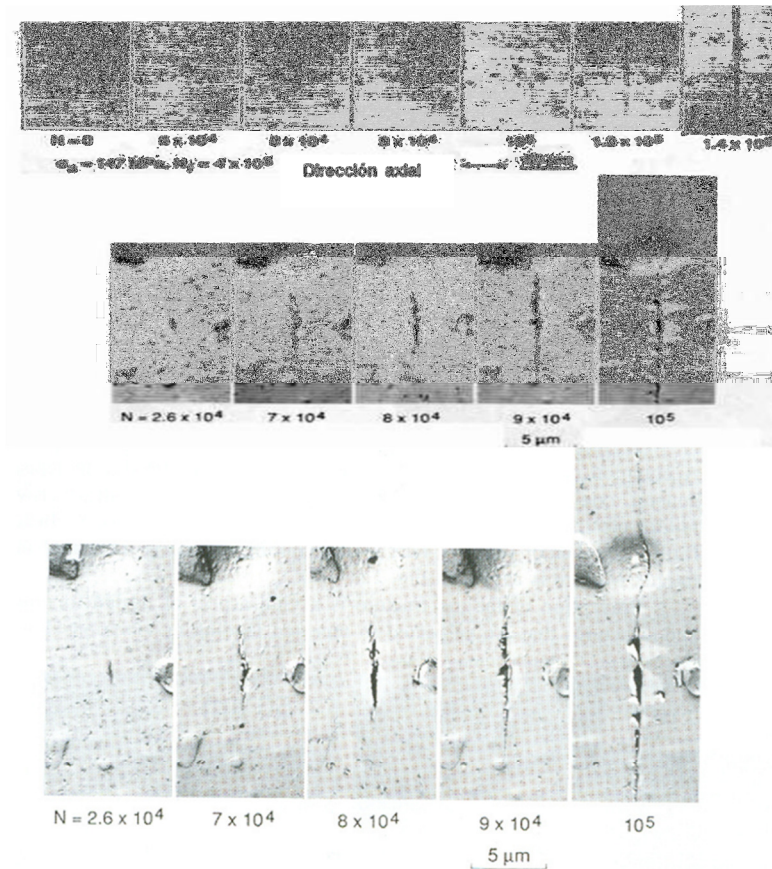


Figura 2-19.- Secuencia fotográfica de la aparición y el crecimiento de una grieta durante una carga cíclica. Se aprecia que hasta  $N=1.4 \times 10^5$  aparece la entonces microgrieta.

### 2.5.5 La Regla Palmgren-Miner

Considere una situación de carga de amplitud variable como se ilustra en la Figura 2-20. Una cierta amplitud de esfuerzo  $\sigma_{a1}$  es aplicado para un número de ciclos  $N_1$ , donde el número de ciclos a la falla de la curva S-N para  $\sigma_{a1}$  es  $N_{f1}$ . La fracción de la vida es entonces  $N_1/N_{f1}$ . Ahora consideremos otra amplitud de esfuerzo  $\sigma_{a2}$ , correspondiendo a  $N_{f2}$  en la curva S-N, se aplicó para  $N_2$  ciclos. Entonces se usa una fracción adicional de la vida  $N_2/N_{f2}$ . La regla Palmgren-Miner simplemente establece que la falla por fatiga se espera cuando tales fracciones de vida suman la unidad, esto es, cuando se alcanza el 100% de vida.

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots = \sum \frac{N_j}{N_{fj}} = 1$$

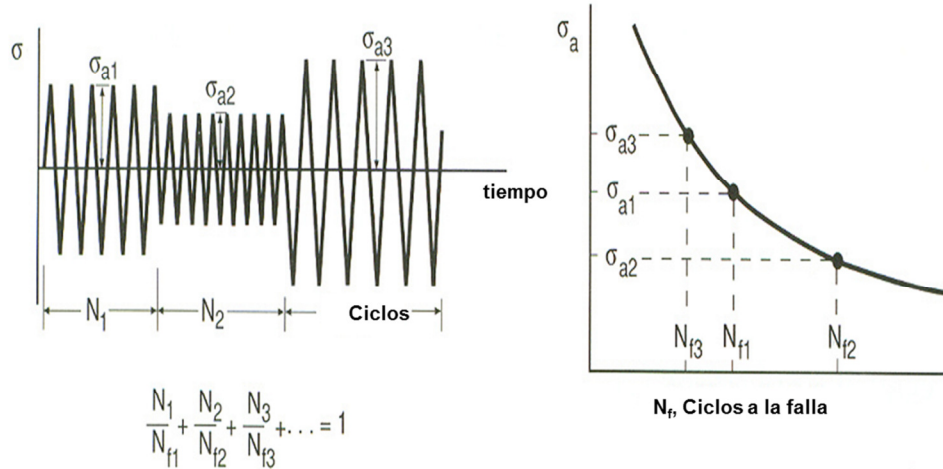


Figura 2-20.- Uso de la regla Palmgren-Miner para la predicción de vida para una amplitud variable de carga completamente invertida.

Frecuentemente, una secuencia de cargas de amplitud variable se repite un número de veces. Bajo estas circunstancias, es conveniente sumar razones de ciclo sobre una repetición de la historia, y multiplicando ésta por el número de repeticiones requeridas para que la suma alcance la unidad.

$$B_f = \left[ \sum \frac{N_j}{N_{fj}} \right] = 1$$

Donde  $B_f$  es el número de repeticiones a la falla. Esto se muestra en la Figura 2-21.

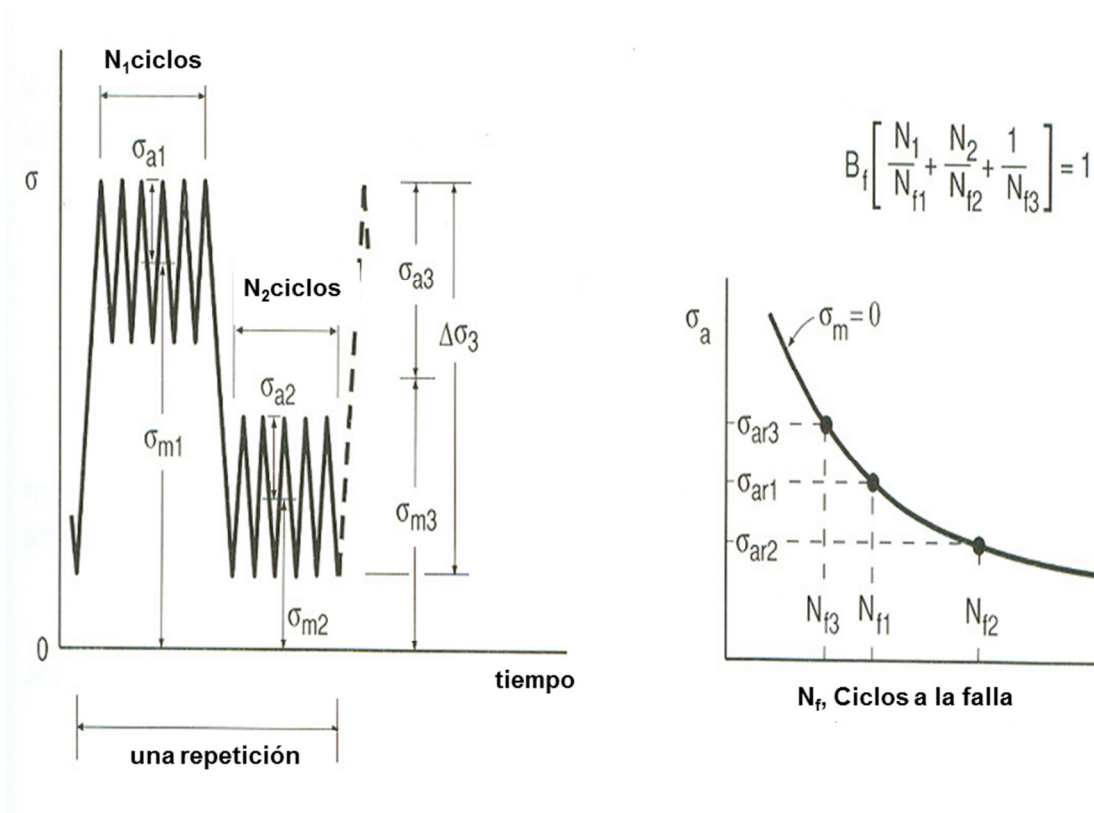


Figura 2-21.- Predicción de vida para una historia de esfuerzos repetidos con cambio de valor medio.

### 2.5.6 Fatiga en soldaduras

Partes y estructuras son soldadas a menudo entre si de alguna manera, usualmente debido al costo y a la eficacia de peso. Aceros, seguido por las aleaciones de aluminio, son los metales soldados con mayor frecuencia, mientras que algunos metales no pueden ser soldados efectivamente. Las soldaduras presentan dificultades debido a las macro y micro discontinuidades, esfuerzos residuales, y posible desalineamiento. Las soldaduras son frecuentemente el lugar principal de las fallas por fatiga. La soldadura en sí es un procedimiento complejo que puede resultar en un amplio rango de resistencia a la fatiga. La calidad de la mano de obra y el diseño determinan la resistencia a la fatiga de las soldaduras. Un cuidadoso diseño y procesado de piezas soldadas pueden desarrollar la misma resistencia a la fatiga como una parte forjada y mecanizada de una pieza, y a un costo mucho menor [22].



### 2.5.6.1 Curva Esfuerzo-Ciclos de vida para uniones soldadas (S-N)

La mayoría de los aceros usados en soldaduras tienen resistencia a la fluencia por debajo de 700 MPa. Aún con fuerzas por encima de este valor, mucha información indica que para una soldadura transversal a tope o con filete, como soldados los puntos de fatiga a amplitud constante de  $10^6$  ciclos o más son bastante independientes de la última resistencia a la tensión del material. La geometría de la muesca de la soldadura, esfuerzos residuales que pueden o no relajarse, otras discontinuidades, pérdida de calor, y el ablandamiento o endurecimiento cíclico son las causas de este comportamiento. Las concentraciones geométricas del esfuerzo tienen un efecto significativo en la resistencia a la fatiga de la soldadura. La influencia del ángulo de reforzamiento para soldaduras transversales a tope se muestra en la Figura 2-22. Aquí se ve que un factor de casi 2 existe para la resistencia a la fatiga en  $2 \times 10^6$  ciclos como el ángulo de reforzamiento varía de  $100^\circ$  a  $150^\circ$ . El decremento de altura  $h$  de la soldadura transversal a tope reforzada mejora continuamente la resistencia a la fatiga da la resistencia última a la tensión del acero, como se muestra en la Figura 2-23. La influencia del esfuerzo medio en la resistencia a la fatiga de soldaduras es similar a la de otros componentes con muescas.

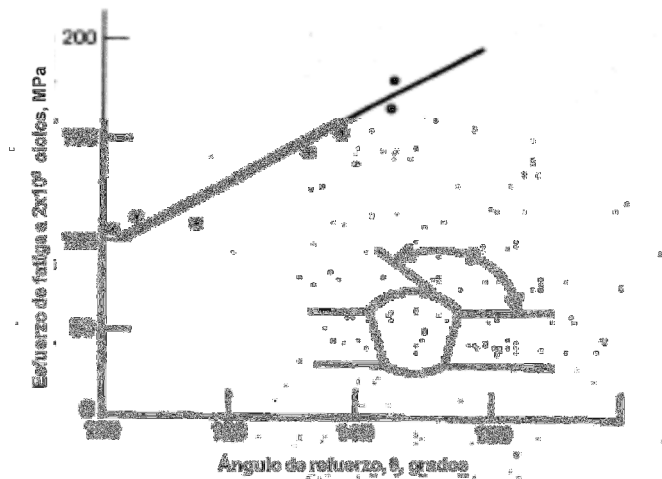


Figura 2-22.- Influencia de la forma de reforzamiento en la resistencia a la fatiga de soldaduras transversales a tope.

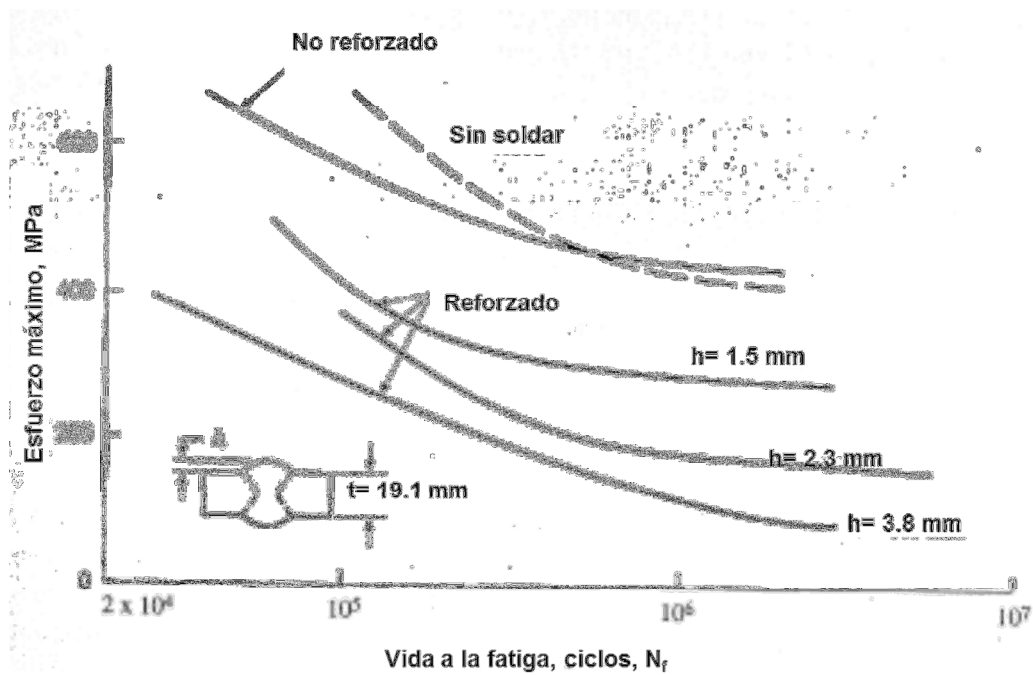


Figura 2-23.- Curvas S-N para soldaduras transversales a tope de acero al carbono  $S_u=785$  MPa,  $R=0$  [22].

### 2.5.6.2 Mejora de la resistencia a la fatiga en soldadura

Hay esencialmente 4 formas básicas de mejorar la resistencia a la fatiga en las soldaduras:

1. Mejorar el procedimiento de soldadura actual.
2. Modificar la microestructura del material.
3. Reducir las discontinuidades geométricas.
4. Inducir esfuerzos residuales a compresión en la superficie.

Estos cuatro métodos en realidad se superponen, desde la mejora del proceso de soldadura se puede mejorar la microestructura, reducir la concentración de esfuerzos, y alterar los esfuerzos residuales. Por lo tanto, en la mejora de la resistencia a la fatiga en soldadura, el mayor énfasis es en reducir las discontinuidades geométricas y el uso de esfuerzos residuales a compresión.

### 2.5.6.3 Estimación de vida a la fatiga en soldadura

Existen varios métodos para estimar la vida a la fatiga en uniones soldadas, un método involucra el uso del comportamiento de la curva S-N y el diagrama de Haigh o el diagrama modificado de Goodman para esfuerzos medios. Otro método usa el comportamiento de la curva  $\epsilon$ -N con un análisis de modelo muesca deformación y el modelo Morrow o SWT para esfuerzos medios. Un tercer método involucra la integración  $da/dN-K\Delta$  con Forman, Walker, u otros modelos para esfuerzos medios. El enfoque de la curva S-N desarrollada de las pruebas de fatiga de las soldaduras es históricamente, y en la actualidad, el método de diseño más común para fatiga en soldaduras.

## 2.6 Procesos de soldadura

Soldadura es el procedimiento por el cual dos o más piezas de metal se unen por medio de aplicación de calor, presión, o una combinación de ambos, con o sin aporte de otro metal, llamado metal de aporte, cuya temperatura de fusión es inferior a la de las piezas que se han de soldar [25]. La soldadura es fundamental para la expansión y productividad de las industrias. Actualmente es uno de los principales medios de fabricación y reparación de productos metálicos. Es casi imposible citar una industria, grande o pequeña, que no utilice algún tipo de soldadura. La industria ha encontrado en la soldadura un procedimiento eficiente, seguro y económico para la unión de metales en operaciones de fabricación y en la mayoría de las construcciones [26].

### 2.6.1. Tipos de soldaduras

Sobre las distintas uniones (a tope, a solape, en ángulo interior, en ángulo exterior y uniones cantos), que se muestran en la Figura 2-24, se pueden realizar los siguientes tipos de soldaduras:

- Soldadura de recargue: consiste en depositar una o más capas de material de aporte, mediante cordones o pasadas, sobre una superficie continua, con vistas a conseguir unas dimensiones o características superficiales específicas.
- Soldadura mediante cordones en ángulo: es la que se emplea para conseguir uniones a solape en ángulo interior y exterior. El cordón presenta una sección aproximadamente triangular y se deposita entre dos superficies formando ángulo recto.
- Soldadura a tope: es la que se deposita en el espacio que queda entre las piezas a soldar, que están dispuestas una en prolongación de la otra. Según la preparación de los bordes se pueden distinguir las siguientes soldaduras a tope: con bordes rectos, en U, en doble U, en J, etc.
- Soldadura de entalla o de tapón: se emplean para enlazar piezas solapadas mediante el depósito de cordones en el interior de ranuras o agujeros realizados sobre alguna de las piezas. Tanto por su disposición como su comportamiento, son muy parecidas a los remaches.

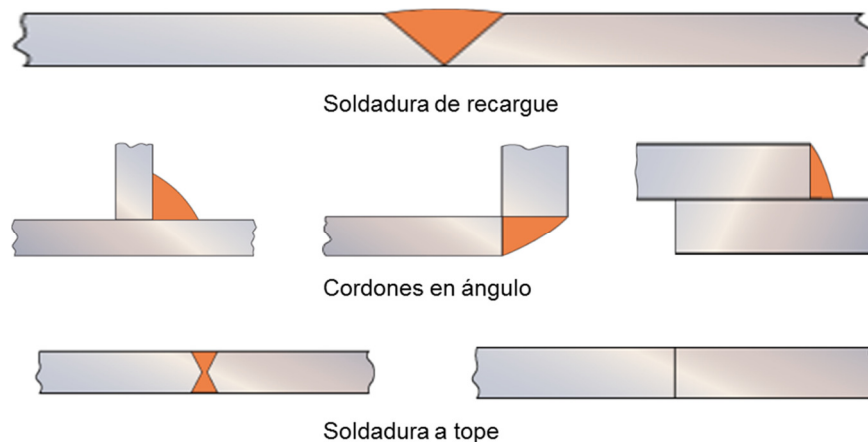


Figura 2-24.- Representación esquemática de los tipos de soldaduras.

### 2.6.2 Selección del tipo de junta

En la elección del tipo de junta más adecuada para cada trabajo, se deben de tener en cuenta numerosos factores. En general, se pueden citar cinco consideraciones básicas para la selección de cualquier junta soldada [26]:

1. Tener en cuenta si el esfuerzo es de tensión, compresión, flexión, fatiga o de choque.
2. Considerar si la carga es estática, de impacto o variable.
3. Dirección de la carga en relación a la junta.
4. Espesor de las piezas.
5. Costo de preparación de la junta.

### 2.6.3 Geometría de la junta

La geometría adecuada de la junta se basa en los siguientes principios:

1. La preparación debe ser uniforme a lo largo de toda la junta. En las uniones a solape y en la mayor parte de uniones en ángulo, las piezas deben acoplarse firmemente, sin separación, en toda su longitud. En las uniones a tope, debe vigilarse la uniformidad de chaflanes y separaciones.
2. Es fundamental trabajar con un ángulo de chaflán suficiente, como se muestra en la Figura 2-25(a). Un ángulo insuficiente dificulta la entrada del electrodo hasta el fondo de la junta. Una junta profunda y estrecha puede quedar con falta de penetración, siendo además muy sensible a la fisuración.
3. Una abertura excesiva, como se muestra en la Figura 2-25(b), desperdicia material de aportación. Dado que el material de aportación, tanto en forma de electrodos como de alambres, es relativamente caro, cualquier aumento de ángulo de los bordes supone un aumento en el consumo del material de aportación y mayor tiempo para depositarlo.

4. Para conseguir una penetración completa es necesario dejar una separación suficiente, como se ve en la Figura 2-25(c). Una junta soldada sin una penetración adecuada no será capaz de soportar las cargas que se la apliquen. Aunque la penetración completa depende en gran medida de la habilidad del soldador, es siempre fundamental el preparar los bordes con una separación adecuada.
5. Para conseguir una unión de calidad con una buena velocidad de soldeo, deben prepararse los bordes con un talón de unos 3 mm o, en caso contrario, utilizar un soporte por el reverso, como se muestra en la Figura 2-25(d). Los preparativos sin talón hacen más lenta y costosa la ejecución del cordón de penetración. Sin embargo, en las uniones a tope con bordes X, se puede facilitar la preparación prescindiendo del talón y compensándolo con una separación de bordes algo menor [26].

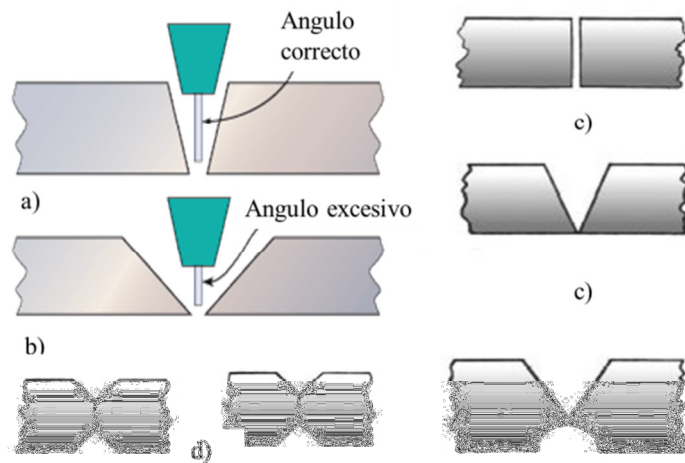


Figura. 2-25.- Representación esquemática de la geometría de las juntas A) apertura adecuada, B) apertura excesiva, C) separación de la junta, (D) altura del talón.

#### 2.6.4 Soldadura GTAW

En el proceso GTAW (TIG) se genera un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno virtualmente no consumible y la piletta fundida de metal base. En este proceso se usa un gas de protección suministrado externamente y sin la aplicación de presión. La adición de metal de

aporte es opcional y se realiza en forma externa. La Figura 2-26 muestra esquemáticamente el proceso de soldadura TIG. Este, ha recibido el nombre de Soldadura de Arco por tungsteno y protección de gas inerte (TIG), pero la terminología empleada por AWS es GTAW (“Gas Tungsten Arc Welding”) porque en algunas aplicaciones es posible usar mezclas de gases protectores que no son inertes [27].

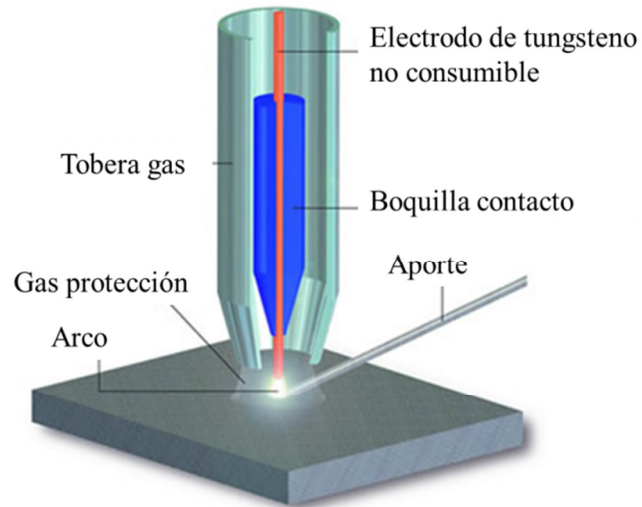


Fig. 2-26.- Esquema del proceso TIG.

Los beneficios más importantes de este proceso son:

- Produce soldaduras de buena calidad, generalmente libre de defectos.
- Está libre de salpicaduras que ocurren con otros procesos de arco.
- Puede utilizarse con metal de aporte o sin él, según requiera la aplicación específica.
- Ofrece un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
- Puede producir soldaduras económicas a altas velocidades.
- Las fuentes de potencia tienen costos relativamente bajos.
- Permite controlar de manera precisa las variables de soldadura.

-Sirve para soldar casi todos los metales incluso aleaciones disímiles.

-Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y la adición de metal de aporte.

Algunas de las limitaciones y desventajas del proceso son:

-Para espesores mayores de 10 mm (3/8") resulta más costoso que los procesos con electrodo consumibles.

-Es difícil proteger la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de aire.

-Puede haber inclusiones de tungsteno.

-Una inadecuada posición del metal de aporte podrá producir contaminación del mismo.

-Puede haber contaminación o porosidad causada por fuga del refrigerante en el caso de antorchas refrigeradas por agua.

-Puede haber golpe, o desviación del arco, al igual que en los otros procesos por arco.

#### *2.6.4.1 Fundamentos del proceso*

El proceso TIG se basa en el uso de un electrodo de tungsteno (o una aleación de tungsteno) no consumible sostenido en una antorcha (soplete). Se alimenta un gas de protección para proteger el electrodo, la pileta líquida y el metal de soldadura durante la solidificación de la contaminación atmosférica. El arco eléctrico se produce por el paso de la corriente a través del gas de protección ionizado, que conduce la electricidad. El arco establece entre la punta del electrodo y la superficie de trabajo. El calor generado funde el metal base. Una vez establecido el arco y el charco de soldadura, el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme.



#### 2.6.4.2 Equipamiento

Todos los sistemas de soldadura TIG tienen en común cuatro componentes básicos, los cuales se muestran en las Figuras 2-26 y 2-27 Soplete o antorcha, control, fuente de poder, sistema de alimentación del gas de protección.

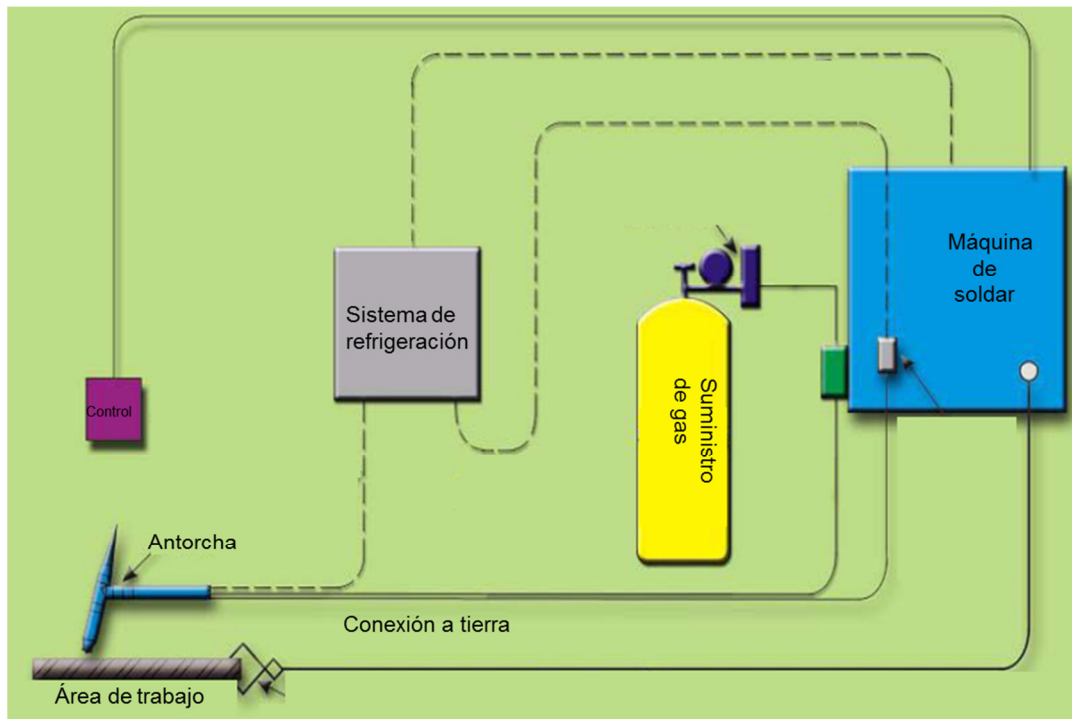


Figura 2-27.- Esquema del equipo para la soldadura TIG.

#### 2.6.4.3 Antorcha

Las antorchas de TIG sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura y conducen el gas protector a la zona de soldadura. La elección de una antorcha se basa en la corriente máxima de soldadura que pueden transportar sin sobrecalentarse. La mayoría de las antorchas permiten manejar electrodos de distintos tamaños para un intervalo dado de boquillas. En función de la corriente máxima de trabajo las antorchas podrán ser

refrigeradas con agua o con gas, estos últimos eliminan el calor por medio del gas de protección y están limitados a una corriente de soldadura de 200A. Los accesorios que usan las antorchas son el mandril y la boquilla, estos sirven para sujetar el electrodo y para dirigir el gas de protección a la zona de la soldadura respectivamente [27]. La Tabla 2.4 muestra algunos tamaños de la boquilla según el diámetro del electrodo [26].

Tabla 2-4.- Boquillas para soldadura TIG [26].

ELECTRODO DE TUNGSTENO Diámetro (mm)	BOQUILLA Diámetro (mm)
1.5	6 a 10
2.5	10 a 12
3	12 a 14
5	14 a 20

#### 2.6.4.4 Electrodo

Por definición, los electrodos utilizados en soldadura GTAW son no consumibles. Se impone, la utilización de un metal con un punto de fusión muy elevado, capaz de soportar temperaturas del orden de 4000°C que aparecen en el arco. Por otra parte, la naturaleza, el diámetro y la limpieza del electrodo y la naturaleza de la corriente utilizada, tienen una gran influencia sobre la calidad del trabajo y la estabilidad del arco. El tungsteno responde perfectamente a la exigencia de soportar temperaturas elevadas, a la vez de que tiene la ventaja de poseer una emisión termoiónica importante. Por este motivo, todos los electrodos que se utilizan son de tungsteno. Se puede incluso reforzar la emisión electrónica de los electrodos añadiendo al tungsteno óxidos de torio, circonio, lantano o de cerio en cantidades que van del 0.15 al 4.2% según los electrodos y el elemento a adicionar. La Tabla 2-5 muestra la composición química y el sistema de clasificación por código de color que es ampliamente utilizado para los electrodos de tungsteno. Estos activantes de emisión facilitan el cebado del arco, mejoran la estabilidad, aumentan la duración de vida de los electrodos y reducen riesgos de contaminación de la soldadura por inclusiones de tungsteno. Por otra parte, a diámetro igual,

los electrodos conteniendo óxidos que les permiten soportar una intensidad de corriente más elevada que la del tungsteno puro [25].

Tabla 2-5.- Código de color y elementos de aleación del tungsteno [25].

Clasificación AWS	Color	Elemento de aleación	Oxido de aleación	Porcentaje de oxido
WWP	Verde	---	---	---
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO <sub>2</sub>	2
EWLa-1	Negro	Lantano	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO <sub>2</sub>	1
EWTh-2	Rojo	Torio	ThO <sub>2</sub>	2
EWZr-1	Marrón	Zirconio	ZrO <sub>2</sub>	0.25
EWG	Gris	---	---	---

Las varillas de tungsteno puro funden a 3400°C, y es necesario que el extremo de la varilla sea redondeado, se utiliza fundamentalmente con corriente directa en la soldadura de titanio y sus aleaciones. El tungsteno aleado con torio tiene un punto de fusión de 4000°C, y es necesario que el extremo de la varilla esté afilado, se utiliza en la soldadura con corriente continua de aceros al carbono, baja aleación, inoxidable, cobre, etc. El tungsteno aleado con circonio funde a 3800°C, y es válido para la soldadura tanto en corriente continua como alterna, se utiliza para soldar metales ligeros como aluminio y magnesio, donde es necesario evitar la contaminación del metal de aporte.

#### 2.6.4.4.1 Extensión del electrodo

La Extensión del Electrodo es la distancia entre el extremo de la boquilla de contacto y la punta del electrodo, cuando se aumenta la extensión del electrodo se produce un aumento en su resistencia eléctrica. El calentamiento por resistencia, a su vez, hace que la temperatura del

electrodo se eleve, lo que resulta en un pequeño incremento de la tasa de fusión del electrodo. En general, la mayor resistencia eléctrica produce una caída de voltaje mayor entre la punta del electrodo y la pieza de trabajo. Esta situación es censada inmediatamente por la fuente de potencia, la cual compensa este aumento con una reducción en la corriente. Esto de inmediato reduce la tasa de fusión del electrodo y permite que se acorte la longitud física del arco. En consecuencia, a menos que haya un incremento de voltaje en la máquina de soldar, el metal de aporte se depositará en un cordón angosto y de corona alta [28].

#### *2.6.4.4.2 Orientación del electrodo.*

Como en todos los procesos de soldadura por arco, la orientación del electrodo con respecto a la junta a soldar afecta la forma del cordón de soldadura y la penetración.

Este efecto sobre el cordón de soldadura es mayor que el del voltaje de arco o el de la velocidad de avance. La orientación del electrodo se describe de dos maneras: primero, por la relación entre el eje del electrodo y la dirección de desplazamiento (ángulo de desplazamiento) y segundo, con el ángulo entre el eje del electrodo y la superficie de la pieza de trabajo (ángulo de trabajo). Cuando el electrodo apunta en la dirección opuesta a la dirección del desplazamiento, la técnica se denomina soldadura de revés con ángulo de arrastre. Cuando el electrodo apunta en la dirección del desplazamiento, la técnica se conoce como soldadura de derecha o avance con ángulo de empuje.

Cuando el electrodo se saca de la perpendicular dándole un ángulo de ataque y con todas las demás condiciones sin alteración, la penetración disminuye y el cordón de soldadura se hace más ancho y plano. La máxima penetración en la posición plana se obtiene con la técnica de arrastre, empleando un ángulo de arrastre de unos  $25^\circ$  con respecto a la perpendicular. Esta técnica también produce un cordón de soldadura más convexo y angosto, un arco más estable. Para todas las posiciones, el ángulo de desplazamiento que generalmente se utiliza es un ángulo de arrastre que esté entre  $5^\circ$  y  $15^\circ$  con el fin de tener un buen control y protección del charco de soldadura [28].

#### 2.6.4.5 Fuente de poder

La fuente de poder utilizadas en TIG son las de corriente constante. La potencia requerida para soldar pueden obtenerse de fuentes transformador rectificador o rotatorias CA o CC. Casi todas las fuentes disponen de rampas de ascenso y descenso de arco, programas para pulso de arco, etc. Las fuentes de potencia para TIG suelen tener características estáticas de caída o de corriente prácticamente constante. La Tabla 2-6 muestra los rangos típicos de corrientes para los electrodos de tungsteno.

Tabla 2-6. Rangos típicos de corrientes para electrodos de tungsteno [27].

Diámetro del Electrodo		Corriente continua (CC)		Corriente Alterna (CA)					
		Polaridad Negativa	Polaridad Positiva	Onda No Balanceada			Onda Balanceada		
In	mm	EWP EWTh-1 EWTh-2 EWTh-3	EWP EWTh-1 EWTh-2 EWTh-3	EWP	EWTh-1 EWTh-2 EWZr	EWTh-3	EWP	EWTh-1 EWTh-2 EWZr	EWTh-3
.01	.26	+ de 15	---	+ de 15	+ de 15	---	+ de 15	+ de 15	---
.02	.51	5 - 20	---	5 - 15	5 - 20	---	10 - 20	5 - 20	10 - 20
.04	1.02	15 - 80	---	10 - 60	15 - 80	10 - 80	20 - 30	20 - 60	20 - 60
1/16	1.59	70 - 150	10 - 20	50 - 100	70 - 150	50 - 150	30 - 80	60 - 120	30 - 120
3/32	2.38	150 - 250	15 - 30	100-160	140 - 235	100 - 235	60 - 130	100 - 180	60 - 180
1/8	3.18	250 - 400	25 - 40	150-210	225 - 325	150 - 325	100 - 180	160 - 250	100 - 250
5/32	3.97	400 - 500	40 - 55	200-275	300 - 400	200 - 400	160 - 240	200 - 320	160 - 320
3/16	4.76	500 - 750	55 - 80	250-350	400 - 500	250 - 500	190 - 300	290 - 390	190 - 390
1/4	6.35	750 - 1000	80 - 125	325-450	500 - 630	325 - 630	250 - 400	340 - 525	250 - 525

##### 2.6.4.5.1 Polaridad

El término polaridad se utiliza para describir la conexión eléctrica de la pistola de soldadura con relación a las terminales de una fuente de potencia que produzca corriente continua. Cuando el cable de la pistola se conecta a la terminal positiva de la máquina, la polaridad es

conocida como corriente directa electrodo positivo (DCEP), también conocida como polaridad invertida. Esta condición proporciona un arco estable, una transferencia suave del metal de soldadura, salpicaduras relativamente bajas, buenas características del cordón de soldadura y una mayor profundidad de la penetración para un amplio rango de corrientes de soldadura.

La polaridad directa; es decir, corriente continua electrodo negativo (DCEN), es raramente utilizada porque la transferencia por spray axial no es posible. La polaridad directa tiene la clara ventaja de las altas tasas de fusión que no pueden ser explotadas porque la transferencia es globular [28], es decir la manera en la cual el metal es transferido desde el alambre hasta la soldadura fundida ya que en la transferencia globular el proceso ocurre cuando las gotas del metal fundido son lo suficientemente grandes para caer al charco de la soldadura por la influencia de la fuerza de gravedad.

#### 2.6.4.5.2 Corriente continua

Si se usa CC el electrodo puede conectarse al terminal positivo o negativo. En casi todos los casos se elige que el electrodo sea negativo (cátodo). Con esta polaridad los electrones fluyen del electrodo al trabajo y los iones positivos se transfieren del trabajo al electrodo. Cuando el electrodo es polo positivo (ánodo), las direcciones de los electrones e iones se invierte, como se muestra en la Figura 2-28.

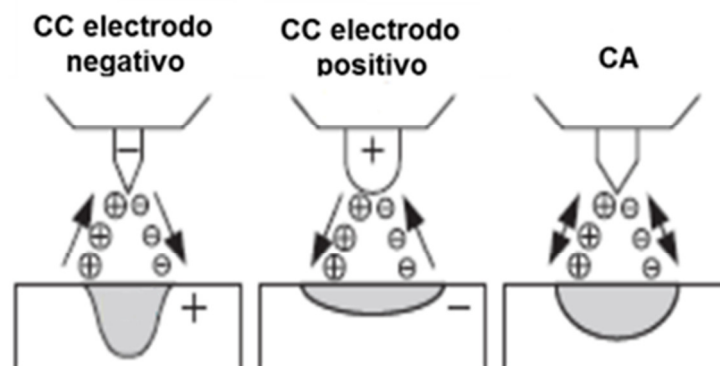


Figura 2-28.- Tipos de corriente.

Cuando el electrodo se conecta a la terminal negativo y es termoiónico como el tungsteno, aproximadamente el 70% de calor se genera en el ánodo y el 30% en el cátodo. Esta polaridad produce una mayor penetración, y es la configuración más común empleada en TIG, y se usa con argón, helio o una mezcla de ambos para soldar la mayor parte de los metales. Cuando el electrodo de tungsteno se conecta a la terminal positiva, se crea una acción de limpieza catódica en la superficie de trabajo. Esta acción ocurre en todos los metales pero es más importante cuando se suelda aluminio o magnesio porque se elimina la capa de óxido refractario que inhibe la soldadura. Esta polaridad calienta además la punta del electrodo lo que requiere del uso de electrodos de mayor diámetro. La capacidad de transporte de corriente de un electrodo conectado a la terminal positiva es de aproximadamente la décima parte de la de un electrodo conectado a la terminal negativa. En general el uso de la polaridad positiva está limitado a la soldadura de piezas en láminas.

La corriente continua recibe su nombre ya que la corriente eléctrica “continuamente” tiene los mismos valores como se ve en la figura 2-29 A.

#### *2.6.4.5.3 Corriente alterna*

Es una corriente eléctrica que alternativamente toma valores positivos y negativos como se ve en la figura 2-29 B. Por tanto puede combinar la acción limpiadora del trabajo de la polaridad inversa (electrodo positivo) con la penetración profunda característica de la polaridad directa (electrodo negativo.)

Dependiendo del material a soldar es recomendable usar cierto tipo de corriente, la tabla 2-7 muestra los tipos de corriente para soldaduras TIG.

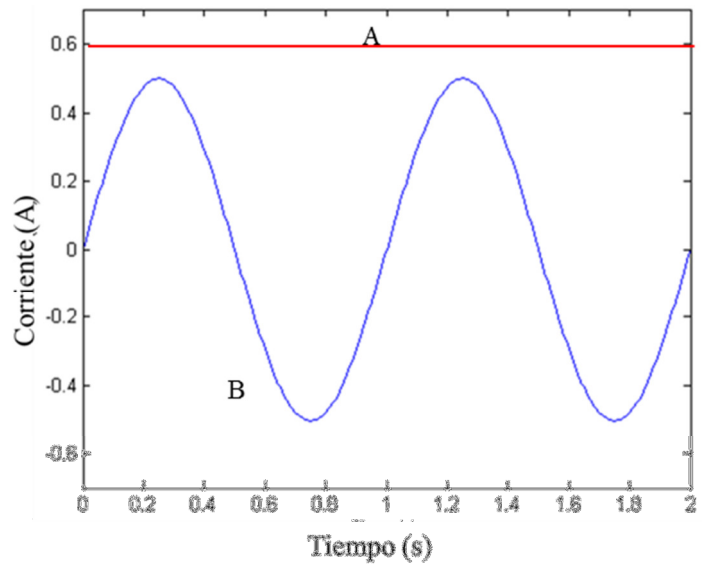


Figura 2-29.- Corriente eléctrica: A) Corriente continua CC , B) Corriente alterna CA



Tabla 2-7.- Selección del tipo de corriente para soldaduras TIG. [26]

Metal a Soldar	CORRIENTE ALTERNA Estabilización por alta frecuencia	CORRIENTE CONTINUA polaridad directa	CORRIENTE CONTINUA Polaridad inversa
Magnesio, hasta 3 mm espesor	1	NR	2
Magnesio, 4mm o más	1	NR	NR
Magnesio (piezas fundidas)	1	NR	2
Aluminio	1	NR	2
Fundición aluminio	1	NR	NR
Acero inoxidable (hasta 1.5 mm)	1	2	NR
Acero inoxidable (1.5 mm o más )	2	1	NR
Latón	2	1	NR
Plata	2	1	NR
Hastelloy	2	1	NR
Metales con plata	1	NR	NR
Recargas duros	1	2	NR
Fundición de hierro	2	1	NR
Acero suave (de 3mm a 7 mm)	2	1	NR
Acero suave (de 7 mm o más)	NR	1	NR
Acero duro (de 3mm a 7 mm)	2	1	NR
Acero duro (de 7 mm o más)	2	1	NR
Cobre desoxidado (hasta 2.5 mm )	NR	1	NR

\* NR = no recomendado

#### *2.6.4.6 Gas de protección*

El soplete dirige el gas hacia el arco y la pileta líquida con el fin de proteger el electrodo y el metal fundido de la contaminación atmosférica. También suele utilizarse gas purgante de respaldo para proteger el lado debajo de la soldadura y las superficies del metal base adyacente contra la oxidación durante la soldadura. El argón y el helio o la mezcla de ambos, son los gases inertes más utilizados en soldadura.

##### *2.6.4.6.1 Argón*

El argón (Ar) es un gas monoatómico inerte con peso molecular 40, se obtiene de la atmósfera por separación del aire licuado. Para la soldadura se refina hasta 99.95%, esto es aceptable para la mayor parte de los metales excepto los reactivos y refractarios para los cuales se requiere una pureza mínima de 99.97%. Algunas características del Ar son:

- Menor penetración.
- Acción de limpieza al soldar materiales como aluminio y magnesio.
- Buena protección con menores caudales.
- Más fácil iniciación del arco.
- Es más denso que el Helio.

##### *2.6.4.7 Material de aporte*

Normalmente, la soldadura TIG de espesores finos puede realizarse sin material de aporte. Sin embargo, al aumentar el espesor, es necesario aportar material para rellenar la junta. En algunos casos, cuando se quiere reforzar la junta, también se aporta material en la soldadura de espesores finos. El metal de aporte debe ser de la misma composición química que el metal base. Así, para la unión de aceros al carbono, se utilizan varillas de acero al carbono; para la

unión de titanio, varillas de titanio, y así sucesivamente. En algunos casos, puede utilizarse satisfactoriamente como material de aportación una tira obtenida de las propias chapas a soldar. Con vistas a conseguir soldaduras sanas y para reducir las proyecciones, las varillas de aporte para el procedimiento TIG llevan mayores cantidades de sustancias desoxidantes. En general, el diámetro de la varilla debe ser aproximadamente igual al espesor de las piezas a soldar.

#### *2.6.4.7.1 Selección de los materiales de aporte.*

Cuando se suelda titanio de pureza comercial con material de aportación no aleado, puede tolerar alguna contaminación procedente de la atmósfera de soldadura, sin que dicha contaminación sea causa de pérdida de ductilidad. Los materiales ERTi 1,2,3 y 4 se destina a estos fines. Se emplean estos aportes cuando la ductilidad del metal depositado sea más importante que la resistencia de la unión soldada. Se lograrán eficiencias de las uniones menores de 100%.

Para aplicaciones criogénicas, en las que el contenido de elementos intersticiales del metal base debe ser bajo, el material de aportación debe tener también baja proporción de estos elementos, para ello se debe procurar que las soldaduras se realicen con equipos y procedimientos que prevengan la contaminación del metal depositado por elementos tales, como el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno.

Las varillas y los alambres deben inspeccionarse cuidadosamente en lo que se refiere a la presencia de defectos mecánicos y a su limpieza, al tiempo que su manipulación, empaquetado y almacenamiento deben llevarse a cabo de forma que no sufran contaminación.

En la tabla 2-8 se mencionan las especificaciones de algunos aportes según la clasificación AWS [37].

AWS	C	O	H	N	Al	V	Tin	Cr	Fe	Mo	Nb	Ta	Pd
	ERTi-1	.03	.10	.005	.012	-	-	-	-	.10	-	-	-
ERTi-2	.05	.10	.008	.020	-	-	-	-	.20	-	-	-	-
ERTi-3	.05	.10-.15	.008	.020	-	-	-	-	.20	-	-	-	-
ERTi-4	.05	.15-.25	.008	.020	-	-	-	-	.30	-	-	-	-
ERTi-0.2Pd	.05	.15	.008	.020	-	-	-	-	.25	-	-	-	.15-.25
ERTi-3Al-2.5V	.05	.12	.008	.020	2.5-3.5	2.0-3.0	-	-	.25	-	-	-	-
ERTi-3Al-2.5V-1	.04	.10	.005	.012	2.5-3.5	2.0-3.0	-	-	.25	-	-	-	-
ERTi-5Al-2.5Sn	.05	.12	.008	.030	4.7-5.6	-	2.0-3.0	-	.40	-	-	-	-
ERTi-5Al-2.5Sn-1	.04	.10	.005	.012	4.7-5.6	-	2.0-3.0	-	.25	-	-	-	-
ERTi-6Al2Cb-1Ta-1Mo	.04	.10	.005	.012	5.5-6.5	-	-	-	.15	.5-1.5	1.5-2.5	.5-1.5	-
ERTi-6Al-4V	.05	.15	.008	.020	5.5-6.7	3.5-4.5	-	-	.25	-	-	-	-
ERTi-6Al-4V-1	.04	.10	.005	.012	5.5-6.7	3.5-4.5	-	-	.15	-	-	-	-
ERTi-8Al-1Mo-1V	.05	.12	.008	.03	7.3-8.3	.75-1.2	-	-	.25	.75-1.2	-	-	-
ERTi-13V-11Cr-3Al	.05	.12	.008	.03	2.5-3.5	12.5-14.5	-	10-12	.25	-	-	-	-

Tabla 2-8.- Requerimientos de composición química de electrodos de titanio y aleaciones de titanio. [37]

#### 2.6.4.8 Generación de calor

En la soldadura por fusión, el calor es generado por un arco eléctrico producido entre la pieza y el electrodo de tungsteno. El método utilizado para aplicar calor en un proceso de soldadura puede afectar significativamente las propiedades de la unión. En la Figura 2-30, se representa la vista plana de dos placas metálicas que son unidas mediante el proceso de soldadura por fusión y el calor generado en el proceso, mostrado mediante las líneas de colores.

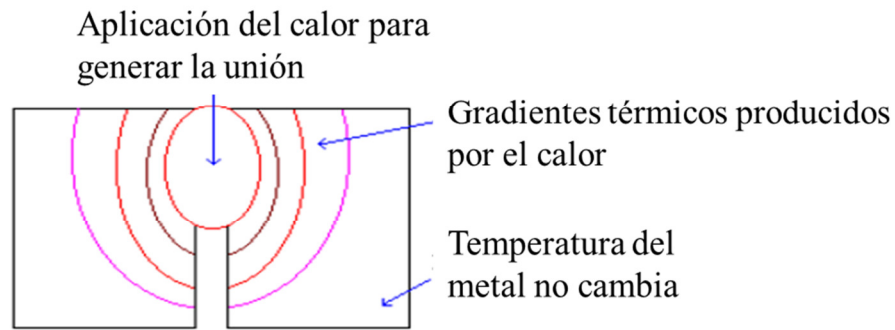


Figura 2-30.- Representación esquemática del calor generado durante el proceso por fusión.

Aunque el calor generado  $Q$  durante el proceso de soldadura se puede medir mediante un calorímetro [29], también puede ser calculado a través de la potencia eléctrica generada en el arco eléctrico  $P$ , mediante las siguientes ecuaciones:

$$P=V*I$$

$$Q=P/v$$

Donde  $V$ ,  $I$  y  $v$  son parámetros del proceso de la soldadura por fusión, voltaje, corriente y velocidad de soldeo, respectivamente.

#### 2.6.4.9 Zonas Afectadas por el Calor

En las Figuras 2-31 (a) y (b), se muestra las zonas que se pueden identificar en una unión soldada mediante el proceso TIG, y las zonas identificadas en una unión de Ti6Al4V soldada por TIG.

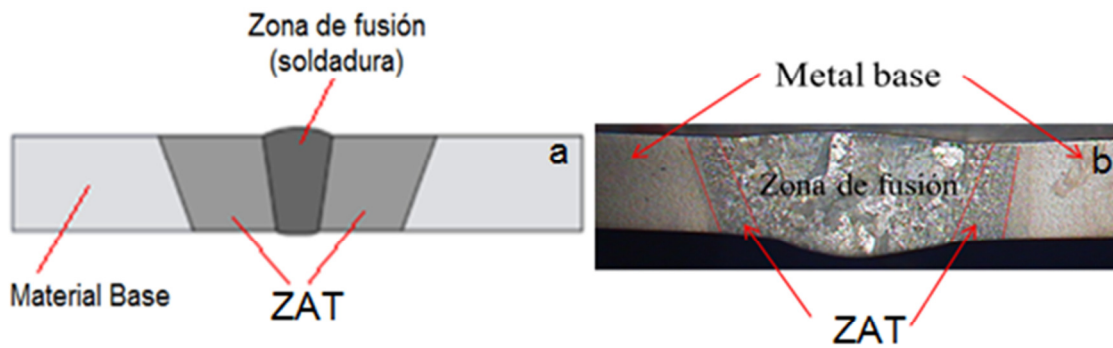


Figura 2-31.- A) Representación esquemática de la sección transversal de una unión soldada por TIG, y B) zonas identificadas en una unión soldada de una aleación de titanio Ti6Al4V.

La resistencia de los metales puede incrementarse de varias maneras, incluyendo el endurecimiento por solución, endurecimiento por trabajo, endurecimiento por precipitación, y el endurecimiento por transformación. La efectividad de los últimos tres métodos puede ser reducida significativamente por el calentamiento de la soldadura en la zona llamada zona afectada térmicamente (ZAT), donde las temperaturas máximas son demasiado bajas para producir la fusión, pero lo suficientemente altas como para causar que la microestructura y las propiedades mecánicas de los materiales cambien significativamente. El efecto de los parámetros de la soldadura en la resistencia de ZAT se explica en la Figura 2-32. Tanto el tamaño de grano del ZAT y el tiempo de retención por encima de la temperatura efectiva de recristalización  $T_x$  incrementan conforme incrementa la entrada de calor por unidad de longitud de la soldadura, es decir, la relación entrada de calor a velocidad de soldadura. En consecuencia, la pérdida de resistencia en la ZAT se vuelve más grave ya que el calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura se incrementa [29].

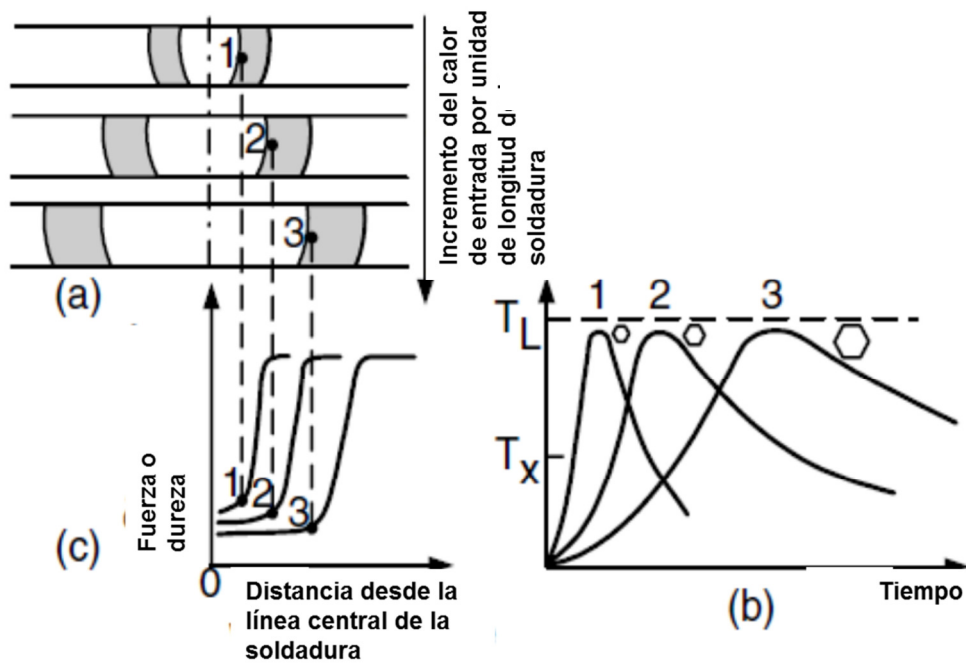


Figura 2-32.- Efecto del calor de entrada por unidad de longitud de la soldadura, A) ancho de ZAT (sombreado), B) ciclos térmicos cerca la frontera de fusión, y C) perfil de resistencia o dureza.

#### 2.6.4.10 Velocidad de avance

La velocidad de avance o de desplazamiento es la tasa de movimiento lineal del arco a lo largo de la junta a soldar. Con todas las otras condiciones constantes, la penetración de la soldadura es máxima con una velocidad de avance intermedia.

Cuando se reduce la velocidad de avance, se aumenta la deposición del metal de aporte por unidad de longitud.

A velocidades muy bajas, el arco de soldadura actúa más en el charco de metal de soldadura que sobre el metal base, con lo que se reduce la penetración efectiva; esta condición también produce un cordón de soldadura más ancho. En la medida en que se aumenta la velocidad de avance, la cantidad de energía térmica por unidad de longitud de soldadura transferida desde el arco hacia el metal base al principio se aumenta, ya que el arco actúa más directamente sobre el metal base. Con un aumento adicional en la velocidad de avance, se transferirá hacia el

metal base menos energía térmica por unidad de longitud de soldadura. Por lo tanto, la fusión del metal base primero se aumenta y luego se disminuye cuando se incrementa la velocidad de avance. Si se aumenta todavía más la velocidad de avance, habrá una tendencia a producir socavado a lo largo de los bordes del cordón de soldadura debido a que hay insuficiente deposición de metal de aporte para llenar el trayecto fundido por el arco [28].

#### *2.6.4.11 Defectos y fallas*

Los principales defectos (discontinuidades) que pueden generarse en este proceso son:

1. Inclusiones de escoria. La escoria es generada por el recubrimiento del electrodo, el cual con el calor del arco se convierte en un líquido menos denso que el metal. A medida que este líquido flota hacia la superficie, sus ingredientes retiran óxidos y sales del pozo metálico por medio de reacciones químicas. Cuando la escoria queda atrapada dentro del pozo en vez de flotar hasta la superficie, genera inclusiones que degradan la resistencia de la unión.
2. Porosidad. La porosidad puede formarse en una soldadura debido a la contaminación de la superficie del metal base, a la presencia de hidrogeno debido a la humedad excesiva en el recubrimiento del electrodo, excesivo calor generado por la excesiva corriente eléctrica, por la excesiva rapidez de avance del electrodo.
3. Socavación. Cuando no se aplica suficiente material de aporte, o cuando éste se aplica incorrectamente, el bisel del cordón queda parcialmente lleno. Este defecto puede ser causado por una corriente excesiva, por el tamaño del electrodo o ángulo del mismo incorrectos, por la velocidad del electrodo inadecuada.
4. Grietas. Pueden generarse en el cordón, o en el metal base cercano al cordón. Las grietas pueden ocurrir a medida que el cordón se enfría hasta la temperatura ambiente. El agrietamiento puede deberse a la contaminación térmica del metal por el enfriamiento, lo cual puede ocasionar esfuerzos en el cordón. También pueden generarse grietas varios días después de realizado el cordón. Estas grietas se forman



generalmente en la ZAT, y sus posibles causas son la presencia de hidrogeno en metales base endurecibles, falta de holgura en la unión para compensar la contracción térmica lo cual originaria esfuerzos residuales y posteriormente las grietas. El metal de aporte no llena completamente el espacio entre las piezas a unir. La fusión incompleta puede ser debida a la velocidad excesiva del electrodo.

5. Distorsión y esfuerzos residuales. La distorsión es causada por el enfriamiento del cordón después de realizar la soldadura. Cuando las piezas soldadas son delgadas y no pueden soportar los esfuerzos que se generan, éstas pierden su geometría original. Cuando las piezas a unir son suficientemente grandes, de tal forma que los esfuerzos generados durante el enfriamiento del cordón pueden ser absorbidos sin provocar deformaciones significativas, se generan esfuerzos internos en el cordón en el metal base, a estos esfuerzos se les llama esfuerzos residuales.

#### *2.6.5 Soldadura GTAW en Ti y sus aleaciones*

El proceso GTAW es comúnmente utilizado en la soldadura del titanio y sus aleaciones en espesore de 3.5 a 6 mm. La soldadura en espacios abiertos es mejor realizarlas en posición plana para mantener una adecuada protección del gas inerte con la antorcha de soldadura y el gas de protección secundario. Este último debe tener un diseño especial cuando la soldadura se realiza en posiciones fuera de la plana, pues la posición de soldadura puede influir en volumen de poros del metal depositado [2].

Se usa normalmente corriente directa polaridad normal con electrodos del tipo toriado (EWTh-2). La contaminación con tungsteno debe ser evitada, pues puede provocar agrietamiento. La extensión del mismo fuera de la tobera debe limitarse para mejorar la visibilidad del baño fundido. La excesiva extensión del electrodo puede provocar un sobrecalentamiento del mismo y por lo tanto la contaminación del baño fundido.

Para reducir al mínimo la posible contaminación del baño se recomienda el empleo de elevados postflujos y preflujos de gas de protección, es decir una vez terminada la aplicación de

la soldadura, el flujo de gas debe de continuar durante el tiempo necesario para que la temperatura del material depositado se encuentre por debajo de los 650°C teniendo cuidado de no realizar un enfriamiento muy súbito.

Particularmente importante durante las operaciones de soldadura manual lo constituye el encendido del arco. No se recomienda el rallado del mismo, es preferible que se realice sobre una placa de encendido o de ser posible con la utilización de corriente de alta frecuencia.

Cuando la soldadura se realiza con metal de aporte, el calentamiento y fusión del extremo del mismo debe ser dentro del área de protección del gas para de esa forma evitar la contaminación. Si este se llegara a contaminar es preferible el corte del extremo del mismo antes de continuar la soldadura.

La tabla 2-9 a y 2-9 b, recomienda condiciones para la soldadura del titanio de manera manual. [28]

Tipo de Junta	Espesor del Metal	Angulo de Ranura	Abertura de raíz
Ranura cuadrada	0.01 - 0.09	0	0
	0.03 - 0.13	0	0 – 0.1t
Ranura en V	0.06 - 0.25	30 – 60	---
	0.12 - 0.50	30 – 90	---
Ranura doble V	0.25 - 1.50	30 – 90	0 – 0.1t
Ranura U	0.25 - 1.00	15 – 30	---
Ranura doble U	0.75 - 2.00	15 – 30	---

Tabla 2-9.- A) Diseño de ranuras típico para soldadura TIG de titanio y aleaciones de titanio. [28]

Espesor In.	Material aporte		Gas de protección	Voltaje V	Corriente A	Velocidad Avance In / min
	Diámetro In	Velocidad alimentación In / min				
0.008	---	---	He	14	10	16
0.030	---	---	Ar	10	25-30	10
0.060	---	---	Ar	10	90-100	10
0.060	0.062	22	Ar	10	120-130	12
0.090	---	---	Ar	12	190-200	10
0.090	0.062	22	Ar	12	200-210	12
0.125	0.062	20	Ar	12	220-230	10

Tabla 2-9.- B) Condiciones de soldadura TIG para titanio y aleaciones de titanio. [28]

El Titanio comercialmente puro posee moderada resistencia pero buena ductilidad. El Ti es usado primeramente por su buena resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad. Si el contenido de hierro es superior al 0.05%, la zona de soldadura puede estar sometida al ataque corrosivo de soluciones de ácido nítrico. Esta zona es particularmente sensible por la naturaleza acicular de alguna fase  $\beta$  retenida que es sensibilizada por el hierro. Surgen celdas galvánicas entre la fase  $\beta$  y la fase  $\alpha$ , iniciando la corrosión en el metal de la costura. Para la soldadura de este material es preferido un metal de aporte de bajo hierro, así como la eliminación de las fuentes de contaminación por hierro durante la preparación de la unión [2].

La soldadura de titanio con Aleaciones  $\alpha$  y la cuasi  $\alpha$  poseen buena soldabilidad, pues poseen buena ductilidad. Las operaciones de soldadura tienen poco efecto en las condiciones de recocido del material. Sin embargo la resistencia de materiales trabajados en frío en la ZAT se ve reducida producto del calentamiento; producto de esto estas aleaciones son normalmente soldadas en condiciones de recocido.

La aleación Ti-5Al-2.5Sn (aleación  $\alpha$ ) deben ser tenidas en cuenta donde la buena resistencia y ductilidad es necesario se combinen con buena soldabilidad. Además la versión (ELI) de *extra low intersticial* posee alta tenacidad a temperaturas inferiores a  $-215^{\circ}\text{C}$ , por lo que es utilizado en aplicaciones criogénicas. Para mantener esta propiedad es necesario que los procesos de unión usados, así como los procedimientos estén exentos de contaminantes como

el carbono, nitrógeno, u oxígeno. Posee una alta resistencia a elevadas temperaturas, mayor que el titanio comercialmente puro. Sin embargo las tensiones residuales de soldadura son proporcionalmente mas altas, por esto los alivios de tensiones son comúnmente recomendados en estas aleaciones.

La aleación Ti-0.2Pd es la misma que el titanio comercialmente puro desde el punto de vista de la soldabilidad. Una destacada virtud de esta aleación es su elevada resistencia a la corrosión en ambientes reductores. La resistencia a las grietas de corrosión son de igual manera altos.

La aleación Ti-0.3Mo-0.8Ni presenta las mismas características, tiene buena resistencia a las grietas de corrosión y es mas resistente que el titanio comercialmente puro del tipo ASTM grado 2 y el Ti-0.2Pd. Las precauciones contra la contaminación por hierro durante la preparación y la soldadura son una buena práctica para estas dos aleaciones, por las mismas razones que el titanio comercialmente puro.

Las Aleaciones cuasi  $\alpha$  presentan excelentes resistencia a la fluencia térmica a elevadas temperaturas. Ellas son soldables, pero las tensiones residuales de los procesos de soldadura son altas. Es por esto que los alivios de tensiones posteriores a la soldadura son recomendados. En muchos casos necesitan ser aplicados procedimientos especiales de soldadura para prevenir el agrietamiento de los cordones de secciones gruesas. Como en las otras aleaciones la contaminación por hierro provoca una disminución a la fluencia térmica, por lo que debe ser evitada.

Las Aleaciones  $\alpha$ - $\beta$ : tiene una respuesta al tratamiento térmico que va a depender de la cantidad y del tipo de elemento de aleación. La soldadura en estas aleaciones puede significar un cambio en la resistencia, ductilidad y tenacidad característicos de estas aleaciones, como resultado del ciclo térmico a que se ha expuesto la aleación. La baja ductilidad en estas aleaciones es causada por una transformación de fase que ha ocurrido en la ZAT y en el metal de la costura o en ambos. Las aleaciones  $\alpha + \beta$  pueden ser soldadas con metal de aporte sin

alear o con metal de aporte  $\alpha$ , para producir un metal depositado que sea bajo en la fase  $\beta$ , esto le proporciona ductilidad al metal de la unión. Sin embargo este procedimiento no puede vencer la baja ductilidad de la ZAT en aleaciones que presentan alta cantidad de elementos estabilizadores de la fase  $\beta$ .

Las aleaciones  $\alpha+\beta$  que poseen muy estabilizada la fase  $\beta$ , tienen limitaciones de soldabilidad. Presentan tendencias al agrietamiento cuando la soldadura se realiza con altos niveles de restricción o cuando un defecto pequeño está presente en la zona de soldadura. Como se mencionó previamente, las aleaciones Ti-7Al-4Mo y Ti-6Al-6V-2Sn son ejemplos de estos tipos de aleaciones. La resistencia al agrietamiento, puede ser mejorada con un precalentamiento en el rango de 300-350 °F y un alivio de tensiones inmediatamente después de concluido la soldadura. La soldadura de la aleación Ti-8Mn, no es recomendada.

La aleación Ti-6Al-4V, posee la mejor soldabilidad de las aleaciones  $\alpha + \beta$ . Esta puede ser soldada en condiciones de recocido o tratada por solubilizado y con envejecimiento parcial. El envejecimiento puede ser completado durante el tratamiento térmico post soldadura de alivio de tensiones.

La aleación Ti-10V-2Fe-3Al, posee buena soldabilidad, pues posee la fase  $\beta$  muy estabilizada, y mantiene el grano fino durante el proceso de soldadura.

Aleaciones  $\beta$ : muchas de las aleaciones  $\beta$  son soldadas en condiciones de recocido o tratadas térmicamente. Estas incluyen Ti-13V-11Cr-3Al, Ti-8Mo-8V-3Al-2Fe, y Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn. sus uniones soldadas poseen buena ductilidad, pero una resistencia relativamente baja en condiciones después de soldado. Ellas son usadas a menudo en estas condiciones, pues el metal de la unión puede responder de forma diferente que el metal base al tratamiento térmico y puede tener baja ductilidad después de envejecido. El envejecimiento se puede realizar si las soldaduras son expuestas a elevadas temperaturas en servicio.

Para la obtención de una unión soldada con un 100% de eficiencia las aleaciones deben ser soldadas en condiciones de recocido. El metal soldado puede ser trabajado en frío por doblado

o embutido u después un tratamiento completo de solubilización y envejecimiento. Una adecuada ductilidad para muchas aplicaciones se logra con este procedimiento.

La soldabilidad el titanio depende fuertemente de su sus aleaciones para que este estas soldadura puedan ser de calidad excelente, regular, limitada y existen algunas aleaciones que no son recomendables para soldar como se muestra en la tabla 2-10.

Tabla 2-10.- Grados de soldabilidad del titanio y sus aleaciones.

ALEACIÓN	GRADO DE SOLDABILIDAD
Titanio Comercial (todos los grados)	E
<b>Aleaciones Alfa</b>	
Ti-02Pb	E
Ti-5Al-2, 5Sn	R
Ti-5Al-2, 5Sn (bajos elementos intersticiales)	E
<b>Aleaciones Alfa + Beta</b>	
Ti-6Al-4V	R
Ti-6Al-4V (bajos elementos intersticiales)	E
Ti-7Al-4Mo	L
Ti-6Al-6V-2Sn	L
Ti-8Mn	NR
<b>Aleaciones Beta</b>	
Ti-13V-11Cr-3Al	R

E = Excelente

R = Regular

L = Limitado

NR=No recomendado para soldar

### 2.6.5.1 Protección de las uniones soldadas:

A causa de la sensibilidad del titanio a la fragilización por el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, toda la zona o la que se haya calentado por encima de los 260°C debe protegerse contra la contaminación por la atmósfera; la protección debe realizarse en una atmósfera de gas inerte de alta pureza, de forma que tanto la zona de soldadura como las adyacentes queden envueltas por el gas.

Durante la operación de soldeo, la unión debe estar protegida hasta que se enfríe a una temperatura de por debajo de los 420°C. Una adecuada protección se logra con la utilización de gas inerte auxiliar, cuando la soldadura se realiza en lugares abiertos. En aplicaciones extremas la soldadura se debe realizar en una cámara como las que se muestran en la figura 2-33, donde se le haya purgado el aire de su interior remplazándolo con Argón de alta pureza (99,999%), helio o mezclas de ambos.



Figura 2-33.- Cabina de soldadura TIG inflable y rígida.

La pureza de los gases protectores influye en las propiedades de las uniones soldadas. El aire y el vapor de agua son particularmente dañinos. La pureza de los gases protectores comerciales para soldadura normalmente son satisfactorias, pero sin embargo siempre hay que tener cuidado en asegurarse que la humedad y el aire no se unan con el gas por una falla en el sistema. Los gases de soldadura deben tener un punto de rocío de  $-54^{\circ}\text{C}$  y menores.

Los gases en los cilindros deben estar suficientemente secos para permitir una cierta captación de humedad en el sistema de suministro.

Un método de control de la pureza del gas inerte consiste en tomar una pieza de titanio para prueba, soldar sobre ella y luego doblarla. Si las superficies dobladas tienen buena apariencia el gas inerte debe considerarse puro.

El color del cordón de soldadura en el titanio frecuentemente es una referencia para determinar el nivel de contaminación o grado de pureza del gas de protección. Un color bronce brillante indica un pequeño grado de contaminación de la superficie, un color azul brillante indica una gran contaminación, Ninguno de los dos es aceptable; solo podrían aceptarse en un solo cordón o en el final de la pasada con la condición de que se elimine la capa superficial antes que la soldadura entre en servicio, tampoco son aceptables las soldaduras o zonas próximas que presenten escamas blancas pues es síntoma de gran contaminación.

Existiendo diversas tonalidades del cordón como se ve en la figura 2-34, las cuales indican de manera visual si el cordón es aceptable o no por el contenido de contaminación del material.



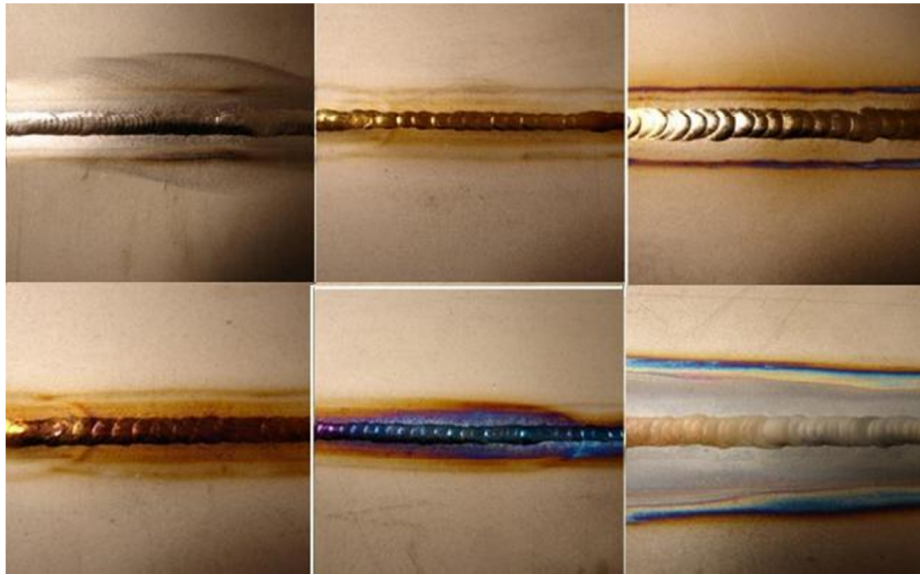


Figura 2-34.- Colores de la contaminación en Ti.

La Protección de gas primaria es la que proporciona la antorcha o la pistola de soldadura. Las toberas generalmente poseen un diámetro de 12.5 a 19 mm. En general su tamaño depende de la accesibilidad y visibilidad necesaria para su uso. La tobera debe posibilitar la salida de un flujo laminar con vista a eliminar las turbulencias en el chorro de gas, y de esa forma evitar la contaminación de dicho flujo con la atmósfera circundante. Algunos porta-electrodos van provistos de mallas de acero inoxidable que se introducen en la tobera, rodeando el electrodo con vista a mantener el flujo lo más laminar posibles. Una adecuada protección del baño fundido es decisivo.

La Protección de gas secundaria es requerida para la protección de la solidificación y enfriamiento del cordón y la zona de influencia térmica. Normalmente la protección de gas primaria ha avanzado con la soldadura, por lo que no protege el metal que se ha solidificado. El metal caliente debe ser protegido del efecto de la atmósfera hasta temperaturas inferiores a la temperatura de oxidación, donde no existen problemas. La baja conductividad térmica del titanio y por tanto su baja velocidad de enfriamiento provoca que el titanio necesite una considerable longitud de protección en la zona caliente, que es normalmente mayor que el área que barre el flujo de gas procedente de al tobera de la antorcha.

Las más comunes de las formas de protección secundarias son las cámaras de arrastre. La misma es una cámara de metal que va unida a la tobera de la antorcha. El flujo de gas sale por unos difusores que se encuentran en la parte inferior y que propician que el gas de protección se aplique sobre el área soldada. La longitud de la cámara es proporcional al calor aportado y a la velocidad de soldadura. La protección por esa cara debe ser lo suficiente como para cubrir la ZAT a cada lado del metal depositado.

El Respaldo de gas protector posee la función de proteger la raíz de la soldadura y la zona aledaña del metal base de los efectos de la atmósfera durante la soldadura. Estos son elementos temporales, los que en muchos casos van incorporados al sistema de sujeción de las piezas. La presión del gas a la salida de las ranuras debe ser bajo para ayudar a que la formación del cordón de raíz posea un contorno convexo, además de esto toda la superficie a soldar debe realizar un buen contacto con la barra de respaldo, para de esa forma garantizar una formación uniforme del cordón.

Estos elementos también ayudan a la evacuación de calor y de esa forma aceleran el enfriamiento de la soldadura, lo que reduce los requerimientos en la protección de gas. La mayoría de estos elementos están fabricados de cobre y pueden ser enfriados por agua. También pueden ser producidos de aceros inoxidable cuando los requerimientos de alta velocidad de enfriamiento no son importantes. La apertura de la raíz de la junta debe ser cercana a cero, para prevenir la formación del arco y la fusión del titanio con el material del respaldo, lo que pudiera causar la contaminación del metal del cordón y disminuir su capacidad de resistencia al agrietamiento [2].

#### *2.6.5.2 Grietas de contaminación*

La contaminación del titanio por elementos intersticiales (oxígeno, nitrógeno, carbono e hidrógeno) reducen la ductilidad y tenacidad, pero incrementan la resistencia y la dureza. Esta puede estar dada por una inadecuada limpieza de la junta, el material de aporte, inadecuada protección del charco metálico o impurezas en el gas de protección.

El titanio posee una capa de óxidos estables que proporcionan excelente resistencia a la corrosión a temperaturas inferiores a 500 °C. Sin embargo a temperaturas superiores a 500°C la resistencia a la corrosión disminuye rápidamente lo que hace ser susceptible al agrietamiento por oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. El baño fundido es el más vulnerable a la contaminación ya que la difusión de elementos intersticiales es más rápida en el titanio fundido. La contaminación del metal del cordón solidificado o de la ZAC usualmente solo afecta el material cercano a la superficie. En excesivas concentraciones produce depósitos con pobres propiedades

Por ejemplo el oxígeno empieza a ser nocivo cuando sobrepasa las 3000 ppm, además la alta solubilidad del oxígeno y del nitrógeno en el titanio, genera problemas durante el calentamiento al aire. Ese calentamiento no solo genera oxidación superficial, sino también un endurecimiento de la solución sólida como resultado de la difusión interna del oxígeno. El endurecimiento de las capas superficiales es conocido como proceso alfa, debido a que esta fase es la que es más sensible a este tipo de fenómeno. La gruesa capa de óxidos de titanio o proceso alfa debe ser eliminado antes de que la pieza entre en servicio, pues su presencia puede disminuir la ductilidad y la resistencia a la fatiga.

La tendencia al agrietamiento por contaminación por elementos intersticiales, se puede apreciar a través de la dureza. El nitrógeno tiene aproximadamente el doble del efecto de endurecimiento que el oxígeno y el carbono.

#### *2.6.5.3 Grietas de solidificación.*

A diferencia de otras aleaciones como el aluminio y los aceros inoxidable, el titanio y sus aleaciones no presentan una alta susceptibilidad al agrietamiento de solidificación en la zona de fusión. Sin embargo estudios han demostrado que dentro de altas condiciones de restricción se puede presentar el agrietamiento de solidificación, principalmente en los límites de granos; este puede ocurrir principalmente en la línea central de solidificación, lo que puede estar dado por la acumulación precipitados de segunda fase, o impurezas en los límites de grano [2]

#### 2.6.5.4 Pre calentamiento y temperatura entre pasadas

El pre calentamiento y la temperatura entre pasadas debe ser mantenida lo más bajo posible para la soldadura en espacios abiertos, para evitar la oxidación superficial, que se puede disolver en el baño fundido. Un bajo pre calentamiento es generalmente empleado para secar y eliminar la humedad superficial antes de la soldadura. Este pre calentamiento no debe exceder los 120°C. Un calentamiento prolongado por encima de 120°C puede causar que se forme una fina película de óxido sobre la superficie del metal soldado y el metal base. Esta fina película de óxido puede ser removida con un cepillo de acero inoxidable, manual o rotatorio, después de la soldadura para reducir el metal contaminado [2].

#### 2.6.5.5 Esfuerzos residuales en el proceso TIG

Los esfuerzos residuales son esfuerzos que existen en un cuerpo si todas las cargas externas fueron retiradas. A veces son llamados esfuerzos internos. Los esfuerzos residuales que existen en un cuerpo que ha sido sujeto previamente a cambios de temperatura no uniformes, tales como aquellos durante la soldadura, son a menudo llamados esfuerzos térmicos. La Figura 2-35 es una representación esquemática del cambio de temperatura  $\Delta T$  y esfuerzos en la dirección de la soldadura  $\sigma_x$  durante el proceso de soldadura. El área rayada M-M' es la región donde la deformación plástica ocurre. Si se considera un esfuerzo inducido térmicamente a lo largo de la dirección longitudinal  $\sigma_x$ . Donde la sección A-A es no afectada por el calor de entrada,  $\sigma_x$  es cero. A lo largo de la sección B-B,  $\sigma_x$  es cercano a cero en la región por debajo de la fuente de calor, donde la junta soldada no tiene ningún esfuerzo para soportar cualquier carga. En las regiones un poco lejos de la fuente de calor, los esfuerzos son a compresión ( $\sigma_x$  es negativo) porque la expansión de estas zonas es restringido por el metal que rodea de temperaturas más bajas. Debido al bajo esfuerzo de fluencia de metal de alta temperatura en estas zonas,  $\sigma_x$  alcanza el esfuerzo de fluencia del metal base a la temperatura correspondiente. En las zonas más alejadas de la soldadura  $\sigma_x$  está a tensión, y  $\sigma_x$  es equilibrado con esfuerzos a compresión en zonas cercanas a la soldadura. A lo largo de la sección C-C del metal de soldadura y el metal base adyacente se han enfriado y por lo tanto

tienen una tendencia a contraerse, lo que produce esfuerzos de tensión ( $\sigma_x$  es positivo). En las zonas adyacentes  $\sigma_x$  está a compresión. Finalmente a lo largo de la sección D-D el metal de soldadura y el material base adyacente se han enfriado y contraído aún más, produciendo esfuerzos de tensión más altos en regiones cercanas a la soldadura y esfuerzos de compresión en regiones alejadas de la soldadura. Donde la sección D-D esta atrás de la fuente de calor, la distribución de esfuerzo no cambia significativamente más allá de esta, y esta distribución de esfuerzo es la distribución de esfuerzo residual [29].

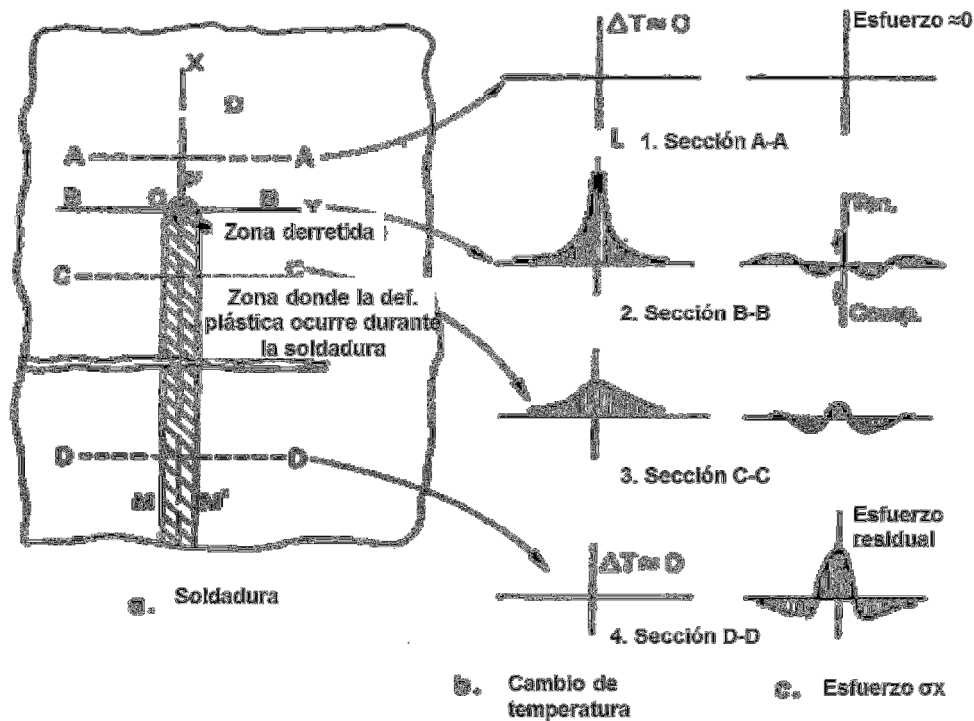


Figura 2-35.- Cambios de temperatura y esfuerzos durante el proceso de soldadura.

La Figura 2-36 muestra la típica distribución de esfuerzos residuales en una unión soldada a tope. La distribución longitudinal del esfuerzo residual  $\sigma_x$  puede ser aproximado por la siguiente ecuación [29]:

$$\sigma_x(y) = \sigma_m \left[ 1 - \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{b} \right)^2 \right]$$

donde  $\sigma_m$  es el esfuerzo residual máximo, el cual es usualmente más alto que el esfuerzo de fluencia del metal de soldadura. El parámetro  $b$  es el ancho de la zona de tensión de  $\sigma_x$ , Figura 2-36(a). La distribución del esfuerzo residual transversal  $\sigma_y$  a lo largo de la longitud de la soldadura se muestra en la Figura 2-36(b). Como se muestra, los esfuerzos a tensión de magnitud relativamente baja son producidos en la parte media de la soldadura, donde la contracción térmica en la dirección transversal es restringida por el material base mucho más frío que está más alejado de la soldadura. Los esfuerzos a tensión en la parte media de la soldadura son equilibrados por esfuerzos de compresión en el final de la soldadura.

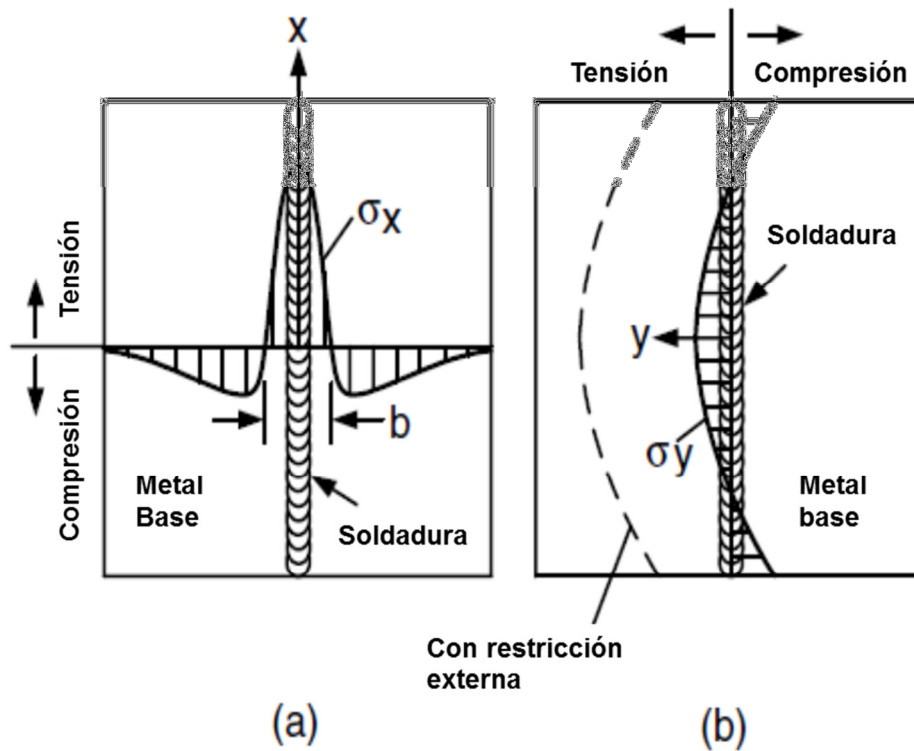


Figura 2-36.- Típica distribución de esfuerzos residuales longitudinal  $\sigma_x$  y transversal  $\sigma_y$ .

## CAPITULO III

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se analizará y explicará la metodología experimental y los procedimientos empleados en el análisis del comportamiento de los especímenes utilizados, en las pruebas de fatiga y en las pruebas cuasi-estáticas; así como los parámetros para llevar a cabo los procesos de soldadura.

La experimentación consistirá en obtener los especímenes soldados por proceso TIG, caracterizar los materiales (pruebas cuasi-estáticas), aplicar fatiga para poder obtener la curva S-N de los especímenes obtenidos por el proceso de soldadura, aplicar pre-daño por fatiga a diferentes niveles de daño 25%, 50% y 100% del límite de fatiga. Para los especímenes pre-dañados realizar las pruebas cuasi-estáticas, y hacer el análisis con los datos obtenidos de los ensayos.

También se obtendrán los perfiles de microindentación, metalografías, fractografías y se calcularán los esfuerzos residuales de ambas uniones soldadas implementando el “método de contorno”, en el cual se utiliza el análisis por medio de Elemento Finito.

#### 3.1 El material

Para realizar el desarrollo de la investigación se utilizó una placa de aleación Ti-6Al-4V, ASTM B265 grado 5 con dimensión de 1000x1000x5.00 mm de ahí se tomaron cupones de 40 x 250 x 4.76 mm. La composición se muestra en la Tabla 3.1

Tabla 3-1.- Composición química de la aleación de Titanio 6Al4V.

Mn (%)	P (%)	Si (%)	Cr (%)	Cu (%)	Zr (%)	Fe (%)	Sn (%)	Pb (%)	Sb (%)
0.005	0.016	0.014	0.017	0.027	<0.01	0.20	0.28	<0.01	0.052
Mo (%)	Al (%)	Mg (%)	Zn (%)	V (%)	Co (%)	Cd (%)	Ca (%)	C (%)	S (%)
0.009	5.68	<0.01	<0.01	3.79	0.14	0.005	0.16	0.03	<0.002

Para determinar la composición química se contó con el apoyo de la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, COMIMSA, en donde la composición química de C y S fue determinada por combustión y detección infrarroja y el resto de los elementos por espectrometría de plasma,

La aleación Ti6Al4V se utilizó para obtener uniones soldadas por proceso de fusión TIG, y comparar las propiedades mecánicas bajo condiciones cuasi-estáticas, así como los perfiles de microdureza, fractografías, esfuerzos residuales.

### 3.2 Preparación de especímenes

El diseño y selección de la geometría adecuada para el espécimen fue lo primero que se hizo. Se seleccionó una sola geometría del espécimen para las diferentes pruebas a realizar: cuasi-estáticas y fatiga, teniendo así un área constante en todos los ensayos. El diseño y selección de la geometría del espécimen se basaron en investigaciones bibliográficas previas donde usan diferentes geometrías (planas y cilíndricas) de especímenes [30, 31]. La geometría final del espécimen, que se muestra en la Figura 3-1, fue la seleccionada para realizar los diferentes ensayos.

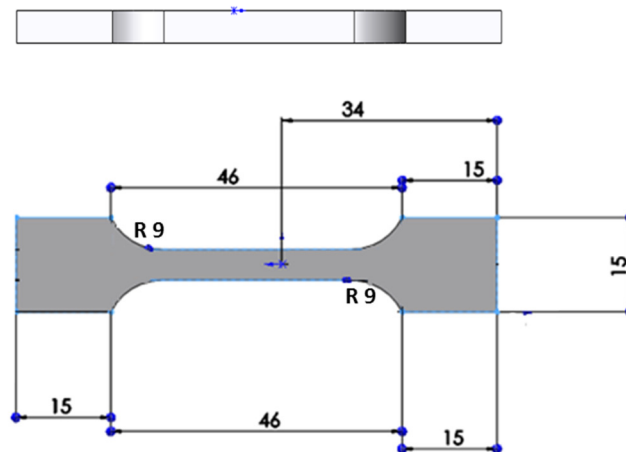


Figura 3-1.- Ilustración esquemática del espécimen usado en los ensayos cuasi-estáticos y de fatiga.

(Dimensiones en mm.)



Los especímenes se obtuvieron de la placa de manera que el sentido de aplicación de las cargas a los especímenes fueran paralelo al sentido de rolado de la placa, así mismo los especímenes obtenidos del centro de las placas soldadas, se maquinaron en dirección perpendicular a la soldadura en todas las placas, con el fin de que esta misma quedará a la mitad de la probeta.

### 3.3 Soldadura GTAW

La unión de soldadura mediante el proceso GTAW (TIG) presenta ciertas características como se ilustra en la tabla 3-2 por las cuales se le considera idóneo para su aplicación en el titanio por tal fue elegido como el proceso para unir por fusión las placas.

VENTAJAS		DESVENTAJAS
Aplicación con procesos manuales o automáticos	Baja densidad y alta resistencia a la tensión	Baja producción
Aplicación en cualquier posición	Puede ser aplicada con o sin material de aporte.	Inclusiones de Tungsteno si el electrodo toca el material fundido.
Soldaduras de alta calidad	Gases usados: Argón mezcla Helio – Argón.	

Tabal 3-2.- Ventajas y desventajas proceso TIG.

#### 3.3.1 Equipo GTAW *cold wire* utilizado.

Las soldaduras por fusión se realizaron con un sistema GTAW “Fronius Kühlgerät FK 2200FC – MagicWabe” con alimentador de aporte automático “Fronius KD 4000 D-11” y una antorcha “Fronius Robacta TTW4500” como se observa en la figura 3-2.

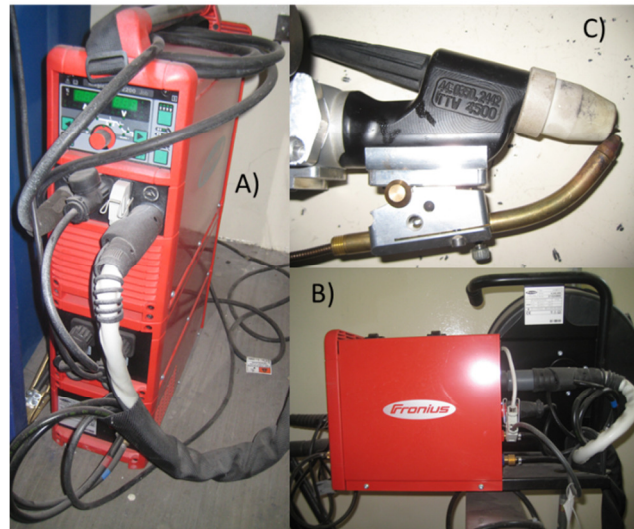


Figura 3-2.- Equipo GTAW cold wire A) Fuente de poder, B) alimentador automático, C) antorcha Robacta.

Se implementó un sistema para lograr el avance automático horizontal de la antorcha con aporte automática, para lograr obtener una soldadura semi automática y conseguir una buena y homogénea calidad de la soldadura aplicada, para lo cual se utilizó un sistema de desplazamiento horizontal “bug-o-system, Go-Fer III” con control de velocidad de 200-2500 mm/min y cambio de dirección, al cual se le diseñó un sujetador para obtener la posición deseada de la soldadura como lo muestra la figura 3-3.

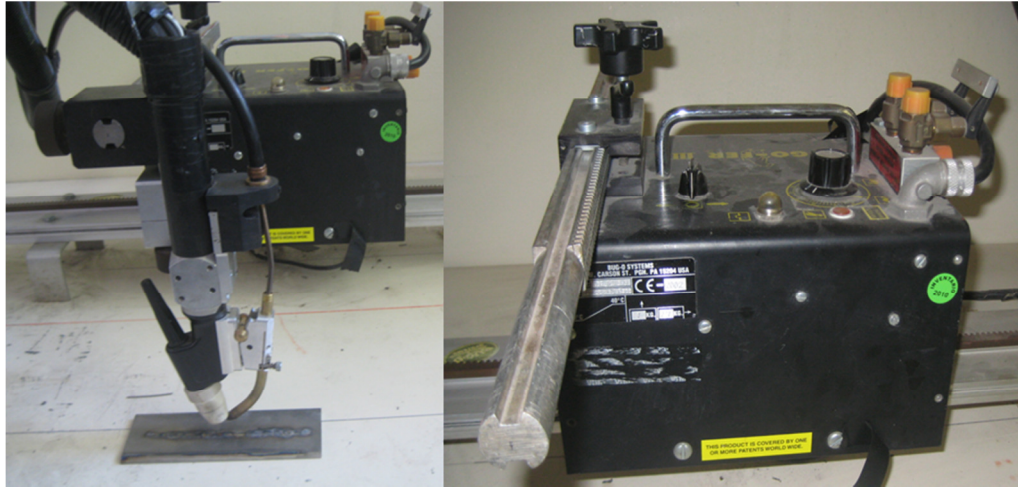


Figura 3-3.- Avance automático “Go-FerIII”.

### 3.3.2 Protección gaseosa de la atmosfera

El gas empleado para la protección de las uniones soldadas fue argón de alta pureza (99.999%). La protección primaria en la antorcha con un flujo de 25 pies cúbicos por hora (CFH). Para la protección secundaria (lateral) se fabricó un respaldo con suministro de gas lateral como se aprecia en la figura 3-4 A, el cual consta de una placa de respaldo de cobre con un orificio central el cual sirve como salida del gas de respaldo, y por la parte superior cuenta con dos placas unidas con unos “clamps” de presión para sujetar las piezas en la posición deseada a soldar y evitar la deformación por calor (figura 3-4B). El flujo lateral aplicado fue de 38CFH y un flujo de gas de respaldo de 35 CFH.

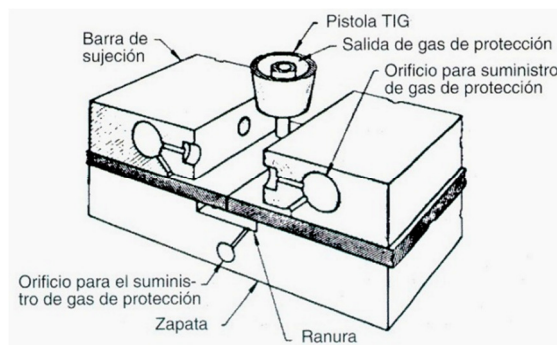


Figura 3-4.- A) Diseño protección de atmosfera.

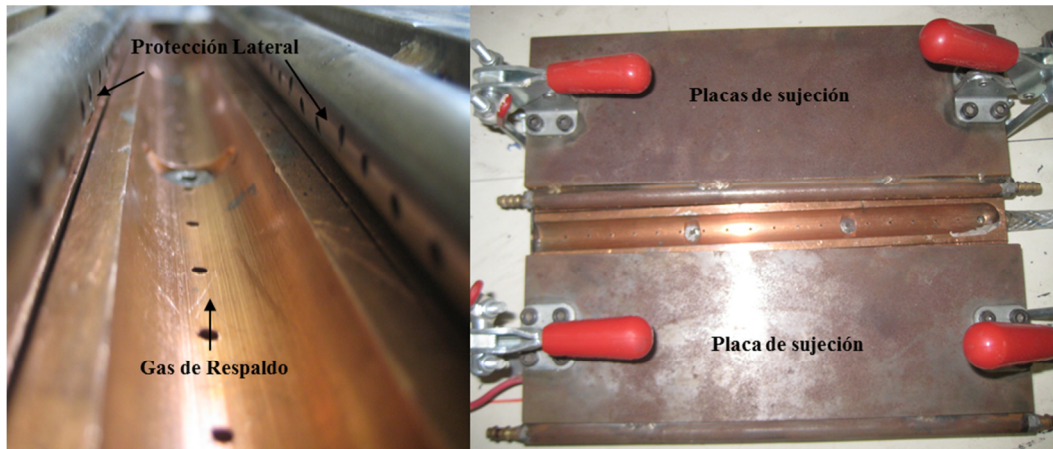


Figura 3-4.- B) Protección lateral y de respaldo.

### 3.3.3 Procedimiento GTAW aplicado

Para llevar a cabo la soldadura de las placas por medio del proceso GTAW, estas se maquinaron con un bidel en “V” y un Angulo de  $60^\circ$  sin hombro colocándolas a tope con una separación de raíz de 1mm como se ve en la figura 3-5.

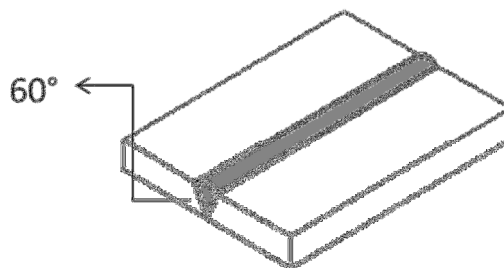


Figura 3-5.- Bisel en V ángulo  $60^\circ$  sin hombro a tope.

La unión soldada se llevó a cabo utilizando un total de 3 pasadas de soldadura, una pasada por el lado de la raíz y dos pasadas por la cara, las variables eléctricas del procedimiento de soldadura utilizado son las que se muestran en la Tabla 3-3.

Pasada	Posición	Corriente (A)	Voltaje (V)	Electrodo	Calor generado (Q)(KJ/mm)
1	Raíz	100	18	ERTi-5ELI	60
2	Cara (1)	120	20	ERTi-5ELI	46
3	Cara (2)	120	20	ERTi-5ELI	46

Tabla 3-3.- Variables eléctricas del proceso de soldadura.

El material de aporte utilizado fue un micro alambre con clasificación AWS ERTi-5ELI, es decir, un material de bajos contenidos intersticiales, su composición química se muestran en la tabla 3-4.

AWS	Numero UNS	C	O	H	N	Al	V	Tin	Fe	Y
ERTi-5ELI	R56402	.03	.10	.005	.012	5.5-6.5	3.5-4.5	---	.15	.005

Tabla 3-4.- Composición química del metal de aporte ERTi-5ELI.

### 3.3.4 Limpieza de la superficie

Antes de cualquier proceso de soldadura, la superficie debe estar perfectamente limpia y seca. Deben eliminarse con los disolventes apropiados las huellas dejadas por los dedos, manchas de aceites, grasas y pinturas. Normalmente las superficies no deben lavarse con agua. Los cloruros y otros restos de los agentes limpiadores pueden ser origen de corrosión, mientras los residuos de hidrocarburos pueden producir contaminación que fragiliza el titanio.

Las partes a soldar cerca de su zona de fusión se procedieron a limpiar mediante tratamiento químico en una solución acuosa con 2–4% de ácido fluorhídrico y 30–40% de ácido nítrico, durante 5 a 10 min., con una temperatura aproximada del baño de 60 ° C y posteriormente se seca completamente con aire caliente. Para la manipulación de la zona limpia deben utilizarse igualmente guantes limpios.

No solo deben de limpiarse las placas a soldar, si se desea una buena soldadura se debe limpiar toda la superficie de trabajo, pinzas, herramienta en general, antorcha, material de aporte, electrodo, etc., con acetona industrial.

### *3.3.5 Preparación de especímenes con soldadura*

Una vez terminado el proceso de soldadura, los cupones de prueba se obtuvieron del centro de la junta soldada cortando en dirección perpendicular a la soldadura. Las dimensiones del espécimen se muestran en la Figura 3-1. La dirección de la soldadura fue perpendicular a la dirección del laminado.

Los extremos de las placas se desecharon para evitar alguna imperfección en la soldadura debido a el inicio del aporte o a la rampa de entrada y salida del arco.

### *3.4 Ensayos cuasi-estáticos uniaxiales*

Las pruebas cuasi-estáticas a tensión para caracterizar los materiales, se hicieron en una máquina universal servo hidráulica MTS 810, la cual tiene una capacidad de hasta 100kN (10 toneladas). Para obtener la deformación de las probetas se usó un extensómetro marca MTS, modelo 634.11F-25. En la Figura 3-6 se muestra una imagen completa la máquina MTS 810. Las pruebas se realizaron aplicando una carga monotónica a una velocidad constante de 1 mm/min.

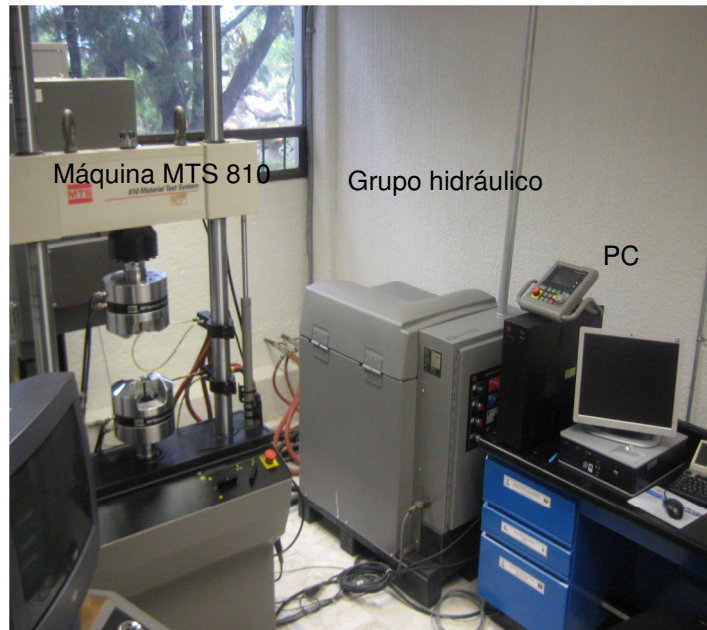


Figura 3-6.- Máquina MTS 810.

Los materiales se encontraban libres de daño a temperatura ambiente.

Para determinar el módulo de elasticidad se calculó la pendiente de la parte lineal del diagrama o curva esfuerzo-deformación obtenido; esto es, desde el primer punto donde se empieza aplicar carga hasta antes donde el material empieza a ceder. Para determinar el esfuerzo de fluencia se usó el método de la línea compensada (0.2%) como se muestra en la figura 3-7.

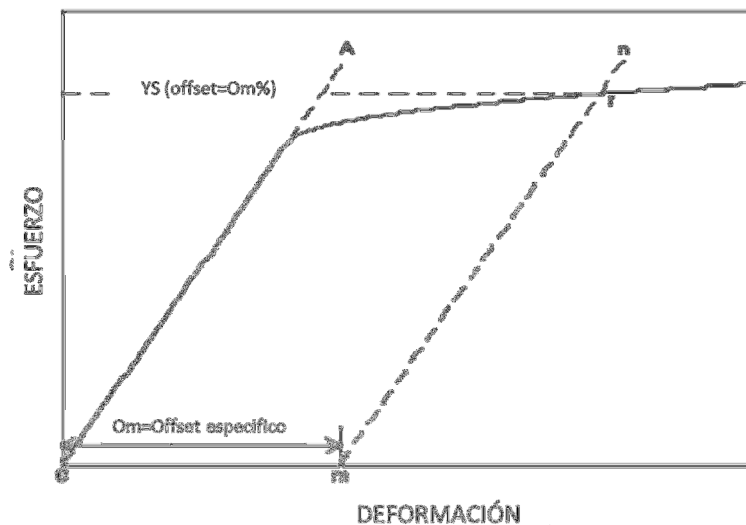


Figura 3-7.- Método del offset para determinar la cedencia.

### 3.5 Ensayos uniaxiales de fatiga

Para poder aplicar pre-daño o pre fatigar a un material, primero es necesario determinar la resistencia a la fatiga, y una vez conocido este valor, a las probetas a ser ensayadas se les aplica un porcentaje del número de ciclos a la falla. En este trabajo, el daño por fatiga fue inducido en los especímenes de unión GTAW y metal base.

Las pruebas de fatiga por control de esfuerzo fueron realizadas en una máquina MTS810, se aplicó diferentes niveles de esfuerzo a los especímenes, usando una carga cíclica uniaxial entre los límites del esfuerzo constante con la relación de reversión de esfuerzos  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.1$ .

La carga cíclica aplicada tiene una forma de onda sinodal a una frecuencia de 30 Hz, las pruebas se hicieron a temperatura ambiente. Los ensayos de fatiga fueron aplicados a los especímenes a diferentes niveles de esfuerzo para ser llevados a la falla por fatiga para determinar las curvas esfuerzo – ciclos ( $\sigma - n$ ).

Para obtener la relación entre los puntos obtenidos por ensayos y conocer la curva que nos dirá el número de ciclos a la falla en todos los esfuerzos utilizaremos la ecuación de Basquin.



$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b = AN_f^B \quad \text{Ecuación de Basquin}$$

Donde  $\sigma'_f$  es el coeficiente de resistencia a la fatiga, y b es el exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin que para la mayoría de los materiales metálicos se encuentra entre 0.05 y 0.12

Una vez determinadas las curvas  $\sigma - n$  se determinó el esfuerzo que se tomó como base para pre fatigar especímenes al 25, 50 y 75% de daño, obteniendo un número conocido de ciclos para cada nivel de daño.

### *3.6 Dureza por micro indentacion*

La medición del perfil de microindentación se hizo en un Microindentador de la marca FUTURE-TECH, modelo FM-7 que se muestra en la Figura 3-8. La medición del perfil se midió en dirección perpendicular a la soldadura, se preparó una muestra de cada unión soldada para la medición de la microdureza. Se aplicó una carga de 100 gf y un tiempo de 11s para cada indentacion.



Figura 3-8.- Microindentador FUTURE-TECH.

### 3.7 Metalografías

Las muestras se prepararon en moldes individuales para resina en frío, por tal motivo no fue necesario el uso de montadoras automáticas. Una vez que se obtiene las muestras, pasan por todo un proceso de pulido, para dejar las piezas con un acabado espejo y poder ser observadas y medidas. Se utilizó el mismo tipo de preparación de muestras para la observación microscópica y la medición del perfil de microdureza.

Para realizar los análisis metalográficos se utilizaron muestras montadas en resina transparente en frío, utilizando un pulido automático a 150 rpm con 6 libras de presión y como ataque químico *kroll's* [32] (1-3 ml HF, 2-6 ml HNO<sub>3</sub>, 100 ml H<sub>2</sub>O), aplicado en la superficie con un cotonete, posteriormente del tiempo de ataque fue removida con agua y finalmente la pieza se enjuagó con alcohol para evitar alguna oxidación o mancha del agua.

La caracterización mediante microscopía óptica de las muestras se lleva a cabo mediante un estereoscopio de la marca Leica, modelo Z30V, que se muestra en la Figura 3-9 A, se observaron las diferentes zonas reveladas en las muestras. Como parte de la metalografías se utilizó un microscopio óptico Zeiss Jenatech-Inspection que se muestra en la figura 3-9 B, que posee un cabezal rotatorio con 5 objetivos de diferente distancia focal que permiten obtener 5, 10, 20, 50 y 100 aumentos permitiendo observar tamaño de grano, fases, etc. Además, el microscopio tiene acoplada una cámara CCD en color conectada a una computadora que permite, mediante un software, capturar imágenes en color de las muestras observadas.

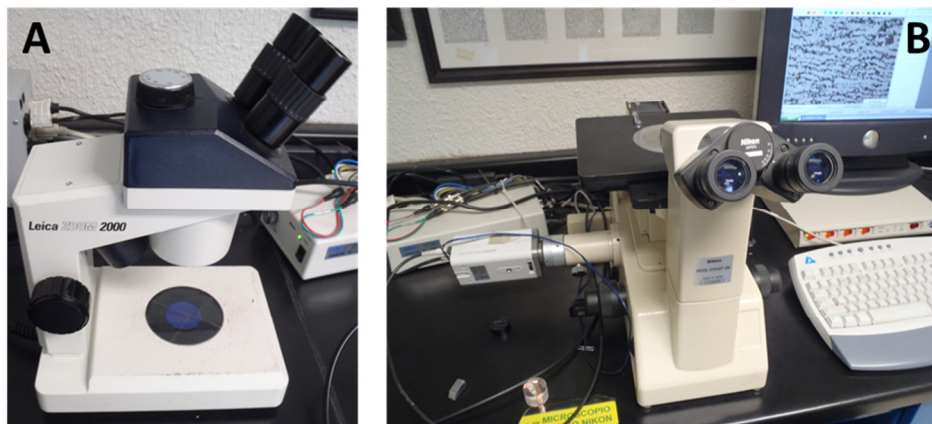


Figura 3-9.- A) Estereoscopio Leica Zoom 2000, B) Microscopio óptico Zeiss Jenatech-Inspection.

### 3.8 *Fractografías*

Las fractografías de la superficie de fractura de los especímenes ensayados a tensión con y sin daño previo fueron obtenidas mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés). A través de las fractografías se pueden observar los diferentes modos o mecanismos de fallas por los que una pieza, probeta, etc., pueden fallar y fracturarse.

En todos los estudios se utilizó un microscopio JEOL JSM-6640LV con un potencial de aceleración de 10 kV, una intensidad de filamento de 2.85 A y una intensidad electrónica sobre la muestra de 75 pA.

### 3.9 *Medición superficie soldadura (esfuerzos residuales)*

Los esfuerzos residuales se midieron en la dirección longitudinal en la muestra con soldadura mediante el método de contorno. Esto se llevó a cabo cortando la muestra en un plano perpendicular a la soldadura mediante una electroerosionadora de hilo. La forma de la superficie deformada, resultante de la relajación de los esfuerzos residuales, se midió mediante una máquina de coordenadas.

#### 3.9.1 *Método de contorno*

El método de contorno, es un nuevo y poderoso método para la medición de esfuerzos residuales en soldaduras [33, 34,35]. En el Apéndice A se muestran los programas, desarrollados en MatLab®, para la unión soldada. De los datos obtenidos (x,y,z) de la superficie cortada y medida en la máquina de coordenadas, se organizan y acomodan en Excel, después de que son acomodados, se guardan como archivo .csv, de aquí se abren en una hoja de texto y se guardan finalmente como archivo .txt, el cual se carga en el programa. También se carga otro archivo de texto con el número de nodos de la superficie (el mallado), en este caso, en el programa el mallado de la superficie fue de “x” 171 nodos y en “y” 25 nodos. En la primera parte del programa se genera la superficie deformada de la muestra, la cual sufre

cierta deformación y/o distorsión durante el proceso de soldadura, la superficie es generada a través de los archivos de texto cargados.

Esta primera parte incluye el mallado y suavizado de la superficie. En el suavizado de la superficie se eliminan todos los picos de la superficie original, es decir, se suaviza y se hace más fina. En este caso, el suavizado de la superficie se hizo utilizando una aproximación cuadrática, mediante el uso de “splines”. La finura del mallado y suavizado de la superficie también depende de la densidad de puntos de la nube, es decir, entre más densa sea la nube de puntos, más fino es el mallado y el suavizado de la superficie. Como se mencionó anteriormente la densidad de la nube de puntos fue (171, 25).

En la segunda parte del programa se generan los desplazamientos de la superficie los cuales son guardados en una hoja de Excel, estos desplazamientos más adelante son agregados a ANSYS®. Los desplazamientos son generados a través de un código introducido en el programa, éste código incluye códigos de ANSYS® con el fin de que los desplazamientos se pueden agregar para el análisis de los esfuerzos residuales en el elemento finito.

### *3.9.2 Elemento Finito*

El Método de Elemento Finito (MEF) es uno de los pocos métodos prácticos para realizar análisis de estructura y modelos tridimensionales. El análisis de modelos en 3D conlleva un mayor uso de recursos computacionales y toma mayor cantidad de tiempo que un análisis bidimensional; por esto, resulta importante simplificar al máximo el análisis que se realiza por Elemento Finito. El punto de partida del MEF es la subdivisión en sub dominios pequeños llamados elementos. Las formas básicas de los elementos para modelado en 3D son el tetraedro y el hexaedro.

Para éste análisis se utilizó un elemento SOLID 185, el cual se utiliza en la discretización de elementos tridimensionales. Éste elemento se define a partir de ocho nodos, cada uno de los

los nodos tiene tres grados de libertad, que corresponden a las tres direcciones de los desplazamientos.

Para el cálculo de los esfuerzos residuales se consideró un análisis estructural, con el cual se determinará la distribución de esfuerzos bajo la aplicación de los desplazamientos generados previamente en el programa de MatLab®. Para el análisis se consideró un material isotrópico y linealmente elástico. Las propiedades mecánicas utilizadas para el análisis se muestran en la Tabla 3-5. Los valores del módulo de elasticidad, empleados en el análisis para el cálculo de los esfuerzos residuales la muestra, fueron obtenidos al caracterizar la unión soldada mediante las pruebas cuasi-estáticas realizadas, mientras que el módulo de Poisson se tomó el valor común para este material.

Tabla 3-5.- Propiedades mecánicas de la unión GTAW utilizada para el análisis de los esfuerzos residuales.

Muestra	GTAW
Módulo de elasticidad, E (GPa)	97.00
Módulo de Poisson, $\nu$	0.3

Después de haberse elegido el tipo elemento, definirse las propiedades mecánicas del material, se procedió a generar la geometría. Se generó un rectángulo con las dimensiones de 85.5 x 3 mm, estas dimensiones representan las superficies medidas por la máquina de coordenadas. Después de generarse el área del rectángulo, se hizo un extruido de 2mm en dirección normal a la cara de éste.

Una vez hecha la geometría, se realizó el mallado en la pieza, como se muestra en la Figura 3-10. El mallado se realizó de la siguiente manera: 171 divisiones en las líneas superior e inferior del rectángulo, 25 divisiones en las líneas laterales del rectángulo, y elementos de 1mm en las líneas del extruido generado. Ya que se hizo el mallado a la pieza, se seleccionó la cara frontal para ver la numeración de todos los nodos generados por el mallado. Entonces, los

números de los nodos de esa área, se pasaron a una hoja de Excel (acomodados por filas y columnas) para que se generara el archivo de texto con el nombre de ansys.txt que es cargado en el programa de MatLab®.

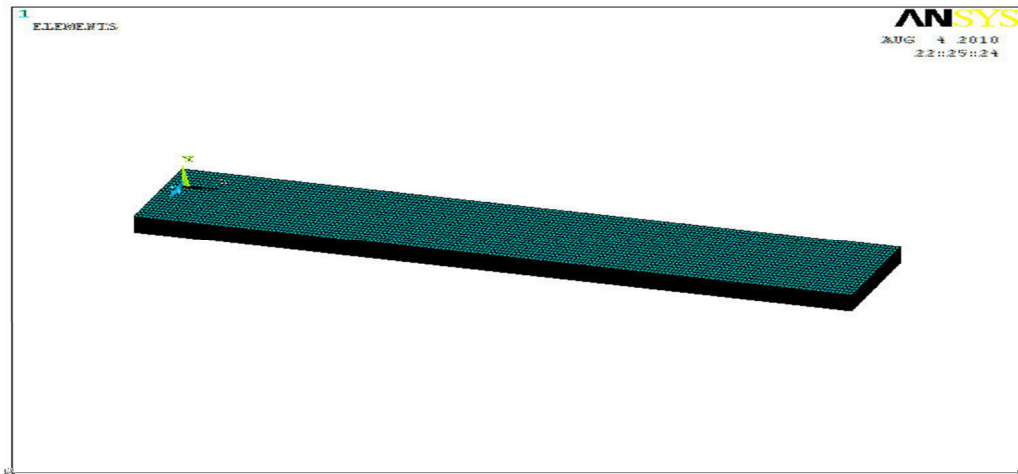


Figura 3-10.- Mallado de la pieza en ANSYS® para el análisis de los esfuerzos residuales.

Posteriormente, todo lo hecho en ANSYS® (tipo de elemento, propiedades mecánicas, geometría, mallado) se guardó como archivo .log, para después pegar en el archivo el código de los desplazamientos generados en MatLab.

Una vez copiado el código de los desplazamientos, se abrió un nuevo archivo en ANSYS® y se cargó el archivo .log ya con los desplazamientos. En la Figura 3-11 se muestran los desplazamientos aplicados en la cara frontal de la pieza. Esta cara frontal es la superficie cortada por hilo y también la superficie medida por la máquina de coordenadas. Se aplicaron restricciones a la cara de atrás, la cual es paralela a la cara donde aplicaron los desplazamientos. Las restricciones aplicadas a esta cara fueron los desplazamientos en todas las direcciones (x,y,z). Después se procedió a la etapa de solución y posteriormente el postprocesamiento para ver los resultados del análisis ejecutado. En el Apéndice B se muestra el programa de ANSYS® para el cálculo de los esfuerzos residuales.

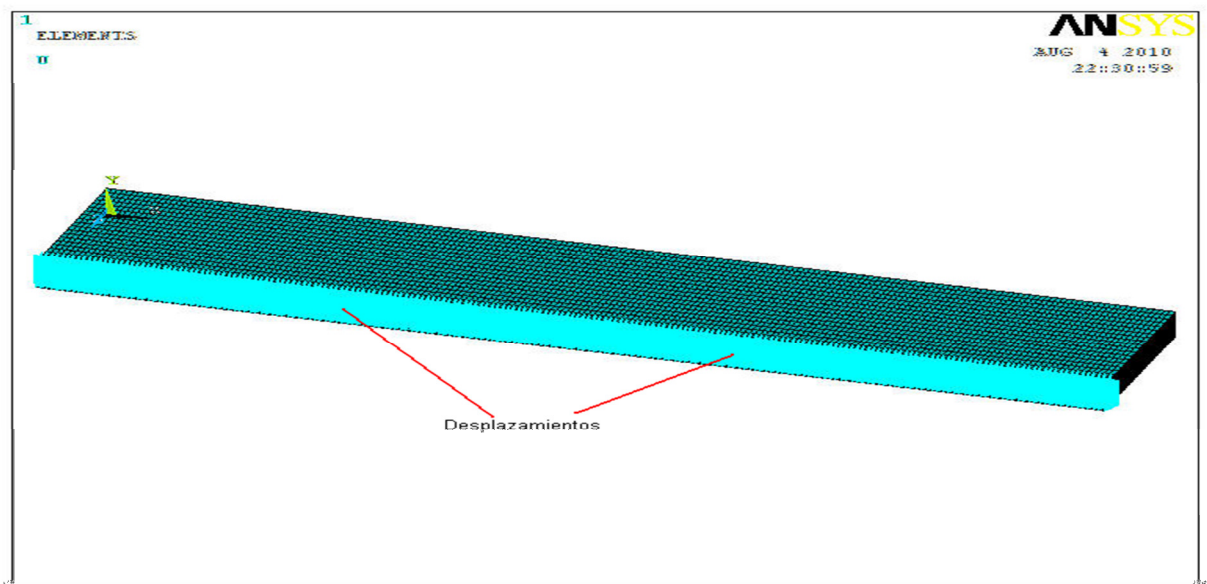
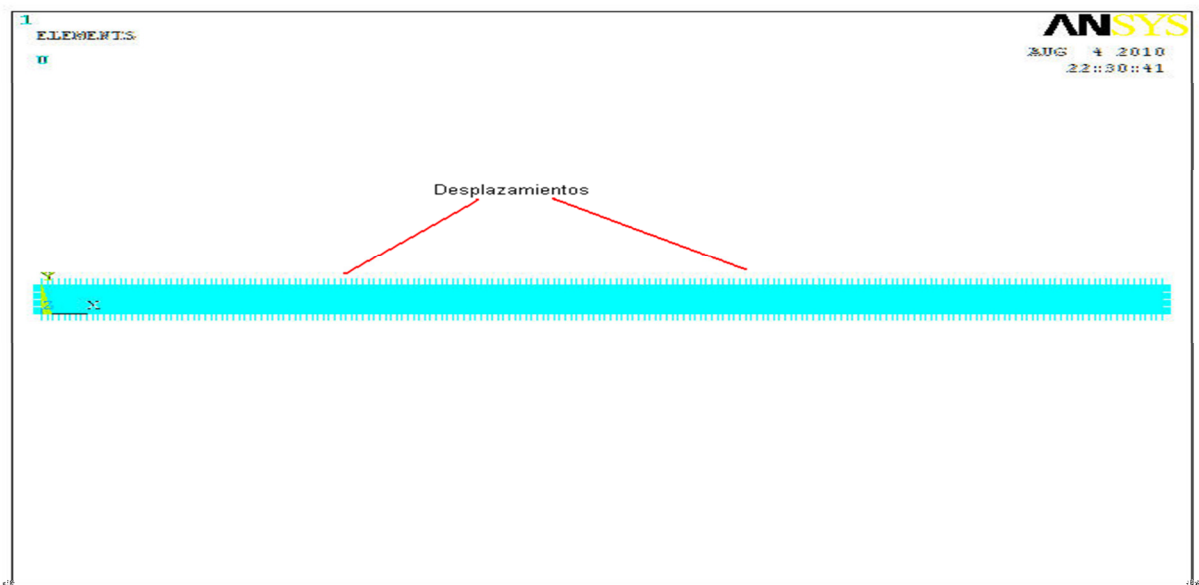


Fig. 3-11. Desplazamientos generados en MatLab®, inducidos en ANSYS®, para el análisis de los esfuerzos residuales.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, así como la comparación de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas, fatiga, microdureza, microestructuras y esfuerzos residuales, de las uniones soldadas por el proceso GTAW (figura 4-1a) y el metal base de la aleación Ti6Al4V.

Para los ensayos de tensión y de fatiga como se mencionó en el capítulo III, se emplearon especímenes (figura 4-1b) de un solo tipo material cuyas dimensiones fueron estandarizadas como se muestra en la figura 3-1, siendo la única diferencia entre ellos que uno tiene la unión de soldadura y el otro es metal base.

La aleación utilizada cumple con los requerimientos mínimos de estándares como ASTM B265 Grado 5, ASM Ti alloys Ti6Al4V, ASTM F135 entre otros.

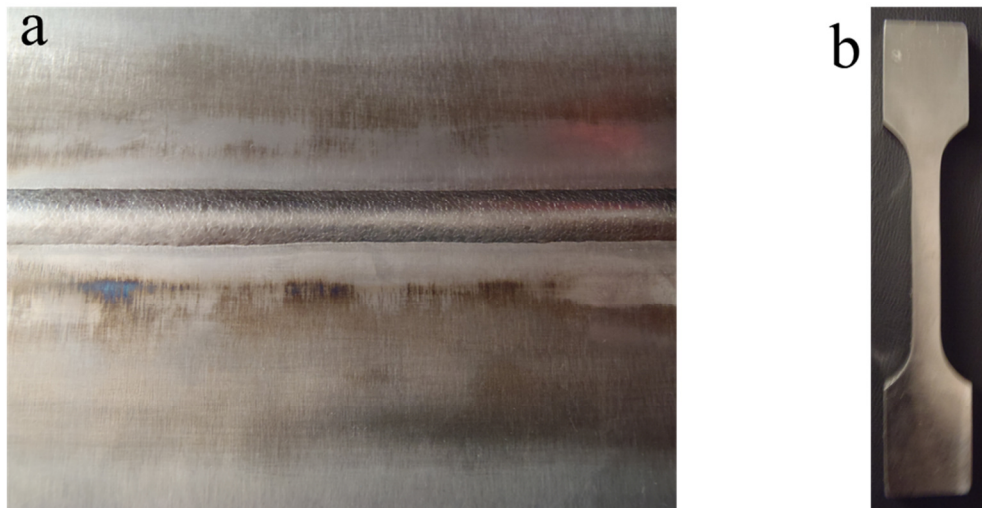


Figura 4-1.- A) Unión Soldada GTAW, B) especímenes utilizados.



#### 4.1 Ensayo uniaxial de tensión sin daño previo por fatiga

Se realizaron ensayos de tensión al material base y la unión soldada libres de daño por fatiga para conocer sus características mecánicas antes inducir algún daño al material por medio de fatiga.

##### 4.1.1 Ensayo de tensión metal base

Se ensayaron cuatro especímenes a tensión de metal base libre de daño para tener una buena referencia del comportamiento mecánico del material base sin daño por fatiga. Los resultados de las características mecánicas se muestran en la tabla 4-1.

Tabla 4-1.- Características mecánicas del metal base libre de daño.

METAL BASE						
	1	2	3	4	ASM Ti alloys Ti6Al4V	ASTM F 136
Resistencia a la tensión (Mpa)	991.65	989.70	994.44	992.45	900	860
Esfuerzo de cedencia (Mpa)	937.80	936.89	938.78	936.34	830	795
Módulo elasticidad (Gpa)	121.00	121.00	121.00	121.45	----	----
% reducción de área	34.52	32.50	33.51	33.65	10 % min	10 % min
%de elongación	17.06	16.22	16.91	16.92	10 % min	10 % min

El material base es comparado contra 3 especificaciones (ASTM B265 GRADO 5, ASM Ti alloys Ti6Al4V, ASTM F 136) para asegurar que cumpla con las propiedades mecánicas mínimas necesarias de esta aleación, obteniendo buenos resultados, por encima de los valores mínimos permisibles para los diferentes estándares, verificando así que el material con el que se está desarrollando la parte experimental cumple con la calidad marcada por estándares internacionales.

En los ensayos de tensión podemos observar una excelente repetibilidad del material base, tanto en su esfuerzo máximo como en su punto de cedencia como se ve en la figura 4-2, esto se debe a la homogeneidad del material y las buenas propiedades del material, también de estas curvas se obtiene el módulo de Young.

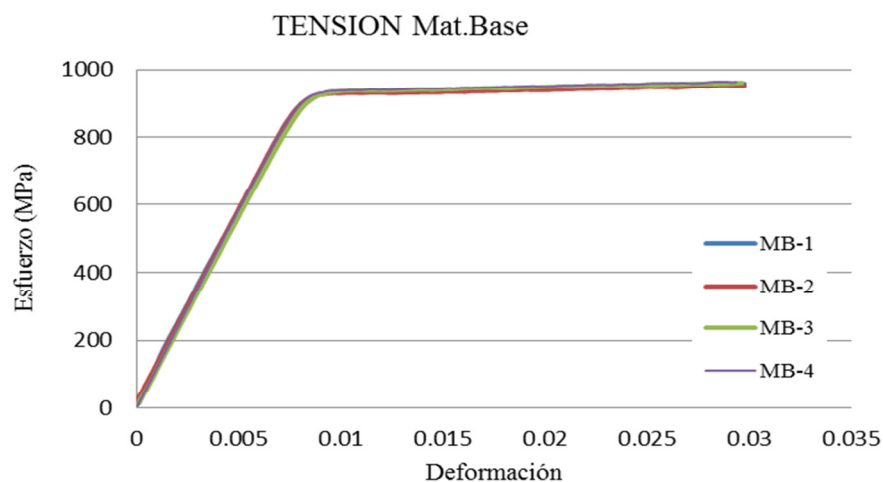


Figura 4-2.- Ensayo tensión material base.

#### 4.1.2 Ensayo de tensión unión GTAW

SOLDADURA				
	1	2	3	4
Resistencia a la tensión (MPa)	990.00	971.71	974.15	991.40
Esfuerzo de cedencia (MPa)	893.48	870.17	872.00	875.96
Módulo elasticidad (GPa)	97.00	97.00	97.00	97.00
% reducción de área	13.44	12.23	12.38	11.02
% de elongación	4.62	4.43	4.37	4.38

Tabla 4-2.- Características mecánicas de la unión soldada libre de daño.

Se ensayaron cuatro especímenes a tensión de la unión soldada libre de daño, podemos observar en los resultados mostrados en la tabla 4-2 que se obtienen valores superiores a los mínimos requeridos por los estándares para el material base en tensión y cedencia, ya que el % de elongación en la reducción de área no es directamente significativo y que los especímenes no cuentan con una longitud calibrada de 2” como lo indican los estándares, por lo tanto podemos concluir que nuestra junta tiene un 100% de eficiencia.

Las pruebas de tensión en la soldadura nos reflejan un comportamiento mecánico cuasi-estático homogéneo en las 4 probetas como se ve en la figura 4-3, tomando en cuenta los valores obtenidos en los estándares del metal base como referencia para comparar la eficiencia de la junta, se tiene que tanto el procedimiento que se diseñó para esta aleación y su aplicación cumple satisfactoriamente con los requisitos mínimos establecidos, lo cual nos da la certeza de que la soldadura aplicada tiene una buena calidad.

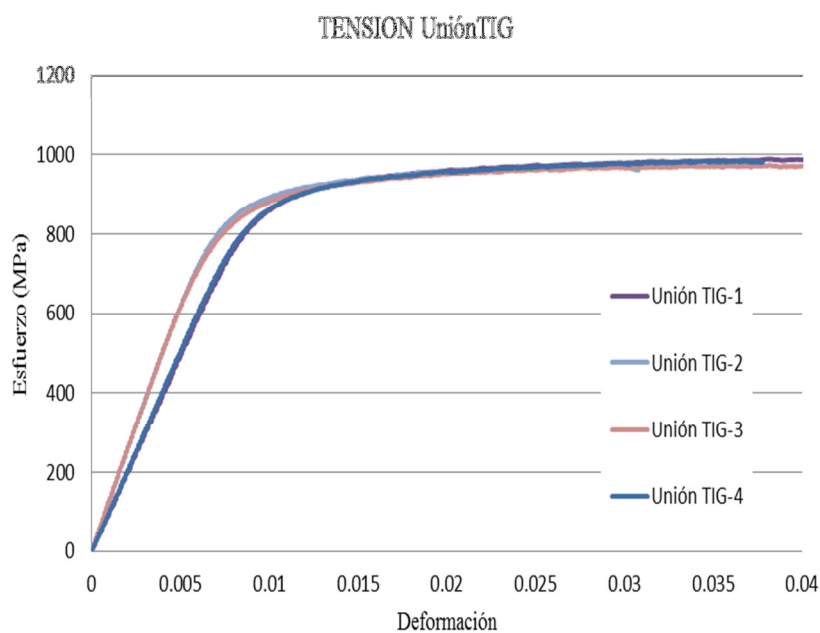


Figura 4-3.- Ensayo tensión unión soldada.

Nótese que las propiedades de la unión TIG son casi las mismas que la del material base. El esfuerzo último de las uniones de TIG es alrededor del 98.99% del valor en el material base y el esfuerzo de fluencia es alrededor del 93.91% del obtenido en el material base, lo podemos apreciar gráficamente en la figura 4-4. Por lo cual podemos asumir que se tiene una eficiencia aceptable, por encima del 90% en la unión soldada.

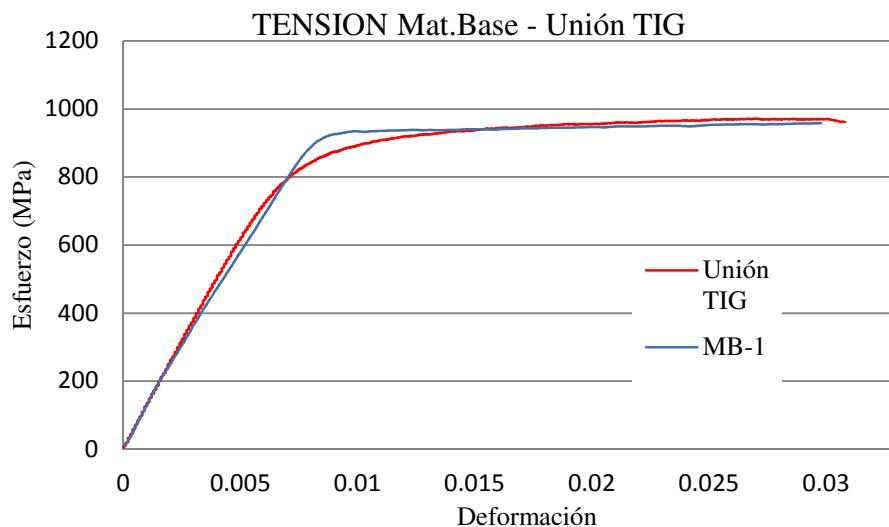


Figura 4-4.- Ensayo tensión unión soldada vs Metal Base.

#### 4.2 Fatiga

Para determinar las curvas S – N se realizaron múltiples ensayos de los especímenes tanto del metal base como de la unión solada tomando como puntos significativos para el trazo de las curvas los puntos de mayor repetitividad, todos los especímenes fueron fatigados hasta la ruptura.

Se realizaron pruebas de fatiga por control de esfuerzo, donde se aplicó diferentes niveles de esfuerzo a los especímenes, usando una carga cíclica uniaxial entre los límites del esfuerzo constante con la relación de reversión de esfuerzos  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.1$ .

La carga cíclica con una forma de onda senoidal a una frecuencia de 30 Hz a una temperatura ambiente.

#### 4.2.1 Curvas S – N metal base

Se aplicaron niveles de esfuerzo máximo del 91, 86, 84, 80, 75, 70 % del esfuerzo de cedencia para trazar la curva esfuerzo contra número de ciclos (S-N) como se aprecia en la figura 4-5, los resultados de los ciclos obtenidos a la ruptura se presentan en forma logarítmica para su mejor interpretación, todas las pruebas fueron controladas por nivel de esfuerzo como se muestra en la tabla 4-3.

Tabla 4-3.- Datos de las pruebas de fatiga en el metal base.

METAL BASE				
	Frec. Hz	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Ciclos N
1	30	850	85	28355
2	30	800	80	75036
3	30	775	77.5	77827
4	30	750	75	198451
5	30	700	70	322346
6	30	650	65	611056

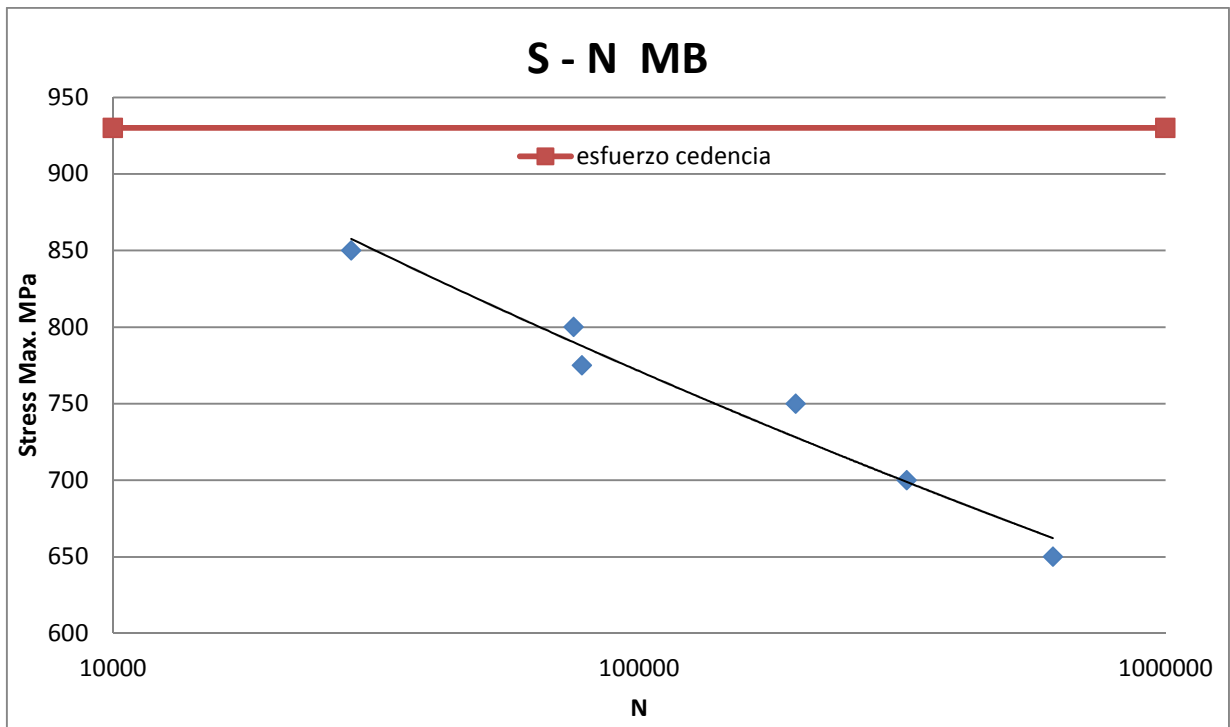


Figura 4-5.- Curva “esfuerzo- ciclos” S-N metal base.

El comportamiento de las curvas S – N es descrito por la ecuación de Basquin, que para el metal base tiene forma:

$$\sigma_{max} = 2032.2N_f^{-0.084}$$

Donde  $\sigma_{max}$  esta dado en MPa

#### 4.2.2 Curvas esfuerzo – ciclos (S – N) unión GTAW

En la aplicación de los ensayos de fatiga en la soldadura se tuvo un poco de dispersión, no se tuvo tan buena respetabilidad como en el metal base, por lo cual se realizaron varios ensayos como se ve en la tabla 4-4 con el mismo nivel de esfuerzos y poder tomar el valor óptimo.

SOLDADURA				
	Frec. Hz	Esfuerzo max (MPa)	Esfuerzo min (MPa)	Ciclos N
1	30	750	75	9015
2	30	700	70	37397
3	30	700	70	30192
4	30	700	70	52040
5	30	650	65	70264
6	30	650	65	28478
7	30	600	60	90054
8	30	550	55	89557
9	30	550	55	36922
10	30	550	55	112796

Tabla 4-4.- Datos de fatiga unión GTAW.

En la curva s – n de la figura 4-6 de la soldadura, se muestran los niveles de esfuerzos ensayados.

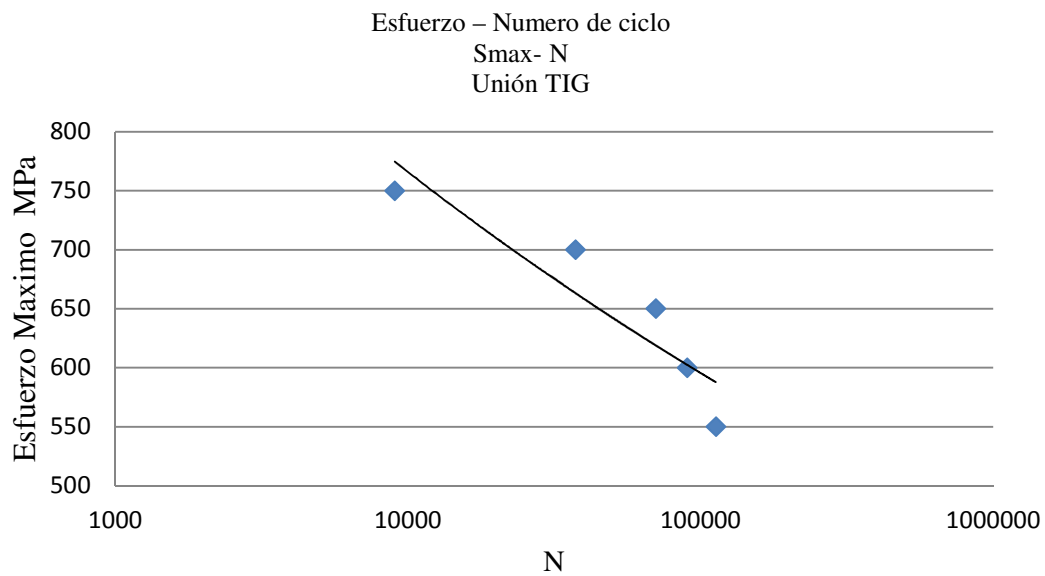


Figura 4-6.- Curva S – N unión GTAW.

El comportamiento de las curvas s – N es descrito por la ecuación de Basquin, que para la unión soldada tiene la siguiente forma:

$$\sigma_{max} = 2095.7N_f^{-0.109}$$

Donde  $\sigma_{max}$  está dado en MPa

#### 4.2.3 Acumulación de daño por fatiga.

Tomando como punto de referencia la curva s-n, se indujo el daño por fatiga a los especímenes a diferentes porcentajes de daño. El daño por fatiga fue introducido en los especímenes por la aplicación de carga cíclica bajo la condición de control de esfuerzo.

Para realizar la acumulacion de daño se tomó como referencia un esfuerzo de 700MPa en ambos casos, de ahí se acumuló daño en un 75, 50 y 25% de daño en ambos casos como se muestra en la tabla 4-5.

	100% ruptura ciclos	75% daño ciclos	50% daño ciclos	25% daño ciclos
Metal Base	322,346	241,759	161,173	80,586
Unión TIG	37,397	28,047	18,698	9,349

Tabla 4-5.- Numero de ciclos y porcentaje de daño.

#### 4.3 Ensayo uniaxial de tensión con daño previo

Ya que se tenía especímenes previamente dañados por fatiga al 25 50 y 75% del daño establecido, se aplicaron ensayos cuasiestaticos de tensión a los especímenes tanto de metal base como especímenes con soldadura.



#### 4.31 Metal base

Se realizaron 2 ensayos de tensión con cada nivel de daño 25 50 y 75%, como la tabla 4-6 lo muestra, no se tiene un cambio significativo en el esfuerzo de tensión, respecto al esfuerzo de cedencia se tiene una pequeña variación respecto a los especímenes fatigados al 25 y 75% de daño.

Tabla 4-6.- Características mecánicas del metal base con daño previo.

METAL BASE CON DAÑO PREVIO						
	1 25%	2 25%	1 50%	2 50%	1 75%	2 75%
Resistencia a la tensión (MPa)	985.40	993.50	977.90	980.26	992.97	994.63
Esfuerzo de cedencia (MPa)	934.70	943.00	930.90	932.06	944.47	942.75
Módulo de elasticidad (Gpa)	113	116	111	114	113	112
% reducción de área	44.24	42.29	43.51	45.51	44.25	43.78
% de elongación	4.87	5.27	4.72	4.18	5.12	4.98

En la figura 4-7 se comparan los resultados de las probetas con daño previo por fatiga contra el material base libre de daño, donde podemos observar que no existe cambio significativo en ningún nivel de acumulación de daño respecto a las propiedades mecánicas del metal base sin daño previo.

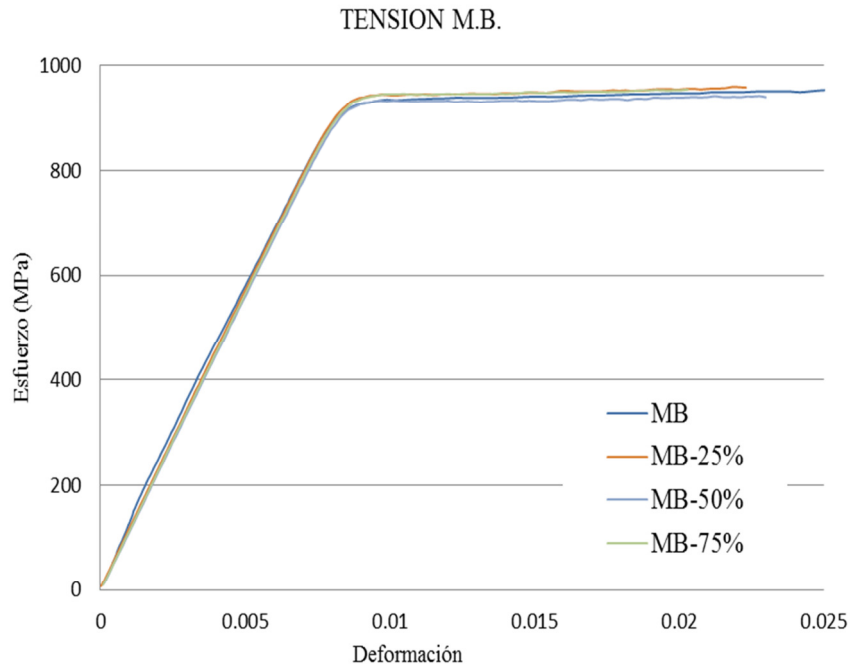


Figura 4-7.- Ensayo tensión metal base con daño previo.

#### 4.3.2 Unión GTAW

Las curvas esfuerzo-deformación cuasi-estáticas de la union soldada para diferente nivel de daño son mostradas en la figura 4-8 , donde de la misma manera que para el metal base se ensayaran 2 probetas para cada nivel de daño, sin embargo en estos ensayos podemos observar en la tabla 4-7 que el esfuerzo de tension aumentó gradualmente conforme el nivel de daño es mayor al igual que el esfuerzo de cedencia, al incrementarse el daño inducido por fatiga las propiedades mecanicas aumentaron.

Tabla 4-7.- Características mecánicas de la unión GTAW con daño previo.

SOLDADURA DAÑO PREVIO						
	1 25%	2 25%	1 50%	2 50%	1 75%	2 75%
Resistencia a la tensión (Mpa)	875.79	874.52	972.85	963.89	978.41	987.47
Esfuerzo de cedencia (Mpa)	861.16	864.25	878.15	874.32	836.97	893.22
Módulo de elasticidad (Gpa)	104.34	104.96	105.64	105.63	115.12	114.68
% reducción de área	44.24	42.29	43.51	45.51	42.12	44.36
% de elongación	4.87	5.27	4.72	4.18	4.96	4.48

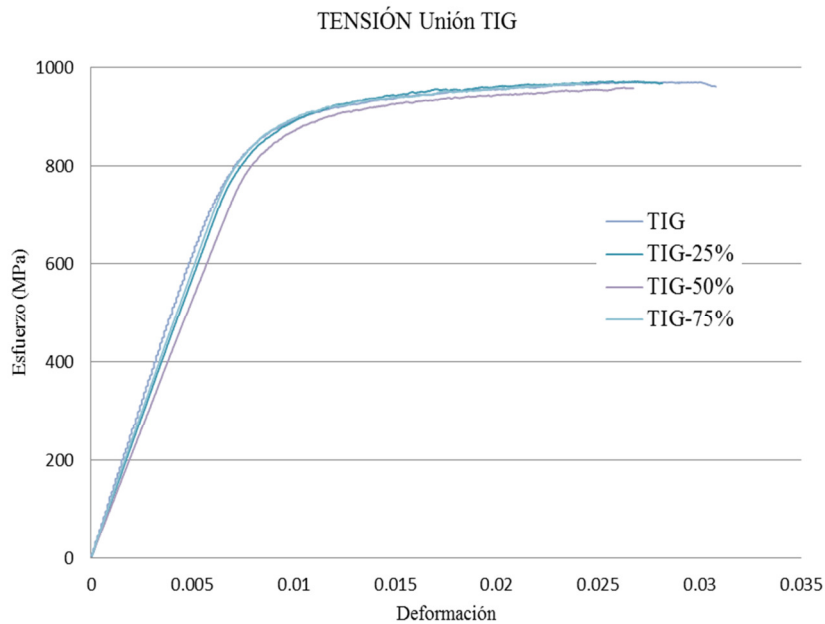


Figura 4-8.- Ensayo de tensión unión GTAW con daño previo.

Se incluye la resistencia mecánica de la unión sin daño para poder comparar el comportamiento del material con un daño acumulado.

Existen pequeñas variaciones debido a el daño acumulado en la unión soldada. Un resumen de las propiedades mecánicas de las uniones con y sin daño previo por fatiga se presenta en la

Tabla 4-8. La estabilidad de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas a diferente nivel de daño nos proporciona información para poder conjeturar que el comportamiento de esta estructura del material base y la unión soldada se comportan de manera similar a este nivel de esfuerzos.

El porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción de área se ve afectado seriamente con la aplicación de daño por fatiga, pero como podemos observar en la figura 4-9 una vez aplicado el daño en los porcentajes se mantiene estables independientemente del nivel daño aplicado.

Tabla 4-8.- Características mecánicas obtenidas ensayos de tensión Ti6Al4V.

	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)
M.B.	122	937	991
TIG.	97.4	880	981
MB25%	113	938	989
MB50%	111	930	977
MB75%	113	944	992
TIG25%	104	887	952
TIG50%	105	876	968
TIG75%	115	878	972

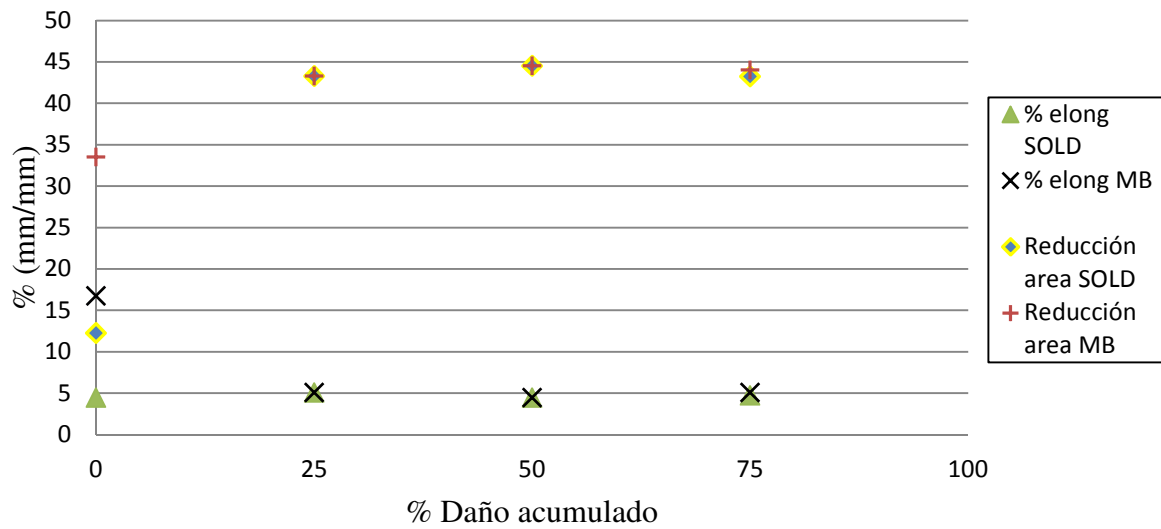


Figura 4-9.- % elongación y reducción de área.

#### 4.4 Metalografías

Para realizar los análisis metalográficos se utilizaron muestras montadas en resina transparente en frío, utilizando un pulido automático a 150 rpm con 6 libras de presión y como ataque químico *kroll's*.

En el metal base las metalografías se realizaron de forma longitudinal al sentido de rolado de la lámina, en la figura 4-10 podemos observar que la fase  $\alpha/\beta$ , la cual se encuentran en proporciones de 50- 50 %, presentándose la fase  $\alpha$  un poco alargada en forma de agujas.

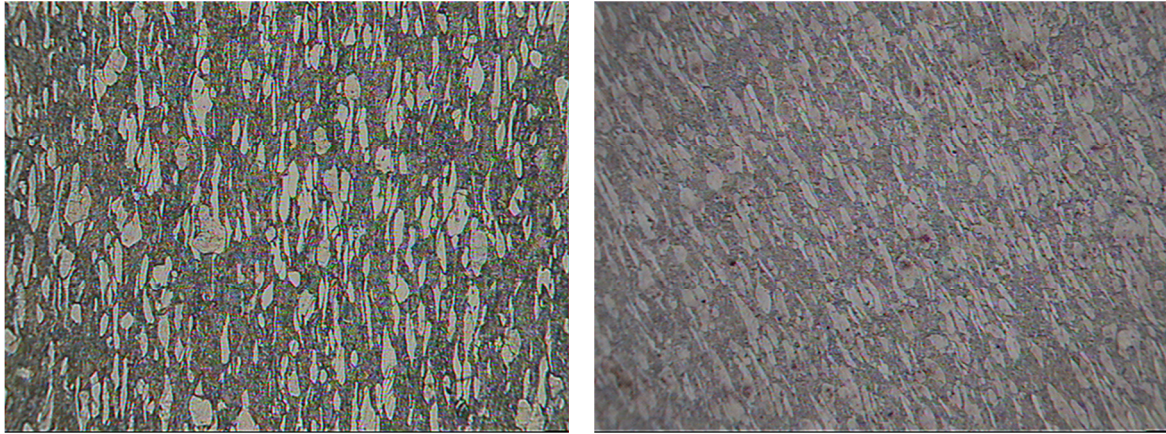


Figura 4-10.- Metal base Fase  $\alpha / \beta$  longitudinal (20X, 200X).

En la región de la soldadura encontramos un cambio en la micro estructura, ya que durante el proceso de soldadura se tiene un aporte de calor considerable llevando el material a fase  $\beta$  casi en su totalidad, y al enfriarse lentamente se genera una estructura laminar de placas  $\alpha$  llamadas placas de windmanstatten como se ve en la figura 4-11, la cual tiene una mayor tenacidad a fractura y mayor resistencia a la corrosión inducida por tensión, así mismo se tiene un incremento considerable en el tamaño de los granos en esta zona.

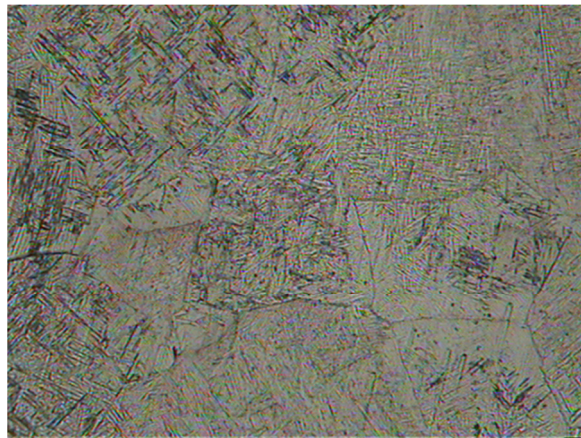


Figura 4-11.- Estructura windmanstatten y crecimiento del grano en el material de aporte ELI (20X).

En la zona afectada por la temperatura, esta aleación se presenta una baja ductilidad causada por una transformación de fase que ha ocurrido en el material depositado de la soldadura o en el metal base como se puede ver en la figura 4-12.

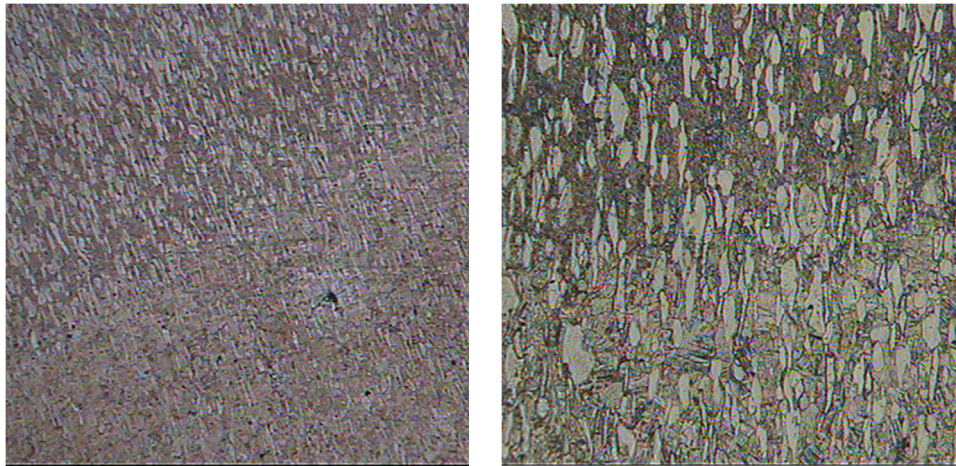


Figura 4-12.- Transformación de fase en la ZAT (100X).

#### *4.5 Fractografía*

Se realizó la fractografía de los especímenes que se llevaron a la fractura, tanto los que tienen daño previo por fatiga así como los especímenes que se encontraban libres de daño.

##### *4.5.1 Fatiga en Metal Base MB*

Primero se analizaron los modos de falla de los especímenes sometidos a la fractura por fatiga para el trazado de las curvas  $s$ - $n$ .

El material base de todos los especímenes muestra un comportamiento repetitivo en su modo de falla a la fatiga, encontrando estrías de fatiga y marcas de playa en toda la superficie, modos de falla muy característicos de que la falla se originó por esfuerzos de fatiga.



En la probeta (a) se observa que el inicio de la fractura ocurre en el borde de la probeta como se ve en la figura 4-13(a), de ahí se pueden observar las estrías por fatiga en todo el plano de fractura. En la figura 4-13(b) observamos una vista perpendicular a la superficie de fractura, pudiendo localizar la zona donde se inicia la fractura. Ya que la probeta falló por fatiga, podemos observar el mecanismo de fallo más común en toda la superficie de fractura, estrías de fatiga, como se muestran en la figura 4-14.

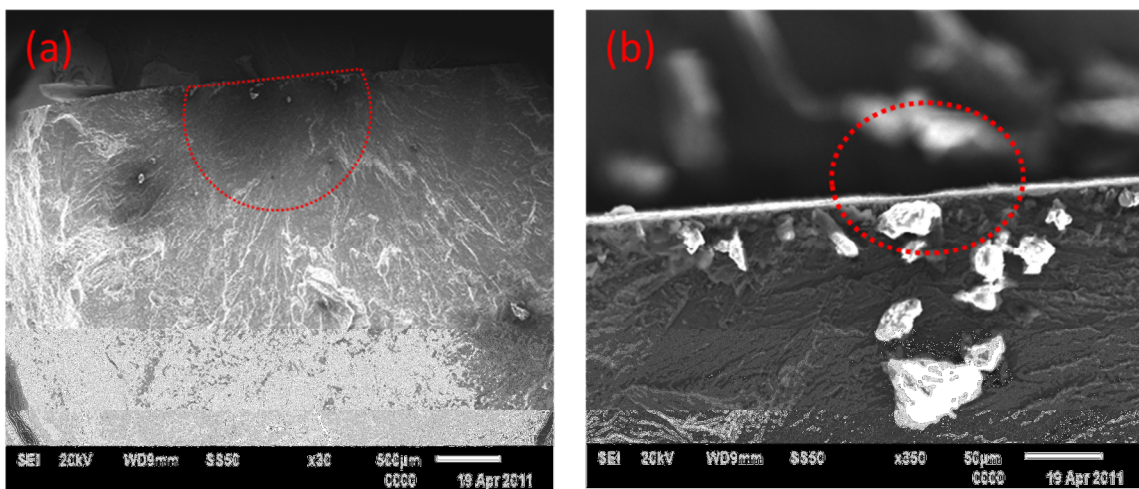


Figura 4-13.- A) Inicio de la falla inducido por fatiga B) Vista perpendicular a la superficie de falla.

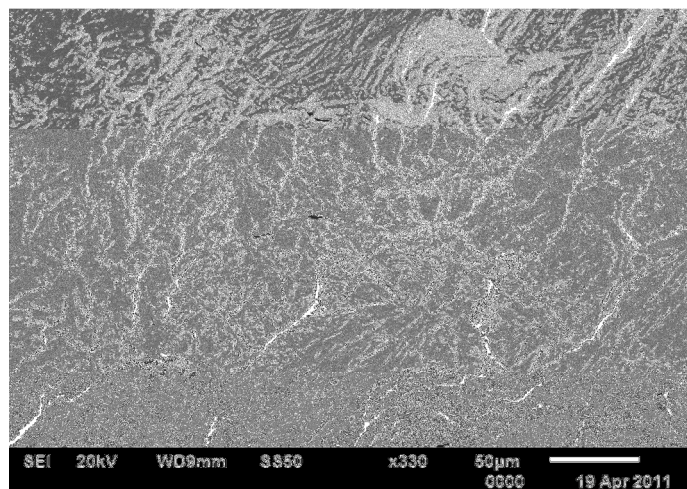


Figura 4-14.- Grietas de fatiga en toda la superficie de falla del espécimen (330X).



En la probeta (b) del metal base observamos el mismo modo de falla, grietas ocasionadas por fatiga (figura 4-15b) y un inicio de grieta en el borde del especimen (figura 4-15a) ocasionando la fractura por fatiga.

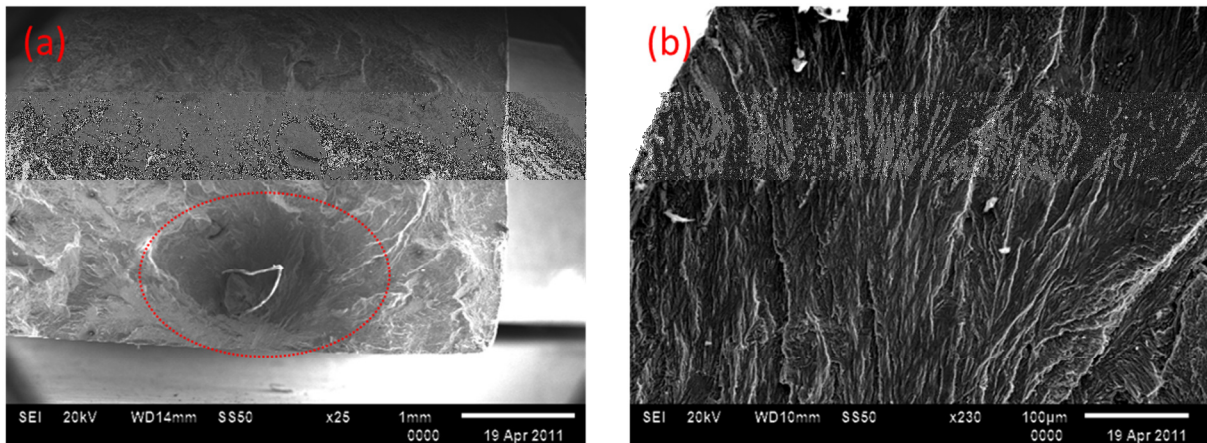


Figura 4-15.- A) Falla inducida por fatiga, B) Grietas de fatiga.

#### 4.5.2 Fatiga en la unión GTAW

Las superficies de fractura de las soldaduras presentan un patrón repetitivo, encontrando varios micro poros en todas las superficies de fractura como se aprecia en la figura 4-16, siendo éstos grandes concentradores de esfuerzos, originando la propagación de micro grietas que ocasionan la fractura final. Todos los microporos encontrados tienen diferentes dimensiones, como se ve en la figura 4-17a y b ,encontrando múltiples regiones con micro poros agrupados cerca de los bordes de los especímenes, siendo el tamaño del mayor poro encontrado  $94.340 \times 168.190 \mu\text{m}$ , como se dimensiona en la figura 4-18. Debido a sus dimensiones, no es posible detectar los microporos antes del ensayo de fatiga por algún método convencional no destructivo.

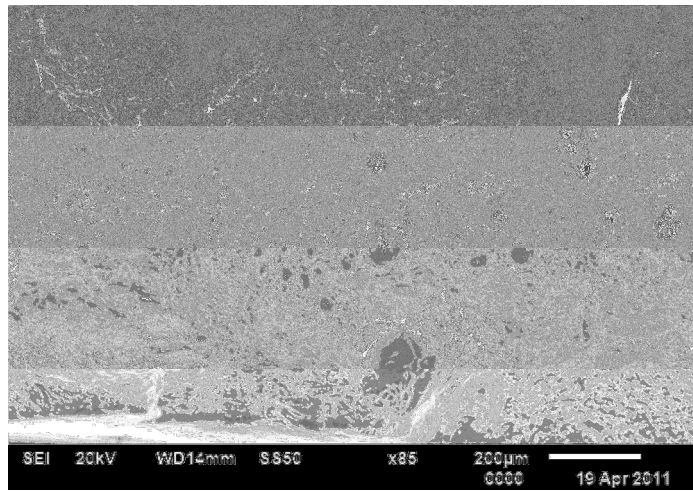


Figura 4-16.- Zonas con micro poros.

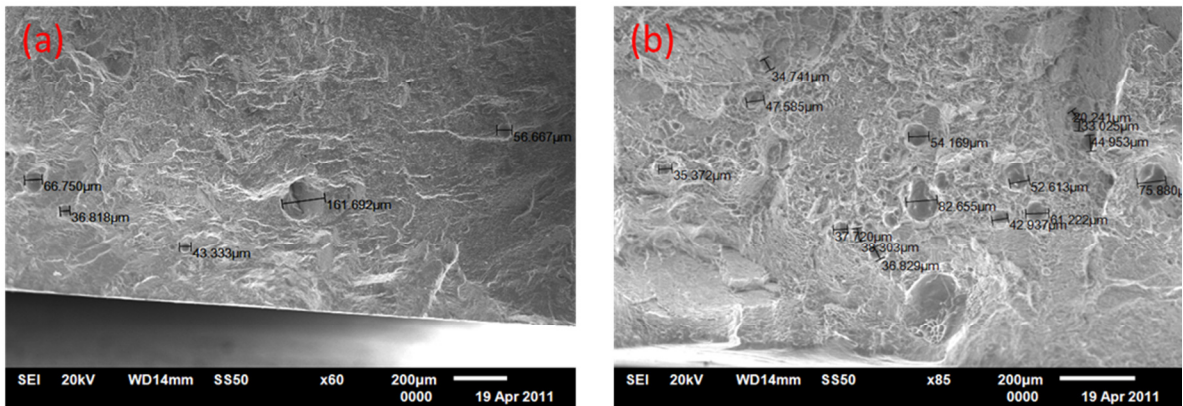


Figura 4-17.- Regiones con micro poros agrupados de diferentes tamaños.

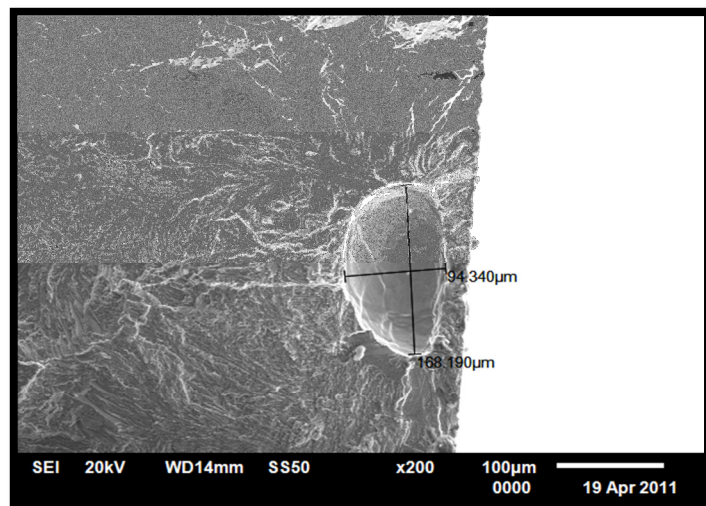


Figura 4-18.-Micro poro de mayores dimensiones.



Se encontraron micro poros redondeados, pueden observarse en la figura 4-19, y podemos asumir que actúan como concentradores de esfuerzos, ya que se puede apreciar en la figura 4-20 que a partir de los diferentes microporos surgen grietas de mayores dimensiones que las estrías de fatiga, que llevaron a la falla el material.

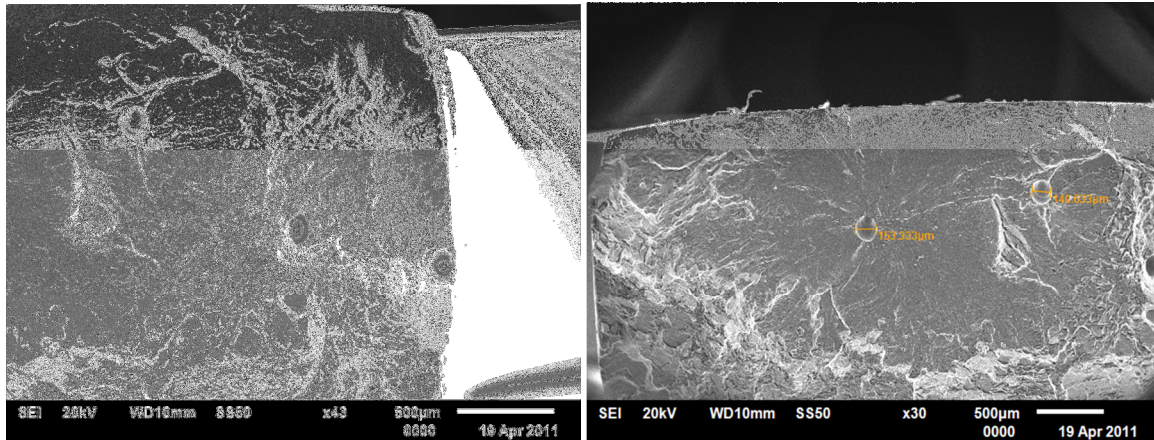


Figura 4-19.- Micro poros redondeados.

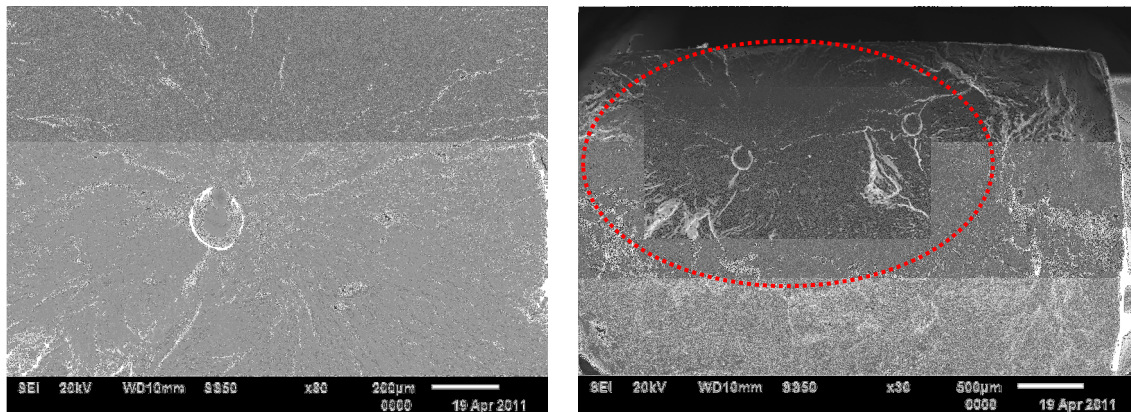


Figura 4-20.- Micro poros actúan como concentradores de esfuerzos.

Como se encontró el mismo modo de falla en todas las probetas, se realizaron análisis por dispersión de energía espectrométrica (siglas en inglés E.D.S.) para determinar de manera cualitativa la composición de elementos que se encuentra en los microporos. Se eligieron microporos al azar para realizar el análisis, como se muestra en la figura 4-21, y saber

si estos han sido generados por contaminación de la atmosfera al momento de aplicar la soldadura o una mala limpieza de las piezas. En general los resultados obtenidos por E.D.S. en los poros muestran un alto contenido de Ti, Al y V, en las figura 4-22 a y b se muestran los resultados del analisis EDs de dos poros, donde los elementos que se encuentran en mayor contenido, son elementos aportados por la aleación y no alguna contaminación de la atmosfera.

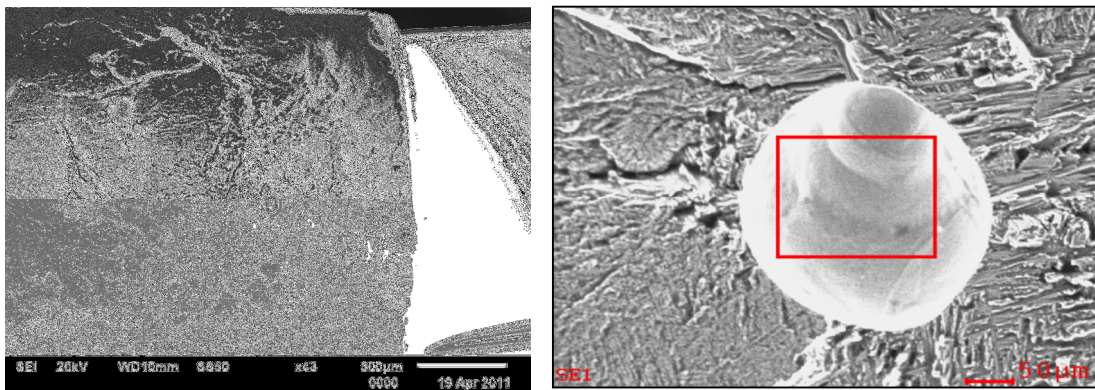


Figura 4-21.- Microporo seleccionado para análisis E.D.S.

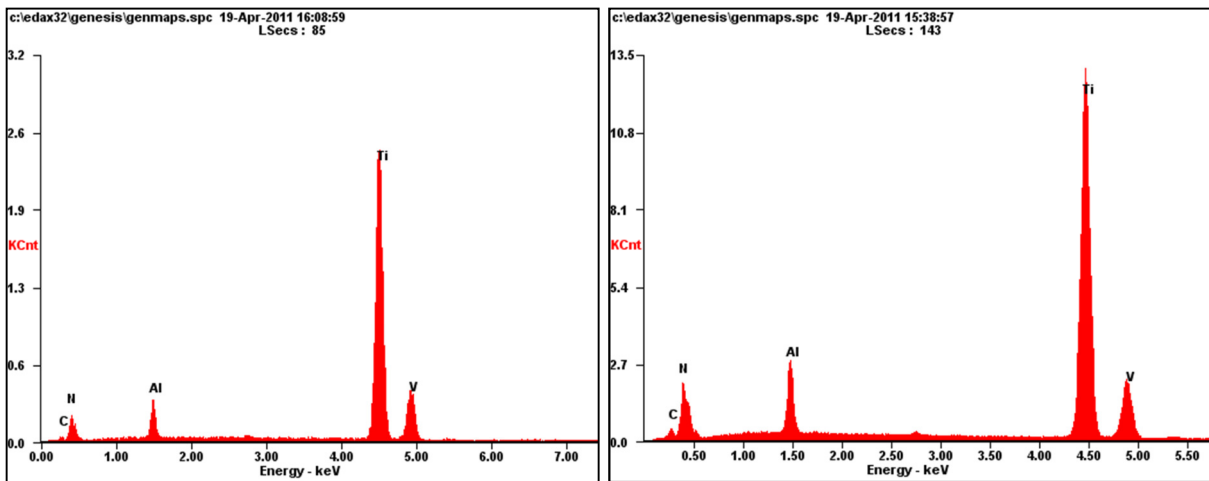


Figura 4-22.-Resultados del análisis EDS a microporos.

También se encontró otro defecto de la soldadura en algunos de los especímenes ensayados. Como se ve en la figura 4-23, algunos especímenes mostraron falta de fusión entre pasadas.

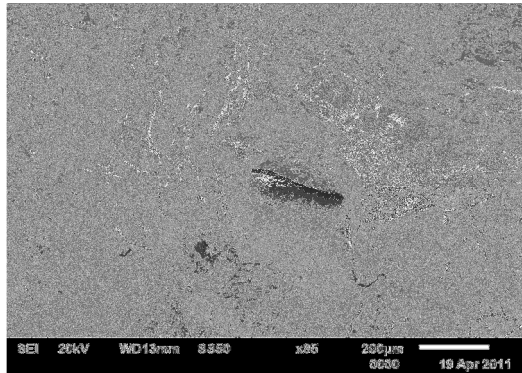


Figura 4-23.- Falta de fusión en la soldadura.

#### *4.5.3 Daño previo en la unión GTAW*

Las rupturas por fatiga no suelen presentar indicios de fallo inminente, es decir se trata de fracturas frágiles que se caracterizan por presentar zonas diferenciadas, una de textura lisa con aspecto de ruptura dúctil y otra de textura gruesa rugosa que es donde se localiza la ruptura final al rebasar la resistencia máxima del material.

En este caso los especímenes se encuentran con un daño previo por fatiga, pero la ruptura del material se debe a un ensayo de tensión, donde la falla del material se da por sobrecarga pudiendo esta, estar influenciada por el daño acumulado por fatiga.

##### *4.5.3.1 Daño previo de 25%*

###### *Probeta 1*

Se observan dos períodos durante la ruptura: un periodo de fractura frágil en el cual se tiene un ángulo recto respecto a la horizontal de la probeta (figura 4-24a), donde se ve una ruptura constante – estable, y después se produce la sobrecarga del material cambiando el ángulo de ruptura por el desgarramiento del material (figura 4-24b).



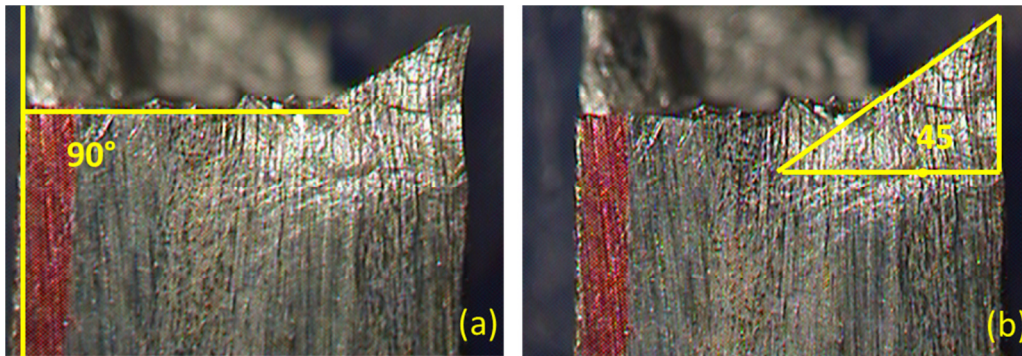


Figura 4-24.- Fractura de probeta con 25% de daño.

Encontramos que la ruptura del material se debe a la sobre carga como se observa en la figura 4-25, localizando el inicio de la fractura en el borde del espécimen, como se ve en la figura 4-26.



Figura 4-25.- Sobre carga del material.

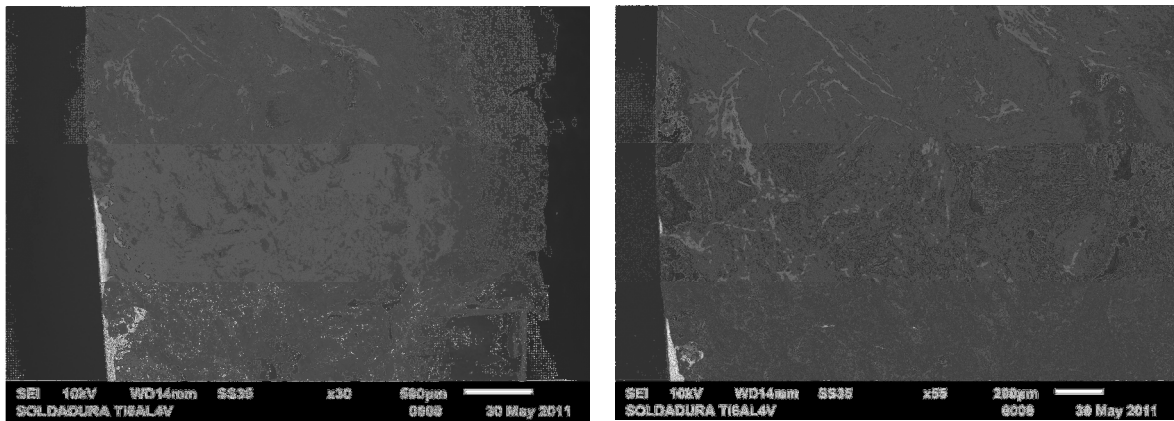


Figura 4-26.- Inicio de la falla (30x, 55X).

Encontramos estrías de fatiga en la región donde se originó la falla. Estas se generaron en el momento de dañar previamente el material, pero no crecieron lo suficiente para ocasionar la falla del material, así mismo, se observan múltiples regiones que presentan una singular morfología del modo de falla, “dimples”, que se observan en toda la superficie de falla, en la figura 4-27, siendo éstos buenos indicadores de que se tiene una ruptura dúctil en los especímenes.

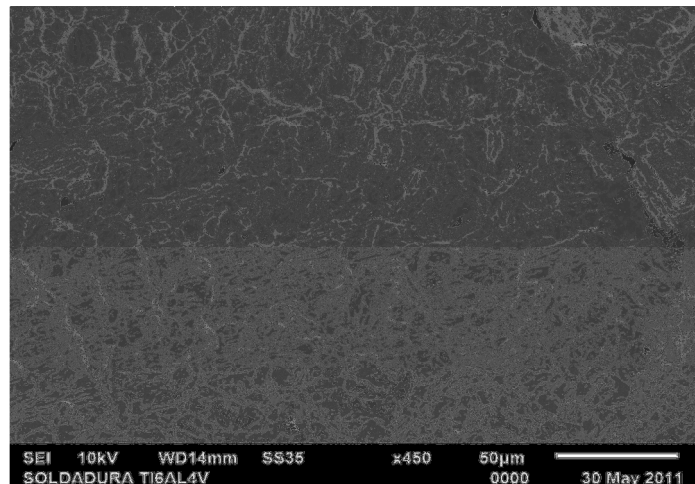


Figura 4-27.- “Dimples”, morfología del modo de falla.

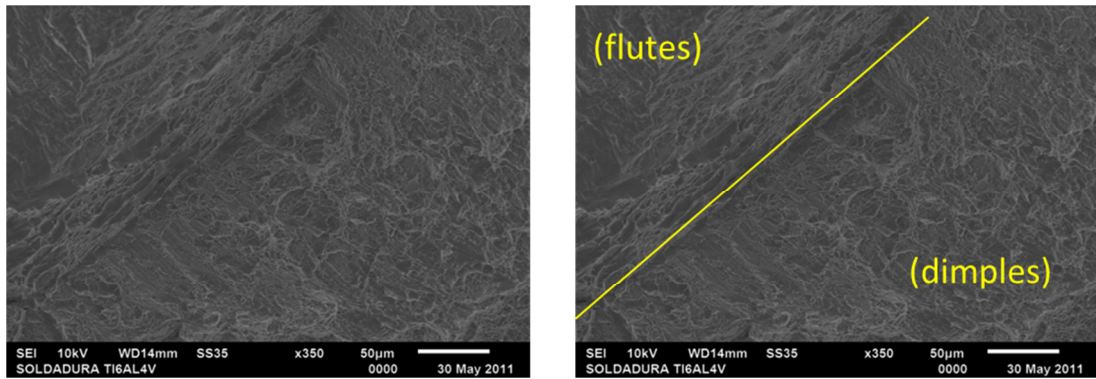


Figura 4-28.- Región con “dimples” y “flutes”.

En la región donde se tiene sobre - carga del material, encontramos un cambio en la morfología de “dimples” a “flutes”, ocasionados por la sobrecarga del material (figura 4-28).

### *Probeta 2*

La sobrecarga ocasiona la falla inducida por una falta de fusión que se ve en la figura 4-29, encontrando un poro rodeado de dimples en toda la superficie de fractura (figura 4-30).

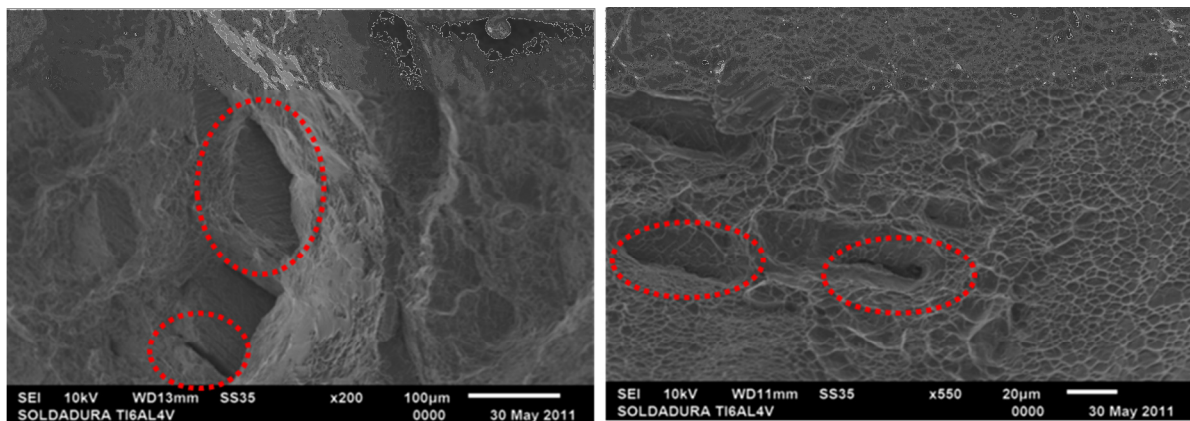


Figura 4-29.- Falta de fusión de la soldadura.



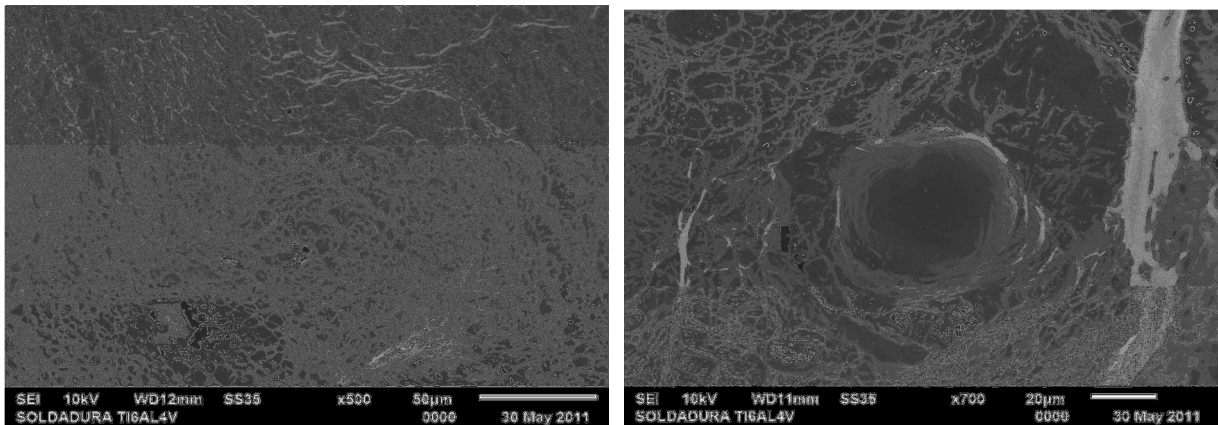


Figura 4-30.- Poro rodeado por dimples.

#### 4.5.3.2 Daño previo de 50%

##### *Probeta 1*

Se observa una fractura frágil en el contorno de la fractura, siendo la línea de fractura perpendicular al borde del espécimen (figura 4-31).

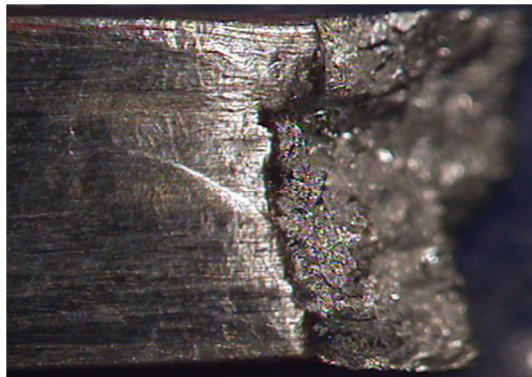


Figura 4-31.- Fractura del espécimen.

Se encontraron “dimples” en toda el área de fractura (figura 4-32), y zonas localizadas con poros agrupados (figura 4-33), siendo uno de ellos el que inició la falla.

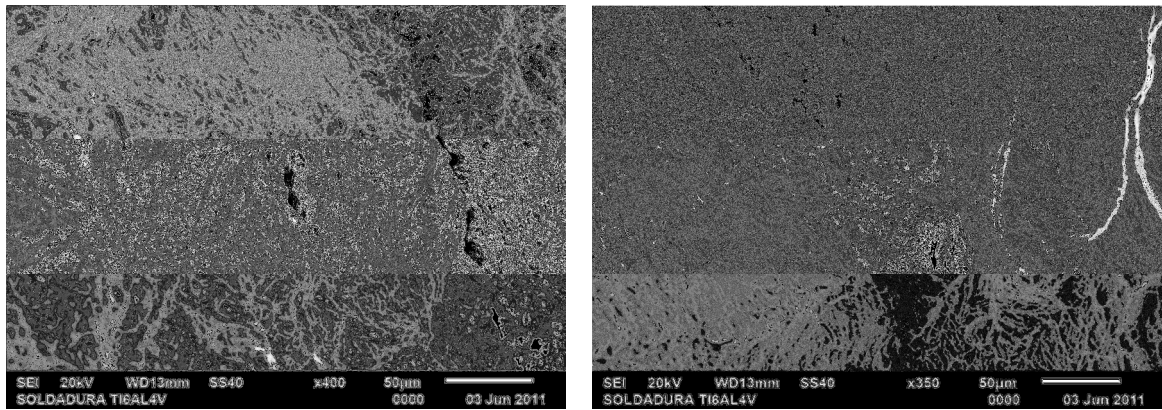


Figura 4-32.- Poro y zona de “dimples”.

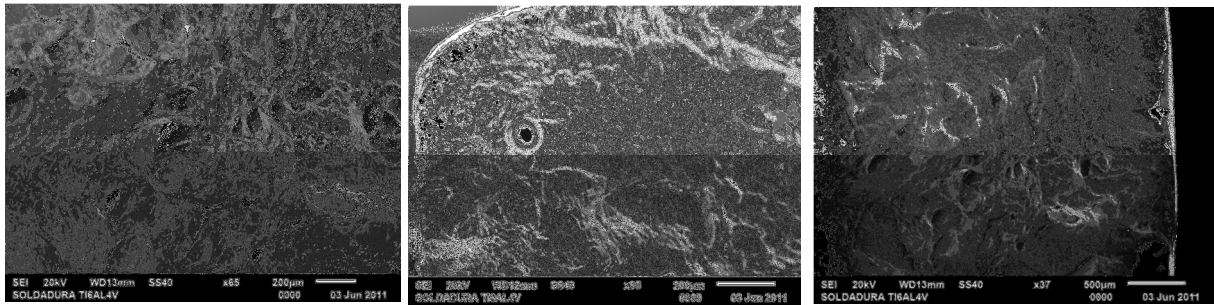


Figura 4-33.- Zonas de poros agrupados.

### *Probeta2*

En esta probeta podemos observar ciertos modos de falla ocasionados por la fatiga acumulada anteriormente, como lo son las estrías de fatiga que se observan en las figuras 4-34 y 4-35, pero sin ser la fatiga la que ocasiona la falla del material, ya que la ruptura del espécimen se debe a la sobrecarga del ensayo de tensión, presentando como morfología de falla dimples en toda el área de fractura (figura 4-36).

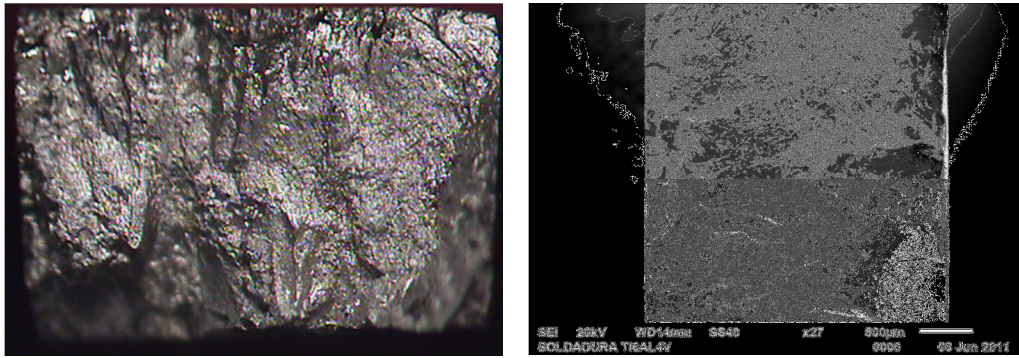


Figura 4-34.- Marcas de fatiga ocasionadas por el daño previo.

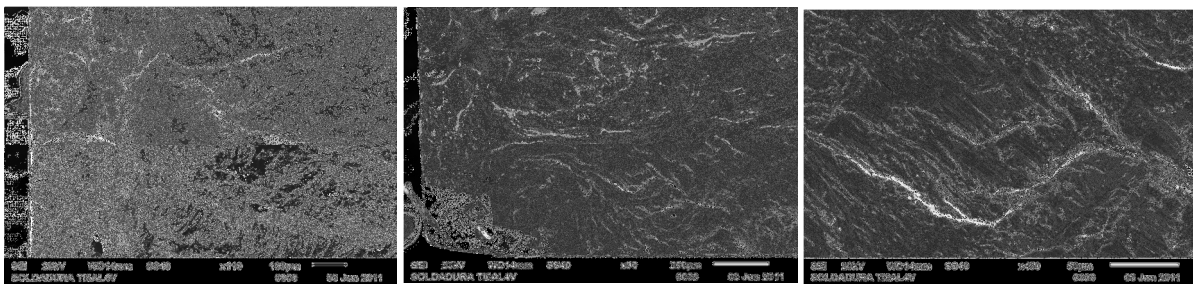


Figura 4-35.- Estrías de la fatiga previa.

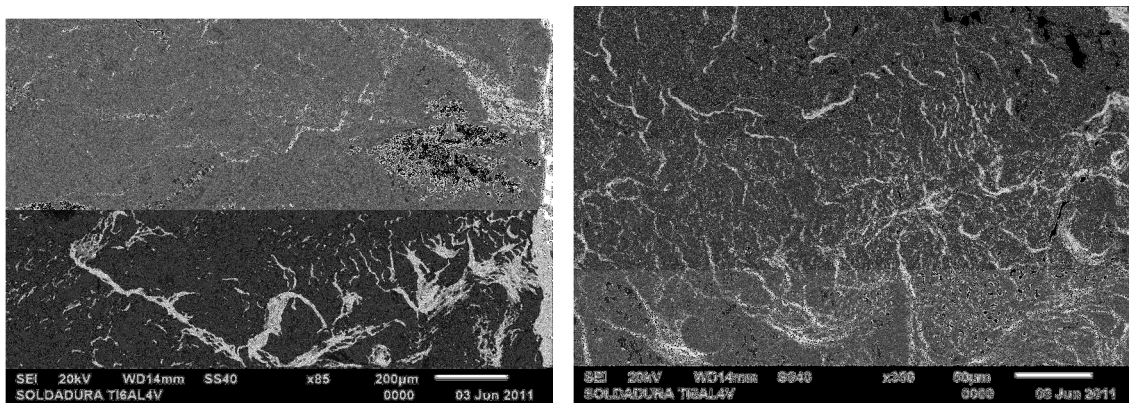


Figura 4-36.- Dimples en toda el área de fractura.

#### 4.5.3.3 Daño previo de 75%

##### *Probeta 1*

La probeta 1 con acumulación de daño más crítico (75%) presenta la misma morfología de falla que los especímenes anteriores, “dimples” en toda el área de fractura se pueden encontrar



fácilmente, como se puede ver en la figura 4-38, llegando a la fractura del material por sobrecarga, como se ve en la figura 4-37.

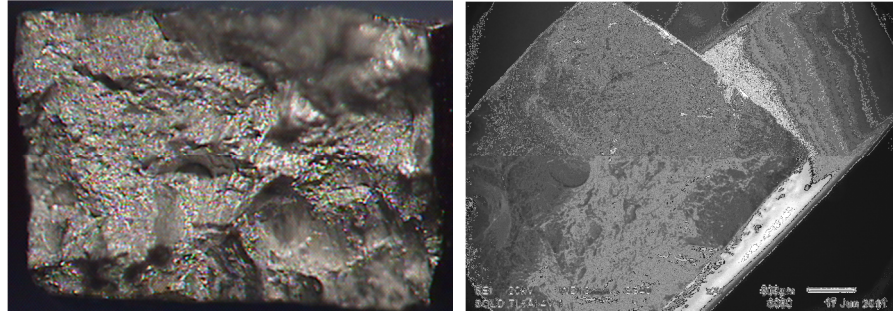


Figura 4-37.- Sobre carga del material.

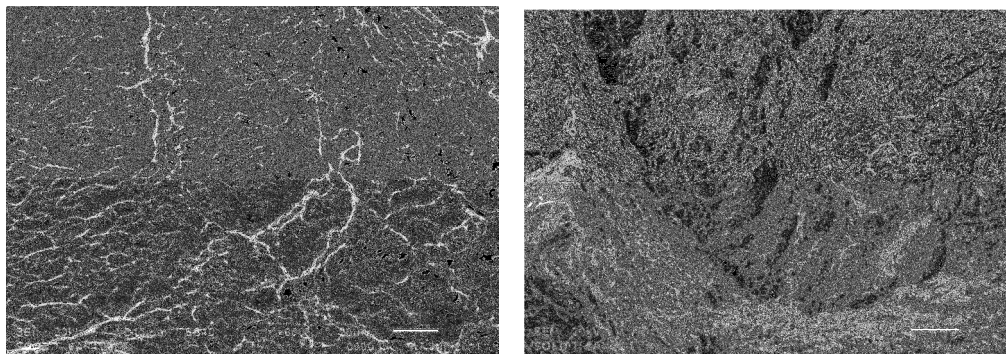


Figura 4-38.- Morfología de "Dimples" .

### *Probeta 2*

Se encontraron "dimples" como morfología de falla en el área de la fractura (figura 4-40), y al igual que en los especímenes que fallaron por fatiga, se encontraron microporos en el borde de la probeta, como se ve en la figura 4-41, sin ser éstos los que ocasionaron la falla, ya que el material falló por sobrecarga (figura 4-39).

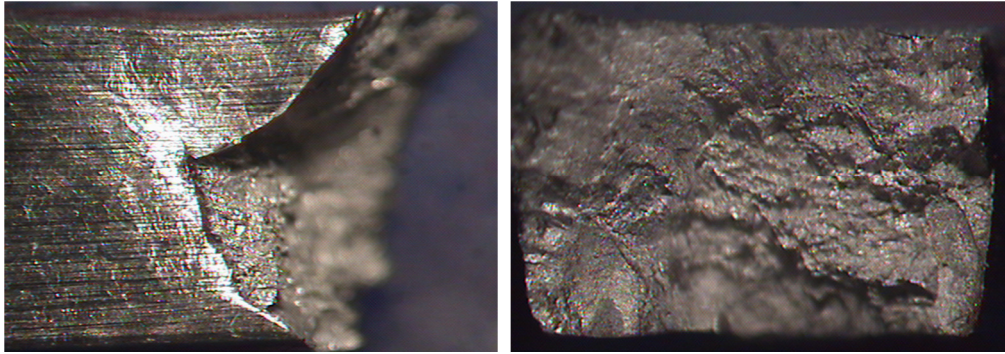


Figura 4-39.- Falla por sobre-carga.

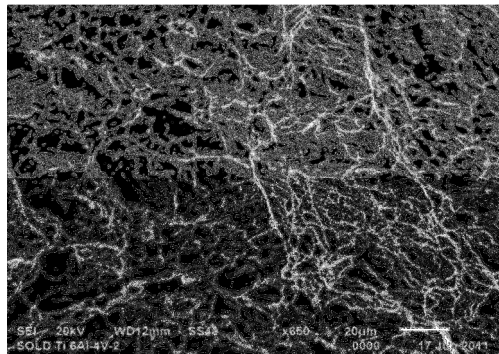


Figura 4-40.- “Dimples” en el área de fractura.

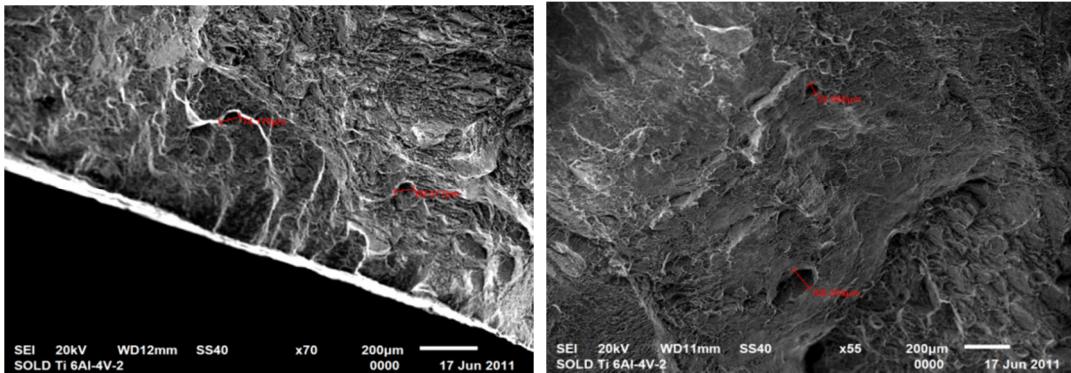


Figura 4-41.- Microporos localizados en el borde.

#### 4.6 Micro indentacion

Se presenta el perfil de dureza por microindentación de la unión soldada. La figura 4-42 presenta la sección transversal de la unión, y la línea dibujada indica la ruta seguida para la medición de la microdureza de la soldadura.

El metal base (MB) presenta valores de dureza por encima de 370HV. La figura 4-43 muestra una gráfica de la dureza de la unión soldada en función de la región, la dureza en la soldadura decrece en la zona afectada termicamente (ZAT), alcanzando valores de alrededor de 360HV, y en la zona del material de soldadura se tiene una caída mayor de dureza, alcanzando valores alrededor de los 340HV; lejos de la ZAT, la dureza alcanza 360HV. En general, podemos observar que no existe una gran diferencia en la dureza a lo largo de las diferentes regiones de la unión soldada, alcanzando valores entre 340HV y 375HV en la mayor parte de la sección transversal, es decir, tenemos una diferencia de 25 puntos de dureza entre el valor máximo y el mínimo. Se presenta un cambio en la estructura metalográfica del material de la unión en sus tres zonas, como se ve en la figura 4-44 (M.B., Z.A.T. y M.S.), reflejando variaciones en la dureza del material, sin tener un efecto significativo en la respuesta mecánica de los materiales.

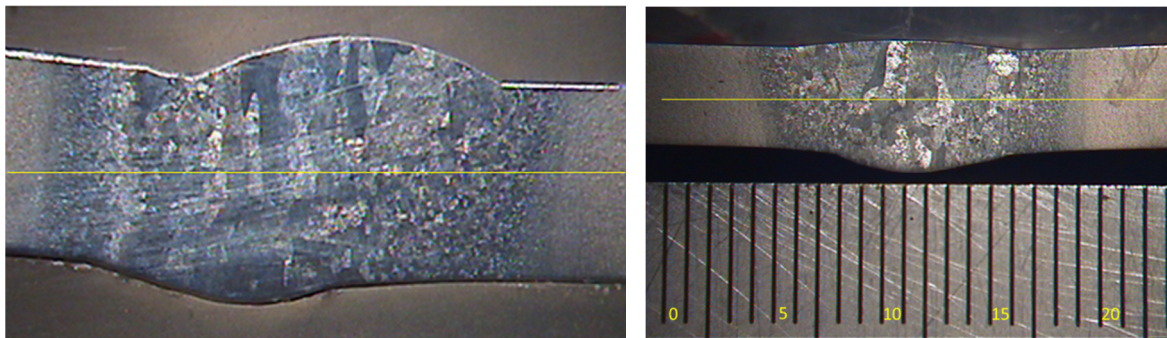


Figura 4-42.- Ruta seguida durante la medición de dureza.



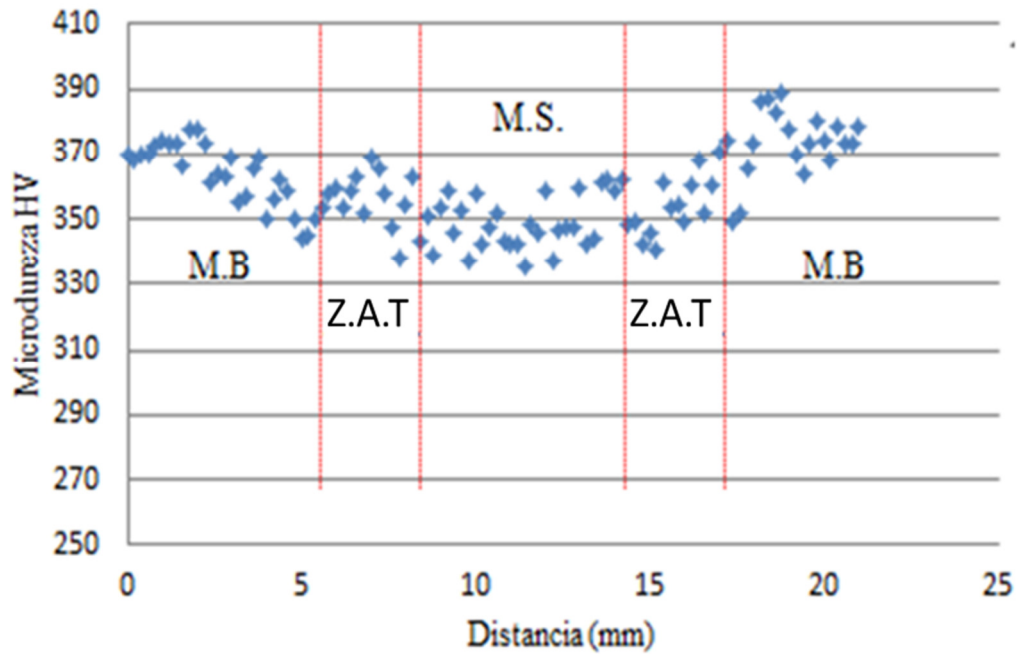


Figura 4-43.- Perfil de dureza Vickers.

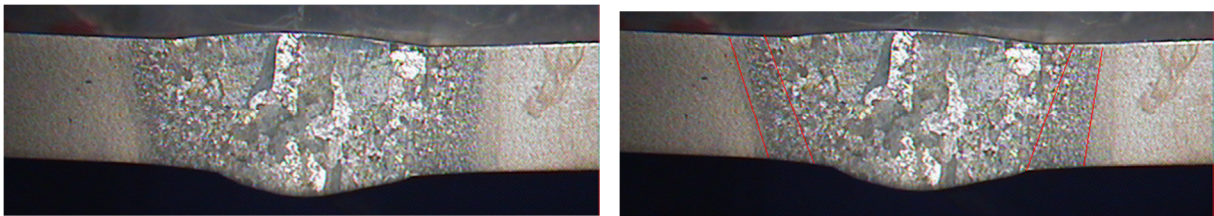


Figura 4-44.- Regiones de la unión soldada.

#### 4.7 Esfuerzos residuales

Los resultados de los esfuerzos residuales encontrados en la unión de soldadura fueron obtenidos mediante el método de contorno descrito anteriormente, y por medio de elemento finito.

Ya que se obtuvieron las deformaciones por medio de la mesa de coordenadas es necesario realizar el suavizado de la superficie como se mencionó anteriormente, ya que como se muestra en la figura 4-45, los datos obtenidos directamente de la mesa presentan una gran

distorsión en la superficie. Con el programa de MatLab®, se realiza el suavizado de la superficie deformada de la muestra como se muestra en las Figuras 4-46.

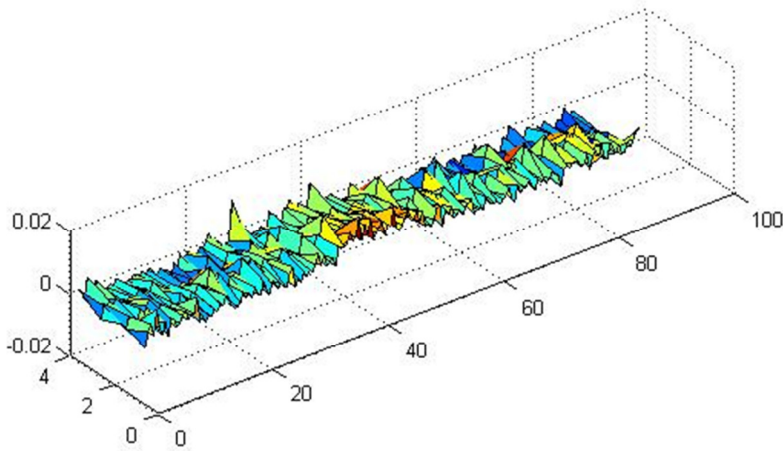


Figura 4-45.- Superficie de soldadura sin suavizado.

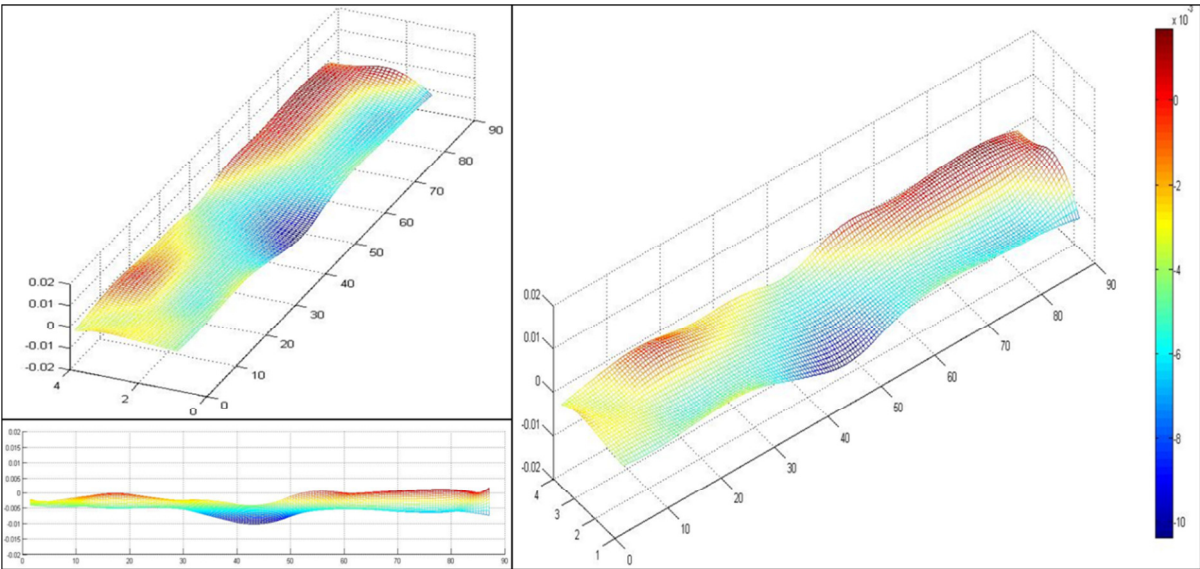


Figura 4-46.- Nube suavizada de puntos de la superficie deformada.



Ya que se cuenta con la superficie suavizada se realiza el análisis con ANSYS®, de donde obtenemos la figura 4-47, que muestra la distribución de esfuerzos longitudinales en la muestra con soldadura.

Los esfuerzos residuales a tensión se observan en el centro de la sección transversal, los valores están alrededor de 103 MPa, como se observa en la Figura 4-47.

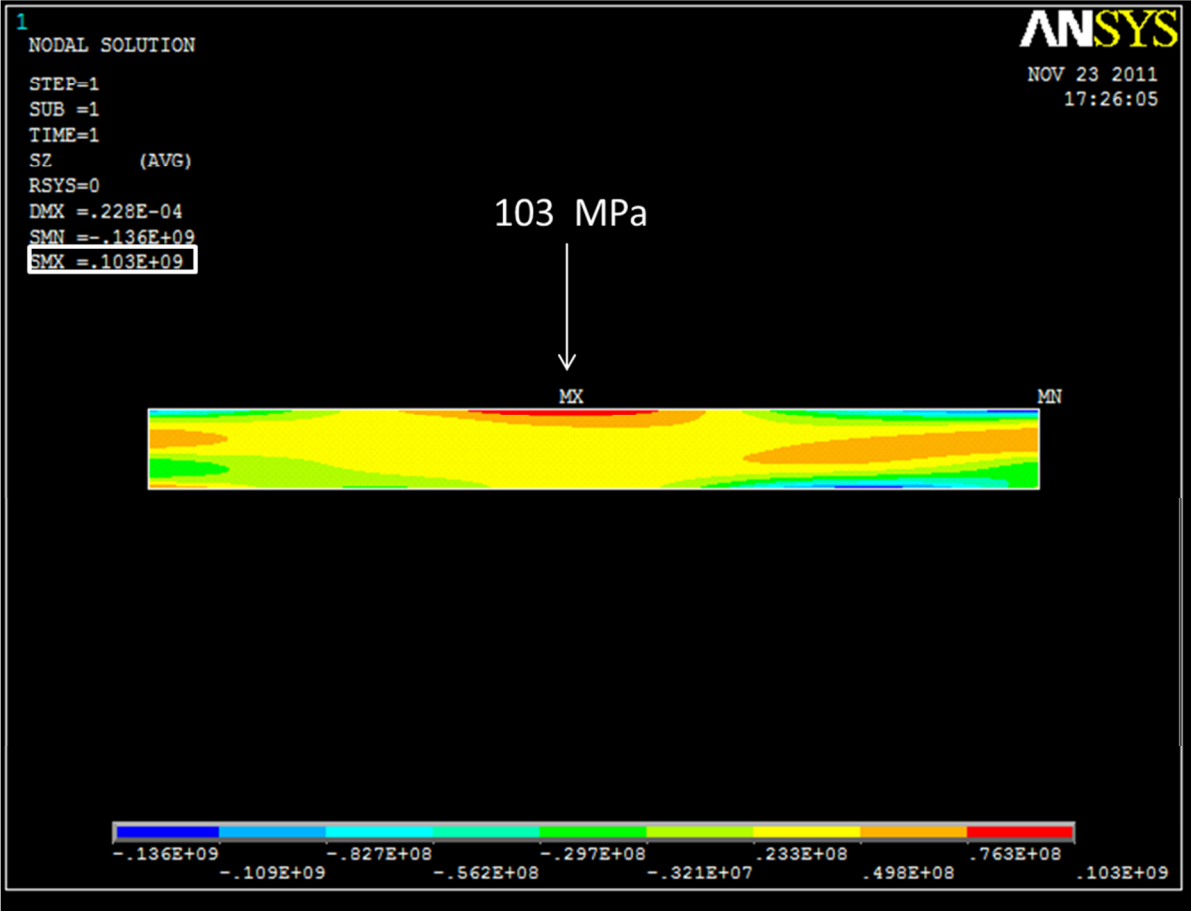


Figura 4-47.- Distribución de esfuerzos residuales de la muestra.

## *CAPITULO V Conclusiones*

El efecto de el daño previo por fatiga en el comportamiento a tensión del material base, que se utilizó como parametro de compración y de uniones soldadas de la aleación de Titanio Ti-6Al-4V (*grado 5*) se investigó en este trabajo. El procesos TIG de soldadura para esta investigación fue desarrollado, calificado y aplicado bajo condiciones experientales de laboratorio.

Se estudio el comportamiento cuasi-estático en especímenes con diferentes niveles de daño previo por fatiga en el material base y en la unión TIG. Se comparó la respuesta de las uniones soldadas y la del material base.

Se presenta un cambio en la estructura metalográfica del material de la unión en sus tres zonas (M.B., Z.A.T. y M.S.), reflejando variaciones en la dureza del material, sin tener un efecto significativo en la respuesta mecánica de los materiales.

No se observó un efecto significativo del daño previo por fatiga en la respuesta esfuerzo-deformación cuasi-estática de los especímenes del material base y de la unión TIG a el nivel de esfuerzos de 700MPa a temperatura ambiente.

Sin embargo el porcentaje de reduccion de area y alargamiento sí se vio afectado con la aplicacion de daño previo por fatiga, el % de area en la union soldada se vio afectado, es decir, se presentó poca reduccion del area inicial, no existió una gran fluencia del material adyacente a la zona de ruptura, en cambio cuando el material presentó un adañio previo se tuvo una reduccion de area mayor es decir el area final de las probetas era mucho menor que el inicial, casi del 50%, lo que nos indica que el material tuvo una gran fluencia en esa zona. Por lo contrario del % de elongacion, el material base tuvo una reduccion de su eloncion final cuando el material presentaba daño previo por fatiga.

Se produjo el mismo modo de falla para los especímenes con union TIG, sin importar el nivel de daño que tenian acumulados, siendo el modo principal de falla la concentración de esfuerzos en los microporos en todos los especímenes.

El hidrógeno en solución en el metal cuando se haya dentro de los límites permitidos no es la causa principal de porosidad. El límite máximo de hidrógeno en el titanio es inferior a

150 ppm, y comúnmente no llega a 100 ppm. Es posible lograr soldaduras sin porosidad cuando el contenido de hidrógeno se encuentra dentro del límite antes descrito.

Otra posible fuente de hidrógeno puede tener origen en la humedad absorbida. Dicha humedad puede ser eliminada con un precalentamiento a 120°C previo a la soldadura.

La estabilidad de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas ayudó a la mejora de el comportamiento de esta estructura con unión soldada.

- [1] Polmear I.J., Light Alloys, Metallurgy of the light metals (3<sup>rd</sup> edition), ISBN 0-340-63207-0, ed. Arnold, Great Britain, pp. 248-314 (1995)
- [2] Fundamentos de metalurgia de la soldadura, Centro de Investigaciones de soldadura, Universidad central de las villas, Cuba, 2001
- [3] Aleaciones de uso en aviación, ciateq, cideteq, viabilidad de pruebas y tecnología aeronáutica. Queretaro, Mexico 20010
- [4] M. T. McLellan, Aerospace Structural Metals handbook, Titanium Alloys, November 2000
- [5] Welsh G., Boyer R. Collins E.W., Material Properties Handbook: Titanium alloys, ASM, Ohio EE.UU. 1994
- [6] S. Timoshenko, Resistencia de materiales, Espasa- Calpe, S.A., Madrid, 1957.
- [7] S. Oller, Fractura Mecánica, un enfoque global, CIMNE, Barcelona, 2001.
- [8] ASM International. Volume 19 “Fatigue and Fracture”, (2007).
- [9] ASM International. Volume 1 “Properties and selection irons, steel, and high-performance alloys”, (2007)
- [10] ASM International. Volume 3 “Alloy Phase Diagrams”, (2007).
- [11] M. A. Meyers, Dynamic Behavior of Materials, Wiley Interscience Publication, 1994.
- [12] Lessells, John M, Strength and resistance of metals, Chapman & Hall, 1994.
- [13] World Center For Materials Joining Technology, TIG The Titanium Information Group, Designers and Users Handbook ,TWI 1999.
- [14] AWS 17.: Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications.
- [15] National Aeronautics and Space Administration, Fusion Welding Titanium and Titanium Alloys, Materials and Processes Laboratory Science and Engineering, 1982
- [16] George F. Vander Voort, Buehler Ltd, Metallography of Aerospace, 2008
- [17] Ralph I. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, Wiley Interscience. 2001
- [18] C.H. Wang, Introduction to Fracture Mechanics, Defense Science and Technology Organization, 1996
- [19] David Roylance, Introduction to Elasticity, Department of Materials Sciens and Engineering Massachusetts Institute of Technology, 2000

- [20] Julie A. Bannantine, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 2002
- [21] Ricardo Echavarria, Fractura de Materiales, Universidad Nacional del Comahue, 2003
- [22] Ralph I. Stephens, Ali Fatemi, Robert R. Stephens, Henry O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering, Second Edition, Wiley Interscience, 2001.
- [25] Jonny Leicer Carabali Lobo, Welding Process in the Engineering, Atlantic International University.
- [26] J. W. Giachino, W. Weeks, Técnica y práctica de la soldadura, Edit. Reverté, S.A, 5ª. Edición, 2003.
- [27] M. Zalazar, Soldadura por arco con electrodo no consumible-Gas Tungsten Arc Welding, Laboratorio de metalografía y soldadura, Universidad Nacional del Comahue.
- [28] Instituto de Soldadura, westarco, Como obtener el mejor desempeño del equipo en el proceso de soldadura GTAW, febrero 2004.
- [29] Sindo Kou, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons, Inc., Publication, Second Edition, 2003.
- [30] U. Sánchez-Santana, C. Rubio-González, G. Mesmacque, A. Amrouche, X. Decoopman, Effect of fatigue damage induced by cyclic plasticity on the dynamic tensile behavior of materials, International Journal of Fatigue 30(2008):1708-1719.
- [31] ASTM 2007 Annual book of ASTM Standarts, Vol. 03.01, No. E8-09, Standart Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2009
- [32] George F. Vander Voort, Metallography, principles and practice, 1984
- [33] Prime, M. B., Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut. J. Eng. Mater. Technol. 123(2001):162–168.
- [34] Prime, M. B., Residual stress mapping in welds using the contour method. Trends in Welding Research, ASM International. 2003pp:891-896.
- [35] Prime, M. B., The contour method: A new approach in experimental mechanics. Proceedings of the SEM Annual Conference, 2009.
- [36] Taylor & Francis Group, Titanium Alloys, An Atlas of Structures and Fracture Features, 2006 , 6000 Broken Sound Parkway NW; Suite 300 Boca Raton, FL.
- [37] ASME SFA 5.16, AWS A5.16, Specification for titanium and titanium alloy welding electrodes and rods.

[38] Welding Handbook, Volume Four, Seventh Edition, Metals and Their Weldability, W.H. Kearns, Editor, American Welding Society, 550 N.W. LeJeune Rd. Miami, FL 33126

## APENDICE A

### *Programa Suavizado de superficie MatLab.*

Tig\_tig

```
clear all, clc
clear all, close all, clc
load ansys.txt
load nodosC1.txt

% se genera una tabla con tres rangos diferentes cada rango con
% incrementos diferentes
a=[1.5:0.5:87]';
b=[1:1:4];
[r,s]=size(a);
%K es el numero de divisiones que se hacen dentro del espesor del
material

Q=ansys; % numero de nodo en la superficie del modelo de ansys
[j,k]=size(Q);
Nsu=j*k;

n=1;
w=r;
K=4;
for m=1:K;
    z=nodosC1(s:w,3)-0.005;
    C(n,:)=z;
    n=n+1;
    s=w+1;
    w=r*n;
end
Cp=C';
%ndgrid genera una tabla con un numero de columnas igual al numero de filas
%de a y asigna los datos a la variable aa de igual manera a b
[aa,bb]=ndgrid(a,b);

%figure; mesh(a,b,C);
%daspect([.5 .1 .001]);

%figure; surf(a,b,C);
%daspect([.5 .1 .001]);

% spiline en la dirección y
ky = 3; knotsy = augknt([1,1:3/1.7:4,4],ky);
sp = spap2(knotsy,ky,b,Cp);
%evaluación de la función
yy = 1:0.05:4; vals = fnval(sp,yy);
vals=vals';
%figure; mesh(a,yy,vals);
%daspect([.5 .1 .001]);
% spiline en la dirección x

coefsy = fnbrk(sp,'c');
```

```

kx = 3; knotsx = augknt([1.5:85.5/9:87],kx);
coefsy=coefsy';
sp2 = spap2(knotsx,kx,a,coefsy);
coefs = fnbrk(sp2,'c');

%Datos para los grafios de superficie suaviada
xv=[1.5:0.5:87];
% xv = 1:.5:95;
yv = 1:3/25:4;
[xvv,yvv] = ndgrid(xv,yv);
xvv=xvv';
yv=yvv';
values = spcol(knotsx,kx,xv)*coefs*spcol(knotsy,ky,yv)';
values=values';
figure; mesh(xv,yv,values)
daspect([.5 .1 .001])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Element=cellstr('ET,1,SOLID185');

Material=cellstr(strvcat('MPTEMP,,,,,,,,','MPTEMP,1,0',
'MPDATA,EX,1,,97e9','MPDATA,PRXY,1,,0.3'));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[f,g]=size(values);

Nod=f*g

for i=1:Nod
    m=strcat('N',',',int2str(i),',',',',num2str(xvv(i)*1e-3),',',
',',num2str(yvv(i)*1e-3),',',',',',');
    R{i,1}=char(m);
end
for i=1:Nod
    m1=strcat('N',',',int2str(i+Nod),',',',',num2str(xvv(i)*1e-3),',',
',',num2str(yvv(i)*1e-3),',',',','-5e-3',',',',');
    Roff{i,1}=char(m1);
end
R=strvcat(char(R{:}),char(Roff{:}));
R=cellstr(R);

for i=1:2*Nod
    d1=strcat('FITEM',',',',',int2str(i));
    A{i,1}=char(d1);
end
A=char(A{:});
A=cellstr(A);
for j=1:f:Nod-f-1
    for i=j:j+f-2

Al{i,1}=(strvcat('FLST,2,8,1',A{i},A{i+f},A{i+f+1},A{i+1},A{i+Nod},A{i+No
d+f},A{i+Nod+f+1},A{i+Nod+1},'E,P51X'));
        end
    end

AT=strvcat(char(A1{1:Nod-f-1}));
AT=cellstr(AT);

```





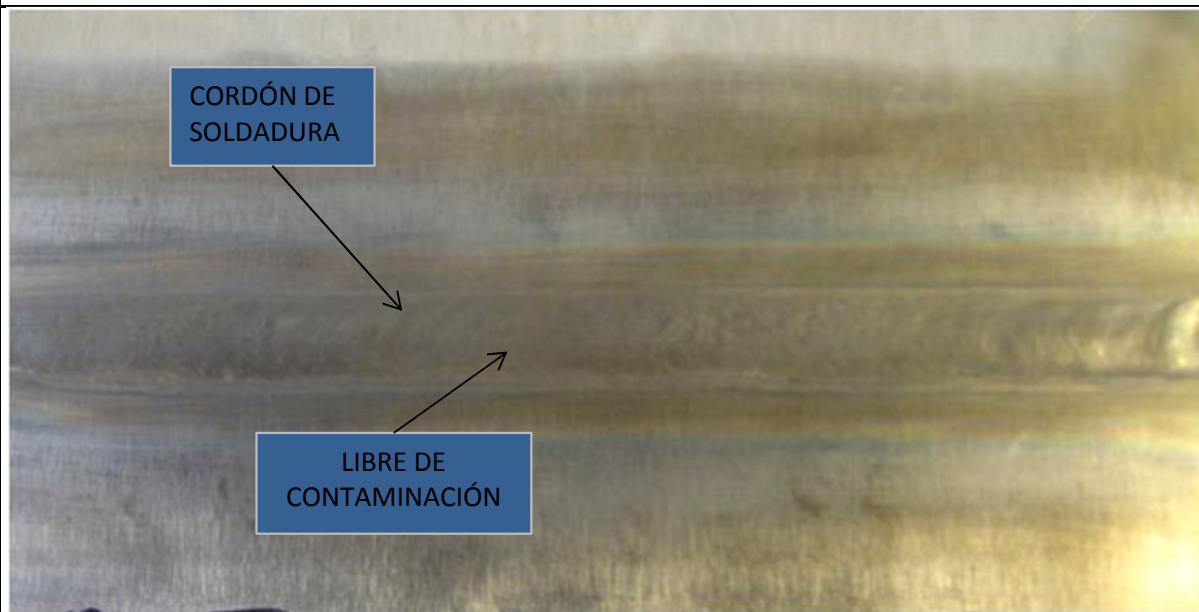
```
[filename, pathname] = uigetfile({'*.xlsx','Excel (*.xlsx)'; '*.xls','Excel (*.xls)'}, 'Guardar Datos en Archivo de Excel', 'C:\MATLAB7\work\');
saveFileName = fullfile(pathname, filename);
xlswrite(saveFileName,R,1,'A1');
xlswrite(saveFileName,AT,1,'B1');
xlswrite(saveFileName,S1,1,'C1');
xlswrite(saveFileName,S2,1,'D1');
xlswrite(saveFileName,S3,1,'E1');
xlswrite(saveFileName,S4,1,'F1');
xlswrite(saveFileName,S,1,'G1');
xlswrite(saveFileName,Alldof,1,'H1');
```

## AVANCE PARA ESTUDIOS DE SOLDADURA GTAW

### PLACA 1

No. PASADAS		RAIZ (m3/h)	CARA (1er PASADA)	CARA (2nd PASADA)
VARIABLES UTILIZADAS				
CORRIENTE ELÉCTRICA (A)		100	120	120
DIFERENCIA DE POTENCIAL (V):		18	20	20
VELOCIDAD (mm/min):		100	90	90
CALOR APORTADO (KJ/mm):		60	46	46
TIPO DE PROTECCIÓN GASEOSA:		Argón		
FLUJO DE PROTECCIÓN GASEOSA CARA (m3/h):		1.4	1.7	1.7
TIPO DE ALIMENTACIÓN:		Micro-alambre coldwire		
VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN (m/min):		3.4		
TIPO DE APORTE:		AWS-ERTi-5 ELI		
DIÁMETRO DE APORTE(mm):		1.14		
TIPO DE ELECTRODO:		EWP		
DIÁMETRO DE ELECTRODO(mm):		3.18		

### RESULTADOS JUNTA



RESULTADOS  
RADIOGRAFÍA

SANIDAD OK

INCLUSIONES DE  
TUNGSTENO



**PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA GTAW**

**PLACA 2 OK**

		No. PASADAS			
VARIABLES UTILIZADAS			RAIZ (m3/h)	CARA (1er PASADA)	CARA (2nd PASADA)
CORRIENTE ELÉCTRICA (A)			110	125	130
DIFERENCIA DE POTENCIAL (V):			10.5	9.6	9
VELOCIDAD (mm/min):			95	95	95
CALOR APORTADO (KJ/mm):			72	75	73
FLUJO DE PROTECCIÓN GASEOSA (m3/h)			1.4	1.7	1.7
TIPO DE PROTECCIÓN GASEOSA:		Argón			
TIPO DE ALIMENTACIÓN:		micro-alambre coldwire			
VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN (m/min):		15			
TIPO DE APORTE:		AWS-ERTi-5-ELI			
DIÁMETRO DE APORTE(mm):		1.14			
TIPO DE ELECTRODO:		EWP			
DIÁMETRO DE ELECTRODO(mm):		3.18			

**RESULTADOS**

**JUNTA**



RESULTADOS  
RADIOGRAFÍA

SANIDAD OK

P2

**PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA GTAW**

**PLACA 3**

		No. PASADAS			
VARIABLES UTILIZADAS			RAIZ (m3/h)	CARA (1er PASADA)	CARA (2nd PASADA)
CORRIENTE ELÉCTRICA (A)			110	125	135
DIFERENCIA DE POTENCIAL (V):			10.4	8.5	8.3
VELOCIDAD (mm/min):			85	85	85
CALOR APORTADO (KJ/mm):			80	75	79
TIPO DE PROTECCIÓN GASEOSA :		Argón			
FLUJO DE PROTECCIÓN GASEOSA (m3/h)			1.4	1.7	1.7
TIPO DE ALIMENTACIÓN:		micro-alambre coldwire			
VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN (m/min):		15			
TIPO DE APORTE:		AWS-ERTi-5-ELI			
DIÁMETRO DE APORTE(mm):		1.14			
TIPO DE ELECTRODO:		EWP			
DIÁMETRO DE ELECTRODO(mm):		3.18			

**RESULTADOS**

**JUNTA**





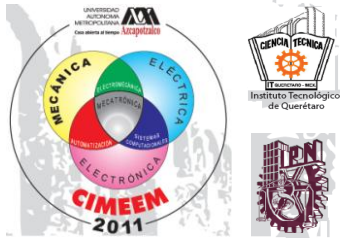
RESULTADOS  
RADIOGRAFÍA

SANIDAD OK

NOTA.- LIGERAMENTE SE DISTINGUE  
EL CORDÓN DE SOLDADURA DEBIDO  
A LA ALTA DENSIDAD DE LA  
RADIOGRAFÍA.

P3





4° CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍAS MECÁNICA,  
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, MECATRÓNICA Y COMPUTACIONAL  
(CIMEEM2011). Web:[cimeem.com](http://cimeem.com)

27 al 29 de septiembre de 2011. Querétaro, Estado de Querétaro, México

## MEMORIAS TÉCNICAS

(No. ISBN en trámite)

Trabajo arbitrado No. 01. Volumen 4(1), 8 páginas.

# COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UNIONES SOLDADAS DE Ti-6Al-4V CON DAÑO PREVIO POR FATIGA

Ivan Arturo León Méndez<sup>1</sup>, Carlos Rubio González<sup>1</sup>, Joel Chaparro González<sup>1</sup>,  
Víctor Manuel Sánchez Cabrera<sup>2</sup>

## Resumen

Las aleaciones de titanio son normalmente seleccionadas para fabricar componentes o sistemas mecánicos cuyo funcionamiento requiera baja densidad o bajo peso del material, aunado a una alta tenacidad, gran resistencia a tensión y resistencia a la corrosión en una extensa variedad de ambientes. Actualmente existe una amplia gama de componentes que demandan ser fabricados con este material y requieren ser unidos con soldadura por fusión, por lo cual es de gran interés para la ingeniería el comprender el comportamiento mecánico de las uniones de soldadura que nos permita diseñar y fabricar sistemas mecánicos confiables. Este trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento cuasi-estático de uniones de soldadura de la aleación Ti-6Al-4V realizada con el proceso GTAW, previamente sometida a diferentes ciclos de carga para determinar el daño ocasionado y conocer la degradación de sus propiedades mecánicas. El comportamiento cuasi-estático fue estudiado en especímenes con diferentes niveles de daño por fatiga. La respuesta de las uniones soldadas fue comparada con la del material-base, se midió micro-dureza, se analizaron modos de falla para especímenes del material-base y de la unión realizada con el proceso GTAW.

**Palabras clave:** Titanio, fatiga, reactivo, soldadura por fusión, daño previo.

## Summary

Titanium alloys are materials with special physical properties, among which highlights a comparatively with another metallic alloys low density, high toughness, high tensile strength and corrosion resistance. Today, a wide range of components that need to be made of such material and consequently will be joined by fusion welding, making it of great interest for engineering the mechanical behavior of welding joints, which allow us to design and manufacture reliable mechanical systems in service. The welding of titanium alloys has certain complications; the most significant is that the metal is very reactive at high temperature, with the constituent gases of the atmosphere (O, N and H) that are accommodated interstitially in the crystal structure which promotes strong tendency to cracking, so it requires a perfect protection of the welding joint. For this reason this paper aims to induce fatigue damage in titanium welded joints and determine the degradation of its mechanical properties after a certain number of cycles. The quasi-static behavior was studied in specimens with different levels of fatigue damage. The response of the welded joints was compared with the base-material. In addition, micro-hardness was measured and failure modes of specimens of base-material and welded joints were analyzed.

**Keywords:** Titanium, fatigue, reactive, fusion weld, fatigue damage.

## Introducción

El titanio puro tiene una densidad de  $4,5 \text{ g/cm}^3$  [1], prácticamente la mitad de la correspondiente a los aceros, es por eso que, algunas aleaciones de titanio son consideradas como una primera opción incluso antes que las aleaciones de aluminio para la fabricación de componentes mecánicos estructurales en la industria aeroespacial. Su temperatura de fusión es de  $1668^\circ\text{C}$  [2].

<sup>1</sup> Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta 702, Desarrollo San Pablo, 76130 Querétaro, Qro. México. Tel 2119800. Correos: [ivan\\_leon@gmx.com](mailto:ivan_leon@gmx.com), [crubio@cidesi.mx](mailto:crubio@cidesi.mx), [jchaparro@cidesi.mx](mailto:jchaparro@cidesi.mx)

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica de Querétaro, Pie de la Cuesta 2501, Unidad Nacional, 76148. Querétaro, Qro. México. Tel 2096100. E-mail: [vsanchez@uteq.edu.mx](mailto:vsanchez@uteq.edu.mx)

Debido a su evidente afinidad por el oxígeno, las aleaciones de titanio generan una finísima película de óxido a temperatura ambiente, gracias a la cual el titanio es resistente a la corrosión, tanto en ambientes salinos como en contacto con algunas soluciones ácidas. La afinidad del titanio por el oxígeno aumenta gradualmente con la temperatura, al igual que el espesor de la película de óxido, que de ser una tenue y fina capa pasa a convertirse en una capa gruesa. Por encima de los 649°C [2], la resistencia a la oxidación decrece rápidamente y tanto el titanio como sus aleaciones deben protegerse del aire debido a su posible combinación con el oxígeno. La presencia de este elemento, del nitrógeno y el hidrógeno del aire aumentan la dureza y fragilizan el metal.

La adición de elementos de aleación aumenta la resistencia a la tensión del metal y disminuye simultáneamente su ductilidad. Tanto el titanio como algunas de sus aleaciones tienen buenas características de resistencia a la tensión, ductilidad y tenacidad hasta -240°C [2]. Los bajos coeficientes de dilatación y de conductividad térmica, comparados con los de los aceros contribuyen a su buena soldabilidad.

La soldadura de titanio y sus aleaciones siempre han representado un gran reto para los diseñadores y tecnólogos. Las aleaciones de titanio, especialmente las tratadas térmicamente, son difíciles de unir por medio de técnicas de soldadura por fusión, ya que algunos defectos de soldadura como grietas y porosidad se forman durante la solidificación de la soldadura [1].

En muchas aplicaciones para las industrias aeronáutica, automotriz, naviera, de la construcción, etc., las estructuras soldadas pueden estar sujetas a cargas cíclicas, cargas de impacto o de explosión. Por lo tanto, es importante entender como estas condiciones de servicio tienen efecto en las propiedades mecánicas de los materiales estructurales sujetos a altas velocidades de deformación a la que estos componentes pueden ser sometidos durante el servicio.

## Procedimiento experimental

### *Materiales, proceso de soldadura y preparación del espécimen*

Para este proyecto de investigación se utilizó una placa de aleación de Ti-6Al-4V, ASTM B265 grado 5 con dimensión de 1000x1000x4.46 mm de ahí se tomaron cupones de 40 x 250 x 4.46 mm. La composición química se muestra en la Tabla No. 1. El proceso de soldadura utilizado fue GTAW automatizado con aporte "cold wire".

La soldadura se realizó, uniendo dos placas a tope, el material de aporte utilizado fue ERTi-5ELI, el dispositivo de protección con gas argón se muestra en la Fig. No 1. El gas empleado para la protección fue argón de alta pureza (99.999%), con un flujo de 0.7079 metros cúbicos por hora (CMH) en la antorcha y 0.9910 CMH en el respaldo. Las variables eléctricas del procedimiento de soldadura utilizado son las que se muestran en la Tabla No. 1. La composición química del material fue determinada por combustión y detección infrarroja (C y S) y por espectrometría de plasma, ver Tabla No. 2.

*Tabla 1.-Variables eléctricas del proceso de soldadura.*

Pasada	Corriente (A)	Voltaje (V)	Electrodo	Calor generado (Q)(KJ/mm)
1	100	18	ERTi-5ELI	60
2	120	20	ERTi-5ELI	46
3	120	20	ERTi-5ELI	46

*Tabla 2.-Composición química Ti-6Al-4V*

Mn (%) 0.005	P (%) 0.016	Si (%) 0.014	Cr (%) 0.017	Cu (%) 0.027	Mo (%) 0.009	Al (%) 5.68	Mg (%) <0.01	Zn (%) <0.01	V (%) 3.79
Zr (%) <0.01	Fe (%) 0.20	Sn (%) 0.28	Pb (%) <0.01	Sb (%) 0.052	Co (%) 0.14	Cd (%) 0.005	Ca (%) 0.16	C (%) 0.03	S (%) <0.002

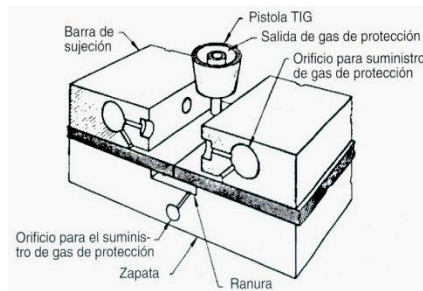


Fig. 1a.-Diseño protección de atmosfera

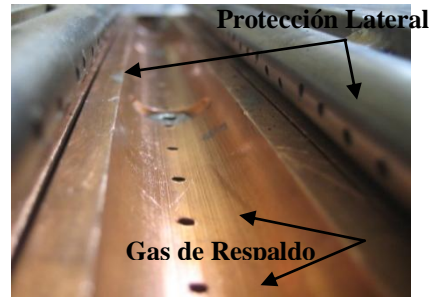


Fig. 1b.- Protección de la atmosfera

La Fig. 2(a) muestra el diseño de junta, en la que se puede ver las dos placas soldadas entre ellas con un bisel en "V" de 60° y una separación de raíz de 1 mm sin hombro. La unión soldada se llevó a cabo utilizando un total de 3 pasadas de soldadura, una pasada por el lado de la raíz y dos pasadas por la cara. Una vez terminado el proceso de soldadura, los especímenes de prueba se obtuvieron del centro de la junta soldada cortando en dirección perpendicular a la soldadura. Las dimensiones del espécimen se muestran en la Fig. 2(b). Las soldaduras por fusión se realizaron con un sistema automático GTAW con alimentador de aporte automático. La dirección de la soldadura fue perpendicular a la dirección del laminado.

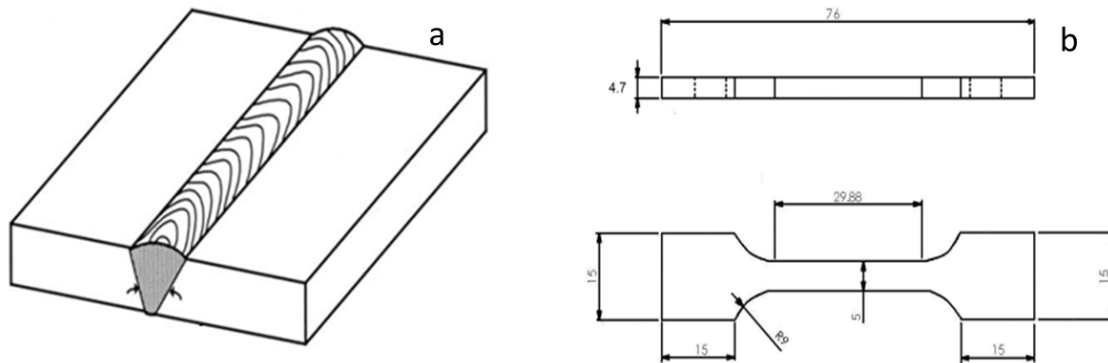


Fig. 2. Representación esquemática de la unión soldada y el espécimen usado en las pruebas cuasi-estáticas (dimensiones en mm)

### Pruebas de Tensión

Los ensayos para determinar las propiedades mecánicas cuasi-estáticas se realizaron en una máquina MTS810 aplicando una carga monótonica a una velocidad constante de 1 mm/min. La Tabla No. 3 muestra los resultados obtenidos de los materiales libres de daño por fatiga a temperatura ambiente. El esfuerzo de fluencia fue calculado empleando el método de *offset* del 0.2%.

### Pruebas de Fatiga

El daño por fatiga fue inducido en las muestras de metal base y en las muestras con soldadura. Los diferentes especímenes fueron sometidos a un proceso de fatiga previa por control de esfuerzo, usando una carga cíclica uniaxial, utilizando una relación de reversión constante de esfuerzos,  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = 0.1$ .

Tabla 3.-Propiedades mecánicas cuasi-estáticas sin daño.

Ti-6Al-4V	Material Base	Unión TIG
Módulo de Young (GPa)	121	97
Esfuerzo de fluencia (MPa)	937	880
Esfuerzo último (MPa)	991	981

La sección transversal de los especímenes fue de 5.0 x 4.46 mm; véase la Fig. 2(b). La carga cíclica aplicada fue de forma senoidal a una frecuencia de 30 Hz y a temperatura ambiente. El daño por fatiga fue inducido a los especímenes a diferentes niveles de esfuerzo para ser llevados a la falla por fatiga para determinar las curvas esfuerzo – ciclos ( $\sigma - n$ ). Una vez determinado el número de ciclos a los que ocurre la falla, y tomando como punto de referencia la curva  $\sigma - n$ , se indujo daño por fatiga sin llegar a la falla, sometiéndolos a menores porcentajes de daño (menos ciclos), como se indica en la Tabla No 4. La carga cíclica de amplitud constante aplicada para todos los especímenes fue  $\sigma_{\min}=70$  MPa y  $\sigma_{\max}=700$  MPa,  $R=0.1$ .

Tabla 4.-Niveles de daño inducido a los especímenes.

	100% ruptura ciclos	75% daño ciclos	50% daño ciclos	25% daño ciclos
Metal Base	322,346	241,759	161,173	80,586
Unión TIG	37,397	28,047	18,698	9,349

### Microdureza

La medición del perfil de microdureza se realizó en dirección perpendicular a la soldadura. Se aplicó una carga de 500g y un tiempo de 5s para cada indentación, en un microdurómetro digital Future Tech.

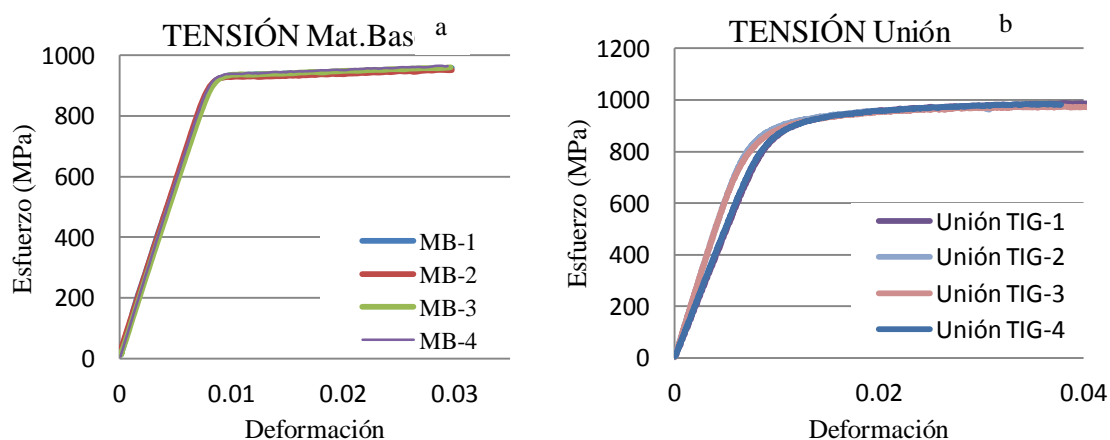
### Metalografía

Para realizar los análisis metalográficos se utilizaron muestras montadas en resina transparente en frío, utilizando un pulido automático a 150 rpm con 6 libras de presión y un ataque químico *kroll's* [13].

## Resultados y discusión

### Pruebas cuasi-estáticas de tensión

Las pruebas cuasi-estáticas de tensión se realizaron en especímenes obtenidos del metal base y las uniones soldadas, las curvas de esfuerzo-deformación se muestran en la Fig. No 3. La curva esfuerzo-deformación del material base es incluida para comparación. Se realizaron 4 probetas distintas, donde se observa una excelente repetibilidad entre ellas. Propiedades importantes obtenidas de las curvas tales como el módulo de Young, esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último se muestran en la Tabla No. 3. Nótese que las propiedades de la unión soldada son casi las mismas que la del material base. El esfuerzo último de las uniones soldadas es alrededor del 98.99% del obtenido en el material base y el esfuerzo de fluencia es alrededor del 93.91% del medido en el material base. Por lo cual podemos asumir que se tiene una eficiencia aceptable, por encima del 90% en la unión soldada.



### Pruebas de fatiga

Las curvas esfuerzo – ciclos ( $\sigma - n$ ) se realizaron tanto en material base como en la unión soldada mostradas en la Fig. 4, fueron tomadas como referencia en el nivel de esfuerzos para acumular daño por fatiga en los especímenes, todos los especímenes fueron probados a diferentes niveles de esfuerzo hasta alcanzar la falla por fatiga. Para realizar la acumulación de daño se tomó como referencia un esfuerzo de 700MPa en ambos casos, de ahí se acumuló daño en un 75, 50 y 25% de daño en ambos casos como se muestra en la Tabla No. 4.

### Pruebas cuasi-estáticas de tensión con daño previo

Las curvas esfuerzo-deformación cuasi-estáticas del metal base y de las uniones soldadas para los diferentes niveles de daño son mostradas en la Fig. 5, diferente número de ciclos fueron aplicados para inducir el daño por fatiga (ver Tabla 4). Las curvas esfuerzo-deformación del material con daño a diferentes niveles y libre de daño son incluidas en la Fig. 5 para comparación.

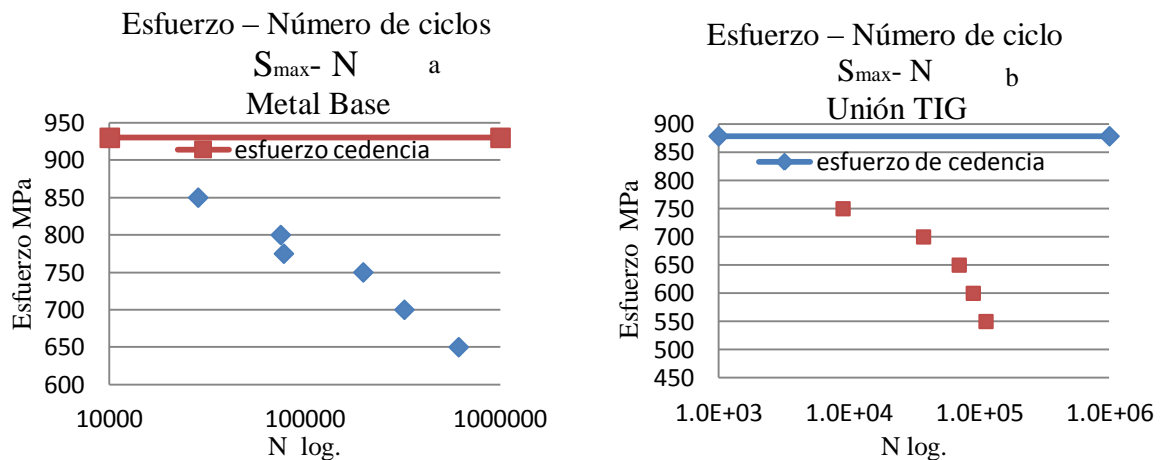


Fig. 4. Curvas de fatiga esfuerzo – ciclos ( $\sigma - n$ ) (a) Material base (b) Unión soldada.

De estos resultados es posible observar un efecto no significativo del daño previo por fatiga en la respuesta esfuerzo-deformación a tensión de los especímenes sometidos a este nivel de esfuerzos.

De estos resultados es posible observar un efecto no significativo del daño previo por fatiga en la respuesta esfuerzo-deformación a tensión de los especímenes sometidos a este nivel de esfuerzos.

Existen pequeñas variaciones debido al daño acumulado en la unión soldada. Un resumen de las propiedades mecánicas de las uniones con y sin daño previo por fatiga se presenta en la Tabla No.5. La estabilidad de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas a diferente nivel de daño nos proporciona información para poder concluir que el comportamiento de esta estructura del material base y la unión soldada se comportan de manera similar a este nivel de esfuerzos.

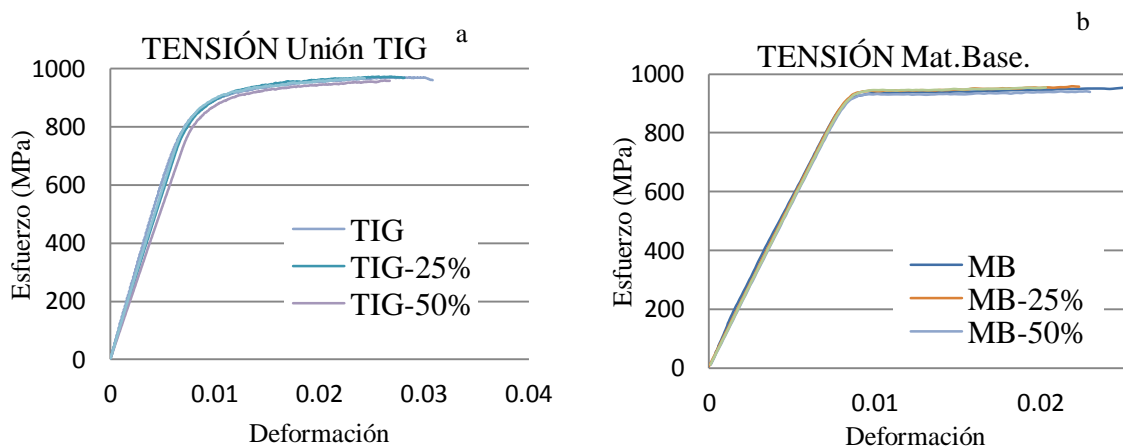


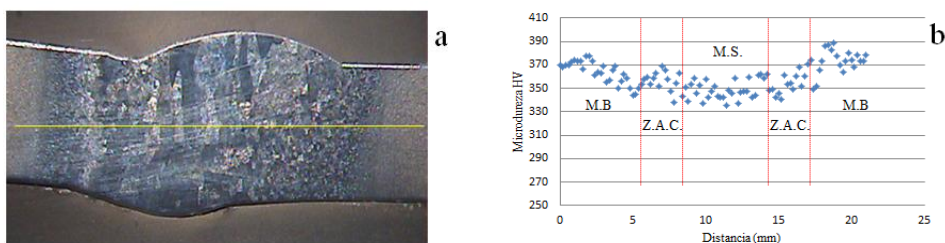
Fig. 5.-Curvas esf.-def. cuasi-estáticas con y sin daño previo (a) Unión soldada (b) Material-base.

*Microdureza*

La Fig. 6 muestra el perfil de microdureza de la unión soldada. La Fig. 6(a) presenta la sección transversal de la unión y la línea dibujada indica la ruta seguida para la medición de la microdureza de la soldadura por fusión. El metal base (MB) presenta valores de dureza sobre 370HV. La dureza decrece en la zona afectada térmicamente (ZAC) alcanzando valores alrededor de 360HV, y en la zona del material de soldadura se tiene una caída mayor de dureza alcanzando valores alrededor de los 340HV lejos de la ZAC, la dureza alcanza 360HV, en general podemos observar que no existe una gran diferencia de la microdureza a lo largo de las diferentes regiones de la unión soldada, alcanzando valores entre 340HV y 375HV en la mayor parte de la sección transversal.

*Tabla 5.-Propiedades mecánicas del material base y las uniones soldadas. Condición cuasi-estática con y sin daño.*

	M.B.	TIG.	MB25%	MB50%	MB75%	TIG25%	TIG50%	TIG75%
Módulo de Young (GPa)	122	97.4	113	111	113	104	105	115
Esfuerzo de fluencia (MPa)	937	880	938	930	944	887	876	878
Esfuerzo último (MPa)	991	981	989	977	992	952	968	972



*Fig 6. Perfil de microdureza de la unión soldada. La línea indicada en (a) ilustra la ruta seguida para la medición de la microdureza.*

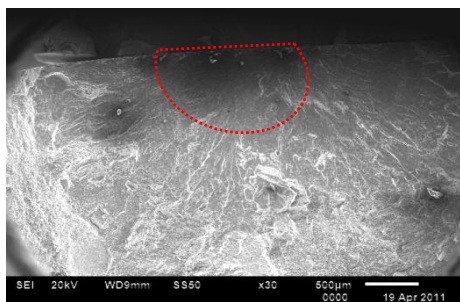
*Modos de falla*

Las fractografías de la superficie de fractura de los especímenes ensayados a tensión en el material base y la unión soldada con y sin daño previo fueron obtenidas mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) JEOL JSM-6640LV.

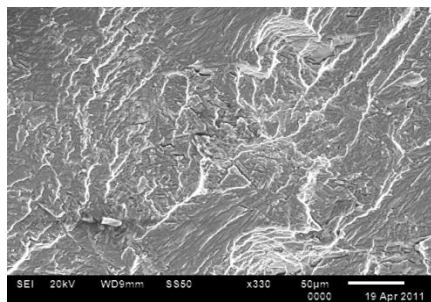
Las Figs. 7 y 8 muestran la superficie de fractura de especímenes distintos de material base bajo carga cíclica con reversión  $R=0.1$  y daño acumulado de 50 y 75% respectivamente.

También se observó los modos de fallo en las uniones soldadas, observando que todos los especímenes tuvieron un modo de fallo similar, éste ocasionado por concentradores de esfuerzos en la zona de la soldadura, se encontraron microporos que actuaron como concentradores de esfuerzos y de ahí partió la falla por fatiga en todos los niveles de daño.

Las Figs. 9 y 10 muestran las superficies de fractura de especímenes distintos de unión soldada con daño acumulado de 50 y 75% respectivamente. Se incluye un análisis por dispersión de emisión espectrométrica (E.D.S.), para conocer la composición química que se encuentra en los microporos y saber que éstos no han sido generados por contaminación de la atmósfera al momento de aplicar la soldadura, en general los resultados obtenidos por E.D.S. en los poros muestran un alto contenido de Ti, Al y V, elementos aportados por la aleación, en las Figs. 9 y 10 se muestran análisis E.D.S.



*Fig. 7a. Inicio de la falla inducido por fatiga en el borde del espécimen.*



*Fig. 7b. Grietas de fatiga en toda la superficie de falla del espécimen.*



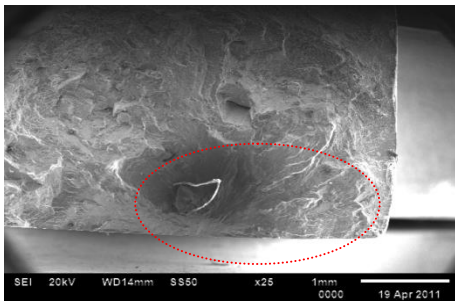


Fig. 8a. Inicio de falla por fatiga.

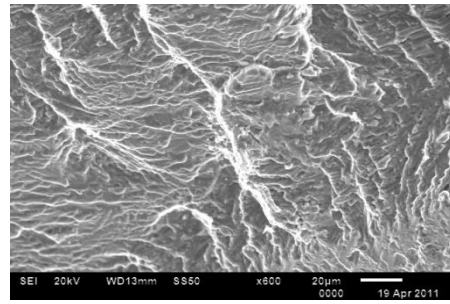


Fig. 8b. Grietas de fatiga zona de falla

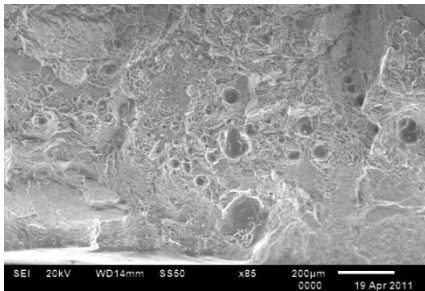


Fig. 9a.-Zonas con microporos agrupados

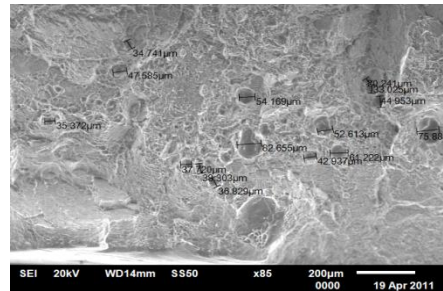


Fig. 9b.-Dimensión de los microporos

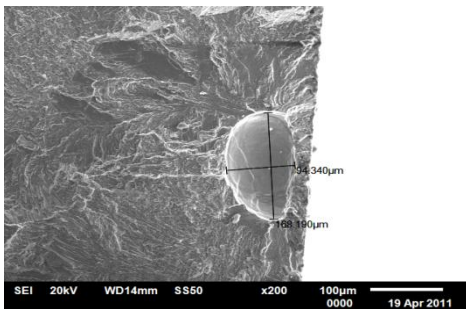


Fig. 9c.-Análisis de un microporo al azar por dispersión de emisión espectrométrica (E.D.S.)

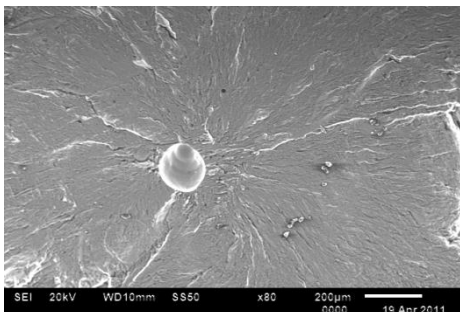
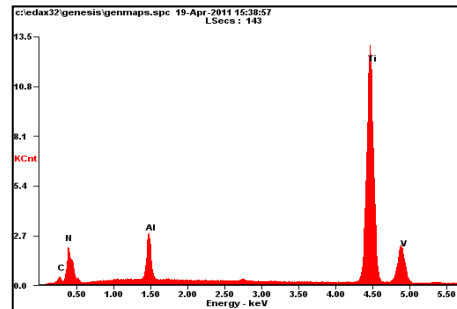
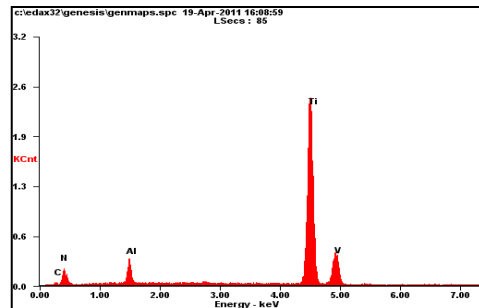


Fig. 10. Analisis de un microporo al azar por E.D.S.



Nótese la combinación de modos de falla en las Figs. 7-10, esto es, junto con mecanismos bien definidos de falla por fatiga se repite en los diferentes especímenes, teniendo una repetibilidad significativa en el material base y la unión soldada, sin importar la acumulación del daño.

Esto se puede comparar con la respuesta cuasi-estática mostrada en la Fig. 5, donde la curva esfuerzo-deformación de los especímenes con daño previo se comparan con los materiales sin daño teniendo un comportamiento muy similar en propiedades mecánicas y momento de ruptura.

## Conclusiones

El efecto del daño previo por fatiga en el comportamiento a tensión del material base, que se utilizó como parámetro de comparación y de uniones soldadas de la aleación de Titanio Ti-6Al-4V (*grado 5*) se investigó en este trabajo. El procesos TIG de soldadura para esta investigación fueron desarrollados y aplicados bajo condiciones experimentales de laboratorio. El comportamiento cuasi-estático fue estudiado en especímenes con diferentes niveles de daño previo por fatiga en el material base y en la unión soldada. Se comparó la respuesta de las uniones soldadas y la del material base.

Se presenta un cambio en la estructura metalográfica del material de la unión en sus tres zonas (MB, ZAC y MS), reflejando variaciones en la dureza del material, sin tener un efecto significativo en la respuesta mecánica de los materiales.

No se observó un efecto significativo del daño previo por fatiga en la respuesta esfuerzo-deformación cuasi-estática de los especímenes del material base y de la unión soldada al nivel de esfuerzos de 700MPa a temperatura ambiente. Se produjo el mismo modo de falla para los especímenes con unión soldada, sin importar el nivel de daño que tenían acumulado, siendo el modo principal de falla la concentración de esfuerzos en los microporos en todos los especímenes.

El problema de las porosidades se debe en la mayoría de los casos a la oclusión de gases durante la solidificación del metal de aporte, afectado por la técnica y el procedimiento de soldadura. El hidrógeno en solución en el metal cuando se halla dentro de los límites permitidos no es la causa principal de porosidad. El límite máximo de hidrógeno en el titanio es inferior a 150 ppm, y comúnmente no llega a 100 ppm. Es posible lograr soldaduras sin porosidad cuando el contenido de hidrógeno se encuentra dentro del límite antes descrito. Otra posible fuente de hidrógeno puede tener origen en la humedad absorbida. Dicha humedad puede ser eliminada con un precalentamiento a 120°C previo a la soldadura. La estabilidad de las propiedades mecánicas cuasi-estáticas ayudó a la mejora de el comportamiento de esta estructura con unión soldada.

## Referencias

- [1]. ASM International. Volume 1 “Properties and selection irons, steel, and high-performance alloys”, (2007)
- [2]. ASM International. Volume 3 “Alloy Phase Diagrams”, (2007)
- [3]. U. Sánchez-Santana, C. Rubio-González, G. Mesmacque, A. Amrouche, X. Decoopman, Effect of fatigue damage induced by cyclic plasticity on the dynamic tensile behavior of materials, *International Journal of Fatigue* 30(2008):1708-1719
- [4]. U. Sánchez-Santana, C. Rubio-González, G. Mesmacque, A. Amrouche, X. Decoopman, Dynamic tensile behavior of materials with previous fatigue damage, *Materials Science and Engineering A* 497(2008):51-60
- [5]. C. Rubio-González, E. Miranda-Paniagua, G. Mesmacque, A. Ruiz, Dynamic tensile behavior of steel welded joints with previous fatigue damage. Submitted to *Int. J. Fatigue*, 2009.
- [6]. M. A. Meyers, *Dynamic Behavior of Materials*, Wiley Interscience Publication, 1994.
- [7]. Lessells, John M, *Strength and resistance of metals*, Chapman & Hall, 1994.
- [8]. World Center For Materials Joining Technology, TIG The Titanium Information Group, Designers and Users Handbook ,TWI 1999
- [9]. *Fractura Mecánica un enfoque global*, S. Oller, CIMNE Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona España, 2001
- [10]. AWS 17.: Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications.
- [11]. National Aeronautics and Space Administration, *Fusion Welding Titanium and Titanium Alloys*, Materials and Processes Laboratory Science and Engineering, 1982.
- [12]. M.T. McLellan, *Types Ti-6AL-4V*, Aerospace Structural Metals Handbook, 2000
- [13]. George F. Vander Voort, Buehler Ltd, *Metallography of Aerospace*, 2008
- [14]. Ralph I. Stephens, *Metal Fatigue in Engineering*, Wiley Interscience. 2001
- [15]. C.H. Wang, *Introduction to Fracture Mechanics*, Defense Science and Technology Organization, 1996
- [16]. David Roylance, *Introduction to Elasticity*, Department of Materials Sciens and Engineering Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [17]. Julie A. Bannantine, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, 2002
- [18]. Ricardo Echavarría, *Fractura de Materiales*, Universidad Nacional del Comahue, 2003.