



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA ALEACIÓN DE
ALUMINIO AA-6061 SOMETIDO A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A
TEMPERATURAS DE 167°C Y 177°C PARA UN TIEMPO DE 14 HORAS**

LEÓN VANESSA
PENAGOS MA. VIRGINIA

VALENCIA, NOVIEMBRE 2008



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA ALEACIÓN DE
ALUMINIO AA-6061 SOMETIDO A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A
TEMPERATURAS DE 167°C Y 177°C PARA UN TIEMPO DE 14 HORAS**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO.**

LEÓN VANESSA
PENAGOS MA. VIRGINIA
TUTOR: ING. ELEAZAR DÍAZ

VALENCIA, NOVIEMBRE 2008



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado asignado para estudiar el trabajo de grado titulado: ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA-6061 SOMETIDO A ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL A TEMPERATURAS DE 167°C Y 177°C PARA UN TIEMPO DE 14 HORAS, realizado por las bachilleres, León Vanessa C.I.- 18.347.815 y Penagos Ma. Virginia C.I.-14.787.711, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Eleazar Díaz
Tutor

Ing. Juan Pereira
Jurado

Ing. Argel Porrelo
Jurado

VALENCIA, NOVIEMBRE 2008

RESUMEN

Para el estudio de la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AA-6061 sometido a envejecimiento artificial durante 14 horas, se partió de barras cilíndricas de dicha aleación que fueron mecanizadas bajo la norma ASTM E 606. Las probetas en condición original se sometieron a un proceso de solubilizado a 533°C durante 2 horas, donde se espera la disolución de las fases del material, para después pasar por un tratamiento de envejecimiento artificial a condiciones de 167°C y 177°C durante 14 horas. Adicionalmente se realizó un ensayo de dureza, que comprobó que este valor disminuye para las probetas solubilizadas con respecto a la condición original y aumenta para las probetas que fueron sometidas a T6. Para obtener el esfuerzo de fluencia de cada condición se recurrió a un ensayo de tracción, y luego a través del método de la escalera se obtuvieron los valores correspondientes al 90, 80, 70, 60, 50 y 40% de este esfuerzo. Con estos parámetros establecidos el siguiente paso fue el ensayo de fatiga cíclica, que describe la variación del número de ciclos a los que el material falla en función del esfuerzo alternante. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se determinó la variación del comportamiento de la aleación en cada caso, para así poder establecer comparaciones y relaciones entre ellos. Haciendo uso de un microscopio óptico y un microscopio electrónico de barrido se hicieron estudios de metalografía y fractografía respectivamente; la metalografía puso en evidencia los cambios microestructurales que sufrió la aleación a través de cada uno de los tratamientos y la fractografía reveló que para las probetas sometidas a altos esfuerzos existía abundancia de cúpulas frágiles y para las que fueron sometidas a bajos esfuerzos se encontraban superficies dúctiles.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	
1.1 Título	5
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
1.4 Justificación	7
1.5 Limitación	8
1.6 Delimitación y Alcance	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes	13
2.1.1 Antecedente No. 1	13
2.1.2 Antecedente N°. 2	13
2.1.3 Antecedente N°. 3	14
2.1.4 Antecedente N°. 4	15
2.1.5 Antecedente N°. 5	16
2.1.6 Antecedente N°. 6	17
2.2 Generalidades del Aluminio	17
2.3 Aleación	18
2.4 Aleación de Aluminio AA-6061	20
2.4.1 Composición química	21
2.4.2 Propiedades Físicas	21
2.4.3 Propiedades Mecánicas	22

2.5 Dureza Superficial	22
2.6 Rugosidad Superficial	23
2.7 Ensayo de Tracción	24
2.8 Ensayo de Fatiga	26
2.9 Comportamiento de Algunas Propiedades a Distintas Temperaturas	30
2.10 Tratamientos Térmicos	31
2.11 Influencia de los Tratamientos Térmicos en las Propiedades Mecánicas	32
2.12 Metalografía	35
2.13 Fractografía	38

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Nivel de la Investigación	43
3.2 Diseño de la Investigación	43
3.3 Técnicas de Recolección de Datos	43
3.4 Instrumentos Para la Recolección de Datos	44
3.5 Diagrama de Flujo	45
3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	46
3.6.1 Material Utilizado	46
3.6.2 Mecanizado de las Probetas	46
3.6.3 Solubilizado de las Probetas	48
3.6.4 Temple de las Probetas	49
3.6.5 Envejecimiento Artificial de las Probetas	50
3.6.6 Control de las Temperaturas Registradas en el Horno	50
3.6.7 Pulido de las Probetas	51
3.6.8 Medición de la Rugosidad de las Probetas	51
3.6.9 Dureza de las Probetas	52
3.7 Ensayo de Tracción	53
3.8 Método de la Escalera	55

3.9 Ensayo de Fatiga	56
3.10 Estudio de Metalografía	58
3.11 Estudio de la Fractografía	61
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
4.1 Composición Química	65
4.2 Tratamientos Térmicos	67
4.3 Rugosidad Superficial	70
4.4 Dureza	72
4.5 Metalografía	73
4.6 Ensayo de Tracción	76
4.7 Ensayo de Fatiga	81
4.8 Estudio de la Superficie de Fractura (Fractografía)	94
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
Conclusiones	105
Recomendaciones	107
ANEXOS	
Certificado de la Composición del Material Suministrado por Sumindu	111
Resultado del Estudio de Espectometría Suministrado por ALUCASA CVG	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Figura 2.1	Diagrama de las Diferentes Aleaciones de Aluminio	19
Figura 2.2	Dispositivo Para Realizar Ensayos de Tracción	24
Figura 2.3	Comportamiento de una Probeta Sometida a Ensayo de Tracción	25
Figura 2.4	Ejemplo de Máquina de Ensayo de Fatiga	27
Figura 2.5	Curva Esfuerzo vs Número de Ciclos	28
Figura 2.6	Orientación de los Granos en las Probetas Ensayadas a Fatiga.	29
Figura 2.7	Diagrama de Equilibrio Al-Mg ₂ Si	31

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Figura 3.1	Dimensiones de la Probeta para Ensayo a Tracción	47
Figura 3.2	Dimensiones de la Probeta Para Ensayo a Fatiga	47
Figura 3.3	Aspecto Final de las Probetas Para Ensayo de Fatiga	47
Figura 3.4	Aspecto Final de las Probetas Para Ensayo de Fatiga	47
Figura 3.5	Horno Eléctrico	48
Figura 3.6	Rugosímetro Digital	52
Figura 3.7	Durómetro	53
Figura 3.8	Máquina Utilizada Para Ensayo de Tracción	54
Figura 3.9	Máquina Utilizada Para Ensayo de Fatiga	56
Figura 3.10	Cortadora Metalográfica	58
Figura 3.11	Desbastadora de Cintas	59
Figura 3.12	Banco de Pulido	59
Figura 3.13	Microscopio Óptico Union MC – 86267	60
Figura 3.14	Microscopio Electrónico de Barrido	61

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 4.1	Apariencia de la muestra de Aluminio AA-6061 Después del Ensayo de Espectometría	67
Figura 4.2	Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante la Solubilización	68
Figura 4.3	Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante el Envejecimiento Artificial a 167°C	68
Figura 4.4	Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante el Envejecimiento Artificial a 177°C	69
Figura 4.5	Distribución de las Probetas en el Horno	69
Figura 4.6	Gráfico del Promedio de los Valores de Dureza Para las Probetas en Cada Condición	73
Figura 4.7	Microestructura del Aluminio AA-6061 en Condición Original a un Aumento de 1000X	74
Figura 4.8	Microestructura del Aluminio AA-6061 Solubilizado a un Aumento de 1000X	74
Figura 4.9	Microestructura del Aluminio AA-6061 Envejecido a 167°C a un Aumento de 1000X	75
Figura 4.10	Microestructura del Aluminio AA-6061 Envejecido a 177°C a un Aumento de 1000X	75
Figura 4.11	Obtención del Esfuerzo de Fluencia mediante el Método Offset	77
Figura 4.12	Gráfica Esfuerzo vs Deformación para el promedio de las Probetas Solubilizadas, Envejecidas a 167°C y Envejecidas a 177°C	79
Figura 4.13	Probetas Después de Ensayos de Fatiga	82
Figura 4.14	Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos para probetas Solubilizadas	83
Figura 4.15	Linealización de la Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos para Probetas Envejecidas a 167°C Durante un Tiempo de 14 Horas	85
Figura 4.16	Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 167°C - 14 horas	86
Figura 4.17	Linealización de la Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 167°C Durante 14 horas	88
Figura 4.18	Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 167°C Durante un Tiempo de 14 Horas	90

Figura 4.19	Linealización de la Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 177°C Durante un Tiempo de 14 Horas	90
Figura 4.20	Comparación de la Curva Esfuerzo vs No de Ciclos Para probetas Solubilizadas, y Envejecidas a 167°C y a 177°C Durante 14 Horas.	91
Figura 4.21	Comparación de los Valores de Esfuerzo Para un Mismo Número de Ciclos de las Condiciones Estudiadas	93
Figura 4.22	Vistas macros de fractura de probetas envejecidas artificialmente a 177°C durante 14 horas sometidas: (a) un esfuerzo de baja carga (b) esfuerzo a altas cargas. Escala 1:6	95
Figura 4.23	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 177°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento para (a) (b) y (c) de 350X, 1000X y 1000X respectivamente.	96
Figura 4.24	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 177°C durante 14 horas sometida a altas cargas con un aumento de 350X	97
Figura 4.25	Vistas macros de fractura de probetas envejecidas artificialmente a 167°C durante 14 horas sometidas: (a) un esfuerzo de baja carga (b) esfuerzo a altas cargas. Escala 1:6	98
Figura 4.26	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento de 100X	99
Figura 4.27	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a altas cargas con un aumento de 750X	99
Figura 4.28	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento de 1000X	100
Figura 4.29	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a	101

177°C durante 14 horas sometida alta cargas con un aumento de
200X

Figura 4.30 Relación del mecanismo de fractura con la resistencia a la fatiga 101

RESUMEN

Para el estudio de la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AA-6061 sometido a envejecimiento artificial durante 14 horas, se partió de barras cilíndricas de dicha aleación que fueron mecanizadas bajo la norma ASTM E 606. Las probetas en condición original se sometieron a un proceso de solubilizado a 533°C durante 2 horas, donde se espera la disolución de las fases del material, para después pasar por un tratamiento de envejecimiento artificial a condiciones de 167°C y 177°C durante 14 horas. Adicionalmente se realizó un ensayo de dureza, que comprobó que este valor disminuye para las probetas solubilizadas con respecto a la condición original y aumenta para las probetas que fueron sometidas a T6. Para obtener el esfuerzo de fluencia de cada condición se recurrió a un ensayo de tracción, y luego a través del método de la escalera se obtuvieron los valores correspondientes al 90, 80, 70, 60, 50 y 40% de este esfuerzo. Con estos parámetros establecidos el siguiente paso fue el ensayo de fatiga cíclica, que describe la variación del número de ciclos a los que el material falla en función del esfuerzo alternante. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos, se determinó la variación del comportamiento de la aleación en cada caso, para así poder establecer comparaciones y relaciones entre ellos. Haciendo uso de un microscopio óptico y un microscopio electrónico de barrido se hicieron estudios de metalografía y fractografía respectivamente; la metalografía puso en evidencia los cambios microestructurales que sufrió la aleación a través de cada uno de los tratamientos y la fractografía reveló que para las probetas sometidas a altos esfuerzos existía abundancia de cúpulas frágiles y para las que fueron sometidas a bajos esfuerzos se encontraban superficies dúctiles.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	1
CAPÍTULO I. EL PROBLEMA	
1.1 Título	5
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
1.4 Justificación	7
1.5 Limitación	8
1.6 Delimitación y Alcance	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes	13
2.1.1 Antecedente No. 1	13
2.1.2 Antecedente N°. 2	13
2.1.3 Antecedente N°. 3	14
2.1.4 Antecedente N°. 4	15
2.1.5 Antecedente N°. 5	16
2.1.6 Antecedente N°. 6	17
2.2 Generalidades del Aluminio	17
2.3 Aleación	18
2.4 Aleación de Aluminio AA-6061	20
2.4.1 Composición química	21
2.4.2 Propiedades Físicas	21
2.4.3 Propiedades Mecánicas	22

2.5 Dureza Superficial	22
2.6 Rugosidad Superficial	23
2.7 Ensayo de Tracción	24
2.8 Ensayo de Fatiga	26
2.9 Comportamiento de Algunas Propiedades a Distintas Temperaturas	30
2.10 Tratamientos Térmicos	31
2.11 Influencia de los Tratamientos Térmicos en las Propiedades Mecánicas	32
2.12 Metalografía	35
2.13 Fractografía	38

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Nivel de la Investigación	45
3.2 Diseño de la Investigación	45
3.3 Técnicas de Recolección de Datos	45
3.4 Instrumentos Para la Recolección de Datos	46
3.5 Diagrama de Flujo	47
3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	48
3.6.1 Material Utilizado	48
3.6.2 Mecanizado de las Probetas	48
3.6.3 Solubilizado de las Probetas	50
3.6.4 Temple de las Probetas	51
3.6.5 Envejecimiento Artificial de las Probetas	52
3.6.6 Control de las Temperaturas Registradas en el Horno	52
3.6.7 Pulido de las Probetas	53
3.6.8 Medición de la Rugosidad de las Probetas	53
3.6.9 Dureza de las Probetas	54
3.7 Ensayo de Tracción	55
3.8 Método de la Escalera	57

3.9 Ensayo de Fatiga	58
3.10 Estudio de Metalografía	60
3.11 Estudio de la Fractografía	63

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Composición Química	67
4.2 Tratamientos Térmicos	69
4.3 Rugosidad Superficial	72
4.4 Dureza	74
4.5 Metalografía	75
4.6 Ensayo de Tracción	78
4.7 Ensayo de Fatiga	83
4.8 Estudio de la Superficie de Fractura (Fractografía)	96

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones	107
Recomendaciones	109

ANEXOS

Certificado de la Composición del Material Suministrado por Sumindu	
Resultado del Estudio de Espectrometría Suministrado por ALUCASA CVG	
Tabla de las Propiedades Mecánicas Para Distintas Aleaciones de Aluminio	

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Figura 2.1	Diagrama de las Diferentes Aleaciones de Aluminio	19
Figura 2.2	Dispositivo Para Realizar Ensayos de Tracción	24
Figura 2.3	Comportamiento de una Probeta Sometida a Ensayo de Tracción	25
Figura 2.4	Ejemplo de Máquina de Ensayo de Fatiga	27
Figura 2.5	Curva Esfuerzo vs Número de Ciclos	28
Figura 2.6	Orientación de los Granos en las Probetas Ensayadas a Fatiga.	29
Figura 2.7	Diagrama de Equilibrio Al-Mg ₂ Si	31

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Figura 3.1	Dimensiones de la Probeta para Ensayo a Tracción	49
Figura 3.2	Dimensiones de la Probeta Para Ensayo a Fatiga	49
Figura 3.3	Aspecto Final de las Probetas Para Ensayo de Fatiga	49
Figura 3.4	Aspecto Final de las Probetas Para Ensayo de Fatiga	49
Figura 3.5	Horno Eléctrico	50
Figura 3.6	Rugosímetro Digital	54
Figura 3.7	Durómetro	55
Figura 3.8	Máquina Utilizada Para Ensayo de Tracción	56
Figura 3.9	Máquina Utilizada Para Ensayo de Fatiga	58
Figura 3.10	Cortadora Metalográfica	60
Figura 3.11	Desbastadora de Cintas	61
Figura 3.12	Banco de Pulido	61
Figura 3.13	Microscopio Óptico Union MC – 86267	62
Figura 3.14	Microscopio Electrónico de Barrido	63

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 4.1	Apariencia de la muestra de Aluminio AA-6061 Después del Ensayo de Espectometría	69
Figura 4.2	Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante la Solubilización	70
Figura 4.3	Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante el Envejecimiento Artificial a 167°C	70
Figura 4.4	Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante el Envejecimiento Artificial a 177°C	71
Figura 4.5	Distribución de las Probetas en el Horno	71
Figura 4.6	Gráfico del Promedio de los Valores de Dureza Para las Probetas en Cada Condición	75
Figura 4.7	Microestructura del Aluminio AA-6061 en Condición Original a un Aumento de 1000X	76
Figura 4.8	Microestructura del Aluminio AA-6061 Solubilizado a un Aumento de 1000X	76
Figura 4.9	Microestructura del Aluminio AA-6061 Envejecido a 167°C a un Aumento de 1000X	77
Figura 4.10	Microestructura del Aluminio AA-6061 Envejecido a 177°C a un Aumento de 1000X	77
Figura 4.11	Obtención del Esfuerzo de Fluencia mediante el Método Offset	79
Figura 4.12	Gráfica Esfuerzo vs Deformación para el promedio de las Probetas Solubilizadas, Envejecidas a 167°C y Envejecidas a 177°C	81
Figura 4.13	Probetas Después de Ensayos de Fatiga	84
Figura 4.14	Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos para probetas Solubilizadas	85
Figura 4.15	Linealización de la Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos para Probetas Envejecidas a 167°C Durante un Tiempo de 14 Horas	87
Figura 4.16	Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 167°C - 14 horas	88
Figura 4.17	Linealización de la Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 167°C Durante 14 horas	90
Figura 4.18	Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 167°C Durante un Tiempo de 14 Horas	92

Figura 4.19	Linealización de la Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos Para Probetas Envejecidas a 177°C Durante un Tiempo de 14 Horas	92
Figura 4.20	Comparación de la Curva Esfuerzo vs No de Ciclos Para probetas Solubilizadas, y Envejecidas a 167°C y a 177°C Durante 14 Horas.	93
Figura 4.21	Comparación de los Valores de Esfuerzo Para un Mismo Número de Ciclos de las Condiciones Estudiadas	95
Figura 4.22	Vistas macros de fractura de probetas envejecidas artificialmente a 177°C durante 14 horas sometidas: (a) un esfuerzo de baja carga (b) esfuerzo a altas cargas. Escala 1:6	97
Figura 4.23	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 177°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento para (a) (b) y (c) de 350X, 1000X y 1000X respectivamente.	98
Figura 4.24	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 177°C durante 14 horas sometida a altas cargas con un aumento de 350X	99
Figura 4.25	Vistas macros de fractura de probetas envejecidas artificialmente a 167°C durante 14 horas sometidas: (a) un esfuerzo de baja carga (b) esfuerzo a altas cargas. Escala 1:6	100
Figura 4.26	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento de 100X	101
Figura 4.27	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a altas cargas con un aumento de 750X	101
Figura 4.28	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento de 1000X	102
Figura 4.29	Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a	103

177°C durante 14 horas sometida alta cargas con un aumento de
200X

Figura 4.30 Relación del mecanismo de fractura con la resistencia a la fatiga 103

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Tabla 2.1	Solubilidad Sólida Máxima de Elementos Aleantes en el Aluminio	20
Tabla 2.2	Composición Química del Aluminio AA-6061	21
Tabla 2.3	Propiedades Físicas del Aluminio AA-6061	21
Tabla 2.4	Propiedades Mecánicas del Aluminio AA-6061	22
Tabla 2.6	Ensayos de Dureza.	23

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

Tabla 3.1	Especificaciones Generales Horno Barnstead Thermolyne 48000	51
Tabla 3.2	Especificaciones Generales del Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ 201-P	54
Tabla 3.3	Especificaciones Generales Máquina Universal de Ensayos de Tracción CMT 20 Galdabini	56
Tabla 3.4	Especificaciones Generales Máquina de Ensayo de Fatiga	59
Tabla 3.5	Especificaciones Generales para Microscopio Óptico Union MC – 86267	62
Tabla 3.6	Especificaciones Generales del Microscopio Electrónico de Barrido	63

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tabla 4.1	Resultados del Análisis de Composición Química	67
Tabla 4.2	Mediciones de Rugosidad Superficial Para Probetas Solubilizadas	72
Tabla 4.3	Mediciones de Rugosidad Superficial Para Probetas Envejecidas a 167°C	73
Tabla 4.4	Mediciones de Rugosidad Superficial Para Probetas Envejecidas a 177°C	73
Tabla 4.5	Mediciones de Dureza	74
Tabla 4.6	Datos obtenidos del Ensayo de Tracción Para Probetas en Condición Original	79
Tabla 4.7	Datos obtenidos del Ensayo de Tracción Para Probetas Solubilizadas	80

Tabla 4.8	Datos obtenidos del Ensayo de Tracción Para Probetas Envejecidas a 167°C	80
Tabla 4.9	Datos obtenidos del Ensayo de Tracción Para Probetas Envejecidas a 177°C	80
Tabla 4.10	Esfuerzos de Fluencia Para Probetas Solubilizadas	81
Tabla 4.11	Porcentajes del Esfuerzo de Fluencia para el Ensayo de Fatiga a Probetas Solubilizadas	82
Tabla 4.12	Esfuerzos de Fluencia Para Probetas Envejecidas a 167°C Durante 14 Horas	82
Tabla 4.13	Porcentajes del Esfuerzo de Fluencia para el ensayo de Fatiga a probetas Envejecidas a 167°C Durante 14 Horas	82
Tabla 4.14	Esfuerzos de Fluencia Para Probetas Envejecidas a 177°C Durante 14 Horas	82
Tabla 4.15	Porcentajes del Esfuerzo de Fluencia para el ensayo de Fatiga a Probetas Envejecidas a 177°C durante 14 horas	83
Tabla 4.16	Valores Obtenidos de los Ensayos de Fatiga Para Probetas Solubilizadas	86
Tabla 4.17	Dispersión del Número de Ciclos Obtenidos a los Niveles de Esfuerzos Aplicados a las Probetas Solubilizadas	87
Tabla 4.18	Valores Obtenidos del Ensayo de Fatiga. T6 a 167°C Durante 14 Horas.	89
Tabla 4.19	Dispersión del Número de Ciclos Obtenidos a los Niveles de Esfuerzos Aplicados a las Probetas Envejecidas Artificialmente a 167°C Durante 14 horas	90
Tabla 4.20	Valores Obtenidos del Ensayo de Fatiga. T6 a 177°C Durante 14 Horas	91
Tabla 4.21	Dispersión del Número de Ciclos Obtenidos a los Niveles de Esfuerzos Aplicados a las Probetas Envejecidas Artificialmente a 177°C Durante 14 Horas	93
Tabla 4.22	Comparación de los Valores de Esfuerzo Para Número de Ciclos Constantes	94
Tabla 4.23	Diferencia Porcentual y Absoluta del Esfuerzo Máximo Antes de Ruptura a un Determinado Número de Ciclos	95
Tabla 4.23	Comparación de las Variables Estudiadas para cada una de las Condiciones	104

ÍNDICE DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

Si	Silicio
Mg	Magnesio
Cu	Cobre
Cr	Cromo
Fe	Hierro
Zn	Zinc
Al	Aluminio
T	Temperatura
CO	Condición Original adquirida en sumindu
t	Tiempo

INTRODUCCIÓN

En un medio en el que existen infinidad de materiales, no se puede catalogar a ninguno de estos como bueno o malo, sencillamente cada uno es único y presenta características y propiedades específicas que pueden resaltar u opacarse dependiendo de las condiciones de operación en las que éste se encuentre.

Al hacer énfasis en el aluminio y sus aleaciones, se sabe que son materiales comúnmente utilizados en obras de ingeniería y elementos de máquinas, pues dadas las condiciones, destacan por su ligereza y resistencia a la corrosión, así como por su elevada conductividad térmica y eléctrica, además, presentan propiedades mecánicas bastante moderadas y aleado con otros elementos las mejoras son considerables.

En la actualidad, numerosas investigaciones ofrecen análisis de la resistencia a la fatiga para la aleación de aluminio AA-6061 previamente envejecida, a diferentes temperaturas y tiempos, a fin de determinar las condiciones que dan lugar a los parámetros idealizados para este material. Cada alteración en las variables estudiadas ofrece un mundo nuevo de propiedades y por consiguiente surgen las aplicaciones en las que este virtuoso material podrá entregar un mejor desempeño.

Controlando los factores que incrementan la probabilidad de falla por fatiga y mediante el análisis de los fenómenos que ocurrieron a lo largo de la investigación se pudo establecer relaciones lógicas entre los estudios de metalografía, fatiga y fractografía para la mencionada aleación.



C A P Í T U L O I

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 TÍTULO

Estudio de la Resistencia a la Fatiga de la Aleación de Aluminio AA-6061 Sometido a Envejecimiento Artificial a Temperaturas de 167 °C y 177 °C para un tiempo de 14 horas.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente son innumerables los procesos de fabricación que emplean como materia prima algún metal, siendo el aluminio uno de los más utilizados en el campo ingenieril, dado que la mayoría de sus aplicaciones se deben a sus características particulares, su baja densidad y resistencia mecánica relativamente elevada, aunque otros de sus usos dependen de la resistencia a la corrosión y de sus propiedades para ser usado en múltiples aplicaciones.

Entre las presentaciones comerciales del aluminio se encuentra la aleación AA-6061, una de las aleaciones térmicamente tratables más versátiles, que ofrece un rango de aplicaciones que van desde componentes de máquinas y piezas en la industria aeronáutica, hasta equipos y productos destinados a la recreación; por esta razón es conveniente mejorar sus propiedades con tratamientos térmicos, como es el caso del envejecimiento artificial, que no es más que un procedimiento aplicado con el fin de mejorar la resistencia del material; sin embargo al manipular las variables

que intervienen en este tratamiento se generan alteraciones en las propiedades mecánicas ya establecidas para este material.

Se plantea estudiar el comportamiento de la aleación de aluminio AA-6061 cuando es sometido a esfuerzos de fatiga, pues la gran mayoría de las fracturas metálicas son la consecuencia de una constante aplicación de tensiones y/o cargas dinámicas cíclicas. Al someter previamente el material a un tratamiento de envejecimiento artificial (T6) a temperaturas de 167°C y 177°C durante un tiempo de 14 horas, y aplicar los ensayos de fatiga es posible elaborar un análisis comparativo de los resultados y establecer los efectos de dicho tratamiento sobre la mencionada aleación.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la resistencia a la fatiga de la aleación de Aluminio AA-6061 sometido a envejecimiento artificial a temperaturas de 167 °C y 177 °C para un tiempo de 14 horas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar análisis metalográficos a la aleación de aluminio AA-6061 para las diversas temperaturas de envejecimiento [167 °C y 177 °C].

- Determinar la dureza de la aleación de aluminio AA-6061 para las diferentes temperaturas de envejecimiento [167 °C y 177 °C].
- Analizar el comportamiento a fatiga de la aleación de aluminio AA- 6061 para las diferentes temperaturas de envejecimiento [167 °C y 177 °C].
- Realizar un estudio fractográfico para la aleación de aluminio AA-6061 sometido a envejecimiento artificial mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido.
- Realizar un análisis que relacione las variables obtenidas para los estudios de metalografía, fatiga y fractografía.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen un gran número de investigaciones en las que se han realizado análisis de la resistencia a la fatiga para la aleación de aluminio AA-6061 previamente envejecida, a distintas temperaturas y tiempos. Al conocer el comportamiento de dicha aleación para un gran número de estas condiciones de envejecimiento, se puede establecer la relación de influencia de estos parámetros en la variación de las propiedades mecánicas del material; se sabe que la AA-6061 es una aleación de aluminio para forja tratable térmicamente por su contenido en magnesio y silicio que permite el endurecimiento por precipitación, ahora, una vez tratada térmicamente se ve modificada su ductilidad con respecto al material en condición original, por medio de los ensayos de fatiga se persigue comprobar y cuantificar la mejora de las propiedades mecánicas del material posteriormente a los tratamientos térmicos antes mencionados, a fin de conformar una base de datos para futuros estudios, que permita distinguir las condiciones óptimas para cada aplicación,

y garantice el aprovechamiento máximo de la aleación AA-6061 en el campo industrial.

1.5 LIMITACIONES

El desarrollo de la investigación dependerá de la disponibilidad de uso de los equipos presentes en los Laboratorios de Materiales y Procesos de Fabricación de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo, puesto que la afluencia de estudiantes a este espacio es continua y en gran masa, lo cual dificulta el libre uso y acceso a los materiales y equipos requeridos.

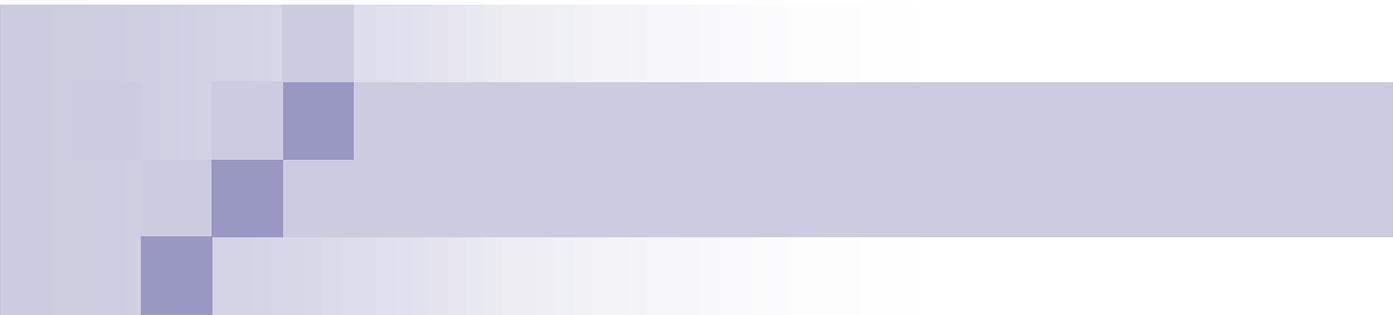
La mediana disponibilidad en el mercado de la aleación de aluminio estudiada, así como el maquinado y rectificado de las probetas a ensayar también representan limitaciones en la investigación.

1.6 DELIMITACIÓN Y/O ALCANCES

El objetivo principal que se persigue es el de determinar la influencia de los factores temperatura y tiempo de envejecimiento en la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AA-6061. Luego de someter dicha aleación a dos temperaturas, [167°C y 177°C], para un tiempo de 14 horas, se realizará un estudio completo de su comportamiento, el resto de las variables se mantendrán controladas. Se emplearán sesenta (60) probetas, las cuáles serán sometidas a ensayos de fatiga y dieciséis (16) a ensayos de tracción, Al tabular las propiedades obtenidas del material para las

condiciones de trabajo dadas, se cuenta con una herramienta confiable para estudios posteriores y nuevas aplicaciones del material estudiado.

Conociendo el efecto que tienen la temperatura y el tiempo de envejecimiento en el comportamiento a la fatiga del aluminio AA-6061 se pueden fijar parámetros de trabajo “ideales” para este tratamiento térmico según sea la aplicación para la que se requiera el material. Todo esto traerá consigo la obtención del máximo provecho de las características de la aleación y un mejor desempeño de la misma.



C A P Í T U L O

||

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 ANTECEDENTE NRO. 1

Light Metal AGE, September/October 2006, Neumeyer X., Chen D., Mostovoy S. y Benedyk J. *Fatigue Properties of AA6061 and AA7075 Extruded Rod after Retrogression Heat Treatment and Thermo-Mechanical Treatment*. Thermal Processing Technology Center, Illinois Institute of Technology (ITT). Año 1999. Estudio de la resistencia a la fatiga de barras extruídas y envejecidas de las aleaciones de aluminio AA-6061 y AA-7075 luego de ser sometidas a un Tratamiento Térmico Regresivo (RHT), a un Tratamiento Termo-Mecánico (TMT) y posteriormente envejecidas artificialmente durante 2, 4, 6 y 8 horas, para los cuales los valores picos de dureza para la aleación AA-6061 estuvieron cercanos a los del material en condiciones iniciales, mientras que se observó que en la aleación AA-7075 se produjo una disminución de aproximadamente 20% en comparación con las condiciones iniciales. Finalmente, de los ensayos de fatiga realizados se concluyó que los materiales que fueron tratados mostraron valores más elevados de resistencia a la fatiga para medio y alto ciclaje.

2.1.2 ANTECEDENTE NRO. 2

Forn A., Baile M. T y Rupérez E. *Optimización del tratamiento térmico de envejecimiento en materiales compuestos base aluminio*. Departamento de Ciencia de

los Materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Cataluña. Año 2002. Investigación acerca de la optimización de los tratamientos térmicos de solubilización y envejecimiento en las aleaciones de aluminio AA-6061 reforzadas con partículas de óxido de aluminio. Para ello se realizaron tratamientos de puesta en solución para distintas condiciones de temperatura y tiempo y posteriores tratamientos de envejecimiento artificial. El análisis de los resultados de dureza y ultra-microdureza de todas las muestras ha permitido determinar para cada material las condiciones óptimas del tratamiento térmico. Los resultados de estos estudios arrojaron que el máximo endurecimiento en la aleación AA-6061 se alcanza entre 6 y 10 horas, para una puesta en solución de 560°C/2h, y una temperatura de envejecimiento de 175°C. Además se obtuvo que al incorporar partículas de alúmina en un material reforzado acelera aparición de precipitados β'' y β' en la matriz en el proceso de envejecimiento artificial, y al obtener el precipitado β'' se tiene el máximo endurecimiento. Los ensayos de tracción y de ultra-microdureza guardan estrecha relación con el comportamiento a fractura del material procedente de colada, debido a la mala adherencia matriz-refuerzo. Los procesos de conformación en caliente y los tratamientos térmicos mejoran dicha adherencia, con lo que se obtienen buenas propiedades a tracción y a fatiga. El análisis fractográfico del material compuesto tratado con T6 mostró que el mecanismo que predomina es la fractura frágil del refuerzo.

2.1.3 ANTECEDENTE NRO. 3

Pérez M., Puchi F. M., Eli S., Villalobos Gutiérrez C. J. *Comportamiento a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 envejecida*. Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (REVELE) Vol 17, No. 2. Año 2002. Estudio sobre el comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga, en condiciones de flexión rotativa, de la aleación de aluminio AA-6063 con un tratamiento térmico

de envejecimiento. A fin de determinar la condición que da lugar al mayor aumento en la resistencia a la fluencia del material (condición óptima de envejecimiento), realizaron una serie de tratamientos térmicos a temperaturas de 155°, 170° y 185°C, durante distintos tiempos de envejecimiento. Una vez determinada dicha condición, se realizaron ensayos de fatiga tanto al aire como en condiciones corrosivas, empleando para éste último propósito una solución de NaCl al 3% en peso. Con relación a los ensayos de fatiga, determinaron que ligeras diferencias en la resistencia a fluencia no generan una diferencia apreciable en la resistencia a la fatiga, mientras que los ensayos de corrosión-fatiga demostraron que a bajos esfuerzos alternantes, la reducción de la vida a la fatiga se eleva para altos esfuerzos, en comparación con los ensayos de fatiga al aire. Finalmente, el estudio de las superficies de fractura en esta aleación demostró que el avance de las grietas de fatiga no es necesariamente normal al esfuerzo de tensión, por lo que las superficies de fractura en general no son planas.

2.1.4 ANTECEDENTE NRO. 4

Correa F. y Pineda M. *Estudio de la resistencia a la fatiga de la aleación AA 6061 bajo un medio acuoso con NaCl al 3%*. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo. Año 2006. Estudio del comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga en condiciones de flexión rotativa, de la aleación AA6061 en un medio acuoso. Para este propósito se realizaron ensayos de fatiga al aire y en una solución de NaCl al 3% en peso: estos ensayos se llevaron a cabo usando el método de la escalera aplicando esfuerzos alternantes del orden de 305, 270, 243, 212, 180, 151, 135, y 90 MPa correspondientes al 100, 90, 80, 70, 60, 50, 45 y 30% de la resistencia a fluencia del material. Se obtuvieron los parámetros de las relaciones que describen la variación del número de ciclos a falla del material en función del esfuerzo alternante, encontrándose una dispersión característica de este tipo de ensayo en ambas condiciones. Se llevó a cabo un análisis con el microscopio

electrónico de barrido de las superficies de fractura seleccionadas y las secciones transversales a estas, con la finalidad de detectar la presencia de grietas que dieron lugar a la falla principal. De esta manera se obtuvo como resultado que a bajos esfuerzos las superficies de fractura de esta aleación demuestran que el avance de las grietas de fatiga no es necesariamente normal al esfuerzo de tensión, y que la vida a fatiga en el medio corrosivo es menor que en el medio inerte.

2.1.5 ANTECEDENTE NRO. 5

Durán C. y Hernández N. *Efecto del tratamiento térmico de envejecimiento aplicado a una aleación de aluminio sobre sus propiedades mecánicas*. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Año 2007. Estudio acerca del efecto que tiene el tratamiento térmico de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas de la aleación AA-6061. Partiendo de barras cilíndricas de 1/2" de diámetro, se trabajó la aleación con 6 condiciones, su condición original, solubilizada con un tiempo de 2 horas a 533°C, donde se esperó la disolución de las fases del material y a cuatro tiempos 1, 3, 6, 9 horas a 177°C. Estas condiciones se estudiaron y analizaron mediante la realización de ensayos de tracción, impacto y dureza. De los resultados obtenidos se evidenció que el material es altamente dúctil en un corto tiempo de permanencia en el horno y el mismo tiende a aumentar su fragilidad a medida que el tiempo es mayor. La conclusión más relevante fue que mientras más alto sea el tiempo de envejecimiento, el material reflejará mayores alteraciones en sus propiedades mecánicas, aunque este no represente un aumento considerable en relación a las condiciones originales.

2.1.6 ANTECEDENTE NRO. 6

José De Frenza, Leañez M., Sáenz L., Caralli A. *Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento sobre el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 6063*. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación. Centro de Investigaciones de Mecánica, CIMEC.2006. Esta investigación presenta un estudio del comportamiento mecánico de la aleación de aluminio AA-6063 sometida a un tratamiento térmico de envejecimiento. Las condiciones originales del material son barras cuadradas de lado $L=5/8''$ y $3/4''$, fabricadas mediante un proceso de extrusión. La aleación se homogeneizó a una temperatura de 550°C por una hora, un segundo tratamiento es realizado, el envejecimiento a la temperatura de 350°C en tiempos de una, tres y cinco horas, respectivamente. Se realizaron ensayos de tracción, Charpy y dureza Vickers ($P=50\text{g}$). La mayor energía absorbida por impacto alcanzada fue para la condición de envejecimiento de una hora, sin embargo esta fue incrementada un cincuenta y tres por ciento (53 %) al ser comparado con la condición original, y un dos por ciento (2 %) al ser comparado con la condición homogeneizada. Se determinó por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB) que el mecanismo de fractura es de coalescencia de cavidades. Con base en esto se apreció la influencia del tratamiento térmico de envejecimiento en las propiedades mecánicas de la aleación.

2.2 GENERALIDADES DEL ALUMINIO

El aluminio posee características versátiles debido a que forma más de trescientas aleaciones que hayan sido reconocidas, con propiedades que le permiten una amplia aplicación industrial, presenta considerable resistencia mecánica, resistencia a la fractura, y gran confiabilidad estructural.

Los costos de los productos de aluminio son más bajos en comparación con los precios de productos elaborados a partir de otros metales, porque éste es más fácil de cortar y maquinar, requiere menos mantenimiento, es más ligero, de buena resistencia, y excelente conductor de calor y electricidad. [Según Barrand y Gadeu].

2.3 ALEACIÓN

El término aleación se utiliza cuando se adicionan otros elementos al aluminio. La principal razón por la cuál el aluminio es aleado, es para obtener mayor resistencia sin incrementar considerablemente su peso, a partir de esto se puede obtener mayor resistencia a la corrosión, mejor soldabilidad, maquinabilidad o simplemente mejor apariencia.

Algunos de estos elementos son añadidos para endurecer la solución sólida, como lo es el caso del Magnesio, Cobre; mientras que otros son añadidos para formar varios compuestos intermetálicos deseados, entre ellos el Litio, Silicio, y Zinc.

Cuando el metal obtenido contiene entre 99,5 y 99,79 % de aluminio es llamado aluminio puro o comúnmente aluminio comercial. Las aleaciones de aluminio pueden ser clasificadas en dos categorías con base en el mecanismo primario del desarrollo de sus propiedades: las aleaciones trabajadas (wrought) y las aleaciones fundidas o vaciadas (castings). [Según <http://www.materiales-sam.org.ar> en Abril 2008]

Los principales elementos químicos adicionados al aluminio para producir aleaciones específicas son los siguientes:

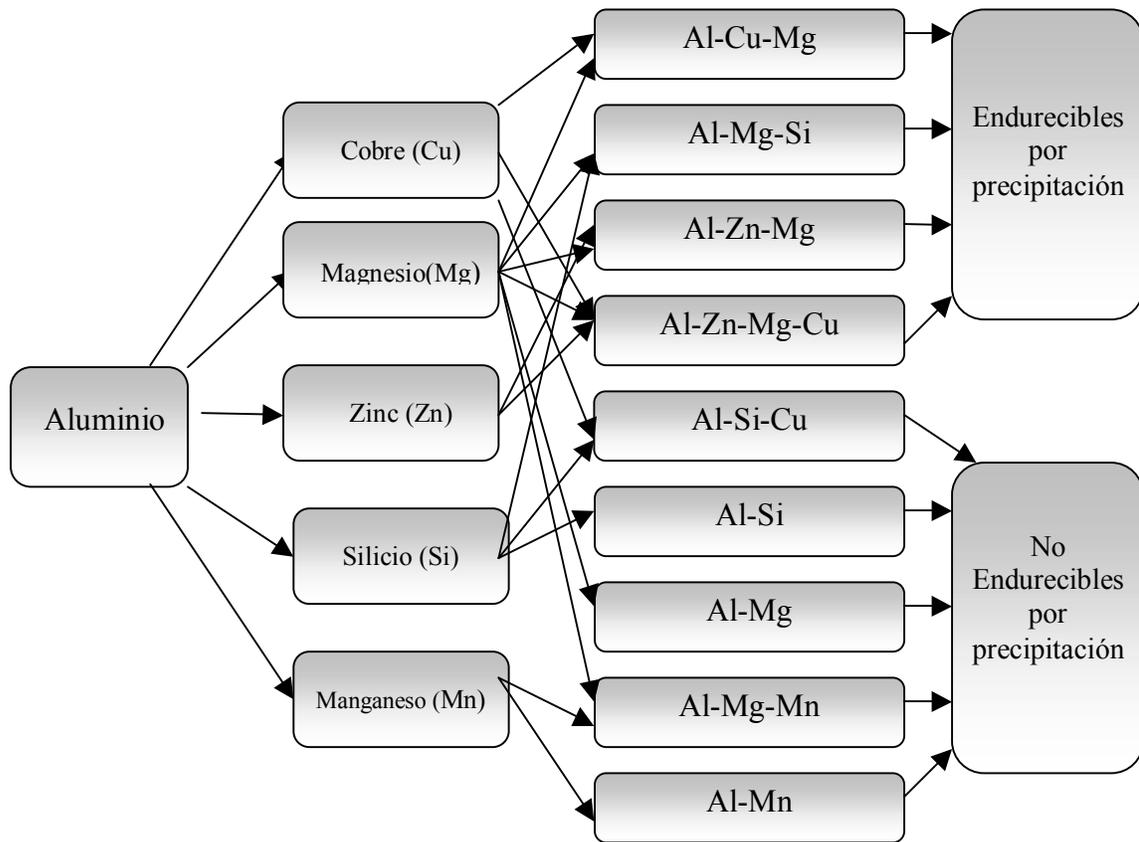


Figura 2.1 Diagrama de las Diferentes Aleaciones de Aluminio
Fuente: Aluminium Cast House Technology. Theory and Practic. 1995

Muchas aleaciones responden a tratamientos térmicos basados en la solubilidad de las fases. Estos tratamientos térmicos incluyen: tratamientos de solución, temple y envejecimiento artificial. En estos casos se aplica el término de aleaciones tratables térmicamente para ambas categorías. Para la composición química de cada aleación, se trabajan mecánicamente mediante deformación plástica para endurecerlas y usualmente se realiza mediante combinación de diferentes procedimientos de recocido. [Según Shackelford]

Tabla N° 2.1 Solubilidad Sólida Máxima de Elementos Aleantes en el Aluminio

Elemento	Temperatura [°C]	w/°Solubilidad
Cobalto	657	<0,02
Cobre	548	5,65
Cromo	661	0,77
Estaño	228	0,06
Germanio	424	7,20
Hierro	655	0,05
Litio	600	4,20
Magnesio	450	17,40
Manganeso	658	1,82
Níquel	640	0,04
Plata	566	55,60
Silicio	577	1,65
Titanio	6655	1,30
Vanadio	6611	0,40
Zinc	443	70,00
Zirconio	660.5	0,28

Fuente: Enciclopedia del Aluminio. Barrant y Gadeau. 1968

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA-6061

Este tipo de aleación es la más empleada en procesos de estampado, forja, doblado, repujado y aplicaciones estructurales en general ya que es de fácil conformado para trabajar en frío y de buena maquinabilidad.

2.4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN AA-6061

La composición química presente en la aleación de aluminio AA-6061 es:

Tabla N° 2.2 Composición Química del Aluminio AA-6061

Elemento	%presente
Silicio	0,40-0,80
Hierro	0,70 max.
Cobre	0,15-0,40
Manganeso	0,15 max.
Magnesio	0,80-1,20
Cromo	0,04-0,35
Zinc	0,25 max.
Titano	0,15 max.

Fuente: Aluminum Standards and Data 2003 Aluminium Association

2.4.2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ALEACIÓN AA-6061

Las propiedades físicas presentes en la aleación de aluminio AA-6061 son:

Tabla N° 2.3 Propiedades Físicas del Aluminio AA- 6061

Propiedad	Valor
Módulo de Elasticidad	71,70Gpa
Módulo de Rigidez	26,80Gpa
Relación de Poisson	0,34
Densidad	2,8 g/cm ³

Fuente: Aluminum Standards and Data 2003 Aluminium Association

2.4.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN AA-6061

Las propiedades mecánicas presentes en la aleación de aluminio AA-6061 son:

Tabla N° 2.4 Propiedades Mecánicas para Tracción del Aluminio AA-6061

Para Recocido	Para T6
Max. 22ksi	Max 38ksi
Flu. 12ksi	Flu 35ksi

Fuente: Enciclopedia del Aluminio. Barrand y Gadeau

Las propiedades de resistencia mecánica sirven en la mayoría de los casos como guía para dictaminar las aplicaciones concretas que se le pueden dar a un material. A continuación se da un resumen de las propiedades mecánicas más importantes del aluminio no sólo sometido a esfuerzo continuo sino también, oscilante y por golpe.

2.5 DUREZA SUPERFICIAL

Es la resistencia de un material a ser marcado por otro. Se prefiere el uso de materiales duros cuando éstos deben resistir el roce con otros elementos. El ensayo es realizado con indentadores en forma de esferas, pirámides o conos, estos elementos se cargan contra el material y se procede a medir el tamaño de la huella que dejan. Una de las ventajas del ensayo de dureza es que los valores entregados pueden usarse para hacer una estimación de la resistencia a la tracción. La clasificación y los métodos varían con cada material, dando origen a los números de dureza:

- **HBN** (Hardness **Brinell** Number)

- **HRA, HRB, HRC**, (Hardness **Rockwell** series A, B, C, ...)
- **HVN** (Hardness **Vickers** Number), entre otros.

[Según <http://materiales.eia.edu.co/laboratorios/Metalografia/teoria.htm> en Enero 2008]

Tabla N° 2.5 Ensayos de Dureza

Ensayo ROCKWELL A, C, D

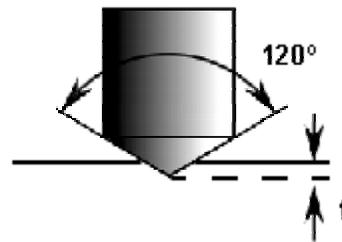
Indentador: Cono de diamante (HRA, HRC, HRD)

Carga:

$$P_A = 60\text{Kg}$$

$$P_C = 150\text{Kg}$$

$$P_D = 100\text{Kg}$$



Formula : HRA, HRC, HRD = 100 – 500t

Fuente: Instituto de Materiales de Argentina

2.6 RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Dentro del mundo de la tecnología, se observan una gran cantidad de piezas que deben ponerse en contacto con otras y rozarse a altas velocidades. El acabado final y la textura de una superficie es de suma importancia e influencia para definir la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia a la fatiga y aspecto externo de una pieza o material, por lo que la rugosidad debe tenerse en cuenta en el estudio de cualquier material. El acabado superficial de los cuerpos puede presentar errores de forma macro y micro, estas muescas o concentradores de esfuerzos pueden ocasionar el principio de grietas y posteriores fracturas. Los valores de rugosidad dependerán de

la orientación de la misma (paralela a la línea de la superficie, perpendicular a esta, de forma cruzada respecto a la línea de la superficie, multidireccional, aproximadamente radial respecto al centro de la superficie y aproximadamente circular respecto al centro de la superficie). [Según <http://www.dsm.usb.ve/materiales/guias/mt-3312%/mt-3312-3.pdf> en Mayo 2008]

2.7 ENSAYO DE TRACCIÓN

En el ensayo de tracción, se coloca una probeta en una máquina de ensayo consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil. Se procede a medir la carga mientras se aplica el desplazamiento de la mordaza móvil.

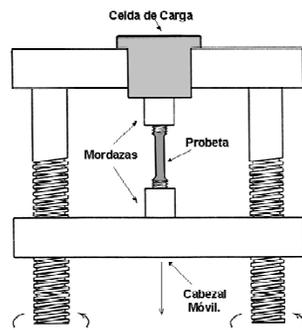


Fig. N° 2.2 Dispositivo Para Realizar Ensayos de Tracción

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad ajustable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, además las máquinas grafican en un eje el desplazamiento y en el otro eje la carga leída.

Las curvas tienen una primera parte lineal llamada zona elástica, en donde la probeta se comporta como un resorte: si se quita la carga en esa zona, la probeta

regresa a su longitud inicial. Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material alcanza el punto de fluencia, desde aquí el material comienza a adquirir una deformación permanente. A partir de este punto, si se quita la carga la probeta quedaría más larga que al principio.

La deformación se concentra en la zona del cuello, provocando que la carga deje de subir. Al adelgazarse la probeta la carga queda aplicada en menor área, provocando la ruptura. En la figura 2.3 se observa la forma de la probeta al inicio, al momento de llegar a la carga máxima y luego de la ruptura.

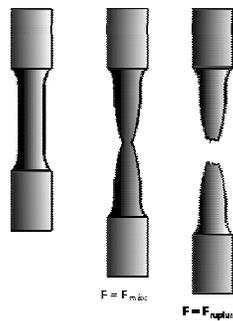


Fig. N° 2.3 Comportamiento de una Probeta al ser Sometida a Ensayo de Tracción

Los valores característicos que se obtienen en el ensayo de tracción son aplicables, generalmente estos valores son el límite elástico 0,2%, la resistencia máxima a la tracción, el alargamiento a la rotura, así como la estricción de ruptura. En general, la resistencia aumenta con el aumento en elementos de aleación. Los dominios de la resistencia en cada aleación surgen, como consecuencia de los aumentos de resistencia que se consiguen por deformación en frío o endurecimiento por tratamiento térmico. Los distintos elementos de aleación actúan de modo muy diferente en cuanto al aumento de la resistencia.

2.8 ENSAYO DE FATIGA

Una gran mayoría de los elementos de máquinas se encuentran sometidos a cambios de tensiones, ya sean de tracción, compresión, flexión o torsión, que se repiten sistemáticamente y que producen la rotura del material para valores de la misma considerablemente menores que las calculadas en ensayos estáticos. Este tipo de rotura que necesariamente se produce en el tiempo, se denomina fatiga aunque es común identificarla como rotura por tensiones repetidas, tensiones que pueden actuar individualmente o combinadas.

En las operaciones de mecanizado, se producen pequeñas rayas y surcos en la superficie de la pieza por acción del corte. Estas marcas limitan la vida a fatiga pues son pequeñas grietas las cuales son mucho más fáciles de aumentar. Mejorando el acabado superficial mediante pulido aumenta la vida a fatiga.

La resistencia a la fatiga de un material depende de una serie de factores, entre estos la composición, estado y procedimiento de obtención del material, pero también hay que considerar la configuración de los elementos constructivos. Los resultados de los ensayos de fatiga alternativa presentan siempre una dispersión que no se disminuye aunque se utilicen métodos más precisos de medición. Se deben, principalmente, a contingencias casuales que intervienen al originarse la primera fisura y prosiguen en las fases iniciales de su expansión.

Un ensayo particular es el ensayo de fatiga con probeta rotatoria en el cual una probeta se hace girar por medio de un motor, mientras se le aplica una carga conocida, esta carga es la resultante de cálculos previos hechos tomando en cuenta la data de ensayos de tracción. La probeta queda sometida a una flexión alternada, que se traduce en que un punto cualquiera de la probeta que queda sometido a un ciclo de cargas que va de tracción a compresión. Esto produce fisuras que se van propagando

lentamente, reduciendo el área hasta un punto tal en que la probeta no puede resistir la carga aplicada y se rompe. [Según Avner]

Variando el peso aplicado en el ensayo, y anotando la cantidad de ciclos que una probeta puede resistir antes de romperse, se puede obtener un gráfico en el que se refleja el comportamiento de la misma.

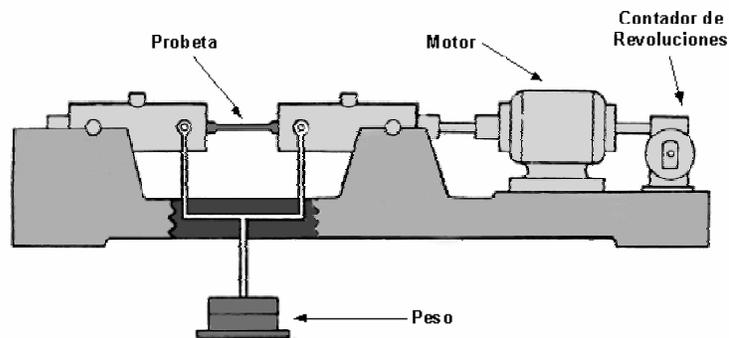


Fig. N° 2.4 Esquema de Máquina de Ensayo de Fatiga.
Fuente:<http://www.gef.es/Congresos/22/PDF/51.pdf>

La curva es decreciente hasta cierto número de ciclos, luego de los cuales la probeta no se rompe. Esta carga que no logra romper la probeta, es la carga de vida infinita y el esfuerzo que provoca es el llamado límite de resistencia a la fatiga S_e , este valor se utiliza para diseñar elementos sometidos a cargas fluctuantes, como es el caso de los ejes en general.

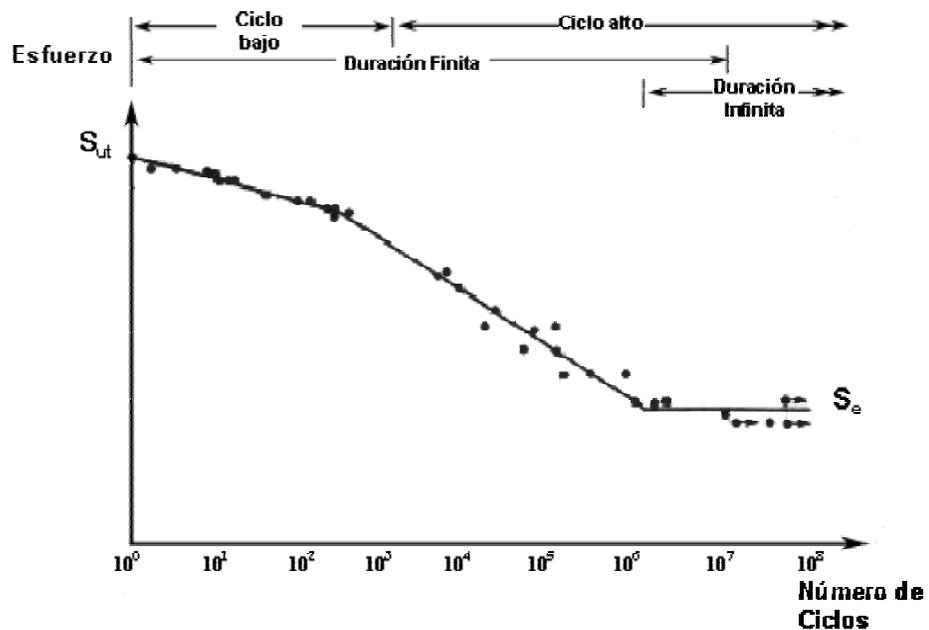


Figura N° 2.5 Ejemplo de la Curva Esfuerzo vs Número de Ciclos

Fuente: <http://www.gef.es/Congresos/22/PDF/51.pdf>

En muchas de las aplicaciones del aluminio (como el caso de usos en la industria aeronáutica), la materia prima cuenta con procesos de fabricación rigurosamente controlados, en los que se verifica las dimensiones, geometría y orientación de los granos en las probetas fabricadas para los ensayos de fatiga previos a cualquier uso del metal, pues se ha demostrado que estos factores tienen gran relevancia al momento de estudiar la respuesta del material.

Una vez verificada la composición química en el material de fabricación de las probetas mediante espectrometría de emisión óptica y las propiedades mecánicas mediante sus respectivos ensayos, se puede proceder a aplicar el ensayo, un ensayo confiable requiere que la probetas estén orientadas según el sentido de los granos, de

la forma más crítica; es decir, con la carga cíclica cruzando transversalmente la dirección del grano con una orientación denominada T-L (esquema A, figura 2.6).

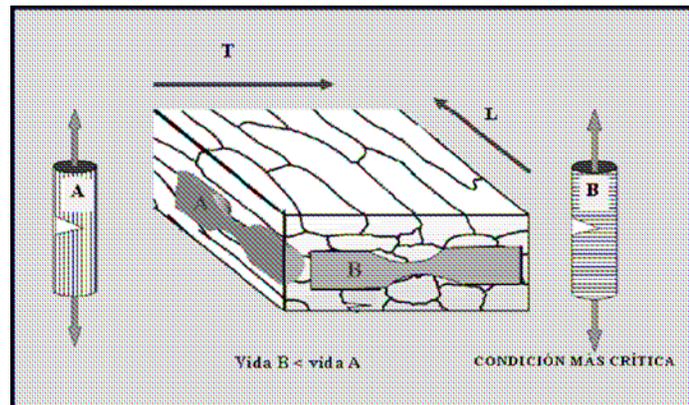


Figura N° 2.6 Orientación de los Granos en las Probetas Ensayadas a Fatiga.

Fuente: INASMET 2005

Con esta orientación se obtiene una resistencia menor que con la carga cíclica orientada a lo largo de la dirección del grano, (esquema B, figura 2.6). [Según Parra]

Entre los factores que influyen directamente en el límite de resistencia a la fatiga se encuentran:

- La calidad superficial, ya que un mejor acabado superficial disminuye la presencia de concentradores de esfuerzos.
- La dureza superficial, los tratamientos de endurecimiento retardan la aparición de grietas mediante el mecanismo de deslizamiento de dislocaciones al hacer más difícil el movimiento de estas últimas.
- Los esfuerzos residuales, los tratamientos mecánicos de deformación superficial como el granallado dejan esfuerzos residuales de compresión que se restan a los esfuerzos externos cíclicos que causan falla por fatiga.

- La temperatura incide en la variación del límite de fatiga, pues al alterarse térmicamente las propiedades del material, este pasa a comportarse de forma diferente.

[Según González y Brisuela]

2.9 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ALGUNAS PROPIEDADES A DISTINTAS TEMPERATURAS

Al aumentar la temperatura del aluminio, disminuyen la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza, y en general, aumenta el alargamiento y la estricción de rotura. El factor tiempo juega un papel esencial en la determinación de valores de resistencia para altas temperaturas. Esta influencia se exterioriza de dos maneras:

Bajo la influencia de temperaturas elevadas se pueden producir modificaciones permanentes en la estructura de los materiales que han experimentado endurecimiento por deformación en frío, estas traen consigo una disminución de la resistencia mecánica, el material puede experimentar deformaciones lentas bajo la acción de cargas en reposo, aumentando la velocidad en el cambio de forma con el incremento de la temperatura y de la tensión. Al mismo tiempo pueden surgir tensiones por debajo de la resistencia a la tracción o del límite elástico 0,2%.

El comportamiento de los metales a bajas temperaturas depende fundamentalmente de la estructura de su red cristalina. El aluminio con su red FCC (ó CCC) tiene la misma estructura que el cobre, el níquel o los aceros austeníticos, por eso no se presentan nunca en las aleaciones de aluminio a temperaturas bajas las complicaciones como rápido descenso de la resiliencia, entre otras, que tienen lugar en los metales BCC, sobretodo en los aceros ferríticos. [Según <http://www.arqhys.com/arquitectura/aluminio-historia.html> en Mayo 2008]

2.10 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Un tratamiento térmico, se orienta al calentamiento y enfriamiento de los metales en estado sólido, para modificar sus propiedades mecánicas, su estructura metalográfica o eliminar tensiones residuales. Cuando se aplica a aleaciones de aluminio, el término tratamiento térmico se refiere usualmente a las operaciones empleadas para incrementar la resistencia y la dureza de las aleaciones de forja o de moldeo endurecibles por precipitación. Uno de los cambios microestructurales que se observan en las aleaciones de aluminio al ser sometidas a un tratamiento térmico es la solubilización de las segundas fases, capaces de precipitar durante el envejecimiento.

La técnica de solubilización consiste en calentar el material a una temperatura mayor que la de solvus y mantener esa temperatura por un tiempo determinado para promover la disolución y redistribución de los elementos aleantes, en este caso Magnesio y Silicio y la transformación de fases de no equilibrio por fases mucho mas estables.

Utilizando como referencia el siguiente diagrama de equilibrio:

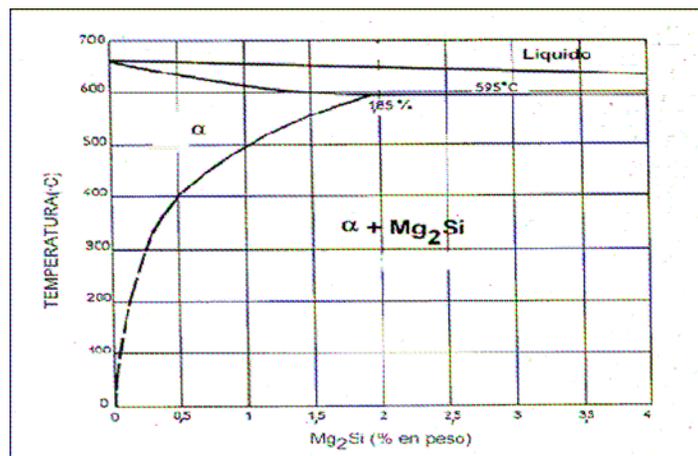


Figura N° 2.7 Diagrama de Equilibrio Al-Mg₂Si.

La fase α para la aleación AA-6061 con 1,2% en peso de Mg₂Si arroja un rango de temperaturas entre 520°C y 560°C.

[Según http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX0Mtbp07de29.pdf en Mayo de 2008]

El Siliciuro de Magnesio se obtiene fundiendo juntos los componentes o bien reduciendo el SiO₂ con suficiente exceso de metal. Según el porcentaje que se tenga de este componente se puede ubicar el estado de la aleación según el diagrama de equilibrio. La reacción química que se genera para el siliciuro de magnesio es la siguiente: $2\text{Mg} + \text{Si} \rightarrow \text{Mg}_2\text{Si}$.

En cuanto al envejecimiento, luego del templado se calienta nuevamente el material hasta una temperatura de envejecimiento por un tiempo determinado en el horno. Con este último paso se busca la formación de un precipitado fino disperso que trae como consecuencia una restricción del movimiento de las dislocaciones. [Según www.educajob.com/xmoned/temarios_elaborados en Enero 2008]

2.11 INFLUENCIA DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

La resistencia a la tracción, el límite elástico 0,2% y la dureza aumentan por deformación en frío, mientras que el alargamiento a la rotura y la estricción a la rotura, disminuyen. El comportamiento en cuanto al aumento de resistencia por deformación en frío depende de la composición. También juegan un papel importante el estado de la estructura antes de la deformación y el tipo de deformación, la velocidad y la temperatura de trabajo.

Mediante la deformación en frío se pueden modificar también otras características como la conductividad eléctrica, que disminuye muy poco. La influencia de una deformación en frío sobre la resistencia a la corrosión es escasa.

Por medio de recocido a elevadas temperaturas se elimina la acritud en los metales deformados en frío, lo que supone, que el aumento de la resistencia conseguida con la deformación en frío, se puede aminorar en mayor o menor medida. Al eliminar totalmente la acritud hasta conseguir el estado inicial es porque el recocido se realiza a temperaturas por encima del umbral de la recristalización. A temperaturas por debajo de este umbral aparece solamente una eliminación parcial del ablandamiento (regeneración). Otras magnitudes que influyen son: el tiempo de recocido, la velocidad de calentamiento y el estado de la estructura antes de la conformación, es decir, los tratamientos térmicos y mecánicos sufridos, a los que se le puede añadir el procedimiento de fundición que se haya seguido en el material de partida.

El recocido de ablandamiento sirve para transformar materiales a un estado de resistencia muy baja y alto alargamiento. Generalmente se realiza para facilitar trabajos de conformación o para hacerlos posibles. Debe tenerse en cuenta el tamaño de grano, la duración del recocido, el nivel del grado de deformación en frío y los recocidos intermedios.

El normalizado sirve para la eliminación de tensiones propias, que pueden surgir debido a un rápido enfriamiento de las piezas al colarlas, por enfriamiento rápido después del proceso de endurecimiento o por trabajo mecánico. Debido a las tensiones propias, pueden producirse deformaciones en las piezas.

Las temperaturas a aplicar en el normalizado térmico son relativamente bajas, ya que de otro modo hay que contar con una merma de la resistencia mecánica no tolerable.

El tratamiento de normalizado es tanto más activo cuando más alta es la temperatura y más largo el tiempo de recocido, aunque deben tenerse en cuenta las posibles modificaciones permanentes de las propiedades del material. El normalizado debe realizarse siempre antes de mecanizar la pieza o al menos antes de la última operación, debido a que está ligada a una deformación permanente.

Con los recocidos totales se pretende conseguir una eliminación de las tensiones propias del producto fundido, un equilibrio de los granos segregados y una disolución de los constituyentes estructurales eutécticos en los bordes de los mismos. Además el recocido total sirve con frecuencia para conseguir una disgregación regular de elementos disueltos en estado de sobresaturación, especialmente Mn y Fe, que influyen sobre el comportamiento en la recristalización y en la conformabilidad en caliente. Finalmente en las aleaciones endurecibles se consigue disolver los elementos de aleación que provocan el endurecimiento. Estos se depositan de nuevo, en el siguiente enfriamiento, que no suele ser rápido. Además si se realiza correctamente el proceso, la distribución tiene lugar de tal forma que, mediante un temple posterior, la disolución tiene lugar de forma rápida y total.

El endurecimiento por precipitación es el tratamiento térmico más importante que se aplica a las aleaciones de aluminio. Este tratamiento eleva notablemente la resistencia mecánica y tiene lugar, fundamentalmente en tres fases:

- Por calentamiento a temperatura elevada se disuelven en la solución sólida de aluminio la mayor parte de los componentes de la aleación, que provocan el endurecimiento (recocido de disolución).
- Por enfriamiento rápido, la solución sólida, enriquecida en estos componentes de la aleación se transforma, en primer lugar, en un estado sobresaturado (temple).
- Por permanencia, a la temperatura ambiente o a una temperatura más elevada, se producen precipitaciones de la solución sólida sobresaturada, que provocan un

aumento de la resistencia a la tracción, del límite elástico 0,2% y de la dureza (envejecimiento o maduración).

Uno de los métodos más efectivos de aumentar el rendimiento es mediante esfuerzos residuales de compresión dentro de una capa delgada superficial. Cualquier tensión externa de tracción es parcialmente contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto es que la probabilidad de nucleación de la grieta, y por tanto de rotura por fatiga se reduce.

2.12 METALOGRAFÍA

La metalografía es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas. Entre las características estructurales que se estudian se encuentran el tamaño de grano, el tamaño, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que pueden modificar de manera considerable las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal. Un examen metalográfico puede suministrar mucha información y el instrumento primordial para la realización del mismo es el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra a diferentes aumentos, que van desde 50X hasta 2000X.

Cuando se habla de exámenes macroscópicos, estos generalmente pueden realizarse sin preparación especial, aunque a veces se requiere una cuidadosa preparación de la superficie para poner de manifiesto las características macroscópicas. En macroscopía, se utilizan criterios para el tipo de corte a realizar

(transversal o longitudinal) para extraer la muestra dependiendo de lo que se quiera observar, por ejemplo:

- Corte transversal: Naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones, procesos de fabricación de caños, y otros.
- Corte longitudinal: Proceso de fabricación de piezas, tipo y calidad de la soldadura y otros.

El examen micrográfico, es una técnica más avanzada y se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido un metal, debido a que los mismos ponen en evidencia los cambios estructurales que sufre el material en dicho proceso.

Los estudios ópticos microscópicos producen resultados que no solo son útiles a los investigadores sino también a los ingenieros. Por ejemplo el examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general, es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales.

Para un estudio de la estructura microscópica se necesita una preparación aún más cuidadosa de la superficie. Los cuatro pasos básicos que se requieren para preparar la superficie para su observación son:

- 1) Corte transversal
- 2) Montaje
- 3) Desbaste y pulido
- 4) Ataque

Los pasos a seguir en el procedimiento de preparación son los mismos para todos los materiales difiriendo solo las herramientas de corte y el grado de finura de los papeles de esmeril, según la dureza del material. El reactivo de ataque a utilizar depende del tipo de aleación. [Según Iriza]

Los materiales duros (aceros aleados, templados, no ferrosos endurecidos) deben cortarse con discos abrasivos muy delgados de carbundum a altas velocidades y gran refrigeración. Los metales frágiles como fundición blanca, aceros templados, bronce ricos en estaño, etc., pueden romperse con golpe de martillo para extraer la probeta.

El desbaste grueso se logra mejor en un esmeril húmedo de banco o en una acabadora de superficies de bandas húmedas, usando bandas de granos 120, 140, 160, lo que se persigue con el esmerilado es obtener una superficie plana, libre de toda huella de marcas de herramientas, y en la que todas las marcas del esmerilado sigan la misma dirección. Se puede esmerilar en seco a condición de no producir cambios estructurales por el calentamiento de la muestra. También se deben evitar presiones excesivas que calienten o distorsionen la superficie a observar.

El desbaste fino se efectúa utilizando granos cada vez mas finos de lija metalográfica para esmerilar. Se utilizan papeles de grano 200 en adelante. Cuando se termina de esmerilar con un papel de lija, las marcas deben estar todas en la misma dirección, antes de proseguir con la siguiente lija mas fina. El desbaste se da por terminado cuando se obtiene una cara perfectamente plana, con rayas muy finas en toda la superficie, producidas en un solo sentido, por el papel de esmeril de mayor finura. Cuando mas blando es el material, mayor es la finura del grano del papel de esmeril utilizado en último término.

Para el pulido se utiliza un disco cubierto con un paño especial, cargado con una suspensión de abrasivo. Al principio, la muestra se sostiene en una posición sobre el disco sin hacerlo girar, hasta que se hayan eliminado la mayoría de las rayas anteriores. Luego puede hacerse girar con lentitud en sentido contrario al de rotación del disco, hasta que solo puedan verse las marcas del abrasivo, la cara del metal debe quedar perfectamente pulida.

El ataque permite poner en evidencia la estructura del metal o aleación. Existen diversos métodos de ataque pero el más utilizado es el ataque químico, este puede hacerse sumergiendo la muestra con cara pulida hacia arriba en un reactivo adecuado, o pasar sobre la cara pulida un algodón empapado en dicho reactivo. Luego la probeta se enjuaga con agua, después alcohol o éter y se seca en corriente de aire. El fundamento se basa en que el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción se ataca más rápido y se verá más oscuro al microscopio, y el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y se verá más brillante en el microscopio.

Por otro lado, en los metales con un solo constituyente metalográfico, los límites de grano están sujetos a ataques selectivos, puesto que representan zonas de imperfección cristalina e impurezas que aceleran el ataque local. Además los granos con orientaciones distintas son atacados con diferente intensidad, dado que esta diferencia en la orientación provoca velocidades de ataque diferentes. Se debe evitar el sobreataque, dado que la superficie se puede manchar y tapar la estructura o producirse manchas de corrosión.

2.13 FRACTOGRAFÍA

El objetivo final de un análisis de falla es la determinación precisa de las causas de rotura de un componente en servicio y la manera de evitarla en el futuro, ya sea mediante un nuevo diseño de la pieza o por el reemplazo del material utilizado originalmente. La causa de la rotura final de un componente es una tensión excesiva aplicada, esta sobrecarga que se produce como consecuencia de otros factores que son justamente los que deben identificarse en el análisis de la falla. Por ejemplo, la sobrecarga final puede ser el resultado de la disminución de la sección efectiva del componente por un proceso previo de fatiga o corrosión. [Según Linares y Roa]

La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información sobre los siguientes parámetros que caracterizan la rotura de un componente en servicio:

- Mecanismo de propagación de la fisura
- Fractoténacidad del material
- Configuración de las tensiones actuantes
- Medio químico
- Origen de la fractura

Una fractografía se vuelve mucho más útil cuanto mayor sea la información que permita obtener. El análisis resulta particularmente efectivo si se puede determinar el punto origen o comienzo de la fractura. Un análisis fractográfico comienza con una observación visual de las características de la superficie de fractura. Se pueden obtener así los primeros indicios de las causas de la nucleación de la fisura, mecanismo y dirección de la propagación, y eventualmente se puede tener alguna estimación de la magnitud de las cargas actuantes. Pero es el análisis de la superficie a mayores aumentos, (como los proporcionados por el microscopio electrónico de barrido), los que permiten la caracterización del proceso microscópico de propagación de la fisura, identificando así las cavidades típicas de la rotura

trasgranular dúctil, las facetas de clivaje de una rotura frágil, las superficies de corrosión bajo tensiones o las estrías típicas de un proceso de fatiga.

Las técnicas fractográficas pueden aportar también información sobre la fractoténacidad del material del componente fracturado. La fragilidad o ductilidad del material quedan en general reveladas en la superficie de fractura. Una aleación más bien dúctil presenta una superficie de fractura con las cavidades características, pero un material más bien frágil rompe generalmente por un mecanismo de clivaje trasgranular. En el caso general estos modos de fractura aparecen mezclados, pero la proporción relativa de los distintos tipos es indicativa de las propiedades fractomecánicas del material. [Según Guerrero y González]

Una observación fractográfica también permite estimar cualitativamente la magnitud de las tensiones actuantes. Por ejemplo, una pequeña zona de fatiga en el inicio de la rotura y una extendida zona de fractura final rápida indica grandes tensiones de trabajo. Inversamente, una zona extendida de propagación por fatiga y una pequeña zona de rotura final indican tensiones más bien bajas. También, la fractura de un componente puede estar muy relacionada con el medio químico activo al cual estuvo expuesto durante el servicio. En un proceso de iniciación de rotura por corrosión, la superficie contiene partículas que se observan claramente en una micrografía electrónica. La densidad de los productos de corrosión también puede indicar el sentido de propagación de la rotura, puesto que es mayor en las zonas cercanas al origen, expuestas durante más tiempo a la acción del medio corrosivo.

Si en una micrografía electrónica puede identificarse que la falla comenzó en el interior del componente, en una inclusión o falla de homogeneidad de la microestructura del material, es obvio que se debe utilizar un material de características más adecuadas. En cambio, si se establece que la rotura comenzó sobre un punto de la superficie del componente, se deberá aumentar la resistencia superficial mediante un tratamiento adecuado, o mejorar el maquinado para disminuir las imperfecciones que puedan generar una iniciación de fisura. En algunos casos las

› confirman las predicciones

C A P Í T U L O

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación fue de tipo descriptiva y explicativa, siendo la caracterización de ésta la realización de ensayos de fatiga a diferentes temperaturas de la aleación de aluminio AA-6061, se pudo examinar el comportamiento fatiga-temperatura-tiempo y luego de un análisis sobre el comportamiento de la aleación bajo estas condiciones, se estableció relaciones causa-efecto para cada situación en particular.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño adoptado fue el de una investigación de tipo experimental, ya que se refirió a la realización de ensayos de laboratorio, y también de tipo documental, lo cual incluyó investigaciones anteriores con apoyo de textos científicos, consultas bibliográficas, páginas web con estudios recientes certificados y libros en general.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica utilizada para la recolección de la información fue la observación directa y análisis de datos, de ésta manera se obtuvieron los resultados de los ensayos de tracción y fatiga y del análisis documental que provino de la bibliografía consultada y de las relaciones obtenidas a partir de curvas, tendencias e imágenes capturadas a diferentes aumentos.

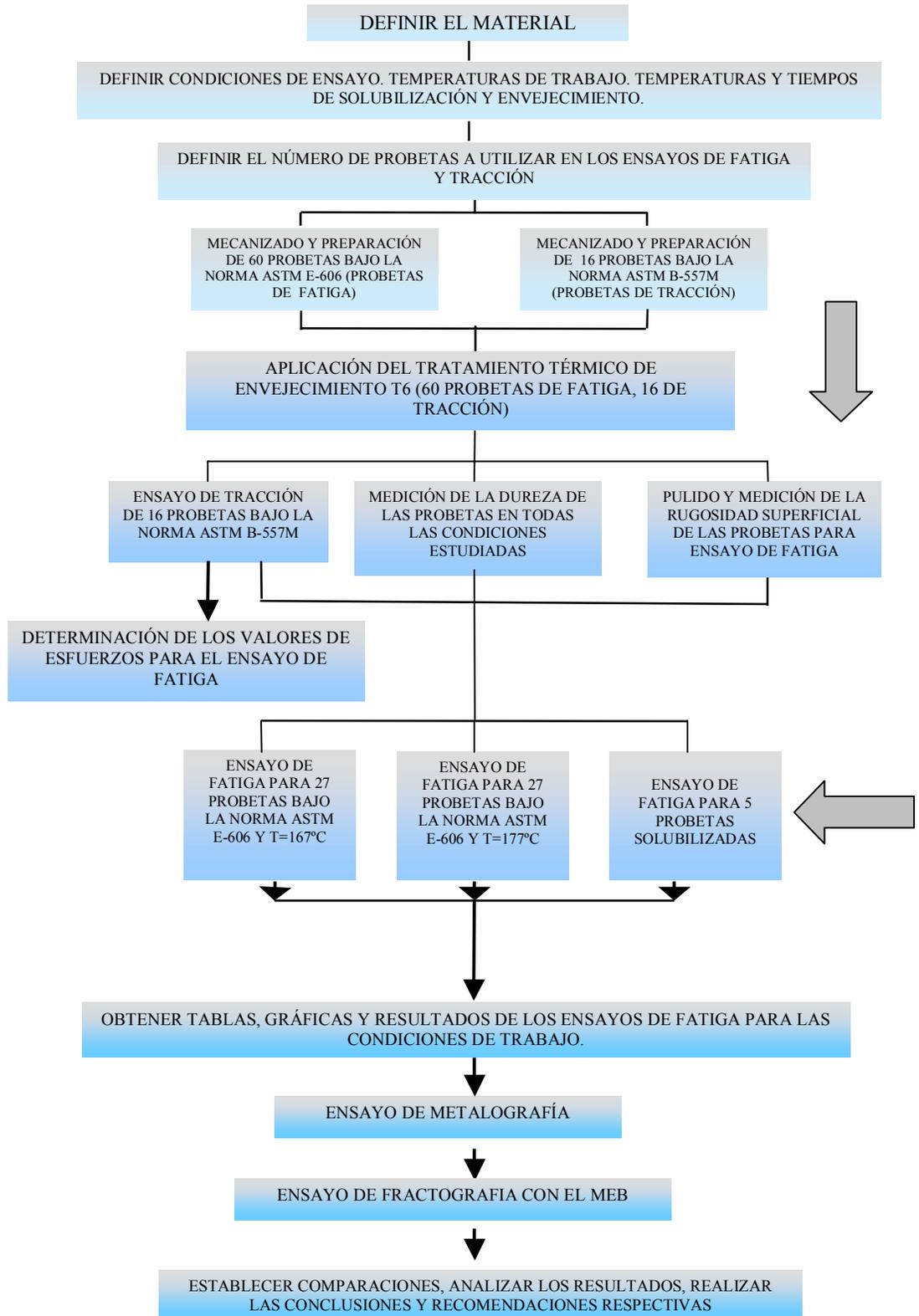
3.4 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos se presentan en forma de cuadros, tablas para la agrupación de los resultados de los ensayos de dureza, rugosidad superficial, ensayos de tracción y de fatiga, y el estudio metalográfico de las imágenes obtenidas por el microscopio y fractografía.

3.5 DIAGRAMA DE FLUJO

Con el fin de hacer un esquema de trabajo se decidió realizar un flujograma que contuviese todas las actividades a realizar durante el desarrollo de la investigación, que a su vez estaba respaldado por un cronograma de trabajo elaborado en Microsoft Project.

Todo el trabajo realizado se encuentra condensado en el siguiente diagrama de flujo. De esta manera se puede visualizar de manera rápida y confiable la estructura organizacional de la investigación.



3.6 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.6.1 MATERIAL UTILIZADO

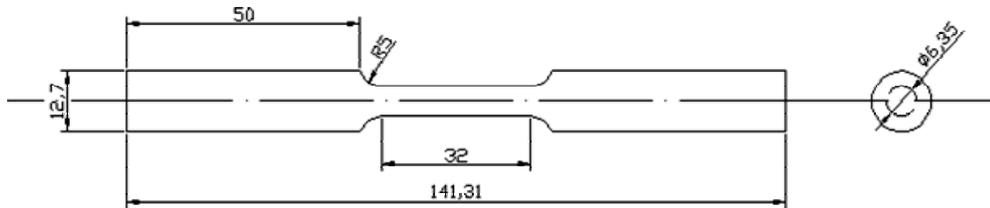
Para la realización de la investigación se dispuso de la aleación de Aluminio AA-6061. Se utilizaron (10) barras cilíndricas de 2 metros de largo y $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro. El material fue adquirido en la empresa SUMINDU, S.A., ubicada en la zona industrial sur de Valencia, estado Carabobo; el Certificado de calidad del material fue suministrado por la misma y se encuentra anexo al final de la investigación.

Por razones de seguridad en cuanto a la materia prima de trabajo, se decidió llevar a cabo un estudio para determinar en que porcentaje se encuentran los principales elementos aleantes experimentalmente, para esto se contó con la empresa ALUCASA CVG, realizando un estudio espectrofotométrico o método de análisis óptico, (chispeos individuales en la cara plana de un tocho) mediante el cual se obtuvo el porcentaje en peso de los elementos químicos presentes en la aleación.

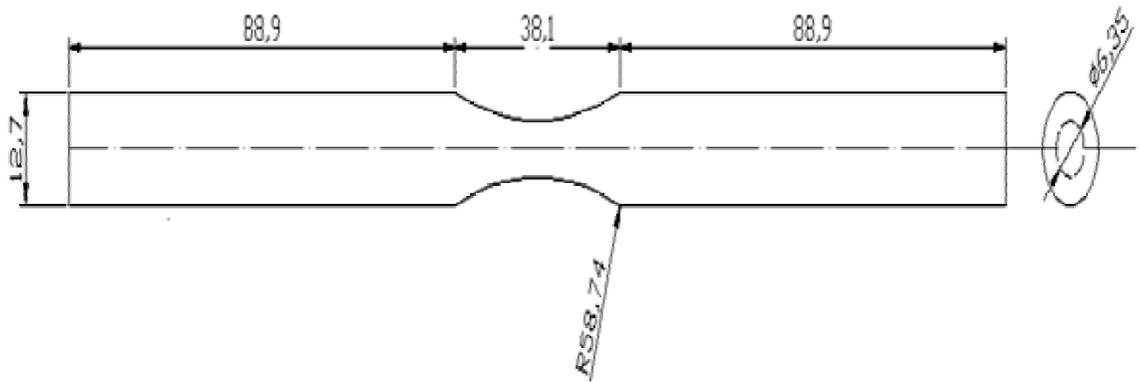
3.6.2 MECANIZADO DE LAS PROBETAS

Para realizar los ensayos correspondientes, fue indispensable tener las probetas adecuadas y requeridas para cada prueba en particular, es por eso que se realizó un proceso de mecanizado; en este caso el proceso tuvo lugar en un taller metal mecánico con un torno operado por Control Numérico Computarizado (CNC) y las probetas se fabricaron según la norma ASTM-E-606, recomendada para fatiga y la

norma ASTM-B 557M para ensayos de tracción para aluminio y aleaciones de aluminio.



**Figura 3.1 N° Dimensiones de la Probeta Para Ensayo de Tracción en mm.
Fuente: Normas ASTM-B 557M**



**Figura N° 3.2 Dimensiones de la Probeta para Ensayo de Fatiga en mm.
Fuente: Normas ASTM-E-606**

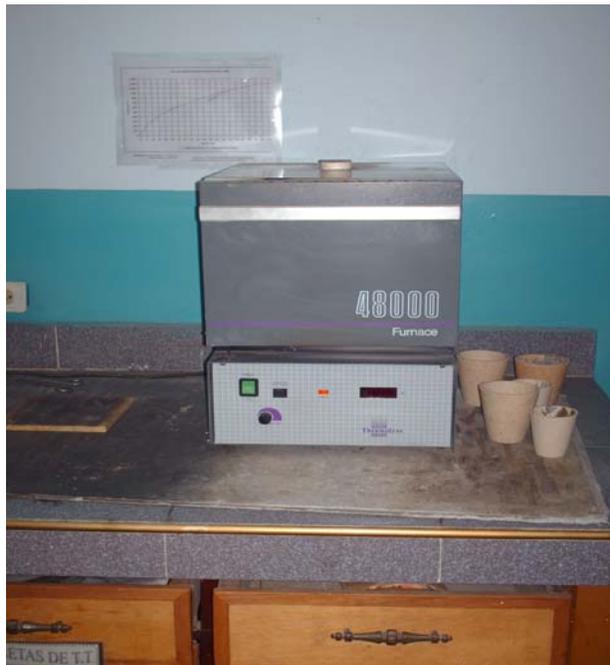


**Figuras N° 3.3 y 3.4. Aspecto Final de las
Probetas para Ensayos de Fatiga.**

3.6.3 SOLUBILIZADO DE LAS PROBETAS

Para llegar a un valor promedio en cuanto a la temperatura de solubilización se puede recurrir a la referencia bibliográfica Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990.

Si se hace referencia a la figura 2.7 (página 31), se puede observar que la fase α para la aleación AA-6061 con 1,2% en peso de Mg_2Si se obtiene en un rango de temperatura que va desde 510°C hasta 590°C, por lo tanto se calentó la muestra a una temperatura igual a 533°C (990°F) durante un tiempo de dos (2) horas, intervalo suficiente para garantizar la obtención de una estructura uniforme en la disolución sólida. Para esta operación se hizo uso de un horno eléctrico disponible en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de



Carabobo.

Figura N° 3.5 Horno Eléctrico.

Tabla N° 3.1 Especificaciones Generales Horno Barnstead Thermolyne 48000

Medidas de la Cámara	
Ancho	17,8cm
Alto	12,7cm
Profundidad	25,4cm
Rango de Operación de Temperaturas	
Corriente Continua	0 – 1093°C
Corriente Alterna	0 – 1200°C
Condiciones Ambientales de Operación	
Temperatura	17 – 27°C
Humedad Relativa	20% - 80%
Altitud Límite	2.000m

Fuente: Manual del usuario del Horno Barnstead Thermolyne 48000

3.6.4 TEMPLE DE LAS PROBETAS

Esta etapa el proceso se aplica inmediatamente después de sacar las probetas del horno en el proceso de solubilización, éstas se someten a un enfriamiento rápido que se realiza en agua a temperatura ambiente ($T=25^{\circ}\text{C}$ la temperatura del laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo), de manera que se logren los precipitados en la estructura del material. Se hizo énfasis en que todas las probetas fuesen templadas con agua a la misma temperatura.

Para evitar el envejecimiento natural de las probetas se procedió a conservar las mismas a una temperatura aproximada de -4°C hasta el momento de llevar a cabo los ensayos de tracción y de fatiga, el material solubilizado fue almacenado en un refrigerador casero marca LG cuyo termostato fue graduado para esa temperatura.

3.6.5 ENVEJECIMIENTO DE LAS PROBETAS

En esta etapa, luego del temple, se calentaron las probetas a una temperatura mucho menor que la temperatura de solubilización con distintos tiempos de permanencia en el horno, para el caso de este trabajo de grado se realizó a 2 temperaturas ($T=167^{\circ}\text{C}$) y ($T=177^{\circ}\text{C}$) para un tiempo de duración en el horno de (14 horas). Estas temperaturas fueron escogidas por encontrarse cercanas, pero por debajo de la línea de solvus, que para este caso es a una temperatura de 180°C , pues en el tratamiento térmico se forma un precipitado que proporciona un efecto de endurecimiento sustancial. Los procesos de precipitación son fundamentales para lograr, por tratamientos térmicos, ciertas características mecánicas y propiedades físicas en los sistemas aleados. A temperaturas próximas a la de la línea solvus para la composición de un determinado sistema, la precipitación tiene lugar, invariablemente, en los límites de grano. Se utilizó el mismo equipo que para la solubilización de las muestras (horno Furnace). De esta manera se forma un precipitado fino disperso que restringe del movimiento de las dislocaciones y pone punto final al tratamiento térmico.

3.6.6 CONTROL DE LAS TEMPERATURAS REGISTRADAS EN EL HORNO

Con el fin de controlar todas las variables posibles, se hizo uso de un termopar, para registrar la fluctuación de la temperatura en la cuál fue programado el horno en

los procesos de solubilizado y envejecimiento artificial, y así verificar si se mantuvo la temperatura deseada durante el tiempo estipulado, previendo interrupciones por fallas eléctricas o cambios bruscos en la intensidad de la corriente.

El termopar utilizado, opera con una apreciación de 1°C y es capaz de medir intervalos cada 1s.

3.6.7 PULIDO DE LAS PROBETAS

Es de saber que debido a la presencia de concentradores de esfuerzos o “muescas” la mayoría de las fracturas o fisuras ocasionadas por fatiga tienen su núcleo en la superficie de las piezas, obviamente una superficie muy rugosa puede llegar a disminuir la resistencia a la fatiga en porcentaje elevados.

Nuevamente, con el fin de controlar todas las variables influyentes en la investigación, se llevó a cabo el pulido de las probetas, haciendo uso de un torno (ubicado en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo), haciéndolo girar a 1000rpm y aplicando sobre el cuello de las probetas (área de estudio) un lijado con papel abrasivo de 400, 600, 1200 y 1600 en ese respectivo orden que no es más que un desbaste mecánico superficial que persigue corregir las imperfecciones presentes en el exterior de las muestras..

3.6.8 MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS

Para verificar la eficacia del paso anterior se procedió a medir la rugosidad superficial de las probetas ensayadas, para medir este parámetro se utilizó un Rugosímetro Digital Marca: Mitutoyo, Modelo: Surf test SJ-201 P, equipo disponible en el Laboratorio de Metrología de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



Figura N° 3.6 Rugosímetro Digital SJ-201 P

Tabla N° 3.2 Especificaciones Generales del Rugosímetro Mitutoyo Surf test SJ 201-P

Intervalo del recorrido	12,5mm
Intervalo de medición	350 μ m
Punta	Diamante (radio = 5 μ m)
Longitud de muestreo	0,25; 0,8 y 2,5 mm

Fuente: [<http://www.cmm.com.mx/pdf/catalogo/12-Forma.pdf> Mayo 2008]

3.6.9 DUREZA DE LAS PROBETAS

Para determinar la dureza de las probetas se realizó un ensayo de dureza superficial en la escala Rockwell A, el cuál presiona al penetrador sobre la superficie del material, este se realizó con una carga de 60Kg y un indentador de punta de diamante. Se efectuó haciendo uso de un durómetro marca BUHLER que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



Figura N° 3.7 Durómetro

3.7 ENSAYO DE TRACCIÓN

El ensayo de tracción se utilizó para evaluar la resistencia en la aleación de aluminio AA-6061. En este ensayo la probeta se deforma usualmente hasta la fractura incrementando gradualmente una tensión que se aplica uniaxialmente a lo largo del eje longitudinal de la probeta. Durante la aplicación de la tensión, la deformación se concentra en la región central más estrecha, la cual tiene una sección transversal uniforme a lo largo de su longitud. La probeta se sostiene por sus extremos en la máquina universal de ensayos a tracción CTM 20 GALDABINI, por medio de

soportes o mordazas que a su vez someten la muestra a tensión a una velocidad constante.

Las variables del ensayo se establecieron en el programa del equipo, y se mantienen constantes para todos los ensayos. Se utilizaron como parámetros predeterminados una velocidad de deformación de 5mm/min. y una carga máxima establecida de 30000 Newton. Estos valores fueron establecidos por referencia de ensayos anteriores realizados a la aleación AA-6061. La máquina se encuentra ubicada en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.



Figura N° 3.8 Máquina para Ensayo de Tracción

*TablaN° 3.3 Especificaciones generales Máquina Universal de Ensayos a Tracción CMT 20
Galdabini*

Carga Máxima	200 KN
Presión de aire comprimido	5 ÷ 8bar
Máximo alargamiento	800mm
Velocidad de ensayo	0,05 ÷ 200mm/min

Unidad de medida de fuerza	Newton, daN, lbs, kgf
Temperatura de operación	10°C ÷ 40°C
Ruido	72 dB(A)

Fuente: Manual del usuario de la Máquina Universal de Ensayos a Tracción CMT 20 Galdabini

El ensayo se le aplicó a cuatro (4) probetas solubilizadas, cinco (5) envejecidas a 167°C, cinco (5) envejecidas a 177°C y dos (2) en condición original.

Con la data obtenida del ensayo se construyó un gráfico de esfuerzos en función del porcentaje de elongación de donde se obtienen diferentes propiedades mecánicas del material (que son utilizadas posteriormente para el cálculo de las cargas de los ensayos de fatiga cíclica) empleando las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_i = \frac{P}{A_o} \quad \text{Ec. 3.1}$$

$$e = \frac{l_f - l_o}{l_o} \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$\sigma_r = \sigma_i * (1 + e) \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde:

σ_i = Esfuerzo Ingenieril. (MPa)

P = Carga (N)

A_o = Área Inicial (mm²)

E = Deformación Ingenieril (mm/mm)

l_f = Longitud final (mm)

l_o = longitud inicial (mm)

ϵ = Deformación real.

3.8 MÉTODO DE LA ESCALERA

Este procedimiento orienta los pasos mediante los cuales se realizan los ensayos de fatiga, se mantiene la siguiente secuencia:

- Ensayo del material a un nivel de esfuerzo cercano o igual a su límite de fluencia.
- Si con el primer esfuerzo aplicado el material falla, es decir se produce ruptura, se debe disminuir el nivel de esfuerzo en un valor menor, a un escalón predeterminado.
- Para cada carga aplicada es necesario tener como mínimo un total entre tres y cinco ensayos con resultados válidos.

3.9 ENSAYO DE FATIGA

Para el caso del ensayo de fatiga cíclica la probeta se hizo girar por medio de un motor, mientras se le aplicó una carga conocida. La probeta quedó sometida a una flexión alternada, que se traduce en que un punto cualquiera queda sometido a un ciclo de cargas que va de tracción a compresión. Esto produjo fisuras que se van propagando lentamente, reduciendo el área hasta un punto tal en que la probeta no resistió la carga aplicada y rompió.

Este ensayo se realizó a 60 probetas en una máquina de ensayos a fatiga fabricada por FATIGUE DINAMICS INC modelo RBF-200 HT (Figura 3.9) ubicada en el



Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

Figura N° 3.9 Máquina para Ensayos de Fatiga

Tabla N° 3.4 Especificaciones Generales Máquina de Ensayo de Fatiga

Contador de ciclos	8 dígitos en pantalla con relación 1:100
Rango de ciclos	0 – 9.999.999.900 ciclos
Velocidad de Giro	500 – 10.000rpm
Potencia Motor	½hp

Fuente: Manual del usuario de la Máquina de Ensayo de Fatiga a Flexión Rotativa RBF - 200

Esta máquina esta diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo sobre probetas cilíndricas, posee un contador de ciclos y un variador de frecuencia con el que se controla la velocidad de giro.

El momento aplicado a la probeta fue ser determinado por la siguiente ecuación:

$$M = 0.0982 \times S \times D^3 \quad \text{Ec.3.5}$$

Donde:

M = momento flector (lbf-pulg)

S = esfuerzo de flexión aplicado a la sección transversal mínima de la probeta (lbf/ pulg²)

D = diámetro de la mínima sección transversal de la probeta (pulg)

Los ensayos sometían las probetas a tensiones cíclicas en un medio inerte, comenzando con un 90% del esfuerzo de fluencia calculado en el ensayo de tracción,

y luego se repitió el procedimiento disminuyendo progresivamente la amplitud del valor máximo, para valores de 80%, 70%, 60%, 50%... hasta encontrar un valor de carga en el que la probeta sea capaz de sobrepasar 1500000 ciclos sin partir.

3.10 ESTUDIO DE METALOGRAFÍA

Para estudiar las características microestructurales de la aleación AA-6061 se efectuó un análisis metalográfico, que permitió obtener características como tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, y otras irregularidades que de una u otra forma puedan modificar las propiedades mecánicas y por ende el comportamiento del material.

Para lograr una preparación efectiva fue necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

Corte por disco abrasivo: Por medio de la cortadora metalográfica (Laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo) se usó este tipo de corte con el disco correspondiente a la dureza del material, se cortaron pequeños pedazos del material por medio de un corte suave y rápido. El equipo usado se muestra en la figura 3.10.



Figura N° 3.10 Cortadora Metalográfica

Desbaste Grueso: Con el fin de aplanar la superficie de estudio de la probeta, se hizo uso de una lijadora de banda. El papel abrasivo fue N° 320 y luego uno N° 400.



Figura N° 3.11 Desbastadora de Cinta

Desbaste Intermedio: Se realizó de forma manual, con papel de lija No. 600. Cada vez que se cambiaba de papel, debió girarse 90 grados, con respecto a la seguida con el papel de lija anterior, hasta que las rayas del desbaste anterior desaparezcan.

Pulido Fino: El último paso para obtener una superficie totalmente lisa y libre de ralladuras e imperfecciones se efectuó mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas. Se usó un paño de billar y un paño microcloth con partículas de alúmina gruesa y luego alúmina fina.



Figura N° 3.12 Banco de Pulido

Ataque Químico: Se hizo sumergiendo la cara pulida de la muestra en una solución de ácido fluorhídrico (HF) al 5%, es decir, por cada 100ml de solución, 0,5ml corresponden a Ácido Fluorico y 99,5ml de agua (tomado de Introducción a la Metalurgia Física) con el fin de revelar la microestructura del material y detectar la presencia de segregaciones; posteriormente se lavó la probeta con agua y se secó en corriente de aire.

Observación en el Microscopio: Para éste procedimiento se aplicó la observación directa de la superficie de la muestra a través de los distintos aumentos que ofrece el microscopio óptico Unión MC – 86267



Figura N° 3.13 Microscopio Óptico Union MC – 86267

Tabla N° 3.5 Especificaciones Generales para Microscopio Óptico Union MC – 86267

Modelo	MC – 86267
Rango de aumentos	15X – 1.000X

Fuente: Manual del usuario Microscopio Óptico Union MC – 86267

3.11 ESTUDIO DE FRACTOGRAFÍA

Luego de haber realizado el ensayo de fatiga, se sometió el material a un análisis fractográfico, que permitió por medio de la captura de imágenes, analizar el tipo de fractura observado para establecer una relación entre los resultados obtenidos para las diferentes condiciones del material, condición original, solubilizado, envejecido a 167°C durante 14 horas y envejecido a 177°C durante 14 horas. Para este estudio se evaluó la superficie de la fractura con un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), ubicado en el Centro de Investigaciones Médicas y Biomédicas de la Universidad de Carabobo (CIMBUC). Equipo capaz de generar un haz de electrones en una columna de vacío, que luego es focalizado y dirigido sobre un pequeño punto exacto de la superficie de una muestra patrón, los electrones con pequeño ángulo de dispersión interaccionan con los resaltes de la superficie generan una dispersión de electrones secundarios que producen una señal electrónica que da una imagen con profundidad.



Figura N° 3.14 Microscopio Electrónico de Barrido.

Tabla N° 3.6 Especificaciones Generales del Microscopio Electrónico de Barrido Marca Jeol

JSM – 5300

C
A
P
Í
T
U
L
O

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA

A través de un análisis de composición química, específicamente un estudio de espectrofotometría, llevado a cabo en la empresa ALUCASA (CVG), se corroboró que el aluminio AA-6061 adquirido en la empresa SUMINDU se encontraba dentro de los rangos establecidos por las norma COVENIN 1281-80 y la norma ASTM B221. El estudio arrojó resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 4.1. Resultados del Análisis de Composición Química

Elementos[%]	Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Zn	Al	
Comp. AA-6061	Mín	0.80	0.40	0.15	0.04	-	-	resto
	Máx	1.20	0.80	0.40	0.35	0.70	0.25	resto

Composición	0.807	0.656	0.262	0.073	0.245	0.005	97.92
Obtenida							

Fuentes: Normas ASM Internacional 10th Edición 1990/ Alucasa (CVG)

Al comprobar que la aleación utilizada cumple con los rangos establecidos dentro de las normas, se puede afirmar con veracidad que la materia prima de trabajo es la adecuada.

El compuesto formado en una aleación AA-6061 donde los principales elementos aleantes son el Magnesio (Mg) y el Silicio (Si) es el Siliciuro de Magnesio (Mg_2Si).

Cada mol de $Mg_2Si \rightarrow 1/3$ moles de átomos de Si y $2/3$ moles de átomo de Mg

Y sabiendo que el peso de un elemento está dado por:

$$W_x = N^\circ \text{ moles} \times \text{Peso Atómico} \qquad \text{Ec. 4.1}$$

Entonces:

$$W_{Si} = 0,333\text{mol} \times 28,080\text{gr/mol} = 9,362\text{gr}$$

$$W_{Mg} = 0,666\text{mol} \times 24,312\text{gr/mol} = 16,208\text{gr}$$

$$W_{\text{total}} = W_{Si} + W_{Mg} = 25,57\text{gr}$$

Calculando el porcentaje en peso de cada elemento en el compuesto:

$$\% \text{Silicio} = 36,613$$

$$\% \text{Magnesio} = 63,387$$

El precipitado de equilibrio en una aleación Al-Mg-Si es el Mg_2Si y la composición balanceada contiene Magnesio y Silicio en un mismo radio atómico para una relación de 2:1. Para este caso, esto se traduce en una relación de 1,73:1. Si se aplica la relación a la composición química de la aleación en estudio (tabla N° 4.1) para formar el compuesto Mg_2Si reaccionó la totalidad del Magnesio (0,807 % en peso) existente con un porcentaje del Silicio presente (0,656 % en peso), con lo cual se tiene que el porcentaje en peso del compuesto Mg_2Si en la aleación es 1,20.



Figura N° 4.1 Apariencia de la muestra de Aluminio AA-6061 después del ensayo de Espectrofotometría.

4.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Se calentó el material a una temperatura de solubilización de 533°C y se mantuvo esta temperatura por un tiempo de 2 horas para promover la disolución y redistribución de los elementos aleantes, en este caso Magnesio y Silicio y la transformación de fases de no equilibrio por fases mucho más estables.

Después de sacar las probetas del horno en el proceso de solubilización, éstas se sometieron a un enfriamiento rápido que se realizó en agua a 25°C.

En esta etapa se calentaron las probetas a 2 temperaturas ($T=167^{\circ}\text{C}$) y ($T=177^{\circ}\text{C}$) para un tiempo de duración en el horno de (14 horas). Después del envejecimiento artificial conservaron las probetas a una temperatura aproximada de -4°C hasta el momento de llevar a cabo los ensayos de tracción y de fatiga, para así evitar el envejecimiento natural.

Con el fin de controlar todas las variables posibles, se hizo uso de un termopar, para registrar la fluctuación de la temperatura para la cuál fue programado el horno en los procesos de solubilizado y envejecimiento artificial, y así verificar si se mantuvo la temperatura deseada durante el tiempo estipulado, previendo interrupciones por fallas eléctricas o cambios bruscos en la intensidad de la corriente. El termopar utilizado, opera con una apreciación de 1°C y es capaz de medir intervalos cada 1s.

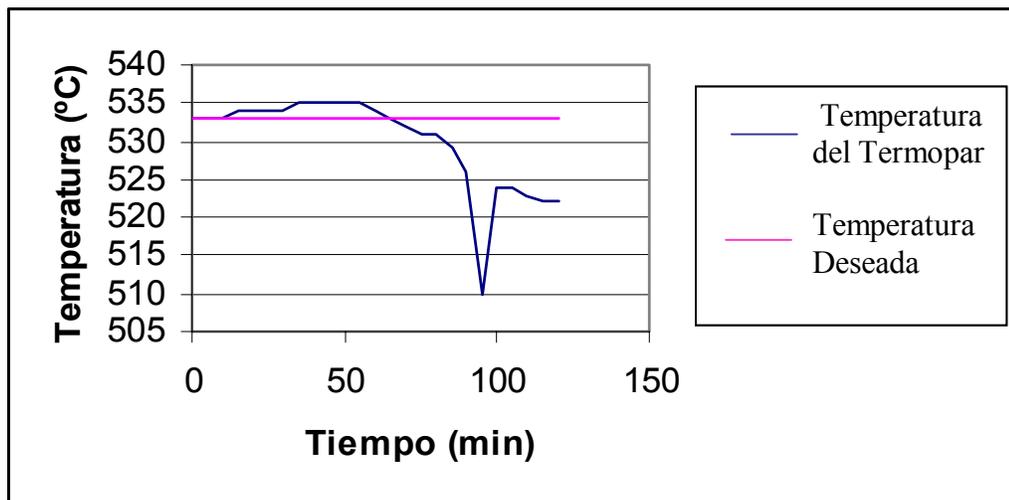


Figura N° 4.2 Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante la Solubilización

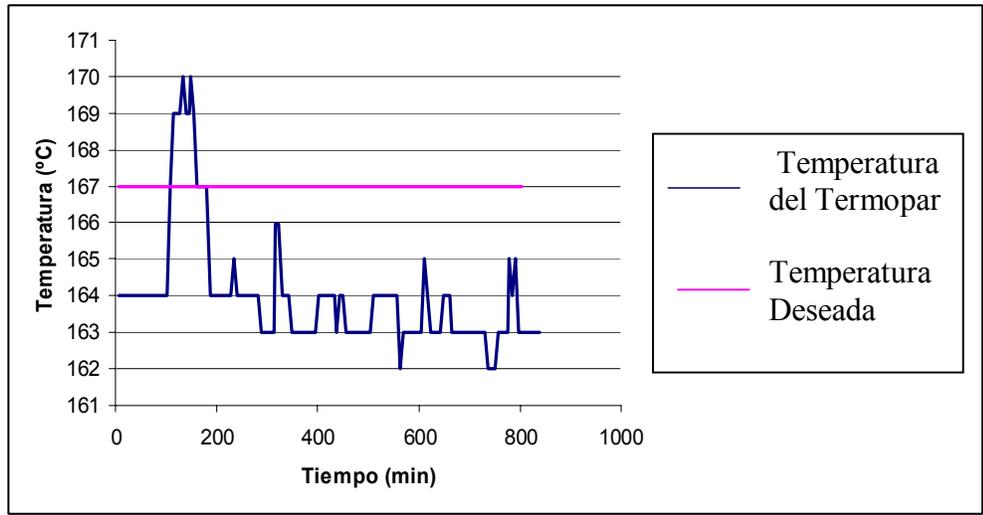


Figura N° 4.3 Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante el Envejecimiento Artificial a 167°C

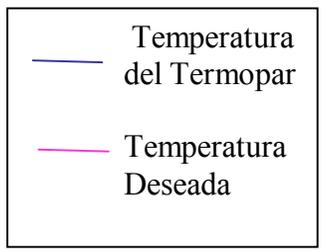
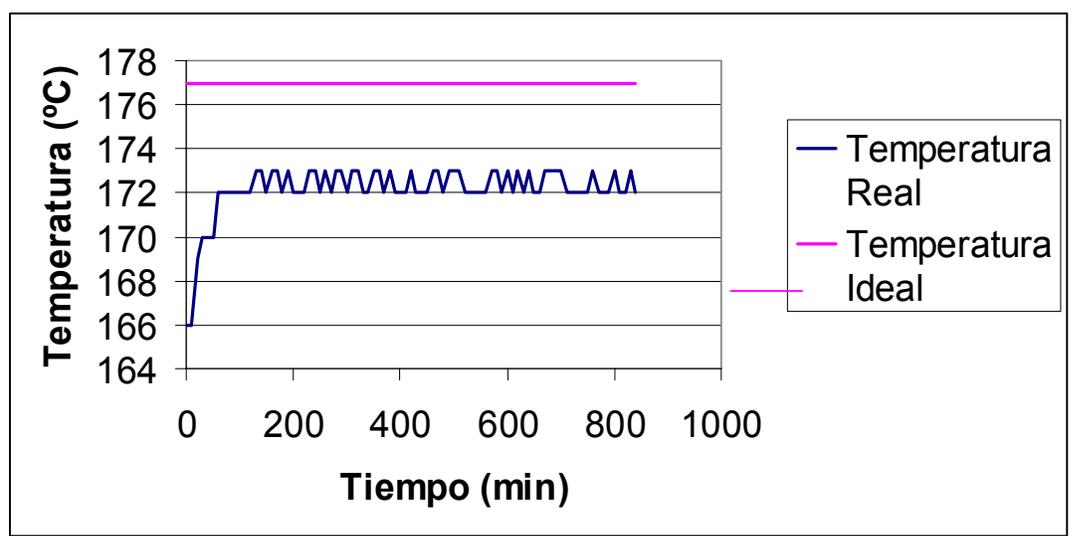


Figura N° 4.4 Gráfica de Temperatura vs Tiempo Durante el Envejecimiento Artificial a 177°C

El uso del termopar ayudo a comprobar que no se registraron fallas de corte en el sistema eléctrico del Laboratorio de Materiales. La variación en la temperatura, pudo ser ocasionada por sobrecarga de probetas en el horno, ya que estas fueron distribuidas de manera que siete (7) probetas quedaran arriba y siete (7) abajo.

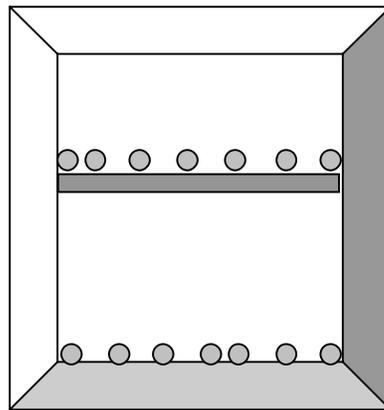


Figura N° 4.5 Distribución de las Probetas en el Horno

También pudo deberse a temperaturas no controladas en el ambiente donde se encontraban los hornos o simplemente que el termopar interno del horno media la temperatura en un sitio diferente al termopar colocado adicionalmente. Para las curvas correspondientes a 167°C y 177°C la temperatura real del horno estuvo la mayor parte del tiempo por debajo de la ideal entre 3 y 4°C, lo que hace que de igual forma se mantenga una diferencia de $10\pm 3^{\circ}\text{C}$ entre ambas condiciones. Se decidió considerar que esta diferencia no representaba una amenaza para los posteriores

ensayos, dado que al analizar las curvas de cedencia (efecto de la temperatura y tiempo de envejecimiento) para el caso de la temperatura 167°C a 14 horas de envejecimiento, presenta un valor de resistencia a la cedencia muy cercano al de la curva a 163°C (temperatura más frecuente en el termopar) para el mismo tiempo (14 horas), por lo tanto se prosiguió con la investigación. De igual manera para las probetas envejecidas a 177°C.

4.3 RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Los ensayos realizados para determinar la rugosidad superficial de las probetas destinadas para el estudio de fatiga se aplicaron a una muestra del 43,75% de la población total de probetas, escogidas al azar. Con el rugosímetro digital Mitutoyo se obtuvieron las siguientes lecturas:

Tabla N° 4.2 Mediciones de Rugosidad Superficial Para Probetas Solubilizadas.

Probeta N°	Medida 1 [μm]	Medida 2 [μm]	Medida 3 [μm]	Promedio [μm]	Desviación Estándar
1	0,45	0,48	0,50	0,48	0,0252
2	0,55	0,49	0,47	0,50	0,0416
3	0,43	0,41	0,47	0,44	0,0306
4	0,38	0,42	0,45	0,42	0,0351
Promedio General =				0,46	0,0365

Tabla N° 4.3 Mediciones de Rugosidad Superficial Para Probetas Envejecidas a 167°C

Probeta N°	Medida 1 [μm]	Medida 2 [μm]	Medida 3 [μm]	Promedio [μm]	Desviación Estándar
1	0,30	0,34	0,41	0,35	0,0557
2	0,23	0,27	0,26	0,25	0,0208
3	0,33	0,33	0,34	0,33	0,0058

4	0,32	0,33	0,29	0,31	0,0208
5	0,35	0,36	0,47	0,39	0,0666
6	0,23	0,20	0,22	0,22	0,0153
7	0,39	0,31	0,31	0,34	0,0462
8	0,32	0,31	0,31	0,31	0,0058
9	0,18	0,23	0,27	0,23	0,0451
10	0,45	0,51	0,44	0,47	0,0379
11	0,44	0,36	0,39	0,40	0,0404
12	0,30	0,32	0,42	0,35	0,0643
Promedio General =				0,33	0,0727

Tabla N° 4.4 Mediciones de Rugosidad Superficial Para Probetas Envejecidas a 177°C

Probeta N°	Medida 1 [μm]	Medida 2 [μm]	Medida 3 [μm]	Promedio [μ]	Desviación Estándar
1	0,26	0,33	0,34	0,31	0,0436
2	0,16	0,16	0,18	0,17	0,0115
3	0,27	0,25	0,25	0,26	0,0115
4	0,27	0,26	0,30	0,28	0,0208
5	0,28	0,31	0,47	0,35	0,1021
6	0,32	0,31	0,32	0,32	0,0058
7	0,20	0,19	0,18	0,19	0,0100
8	0,19	0,18	0,16	0,18	0,0153
9	0,24	0,25	0,25	0,25	0,0058
10	0,43	0,47	0,44	0,45	0,0208
11	0,30	0,28	0,32	0,30	0,0200
12	0,46	0,39	0,43	0,43	0,0351
Promedio General =				0,29	0,0900

Después del tratamiento de pulido al que fueron sometidas las probetas, los promedios obtenidos para los grupos de mediciones fueron bastante uniformes, la desviación estándar se mantuvo en valores muy bajos, pues se logró controlar la variable de rugosidad superficial hasta valores inferiores a 0,5 micras, de esta manera se consiguió disminuir la rugosidad externa en la zona de entalle de las probetas,

disminuyendo posibles muescas o concentradores de esfuerzos que en un futuro representarían el inicio de una grieta y la posterior fractura de la muestra.

4.4 DUREZA

Los ensayos de dureza fueron realizados en la escala Rockwell A, es decir, con un indentador de punta de diamante y con una carga de 60Kgf. Los valores de dureza fueron capturados para muestras de aluminio AA-6061 en condición original, después de ser solubilizado y envejecido durante 14 horas a 167°C y 177°C respectivamente.

Tabla N° 4.5 Mediciones de Dureza

Muestra N°	Condición Original (HRA)	Solubilizadas (HRA)	Envejecidas a 167°C (HRA)	Envejecidas a 177°C (HRA)
1	36,10	34,50	39,70	39,80
2	36,40	36,30	38,90	39,00
3	36,60	35,10	42,50	40,20
4	36,70	35,30	42,20	41,10
5	36,70	36,30	38,30	40,50
6	36,20	35,40	39,10	40,60
Promedio =	36,45	35,48	40,11	40,20
Desv. Est.=	0,2588	0,7054	1,7893	0,7293

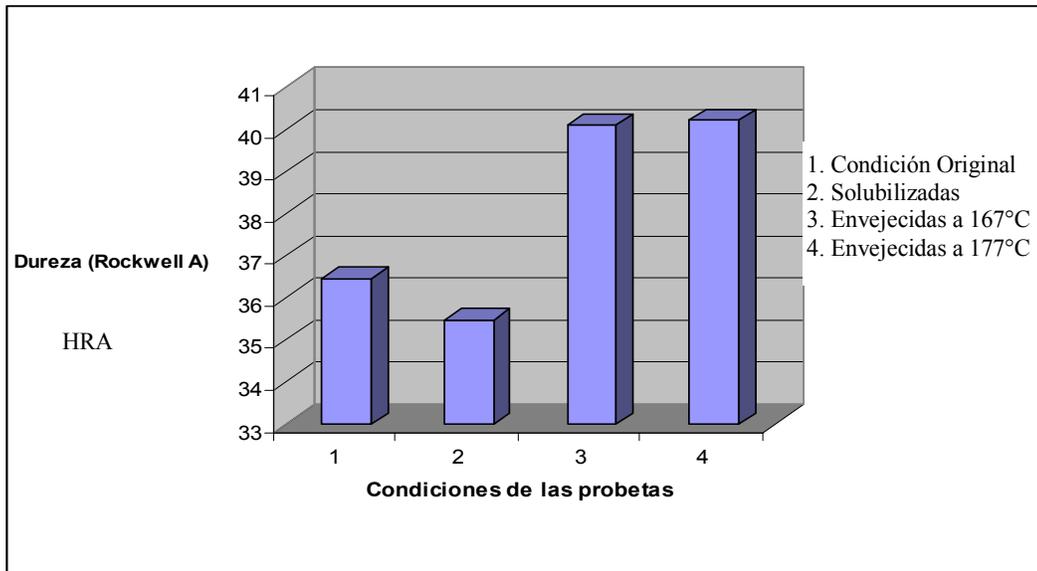


Figura N° 4.6 Gráfico del Promedio de los Valores de Dureza Para las Probetas en Cada Condición.

Los valores obtenidos demuestran que al someter las probetas en C.O.al proceso de solubilización se reduce la dureza en un 2.6% aproximadamente, el proceso de solubilizado a una temperatura de 533°C durante 2 horas con un posterior tratamiento de envejecimiento artificial se considera suficiente para obtener un endurecimiento por precipitación óptimo; después del T6 las probetas aumentaron su dureza aproximadamente en un 9,2% con respecto a la condición original. El tiempo y la temperatura del tratamiento juegan un papel fundamental en los valores de dureza, dado que la evolución de precipitación que tiene lugar durante el envejecimiento artificial radica en la secuencia de los cambios microestructurales de la aleación.

4.5 METALOGRAFÍA

Con el fin de apreciar la evolución microestructural de la aleación AA-6061 cuando es sometido a tratamiento térmico T6 se realizó el estudio de metalografía, en el que por medio de la observación directa de las imágenes capturadas con un

microscopio óptico a distintos aumentos se pudo establecer las diferencias entre las distintas matrices de la aleación (condición original, solubilizada, envejecida a 167°C durante 14 horas y envejecida a 177°C durante 14 horas).

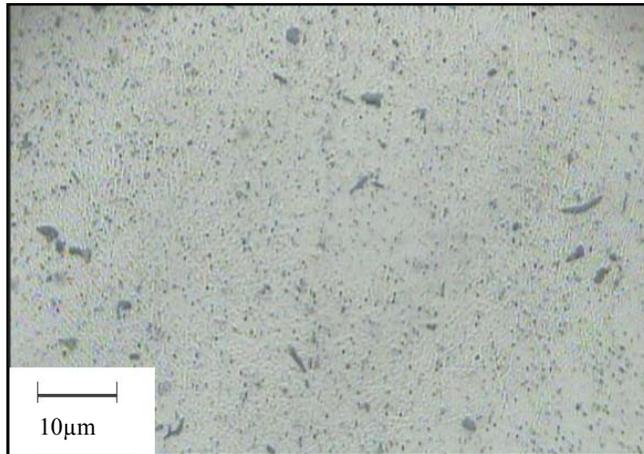


Figura N° 4.7 *Microestructura del AA-6061 en Condición Original a un Aumento de 1000X*

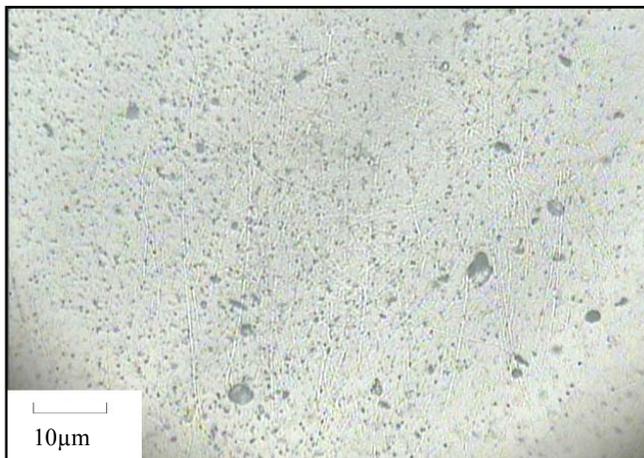


Figura N° 4.8 *Microestructura del Aluminio AA-6061 Solubilizado a un Aumento de 1000X*

Al observar la muestra solubilizada se denota la aparición de pequeñas partículas de color oscuro que indican la presencia de clusters de Silicio y Siliciuro de Magnesio (Mg_2Si), que se observan reordenadas y de un tamaño dos veces mayor para el caso de la muestra en C.O., luego del solubilizado se disuelven los

precipitados y se reduce cualquier segregación microquímica en la aleación original, la geometría de las manchas se mantiene constante en ambas condiciones. Las trazas que presentan una tonalidad un poco más clara corresponden a Siliciuro de Hierro (FeSi). Con el solubilizado se persigue borrar el “efecto memoria” del material, que es la capacidad que tiene para poder desarrollar microestructuras, que después de ser deformadas pueden volver a su forma original luego de ser calentadas.

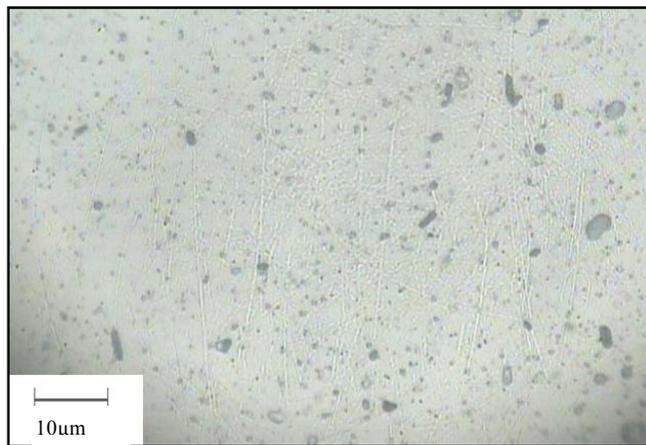


Figura N° 4.9 Microestructura del Aluminio AA-6061 Envejecido a 167°C a un Aumento de 1000X

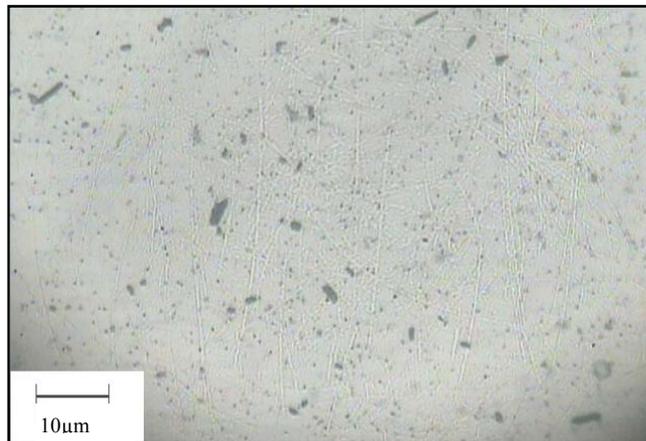


Figura N° 4.10 Microestructura del Aluminio AA-6061 Envejecido a 177°C a un Aumento de 1000X

De igual forma al comparar las muestras de aluminio envejecidas a 167°C y a 177°C, lucen bastante similares a pesar de que las imágenes están capturadas con un aumento de 1000X. Las temperaturas de envejecimiento se encuentran por debajo de la línea de solvus. El tiempo de envejecimiento fue de 14 horas, intervalo suficiente para equilibrar la saturación de los precipitados presentes luego del proceso de solubilizado y temple, por esta razón se aprecian de manera más ordenada los precipitados de color oscuro. Para las muestras a 177°C y 167°C se apreció prácticamente la misma cantidad de precipitados en forma de partículas ultrafinas y en fases uniformemente dispersas, esto incrementa la resistencia de la aleación para la muestra de 177°C se observó una reorganización más uniforme de los precipitados que para la condición de 167°C y que para la solubilizada.

4.6 ENSAYO DE TRACCIÓN

Después de haber sometido las probetas de aluminio AA-6061 a un proceso de solubilizado, temple y tratamiento térmico de envejecimiento artificial a temperaturas de 167°C y 177°C durante 14 horas, se realizaron los ensayos de tracción en la Máquina Universal de Ensayos a Tracción CMT-20 Galdabini, donde se obtuvieron directamente las gráficas Carga vs Alargamiento y aplicando las ecuaciones 3.2 y 3.3 fue posible construir las gráficas Esfuerzo vs Deformación.

Para efectos demostrativos se calcularon los valores de deformación ingenieril y esfuerzo ingenieril con la carga máxima alcanzada en cada ensayo, en vista de que cada curva arrojaba un aproximado de 8000 puntos, se hizo uso de Microsoft Excel para calcular y graficar directamente los puntos obtenidos.

El esfuerzo de fluencia para cada una de las condiciones se obtuvo haciendo uso del método del “offset”, donde se trazó una línea recta paralela a la curva en el

momento de su estabilización (etapa elástica) y se adiciona en el eje de las ordenadas un valor estándar de 0,002, en el punto de intercepción de la recta paralela con la curva de esfuerzo-deformación, de esta manera se lee el valor del esfuerzo de fluencia. Se demuestra un ejemplo en la siguiente figura:

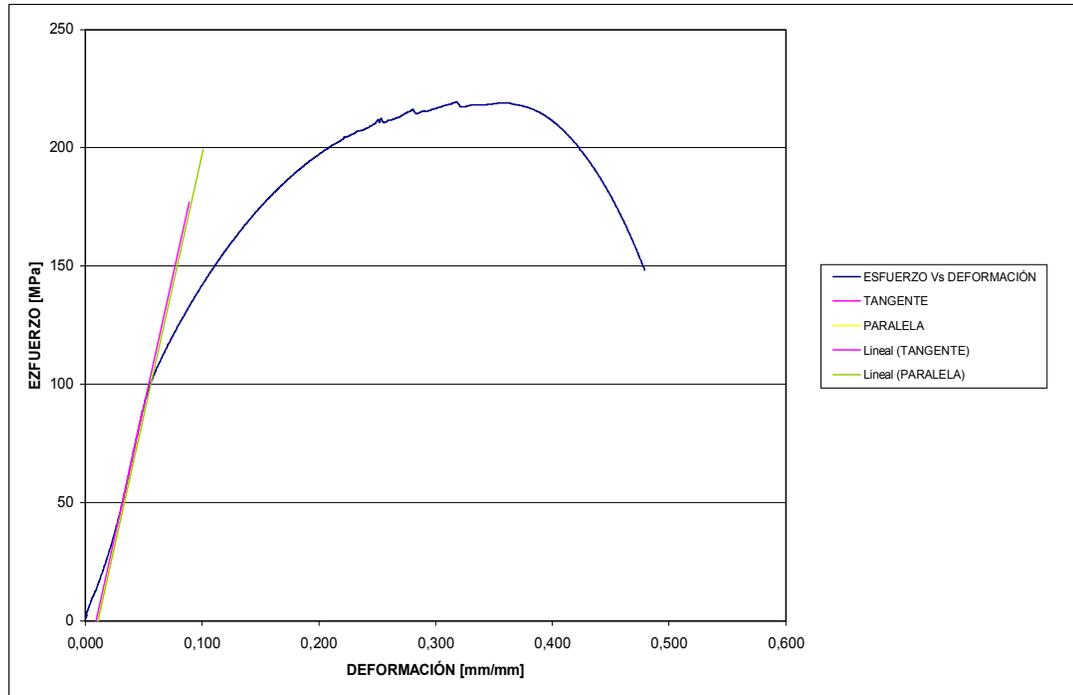


Figura N° 4.11 Obtención del Esfuerzo de Fluencia mediante el Método Offset

Tabla N° 4.6 Datos Obtenidos del Ensayo de Tracción para Probetas en Condición Original

Probeta N°	Carga Max [N]	Deformación [mm/mm]	Esfuerzo Max. [MPa]
1	10.609	0,1151	345,90
2	10.598	0,1181	345,54
Promedio:	10.604	0,1166	345,72
Desv.Est:	7,7781	0,0021	0,2545

Tabla N° 4.7 Datos Obtenidos del Ensayo de Tracción para Probetas en Solubilizadas.

Probeta N°	Carga Max [N]	Deformación [mm/mm]	Esfuerzo Max [MPa]
1	6.732	0,363636	219,49
2	5.792	0,372727	188,84
3	7.091	0,319696	231,20
4	6.575	0,315151	214,37
Promedio:	6.547,5	0,342802	213,47
Desv. Est:	548,02	0,029597	17,87

Tabla N° 4.8 Datos Obtenidos del Ensayo de Tracción para Probetas Envejecidas a 167°C

Probeta N°	Carga Max [N]	Deformación [mm/mm]	Esfuerzo Max [MPa]
1	9.083	0,131818	296,15
2	9.855	0,204545	321,32
3	10.122	0,171212	330,02
4	9.339	0,180303	304,49
5	9.537	0,175757	310,95
Promedio:	9.587,2	0,172727	312,586
Desv. Est:	411,1170	0,026243	13,4032

Tabla N° 4.9 Datos Obtenidos del Ensayo de Tracción para Probetas Envejecidas a 177°C

Probeta N°	Carga Max [N]	Deformación [mm/mm]	Esfuerzo Max [MPa]
1	10.170	0,133333	331,59
2	10.211	0,154545	332,93
3	10.020	0,127272	326,70
4	10.503	0,142424	342,45
5	10.376	0,142424	338,31
Promedio:	10.256	0,139999	334,396
Desv. Est:	187,4339	0,010365	6,112232

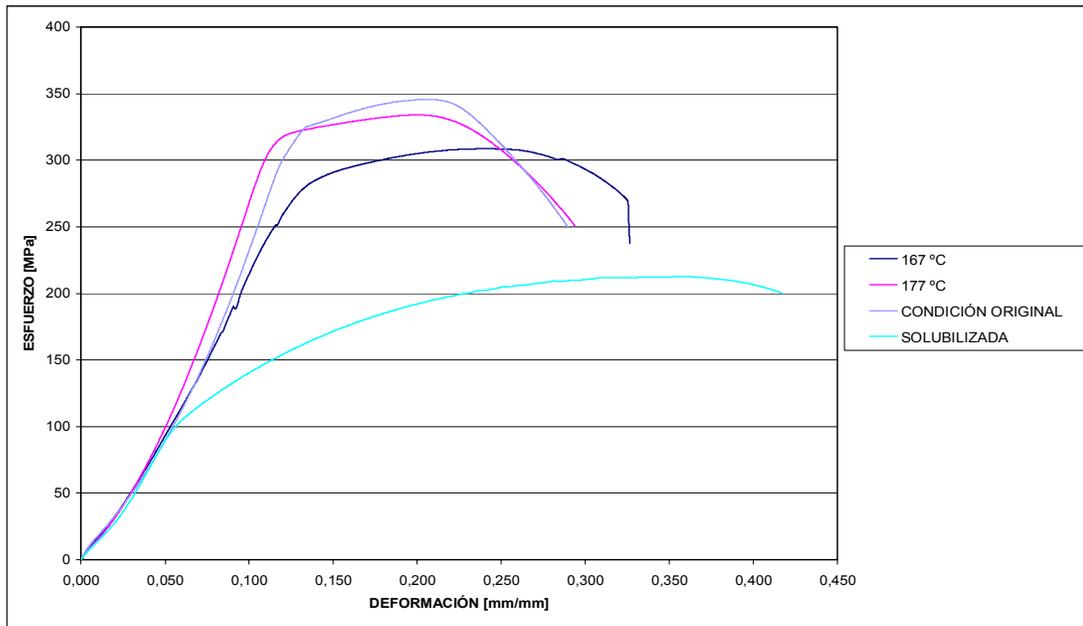


Figura N° 4.12 Gráfica Esfuerzo vs Deformación para el Promedio de las Probetas en Condición Original, Solubilizadas, Envejecidas a 167°C y Envejecidas a 177°C

Para cada condición se promedió los valores obtenidos de manera tal que se obtuvieron los esfuerzos de fluencia del material por el método de “Offset”. Y por medio del método de la escalera se calcularon los porcentajes correspondientes al 90, 80, 70, 60, 50, 40 por ciento del valor máximo.

Tabla N° 4.10 Esfuerzos de Fluencia para Probetas Solubilizadas

Probeta N°	Esfuerzo de Fluencia [MPa]
1	136,98
2	125,89
3	143,61
4	130,72
Promedio	134,96
Desviación Estándar	7,69

Tabla N° 4.11 Porcentajes del Esfuerzo de Fluencia para el Ensayo de Fatiga a Probetas Solubilizadas

Porcentaje	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Esfuerzo [MPa]	134,96	125,84	116,82	107,32	96,70	87,36	76,45	67,43

Tabla N° 4.12 Esfuerzos de fluencia para probetas Envejecidas a 167°C durante 14 Horas

Probeta N°	Esfuerzo de Fluencia [MPa]
1	277,39
2	280,54
3	282,08
4	288,13
5	283,82
Promedio	283,20
Desviación Estándar	3,98

Tabla N° 4.13 Porcentajes del Esfuerzo de Fluencia para el Ensayo de Fatiga a Probetas Envejecidas a 167°C Durante 14 Horas

Porcentaje	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Esfuerzo [MPa]	283,20	254,60	226,31	198,02	169,73	141,44	113,15	84,86

Tabla N° 4.14 Esfuerzos de Fluencia para Probetas Envejecidas a 177°C Durante 14 Horas

Probeta N°	Esfuerzo de Fluencia [MPa]
1	302,92
2	320,08
3	314,31
4	325,72
5	310,12
Promedio	315,30
Desviación Estándar	8,80

Tabla N° 4.15 Porcentajes del Esfuerzo de Fluencia para el Ensayo de Fatiga a Probetas Envejecidas a 177°C Durante 14 Horas

Porcentaje	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
Esfuerzo [MPa]	315,30	284,40	252,50	221,20	189,60	158,00	126,40	94,30

Los resultados obtenidos se encontraron aceptables respecto a los valores de esfuerzo de fluencia para el AA-6061 sometido a T6 publicados en ASM Internacional 10th Ed. 1990, en donde se da un valor mínimo de 235MPa para un T6 a 150°C. El esfuerzo de fluencia dio valores relativamente cercanos para las probetas en condición original y las envejecidas artificialmente, para la condición de solubilizado disminuyó considerablemente, en un 53% con respecto a la condición T6-167°C-14h y un 58% con respecto a la condición T6-177°C-14h. La diferencia entre las temperaturas del envejecimiento artificial es de sólo 10°C, pero esto fue suficiente para aumentar el esfuerzo de fluencia en un 11% para el caso de la temperatura más elevada [177°C].

El tratamiento térmico de envejecimiento artificial contribuyó al aumento del esfuerzo de fluencia del material luego de que las probetas fueran solubilizadas, y por consiguiente aumenta la zona de deformación elástica. Los esfuerzos en [MPa] fueron llevados a [Lbf-pulg] y se redondearon usando cifras significativas ya que la máquina para ensayos de fatiga tiene una apreciación de 1 [Lbf-pulg].

4.7 ENSAYO DE FATIGA

Los ensayos de fatiga cíclica fueron realizados en un medio inerte, y a partir de este se obtuvo el número de ciclos antes de o generarse la ruptura mediante la

aplicación de esfuerzos, obtenidos previamente por medio del ensayo de tracción y el método de la escalera. En los niveles de carga iniciales, cuando las probetas se ven sometidas a esfuerzos bajos, el tiempo requerido es bastante prolongado.

Como se trabajó con dos temperaturas distintas en el tratamiento térmico, se distribuyeron las probetas para cada condición, y el ensayo de fatiga para las probetas solubilizadas se hizo simultáneamente con otros equipos que desarrollaron la misma investigación bajo otras condiciones de envejecimiento artificial, cabe destacar que la curva del comportamiento de las probetas solubilizadas fue utilizada como patrón de comparación con las curvas obtenidas para las probetas de 167°C y 177°C. Es de saber, por estudios anteriores, que a medida que el esfuerzo aplicado disminuye, la dispersión de los resultados aumenta. Con los resultados obtenidos se construyó la curva Esfuerzo vs Número de Ciclos antes de ruptura, también llamada curva de Wöhler.

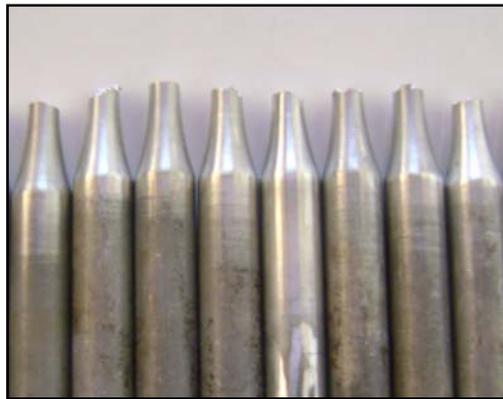


Figura N° 4.13 Probetas Después de Ensayos de Fatiga

Utilizando los criterios del modelo matemático de Basquin, se logró linealizar las curvas de Wöhler, para obtener la recta de las curvas de tendencia.

$$S = A \times N^* \quad \text{donde} \quad * = k \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$\text{LogS} = \text{LogA} + k \text{Logn} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\text{LogS} = Y \quad ; \quad \text{LogA} = b \quad ; \quad \text{LogN} = X;$$

$$k = m$$

$$Y = mX + b \quad \text{Ec. 4.4}$$

Se sustituyen los valores según sea la curva linealizada que se quiera estudiar.

4.7.1 ENSAYOS PARA PROBETAS SOLUBILIZADAS

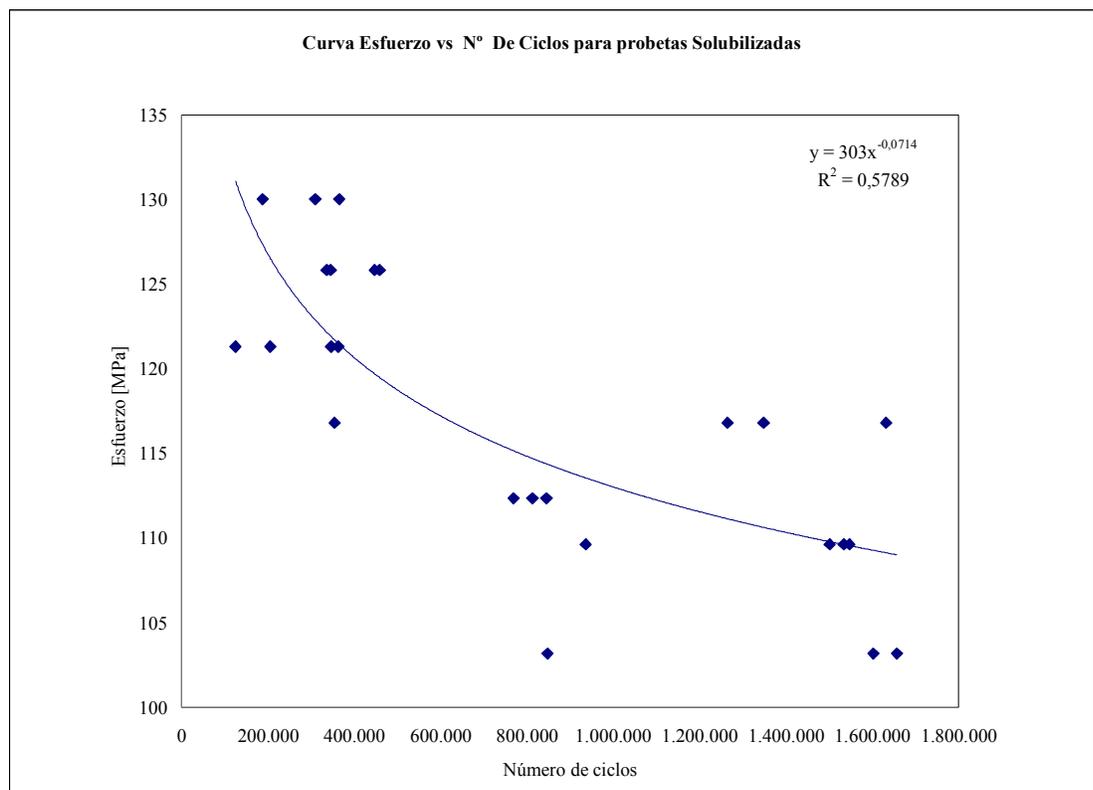


Figura N° 4.14 Curva Esfuerzo vs N° De Ciclos para probetas Solubilizadas

Tabla N° 4.16 Valores Obtenidos de los Ensayos de Fatiga para Probetas Solubilizadas

PROBETA	%	Sy [MPa]	M [Lbf-pulg]	CICLOS
1	95	130,02	28,41	187.700
2		130,02	28,41	310.200
3		130,02	28,41	365.300
4	90	125,84	27,72	345.700
5		125,84	27,72	458700
6		125,84	27,72	447.500
7		125,84	27,72	336.600
8	85	121,32	26,72	363.200
9		121,32	26,72	347.000
10		121,32	26,72	206.000
11		121,32	26,72	125.200
12	80	116,82	25,73	355.000
13		116,82	25,73	1.348.600
14		116,82	25,73	1.264.300
15		116,82	25,73	1.632.100
16	75	112,36	24,75	812.900
17		112,36	24,75	845.400
18		112,36	24,75	769.300
19	70	109,65	24,15	1.534.200
20		109,65	24,15	1.546.700
21		109,65	24,15	936.200
22		109,65	24,15	1.501.500
23	65	103,20	22,73	1.602.300
24		103,20	22,73	847.800
25		103,20	22,73	1.657.100

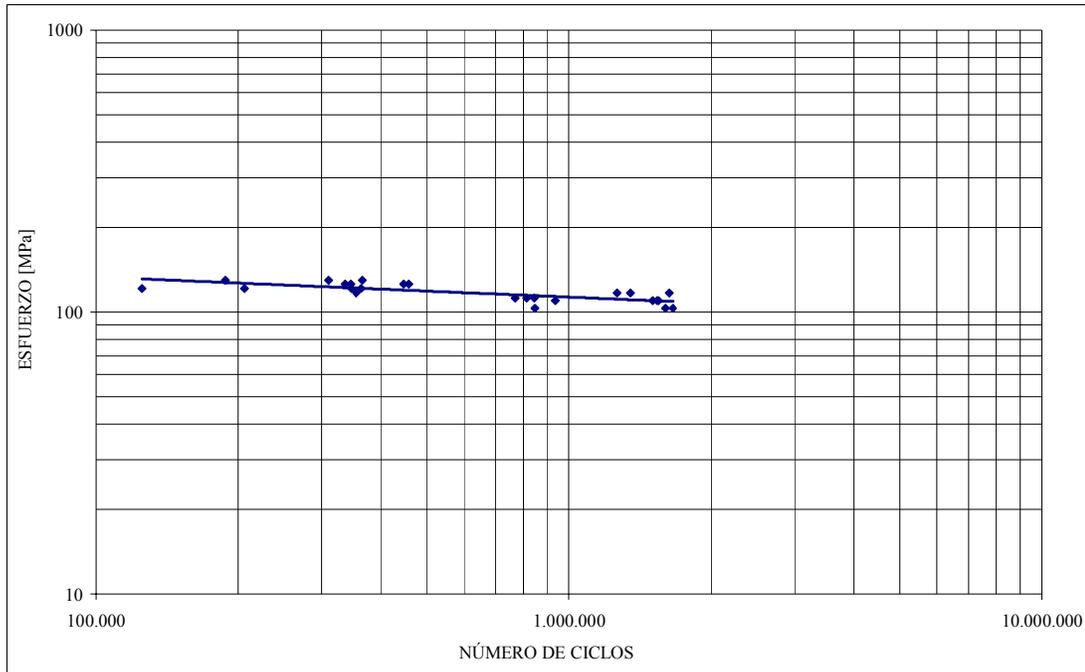


Figura N° 4.15 Linealización de la Curva Esfuerzo vs N° De Ciclos para Probetas Envejecidas a 167°C Durante un Tiempo de 14 Horas

Tabla N° 4.17 Promedio de Ciclos Obtenidos para los Esfuerzos Aplicados a las Probetas Solubilizadas

Nivel de Esfuerzo (%)	Esfuerzo [MPa]	Promedio de ciclos	Desviación Estándar
95	130,02	287.733	90.906,56
90	125,84	392.050	64.902,30
85	121,32	260.350	114.463,66
80	116,82	1.083.800	669.466,98
75	112,36	840.950	363.838,28
70	109,65	1.218.850	340.175,78
65	103,20	1.369.066	452.260,94

No fueron realizados en este trabajo de grado ensayos de fatiga a probetas en condición original (sin tratamiento térmico), por lo tanto para hacer las comparaciones futuras se tomó como referencia los resultados obtenidos del trabajo de grado titulado: “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA ALEACIÓN AA-6061 BAJO UN MEDIO ACUOSO CON NaCl AL 3%”, desarrollado en el Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

4.7.2 ENSAYOS PARA PROBETAS ENVEJECIDAS A 167°C DURANTE 14 HORAS

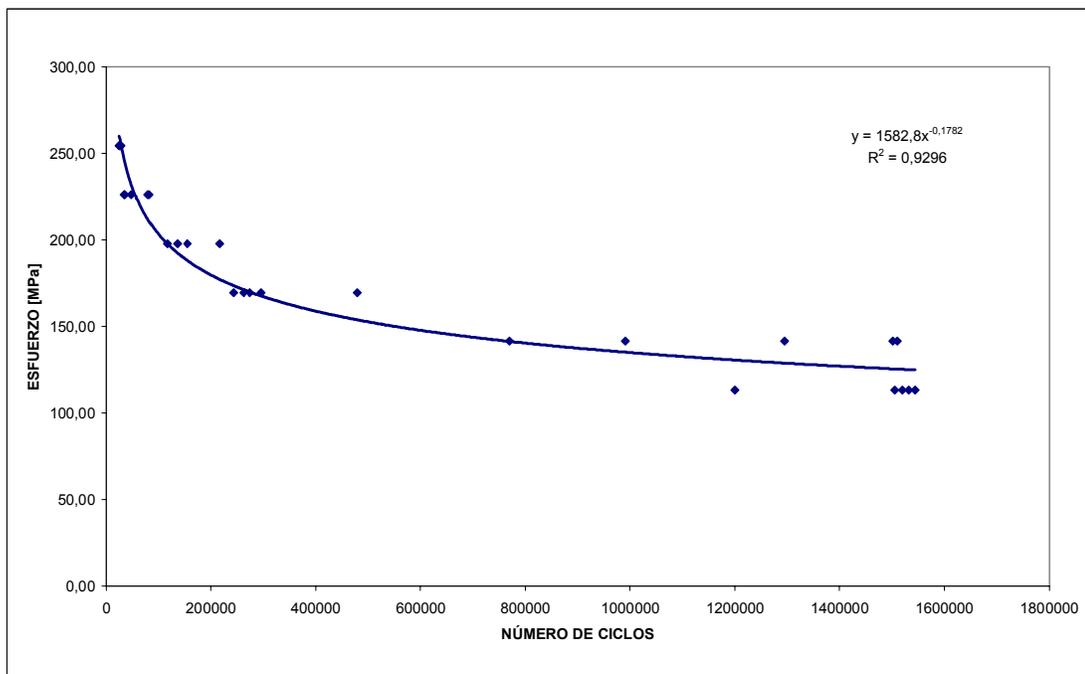


Figura N° 4.16 Curva Esfuerzo vs N° De Ciclos para Probetas Envejecidas a 167°C - 14 Horas

Tabla N° 4.18 Valores Obtenidos del Ensayo de Fatiga. T6 a 167°C Durante 14 Horas.

N° PROBETA	%	Sy [MPa]	M [Lbf- pulg]	CICLOS
1	90	254,60	56	25.400
2		254,60	56	28.300
3		254,60	56	25.200
4		254,60	56	27.400
5	80	226,31	50	34.900
6		226,31	50	35.500
7		226,31	50	79.000
8		226,31	50	81.900
9	70	198,02	44	48.500
10		198,02	44	136.000
11		198,02	44	216.700
12		198,02	44	155.500
13		198,02	44	117.500
14	60	169,73	37	262.200
15		169,73	37	296.300
16		169,73	37	243.000
17		169,73	37	274.600
18		169,73	37	479.200
19	50	141,44	31	1.501.200
20		141,44	31	1.295.000
21		141,44	31	1.510.200
22		141,44	31	991.000
23		141,44	31	770.000
24	40	113,15	31	1.505.100
25		113,15	25	1.531.500
26		113,15	25	1.199.800
27		113,15	25	1.544.100
28		113,15	25	1.520.000

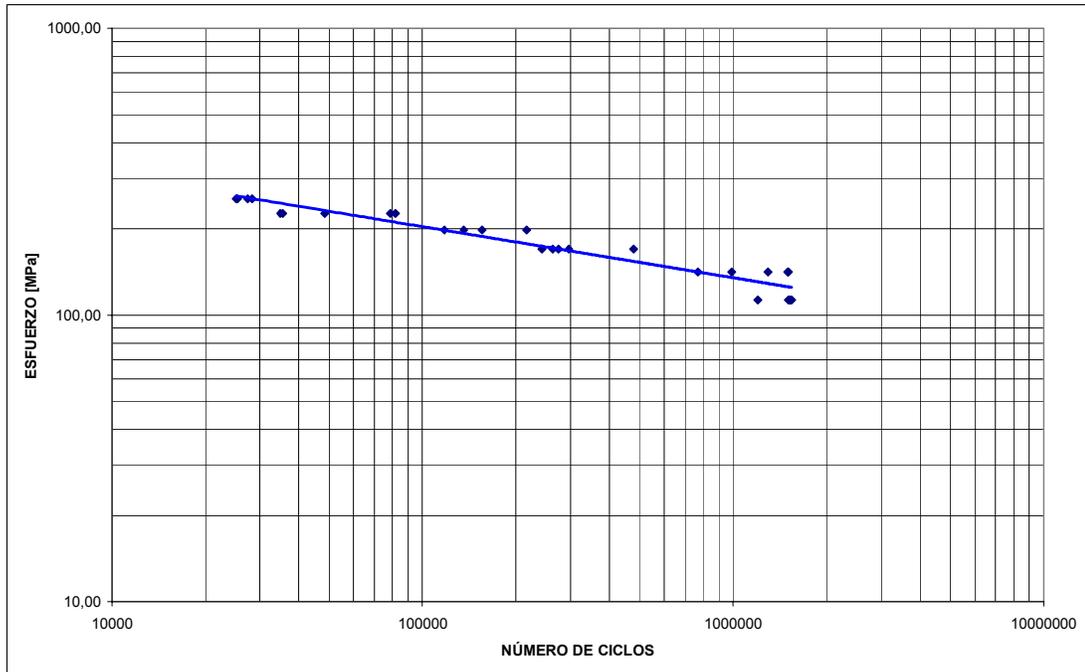


Figura N° 4.17 Linealización de la Curva Esfuerzo vs N° De Ciclos para Probetas Envejecidas a 167°C Durante 14 horas

Tabla N° 4.19 Promedio de Ciclos Obtenidos para los Esfuerzos Aplicados a las Probetas Envejecidas Artificialmente a 167°C Durante 14 Horas

Nivel de Esfuerzo %	Esfuerzo [MPa]	Promedio de ciclos	Desviación Estándar
90	254,60	26.575	1.519,59
80	226,30	57.825	26.153,05
70	198,02	134.840	61.001,04
60	169,73	311.060	95.965,76
50	141,44	1.262.083	314.487,34
40	113,15	1.448.850	166.324,79

4.7.3 ENSAYOS PARA PROBETAS ENVEJECIDAS A 177°C DURANTE 14 HORAS

Tabla N° 4.20 Valores Obtenidos del Ensayo de Fatiga. T6 a 177°C Durante 14 Horas.

N° PROBETA	%	Sy [MPa]	M [Lbf- pulg]	CICLOS
1	90	284,40	63	9.800
2		284,40	63	18.300
3		284,40	63	11.400
4		284,40	63	43.300
5	80	252,50	56	29.500
6		252,50	56	28.100
7		252,50	56	52.800
8		252,50	56	25.900
9	70	221,20	49	72.700
10		221,20	49	60.500
11		221,20	49	86.500
12		221,20	49	76.700
13		221,20	49	89.400
14	60	189,60	42	249.400
15		189,60	42	180.500
16		189,60	42	164.800
17		189,60	42	457.100
18		189,60	42	316.800
19	50	158,00	35	1.546.400
20		158,00	35	797.500
21		158,00	35	965.500
22		158,00	35	1.389.700
23		158,00	35	1.519.900
24		158,00	35	1.572.900
25	40	126,40	28	1.500.500
26		126,40	28	1.509.000
27		126,40	28	1.496.500
28		126,40	28	1.573.400
29		126,40	28	1.519.800

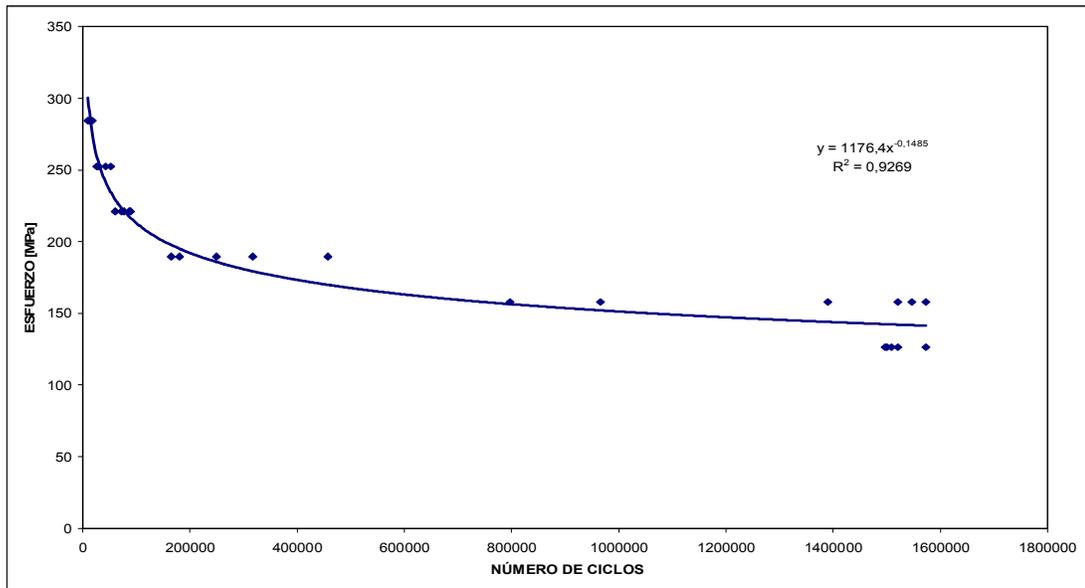


Figura N° 4.18 Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos para Probetas Envejecidas a 177°C Durante un Tiempo de 14 Horas

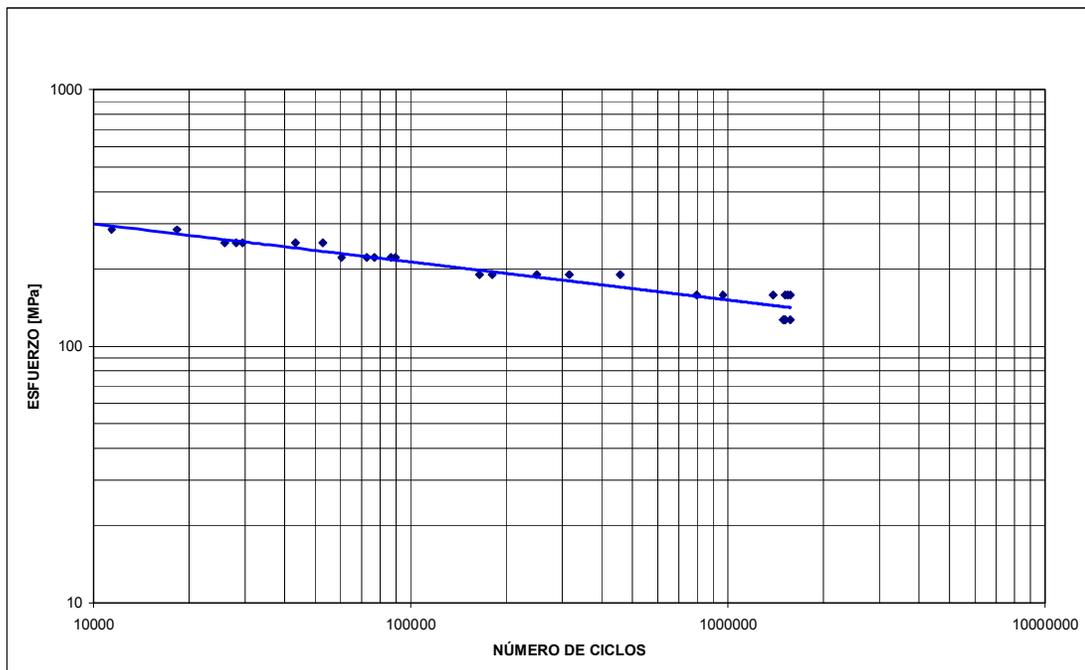


Figura N° 4.19 Linealización de la Curva Esfuerzo vs N°. De Ciclos para Probetas Envejecidas a 177°C Durante un Tiempo de 14 Horas

Tabla 4.21 Promedio de Ciclos Obtenidos para los Esfuerzos Aplicados a las Probetas Envejecidas Artificialmente a 177°C Durante 14 Horas

Nivel de Esfuerzo %	Esfuerzo [MPa]	Promedio de ciclos	Desviación Estándar
90	284,40	20.700	15.511,50
80	252,50	34.075	12.570,96
70	221,20	77.160	11.561,92
60	189,60	273.720	118.984,35
50	158,00	1.298.650	333.459,15
40	126,40	1.519.840	31.244,88

Finalmente, al comparar la Curva de Fatiga obtenida para cada una de las cuatro condiciones, se tiene que:

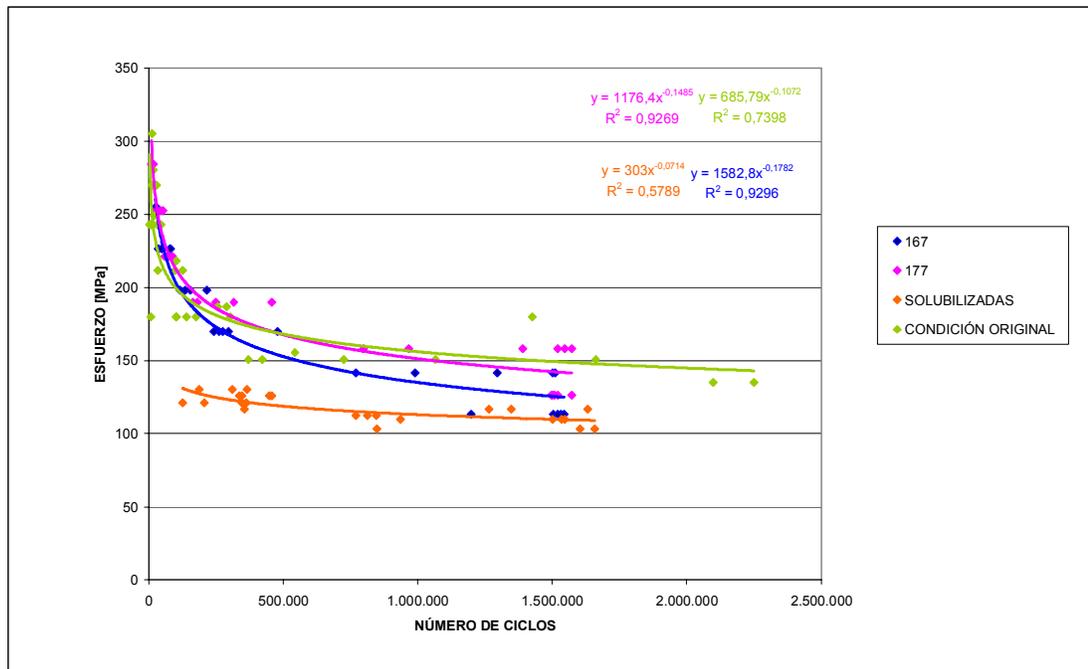


Figura N° 4.20 Comparación de la Curva Esfuerzo vs N° de Ciclos para Probetas en Condición Original, Solubilizadas, y Envejecidas a 167°C y a 177°C Durante 14 horas.

Analizando la figura 4.20 es notable que para el caso de tratamiento térmico de envejecimiento artificial a 177°C, la aleación AA-6061 ofrece mayor resistencia a la fatiga, en comparación a la condición de 167°C y a la de solubilizado, esto puede afirmarse dado que para un mismo número de ciclos (antes de generarse la ruptura) la aleación sometida a T6 177°C-14h soporta un esfuerzo mayor. Pero la tendencia de esta curva es bastante semejante a la de Condición Original obtenida de un estudio anterior. Para altas cargas la aleación envejecida a 177°C ofrecía mayor resistencia a la fatiga que la C.O., pero al bajar el esfuerzo aplicado, esta tendencia se invierte, y queda por encima la aleación sin tratamiento, ya que para un mismo esfuerzo esta soporta mayor número de ciclos que las otras muestras.

La diferencia de valores entre las curvas a medida que el número de ciclos aumenta permanece con una tendencia estable. Las muestras que ofrecieron la máxima resistencia para los ensayos de fatiga cíclica presentan valores de dureza bastante distanciados entre sí.

De la figura 4.20 se comparan los valores de esfuerzo de cada una de las condiciones para el mismo número de ciclos y dan origen a la tabla 4.22.

Tabla 4.22 Comparación de los Valores de Esfuerzo Para un Número de Ciclos Constantes

Condición	Número de Ciclos						
	200.000	400.000	600.000	800.000	1.000.000	1.200.000	1.400.000
Condición Original	173,80	171,30	164,80	162,40	159,20	151,40	148,90
Solubilizadas	125,30	120,00	118,20	113,90	111,80	110,70	110,30
Envejecidas 167°C	179,80	159,50	148,70	140,20	136,30	131,20	120,90
Envejecidas 177°C	193,40	172,30	162,80	157,90	151,50	149,30	142,30

Reflejando estas tendencias en un gráfico se obtiene la figura 4.21:

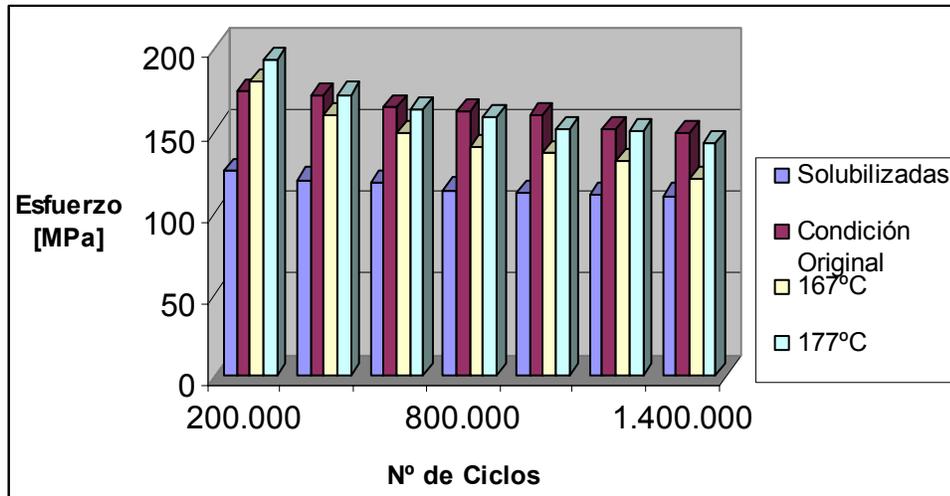


Figura N° 4.21 Comparación de los Valores de Esfuerzo Para un Mismo Número de Ciclos de las Condiciones Estudiadas

Tabla 4.23 Diferencia Porcentual de Esfuerzo Máximo Antes de Ruptura a un Determinado Número de Ciclos

Ciclos	Diferencia % 167°C y Solubilizadas	Diferencia % 177°C y Solubilizadas	Diferencia % 177°C y Envejecidas a 167°C	Diferencia % C.O. y 177°C
200.000	30,4	35,2	7,1	10,2
400.000	24,7	30,4	7,5	0,6
600.000	20,7	27,4	8,7	1,2
800.000	18,8	26,5	11,3	2,8
1.000.000	16,3	26,3	11,1	5,0
1.200.000	15,7	25,9	13,7	3,4
1.400.000	8,8	13,5	13,7	4,6

Observando las curvas para cada condición en particular, cuando son aplicados altos esfuerzos en las probetas para el ensayo de fatiga cíclica, el intervalo de

dispersión para el número de ciclos en que ocurre la fractura de la muestra es menor que cuando son aplicados niveles bajos de esfuerzos.

Las máximas diferencias porcentuales en cuanto al esfuerzo de ruptura a un determinado número de ciclos, se registraron para las probetas solubilizadas en comparación con 177°C y las mínimas se registraron para la condición original y 177°C, a pesar de que la segunda ofrece un valor mayor de dureza y un esfuerzo de fluencia mayor, para altas cargas las aleaciones tratadas térmicamente con envejecimiento artificial ofrecían mayor resistencia a la fatiga que la condición original, pero esa tendencia se invirtió al ir disminuyendo los esfuerzos, postulándose la C.O. como la más resistente a la fatiga; las solubilizadas siempre estuvieron muy por debajo de las otras tres condiciones.

4.8 ESTUDIO DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA (FRACTOGRAFÍA)

Luego de haber obtenido todos los resultados de los ensayos realizados a fatiga cíclica, se sometió a los material con diferentes condiciones de trabajo a un análisis fractográfico, que permitió por medio de la captura de imágenes con un Microscopio Electrónico De Barrido (MEB) estudiar la superficie de la fractura, para determinar la influencia que tuvieron los diferentes ensayos sobre las probetas y poder establecer las posibles causas por las cuales falló el material, analizar donde ocurre el inicio y la propagación de la grieta y establecer qué relación existe entre los resultados.

Para tener una apreciación mas acertada acerca del tipo de fractura, se realizó también un estudio de las fotos macroscópicas con la ayuda de una cámara digital. Con la observación directa se pudo cuantificar las zonas brillantes y opacas como se

muestra en la figura 4.22, luego de esto se realizará un estudio microscópico para definir la presencia de los dimples y los clivajes en las zonas brillantes u opacas.

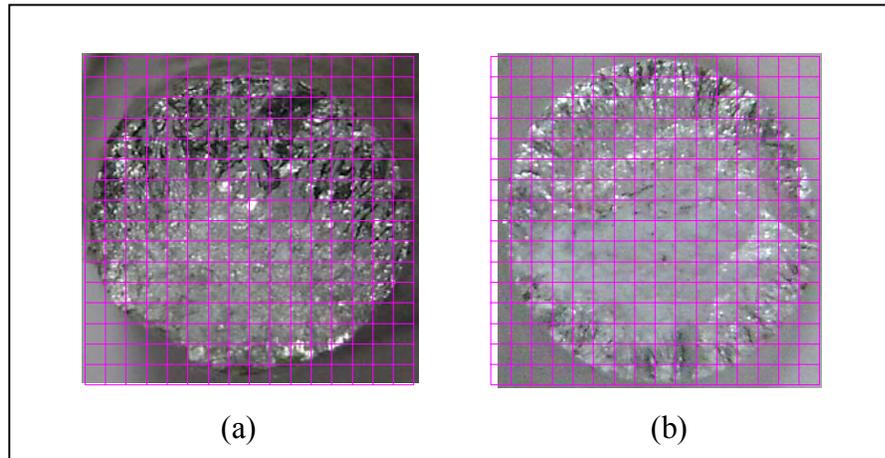


Figura N° 4.22 Vistas macros de fractura de probetas envejecidas artificialmente a 177°C durante 14 horas sometidas: (a) un esfuerzo de baja carga (b) esfuerzo a altas cargas. Escala 1:6

Se puede observar en la figura 4.22 (a) que existe 80% de zonas opacas (cuantificando las zonas cuadrículadas) y al ser analizadas microscópicamente se pudo apreciar la presencia de dimples, por otra parte para la figura 4.22 (b) representa la superficie de fractura sometida a cargas elevadas, se observan zonas brillantes alrededor de un 78% y al ser analizadas microscópicamente se aprecia la presencia de clivajes a lo largo de toda la muestra.

En la figura 4.23 se analizó la superficie de fractura para una muestra envejecida artificialmente a 177°C sometida a bajo esfuerzo, allí se observa la existencia de dimples y clivajes, y se confirmó claramente que la mayor parte de la muestra viene dada por una zona opaca que representa el 89% de la superficie. Se observó en la figura 4.23 (c) esta faceta representada por los dimples, presentes comunemente para fracturas tipo dúctiles cuando se realizan ensayos con cargas bajas. En el detalle (b)

de la figura 4.22 se observan ciertas formaciones de clivajes que sólo estuvieron presentes en esta zona para esta muestra.

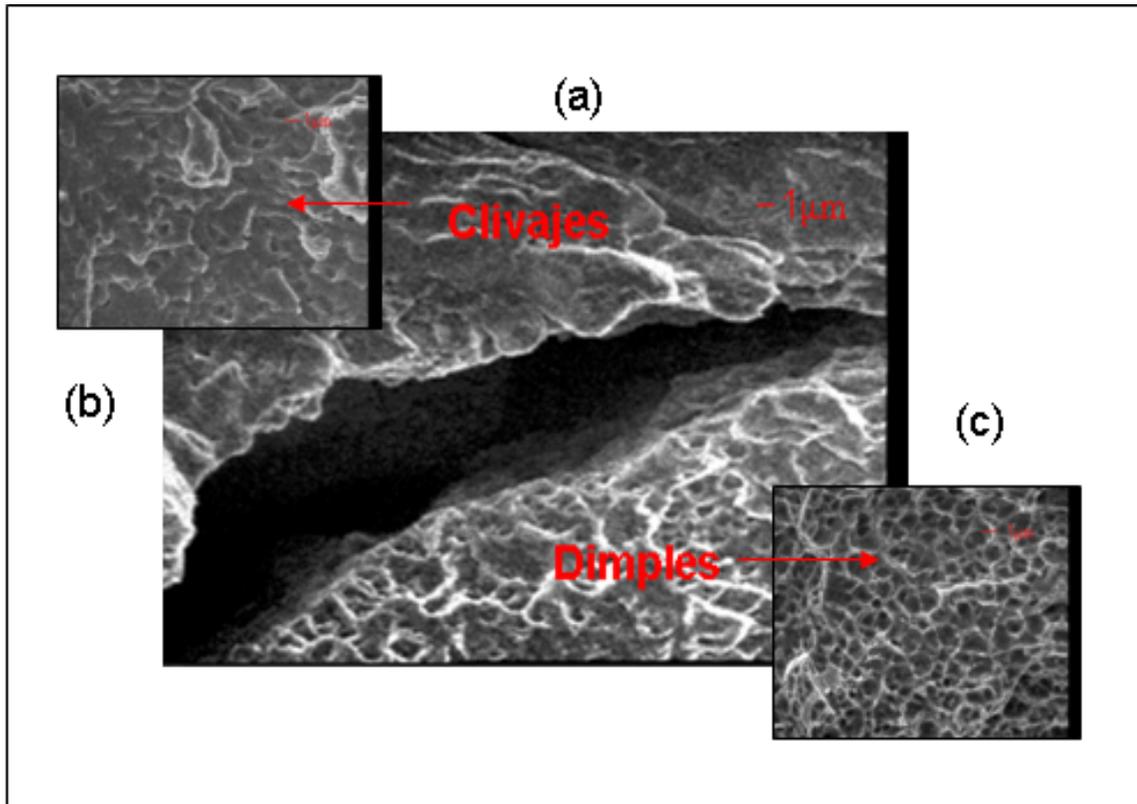


Figura N° 4.23 Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 177°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento para (a) (b) y (c) de 350X, 1000X y 1000X respectivamente.

También se pudo apreciar una grieta en la figura 4.23 (a), esta fisura se encontró formada en el centro de la probeta y fue avanzando hacia la superficie, luego de esto se presume ocurrió la fractura la cual dejó la mitad de la probeta con una apariencia de copa poco profunda y la otra se asemeja a un cono con la parte superior aplanada que da lugar al término de fractura “*copa y cono*”.

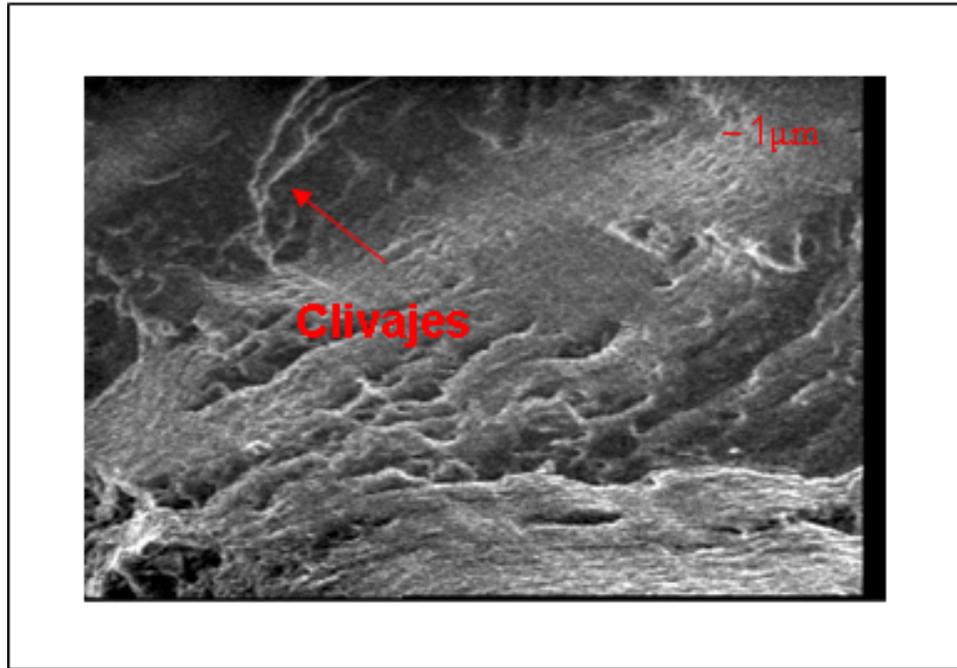


Figura N° 4.24 Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 177°C durante 14 horas sometida a altas cargas con un aumento de 350X

En la figura 4.24 se analizó la superficie de fractura para una muestra envejecida artificialmente a 177°C sometida a un esfuerzo de 252,5 [MPa] el cuál representa el 80% del esfuerzo de fluencia, allí se observa claramente la existencia de clivajes en las zonas brillantes (aproximadamente el 78% de la muestra) que destacaban de la figura 4.24 (b), se puede inferir que la muestra tuvo una fractura de tipo frágil con una rápida propagación de una grieta, con el mínimo de absorción de energía y de deformación plástica.

Se realizó también un estudio a las fotos macroscópicas de las muestras envejecidas a 167°C por 14 horas. En la figura 4.25 (a) se aprecia una muestra a la que se le aplicó baja carga, se pudo observar que predominan las zonas opacas con un 87%, sobre las zonas brillantes con un 13%; a diferencia de la figura 4.25 (b) la cuál representa una muestra con alta carga aplicada, en ésta la zona brillante (representada

por un 76%) predomina sobre las zonas oscuras (representada por un 24%); Para definir si las muestras analizadas representan fracturas frágiles o dúctiles se realizó también una observación directa y así se cuantificaron las zonas opacas y brillantes, luego se analizó cada una de las muestras microscópicamente para comprobar si hay existencia de dimples o clivajes.

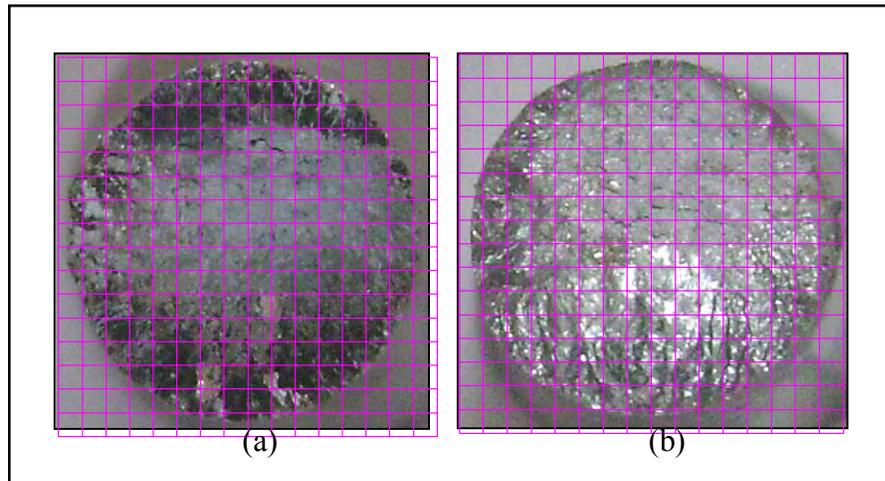


Figura N° 4.25 Vistas macros de fractura de probetas envejecidas artificialmente a 167°C durante 14 horas sometidas: (a) un esfuerzo de baja carga (b) esfuerzo a altas cargas. Escala 1:6

Para poder definir el tipo de fractura que tuvo la muestra observada en la figura 4.25 (a) se realizó un estudio microscópico en la probeta y se observó que en las zonas opacas existen grandes cantidades dimples como se ve en la figura 4.26 los cuales hacen referencia a un tipo de fractura dúctil, estos hoyuelos se encuentran reunidos en el centro de la muestra lo que ocasiona una concentración de esfuerzos para luego así llegar a la fractura.

Al observar las zonas brillantes de la probeta envejecidas artificialmente a 167°C durante 14 horas con un esfuerzo de 254,60 [MPa], 90% del esfuerzo de fluencia, (la muestra (b) de la figura 4.25 se verificó que hay presencia de clivajes en estas zonas brillantes, lo que indica que primero se alcanzó el esfuerzo crítico normal, donde

hubo una rápida propagación de la grieta con poca deformación plástica, por lo que se infiere que la fractura fue de tipo frágil.

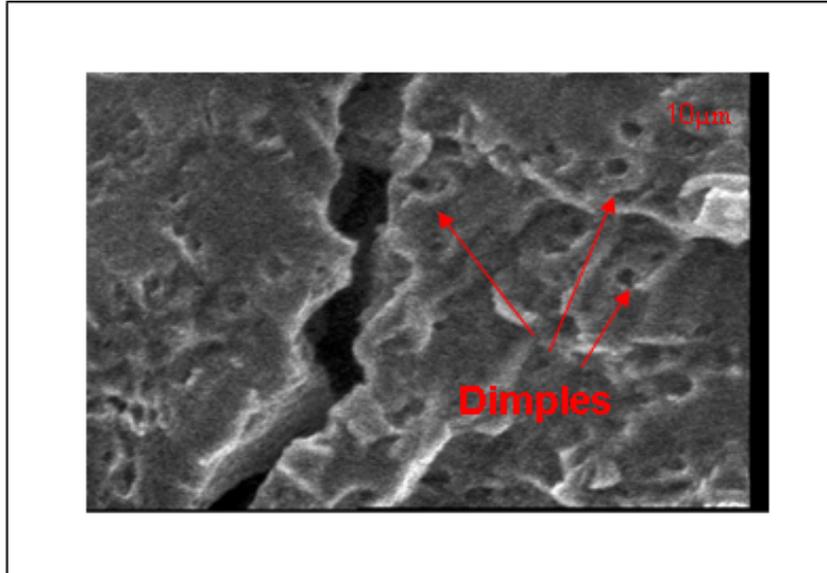


Figura N° 4.26 Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento de 100X

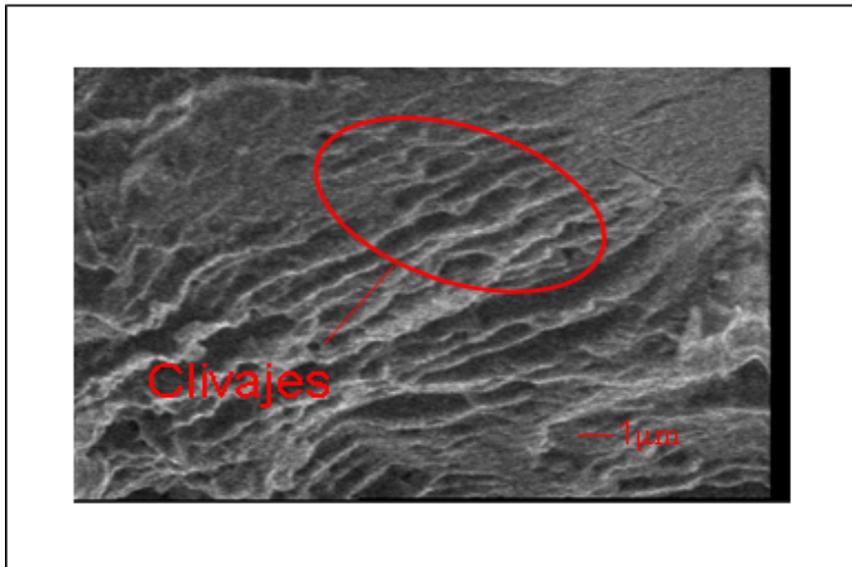


Figura N° 4.27 Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a altas cargas con un aumento de 750X

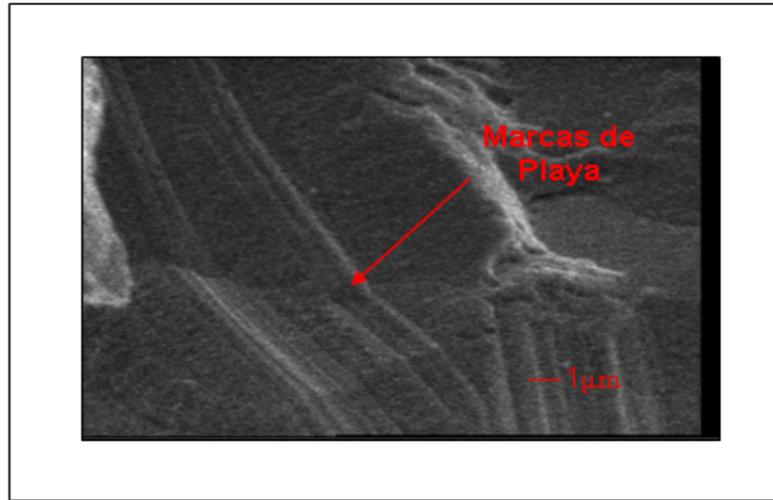


Figura N° 4.28 Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 167°C durante 14 horas sometida a bajas cargas con un aumento de 1000X

En la figura 4.28 se observó la superficie de fractura de una probeta envejecida artificialmente a una temperatura de 167°C y sometida a un esfuerzo de 169,73 Mpa el cual representa el 60% del esfuerzo de fluencia, en esta muestra se pudo ver una superficie de fractura con presencia de marcas de playa o concha de almeja, este tipo de marcas es muy común cuando ocurren fracturas por fatiga cíclica ya que ésta es de manera progresiva desarrollándose por un largo tiempo.

En la figura 4.29 se observó la superficie de fractura de una probeta envejecida artificialmente a una temperatura de 177°C y sometida a un esfuerzo de 252,5 [MPa] (80% del esfuerzo de fluencia), en esta figura se pueden apreciar cavidades o dimples, clivajes y una grieta, observando dos facetas en la figura, la faceta frágil que viene representada por la formación de los clivajes y la faceta dúctil que viene representada por los dimples, también se pudo observar el comienzo y propagación de la grieta. La mayor parte de la muestra estaba representada por los hoyuelos, por lo que se trata de una fractura de tipo dúctil ya que ocurre después que ha sucedido una considerable deformación plástica.

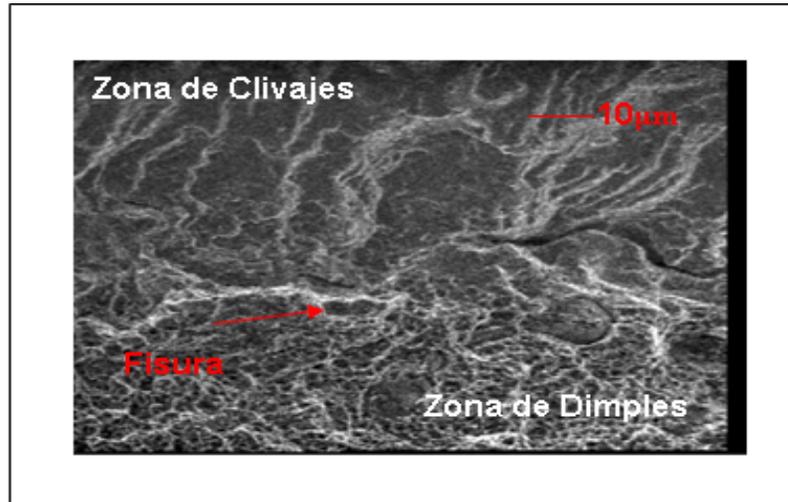


Figura N° 4.29 Superficie de fractura para muestra envejecida artificialmente a 177°C durante 14 horas sometida alta cargas con un aumento de 200X

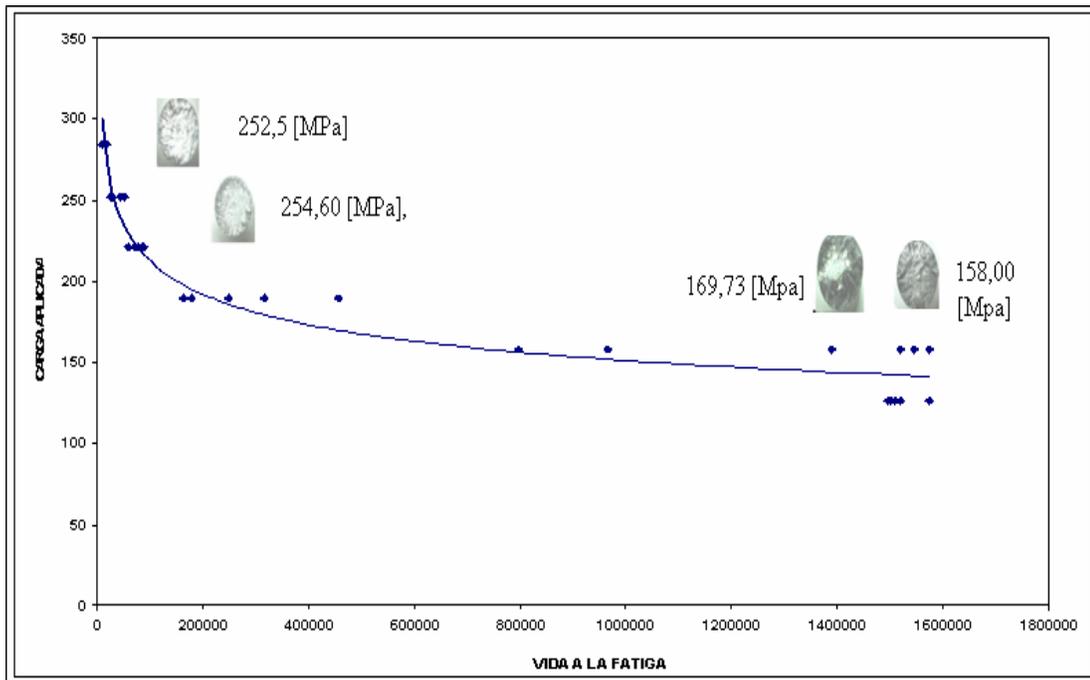


Figura N° 4.30 Relación del mecanismo de fractura con la resistencia a la fatiga

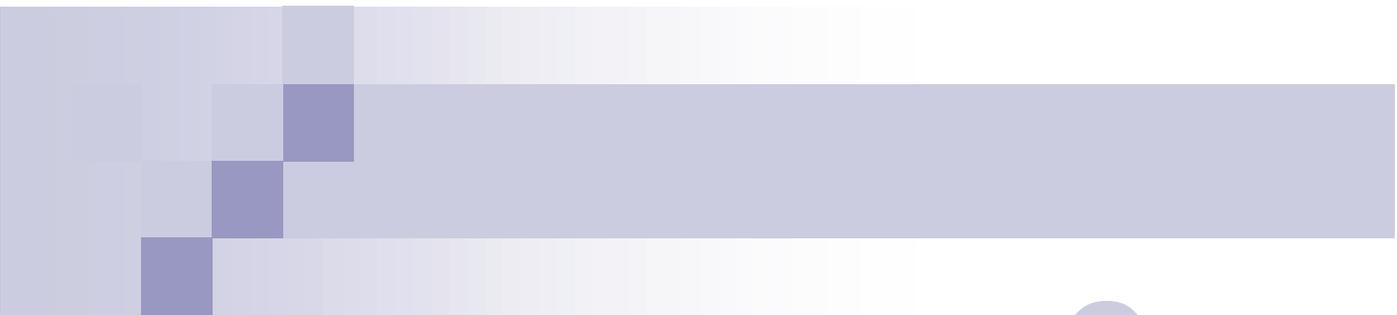
Se pudo analizar finalmente que el tipo de fractura que ocurre en una probeta sometida a fatiga cíclica para las dos condiciones estudiadas (167°C y 177°C) se encontró relacionada con el esfuerzo al cual se les está aplicando, cuando es sometida a esfuerzos más altos ocurren fracturas de tipo frágil y cuando es sometida a esfuerzos más bajos ocurren fracturas de tipo dúctil.

Al hacer la comparación de todas las variables estudiadas para cada una de las cuatro condiciones, se tiene que:

Comparando los resultados obtenidos se puede decir que las muestras a las cuales se les aplicó un T6 a 177°C presentaron una mayor dureza, mayor resistencia a la tracción y una de las más elevadas resistencias a la fatiga, revelando con esto que entre las otras condiciones ésta es la más idónea ya que soporta mayores esfuerzos para la realización de cada ensayo, a diferencia de las muestras a las cuales sólo se les realizó tratamiento de solubilizado, estas disminuyeron su dureza, resistencia a la tracción y resistencia a la fatiga con respecto a la condición original, por tanto es recomendable realizar un tratamiento posterior al del solubilizado.

Tabla N° 4.24. Comparación de las Variables Estudiadas para cada una de las Condiciones

Ensayo	MAYOR	--	--	MENOR
Tracción (Esf.)	177°C	167°C	C.O.	SOLUB
Dureza	177°C	167°C	C.O.	SOLUB
Fatiga (Resistencia)	177°C/C.O.	177°C/C.O.	167°C	SOLUB
Micrografía	La solubilizada presentaba mayor cantidad de facetas oscuras, las otras tres muestras lucían bastante similares.			
Fractografía	Frágil para altas cargas y dúctil para bajas cargas en las muestras 167°C y 177°C.			



C A P Í T U L O V

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

A partir del estudio de la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AA-6061 sometida a envejecimiento artificial a temperaturas de 167°C y 177°C durante 14 horas se pudo concluir que:

- El estudio de metalografía permitió establecer la comparación de las características microestructurales de la aleación para cuatro condiciones diferentes, en la muestra solubilizada se observó que el Siliciuro de Magnesio se encontraba en partículas dispersas a diferencia del resto de las muestras, pues en esa etapa tiene lugar la disolución de elementos y segregaciones; para las otras tres condiciones el Siliciuro de Magnesio se aprecia en partículas de manera más ordenadas.
- Al realizar comparación en la dureza superficial de la aleación de aluminio AA-6061 para las diferentes temperaturas [167 °C y 177 °C], se observó que para un mismo tiempo de envejecimiento y con la diferencia de 10°C no existe una variación significativa en la dureza, puede considerarse despreciable esa variación. A diferencia cuando el material es solubilizado pierde dureza con respecto a la condición original y las otras dos condiciones.
- Al realizar lo comparación en los ensayos de fatiga cíclica para la aleación de aluminio AA-6061 tratada térmicamente con un T6 entre las temperaturas de [167°C y 177°C], se concluyó que la resistencia a la fatiga fue menor para la muestra tratada a 167°C con una diferencia de 7 y 14 % entre ellas. También se

observó que la condición solubilizada presenta menor resistencia a la fatiga con respecto a la condición original y las otras dos condiciones de estudio.

- Al realizar el estudio fractográfico se comprobó que cuando se aplican altos esfuerzos (90 y 80% del esfuerzo de fluencia) al ser observadas las muestras en el MEB la superficie de fractura se presenta de tipo frágil, mientras que para bajos esfuerzos (60 y 50% del esfuerzo de fluencia) la superficie de fractura es de tipo dúctil.
- Al relacionar las variables estudiadas en este trabajo de grado, se comprobó que para las dos condiciones, la muestra tratada térmicamente con un T6 a una temperatura de 177°C es la que ofrece mayor resistencia a la fatiga y en cuanto al resto de las variables, microestructura, fractografía y dureza, los resultados son prácticamente los mismos

RECOMENDACIONES

- Desarrollar trabajos de investigación en los que la aleación AA-6061 solubilizado a 533°C durante 2 horas sea sometida a tratamiento térmico de envejecimiento artificial con tiempos mayores al estudiado.
- Se recomienda realizar análisis fractográficos con un Microscopio de Fuerza Atómica AFM, este equipo permite la medición de los perfiles de altura generados en la superficie de fractura de un material desde los nanómetros hasta varios cientos de micras, parametrizando la fractografía y dando cabida a la ciencia de la geometría fractal.
- Realizar con una frecuencia regulada un mantenimiento preventivo a la máquina de fatiga cíclica ubicada en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros:

- [1] Askeland, D.; La ciencia e ingeniería de materiales. Edit Iberoamérica, 1990.
Mangonon, Pat L, Edit Prentice Hall. 2001.
- [2] Avner, Introducción a la Metalurgia Física. 2da Edición. Mc Graw Hill. 1988.
- [3] Barrand P.y Gadeau R., 1968. Enciclopedia del Aluminio, Vol. 2. URMO
- [4] Cayless R., in Metals Handbook, 1990. Vol. 2, 10th Edition, 15-28
- [5] Cresswell P.and M. Nilmani, 1995, Aluminium Cast House Technology, Theory and Practice, 149-156
- [6] Gruzleski J. and Closset M., 1990. The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys.
- [7] Iriza M. Manual de Prácticas de Laboratorio de Laboratorio de Materiales. Universidad de Carabobo 2004.
- [8] Rooy I., In Metals Handbook, 1990. Vol. 2, 10th Edition, 1-14,
- [9] Shackelford J. y Guemes A- Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros. Prentice Hall. 4ta Edición 1998

Trabajos De Grado:

[10] *Comportamiento a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 envejecida.* Pérez M., Puchi F. M., Eli S., Villalobos. Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (REVELE) Vol 17, No. 2. Año 2002.

[11] *Determinación de la influencia de la temperatura sobre la resistencia a la fatiga de la aleación AA-6061 tratada térmicamente con un T6.* Linares R. Alejandro J. Roa Albaro L. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Noviembre 2007.

[12] *Estudio de la resistencia a la fatiga de la aleación AA 6061 bajo un medio acuoso con NaCl al 3%.* Correa F. y Pineda M. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo 2006.

[13] *Efecto del tratamiento térmico de envejecimiento aplicado a una aleación de aluminio sobre sus propiedades mecánicas.* Durán C. y Hernández N. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo 2007.

[14] *Estudio de la resistencia a la fatiga de la aleación AA-6061 bajo un medio acuoso con NaCl al 3%.* Correa, Francisco. Pineda María. Universidad de Carabobo. Julio 2006.

[15] *Efecto del tratamiento térmico de envejecimiento aplicado a una aleación de aluminio AA-6061 sobre sus propiedades mecánicas.* Durán, Carlos. Hernández, Nelson. Universidad de Carabobo. Febrero 2007

[16] *Fatigue Properties of AA6061 and AA7075 Extruded Rod after Retrogression Heat Treatment and Thermo-Mechanical Treatment*. Neumeyer X., Chen D., Mostovoy S. y Bedyk J. Illinois Institute of Technology (ITT). Año 1999.

[17] *Influencia del tratamiento térmico de envejecimiento sobre el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 6063*. José De Frenza, Leañez M., Sáenz L., Caralli A. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería. 2006

[18] *Influencia del recubrimiento superficial sobre las prestaciones frente al desgaste y la fatiga de una aleación de aluminio AA 7075*. González y Brizuela. INASMET 2005

[19] *Influencia de los tratamientos superficiales en la vida útil a fatiga en la aleación de aluminio AA 2024*. Parra R., Páez M. Academia Politécnica Aeronáutica

[20] *Optimización del tratamiento térmico de envejecimiento en materiales compuestos base aluminio*. Forn A., Baile M. T y Rupérez E. Departamento de ciencia de los materiales e Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Cataluña. Año 2002.

Información en línea:

Manuales del Aluminio

[21] Disponible en <http://www.gef.es/Congresos/22/PDF/51.pdf>

[22] Universidad Politécnica de Valencia.

Disponible en http://www.upv.es/pms2002/comunicaciones/082_FORN.pdf

[23] Universidad Simón Bolívar.

Disponible en [http://www.dsm.usb.ve/materiales/guias/mt-3312%20\(guia\)/mt-3312-3.pdf](http://www.dsm.usb.ve/materiales/guias/mt-3312%20(guia)/mt-3312-3.pdf).

[24] Universidad de Cuyo.

Disponible en

<http://fing.uncu.edu.ar/catedras/industrial/cmateriales/archivos/cmateriales/TPMetalografia.pdf>

[25] Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Disponible en <http://materiales.eia.edu.co/laboratorios/Metalografia/teoria.htm>

[26] Asociación Argentina de los Materiales.

Disponible en <http://www.materiales-sam.org.ar>

[27] Disponible en <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-2.html>